



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

ESTUDIO DE LA GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS ACTIVOS DEL
RÍO COPIAPÓ LUEGO DE LAS INUNDACIONES ALUVIONALES DE
MARZO 2015

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

FERNANDO ANDRÉS GALDAMES CONTRERAS

PROFESOR GUÍA:
DR. GERMÁN AGUILAR MARTORELL

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
DRA. ANA VALDÉS DURAN
DRA. KATJA DECKART

SANTIAGO DE CHILE
2018

Resumen

Los valles del norte de Chile han estado sometido a una fuerte intervención antrópica durante los últimos 200 años, debido, principalmente, a la actividad minera. Esta actividad ha generado el posicionamiento de diferentes pasivos ambientales de origen industrial-minero, como relaves, escoriales y faenas asociadas a procesos metalúrgicos. Los pasivos mineros son fuentes de metales y de otros elementos, que en concentraciones elevadas, pueden ser perjudiciales para la salud de la población y el ecosistema. Los días 24, 25 y 26 de Marzo de 2015 (25M 2015) ocurrió un evento extraordinario de lluvias torrenciales en las regiones de Atacama, Coquimbo y Antofagasta, producidas por una baja segregada desplazada hacia el norte, generando precipitaciones de carácter convectivo. Este evento meteorológico produjo inundaciones aluvionales que afectaron a las Quebradas Taltal, Pan de Azúcar, El Salado, Copiapó, Huasco y Elqui, entre otras. Durante la emergencia, uno de los aspectos preocupantes para autoridades y la población fue la potencial afección de los numerosos pasivos ambientales que se extienden al largo del Río Copiapó. Este trabajo estudia los cambios en el transporte y en la geoquímica de los sedimentos activos del Río Copiapó luego del evento 25M 2015 y discute como estos cambios podrían estar asociados a la susceptibilidad, exposición y vulnerabilidad de los pasivos mineros ante los procesos aluvionales. El estudio relaciona la variación en tiempo y espacio de los procesos de transporte de sedimentos con los cambios en las concentraciones de cobre, plomo, arsénico y mercurio en los sedimentos transportados en suspensión en cinco puntos de la cuenca, algunos con presencia cercana de pasivos mineros. Los resultados muestran el empobrecimiento de las concentraciones de estos elementos en las zonas de fuerte intervención minera después de la activación de los flujos aluvionales del 25M 2015, además se observa la homogenización de los valores a lo largo de la cuenca. Interpretamos que este empobrecimiento y homogenización de las concentraciones fue producto de la renovación del lecho fluvial, la llegada de sedimentos desde zonas distantes a la injerencia de la actividad minera y la reconexión del sistema fluvial en toda su extensión. Los resultados indican que los pasivos ambientales no fueron erosionados mayormente durante las lluvias torrenciales de marzo de 2015 y no se registró un aporte de sedimentos enriquecidos de cobre, plomo, arsénico y mercurio desde ellos. Concluimos que luego del 25M 2015 las concentraciones de cobre, plomo, arsénico y mercurio en los sedimentos promedian mejor las concentraciones naturales de estos elementos en la corteza continental a escala regional, ello en relación a los datos existentes antes del 25M 2015. Uno de los problemas en los estudios ambientales en cuencas intervenidas hace varias décadas, es la ausencia de datos geoquímicos antes de la intervención antrópica e industrial, que permitan confeccionar líneas de bases regionales. Debido a que estos datos representan mejor las concentraciones promedios naturales, en relación a los publicados previamente de la cuenca del Río Copiapó, ellos serán valiosos para componer líneas de bases geoquímicas en futuros estudios de la cuenca.

Agradecimientos

Quiero agradecer en primera instancia a mi familia; mis padres Luis Fernando Galdames Artigas y Elizabeth Contreras Guajardo, que se han esforzado por mí y me han apoyado en todo lo que uno se puede imaginar, a mi hermano Álvaro Galdames Contreras, que siempre me alegró en los momentos difíciles de mi carrera. El principal agradecimiento es para mí polola, Margarita Cecilia Brito Pérez, por el apoyo incondicional, y la energía entregada hacia mi persona durante todo el proceso universitario.

Agradezco también a mis amigos de la universidad, que han sido parte de mi crecimiento en estos años de estudiante, como lo son Esteban Sapunar (Don Sapu), Lorenzo Juacida (ruso), Armando Cid, Kevin Flores, Benjamín Bahamondes, Aldo Aldana, Felipe González, Boris Gonzales, Bárbara Inostroza, Alejandro Allende, Pedro Vergara, Cristóbal Contreras, que me han ayudado en diferentes ámbitos, y muchas personas más que han dejado huella en mí, que me han enseñado sobre la amistad y hacer de mí lo que soy hoy.

Agradezco también al profesor Germán Aguilar quien me dio la oportunidad de realizar mi memoria de título, la cual ha sido la experiencia de mayor aprendizaje de la carrera, satisfactoria y a la vez cansadora. Le agradezco de todo corazón la paciencia y la ayuda entrega en este trabajo. La profesora Ana Valdés se agradece el tiempo, y dedicación en ayudar a entender los conceptos geoquímicos necesarios para realizar el estudio. La profesora Katja Deckart por la motivación a ser parte de esta comisión y a la ayuda brindada en instancias claves del trabajo.

Se agradece a las instituciones que financiaron este estudio. El estudio se ha desarrollado en el marco de las actividades del Centro Avanzado de Tecnología para la Minería (AMTC en si sigla en inglés) de la Facultad de Ciencias físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Análisis sedimentológicos y geoquímicos, así como el trabajo en campaña de trabajo y desarrollo en gabinete, fueron financiado por fondos basales otorgados al AMTC por la Comisión Nacional de Ciencias y Tecnologías (CONICYT), para el proyecto “Mejoras Cruciales en Estudios de Peligros Geológicos para la Minería, Liderado por el Dr. Aguilar.

Tabla de Contenido

1	Introducción	1
1.1	Problema Propuesto	1
1.2	Objetivos del Estudio.....	4
1.2.1	Hipótesis de Trabajo.....	4
1.2.2	Objetivo Principal	4
1.2.3	Objetivos específicos.....	4
1.3	Ubicación y descripción del área de estudio.....	5
1.4	Metodología de Trabajo.....	6
1.4.1	Muestreo en terreno.....	6
1.4.2	Análisis de Laboratorio.....	7
1.4.3	Análisis de datos.....	9
2	Marco Geológico, hidrológico y meteorológico.....	13
2.1	Marco Geológico Regional	13
2.1.1	Cordillera de la Costa	14
2.1.2	Cordillera Frontal.....	15
2.1.3	Geología del cuaternario.....	16
2.3	Marco Hidrometeorológico.....	16
2.3.1	Clima.....	16
2.3.2	Hidrología	17
3	Resultados	19
3.1	Caracterización granulométrica de los sedimentos del Río Copiapó	19
3.1.1	Caracterización granulométrica pre-aluviones	20
3.1.2	Caracterización granulométrica post-aluvión	23
3.2	Caracterización geoquímica de los sedimentos del Rio Copiapó.....	32
3.2.1	Elementos mayores y trazas	32
3.2.2	Metales pesados (Cu, Pb, Hg) y arsénico (As)	35
3.2.3	Factor de enriquecimiento para cobre, plomo, arsénico y mercurio	41
4	Discusiones.....	43
4.1	Cambios en las condiciones de transporte y sedimentación del Rio Copiapó durante las inundaciones aluvionales de marzo de 2015	43

4.2 Cambios en la geoquímica de los sedimentos del río Copiapó durante las inundaciones aluvionales de marzo de 2015.....	44
4.2.1 Escenario Prealuvión vs Postaluvión, análisis de concentraciones para cobre, plomo, arsénico y mercurio.....	46
4.3 Rol de los eventos extraordinarios de transferencia de materia en los cambios de la geoquímica de sedimentos activos	48
5 Conclusiones.....	51
6 Bibliografía	53
7 Anexos	62
7.1 Anexo I: Método de las Momentos.....	62
7.1.1 Primer Momento o Promedio	62
7.1.2 Mediana	62
7.1.3 Desviación estándar	62
7.1.3 Asimetría (Skewness)	63
7.1.4 Kurtosis.....	65
7.2 Anexo II: Geoquímica de Muestras postaluvionales	66
7.2.1 Clasificación de Goldshmidt	70
7.3 Anexo III: Condiciones meteorológicas durante las fechas de muestreo	70
7.4 Anexo IV: Granulometría de Muestras.....	71

ochenta y cuatro no activos, y siete abandonados (SNGM, 2016; Hernández et al., 2017) (Figura 1.1).

Por otra parte, la agricultura y el desarrollo urbano en el norte de Chile está asociada a los sistemas fluviales, y su desarrollo no es viable sin el recurso hídrico. Todo lo anterior ha levantado un conflicto, no solo por la disponibilidad y uso de las aguas, sino por la calidad de ellas luego de ser utilizada por las diferentes actividades industriales. Los pasivos ambientales mineros son fuentes de metales pesados y de otros elementos que, en concentraciones elevadas, pueden ser perjudiciales para la salud de la población y el ecosistema (Yurisch, 2016). Estos elementos, que en condiciones naturales se encuentran en profundidad y amalgamados, derivan de rocas con una fuerte componente de alteración y mineralización hidrotermal. La minería exhuma, tritura y acumula en superficie este material, acelerando su inserción en los suelos y en los sedimentos activos de los ríos, dinámica que por procesos geológicos sería gradual e implicaría cientos de miles de años, e incluso varios millones de años en el ambiente árido del Desierto de Atacama. Los sedimentos activos son partículas de suelo, rocas, minerales y materiales terrestres arrastrados por aguas de escorrentía durante procesos erosivos, que se acumulan en cuencas de sedimentación o en los cauces de los cuerpos de agua, cuando la energía de la corriente disminuye (Glosario Minero, 2003).

El Sernageomin, a través del Departamento de Depósitos de Relaves de la Subdirección Nacional de Minería publicó el 26 de octubre de 2017 una investigación, “Geoquímica de Superficie de Depósitos de Relaves de Chile”, donde la información se obtiene de muestras de superficie de cubetas, muros y sedimentos debajo de los depósitos.

El estudio consiste en identificar espacialmente 56 elementos químicos en áreas no explotadas en el norte de nuestro país. Se incluyeron ocho metales pesados perjudiciales para la salud, como el plomo, mercurio, cinc, cadmio, cobre, arsénico níquel y cromo. Además de estar enfocado en el área minera, económica de los depósitos, también genera una línea de base ambiental, para caracterizar al territorio antes y después de impactos provocados por actividades humanas o por eventos naturales que puedan desencadenar cambios en la geoquímica del territorio chileno. Esto se puede constatar en el valle del Río Salado y en del Río Copiapó, dos de los valles más intervenidos en términos de pasivos ambientales del norte de Chile.

Desde Tierra Amarilla hasta el límite oeste del área urbana de Copiapó, existen un conjunto de plantas mineras, algunas activas y otras abandonadas, que contienen concentraciones de metales pesados sobre la normativa nacional (Hernández et al., 2017. Ver figura 1.1). La geoquímica de los materiales acumulados indica concentraciones importantes de metales tales como Hg, As, Cu, Pb, Be, Zn, Mo, y Ag. Según el Centro Nacional de Medio Ambiente, en su informe sobre la presencia de contaminación en las comunas de Copiapó y Tierra Amarilla (Soubllette et al., 2011), indicaron que estas concentraciones sobre la norma representan riesgos potenciales para la salud de las personas en los asentamientos humanos aledaños a sectores mineros activos y abandonados del Valle del Río Copiapó, e indican un fuerte control de los relaves y escoriales de la actividad minera. En la memoria de Rojos (2016), se estudió la dinámica mensual de transferencia de plomo, cobre, arsénico y mercurio en la fracción más fina de los sedimentos transportados por Río Copiapó durante doce meses, entre mayo 2011 y abril 2012. Rojos (2016) indica que las variaciones en las concentraciones están fuertemente influenciadas por los cambios en la transferencia de sedimentos activos, ligados a factores meteorológicos e hidrológicos propios de la región.

Los sistemas fluviales son poco vigorosos en el norte de Chile, ello en términos de su capacidad de transporte y producción de sedimentos. La aridez del desierto implica que los procesos geomorfológicos sean lentos y con ello los pasivos ambientales de origen minero presentarían, en general, una baja tasa de inserción como sedimentos activos de los sistemas

fluviales y baja dispersión en los suelos de las cuencas, y si ello ocurriera los materiales insertos tendrían un extenso tiempo de residencia en los sistemas fluviales. Esta relativa quiescencia se ve alterada durante eventos extraordinarios de transferencia de sedimentos asociados a inundaciones aluvionales ligadas a lluvias esporádicas y torrenciales. Del punto de vista geomorfológico trabajos como Haug et al. (2010), sugieren que los eventos de precipitación breves e intensos (1-3 hrs, 4mm/hr) son capaces de producir flujos superficiales, en zonas áridas e hiperáridas (Desierto de Atacama), que transportan una gran cantidad de sedimentos, lo que con lleva a cambios en la superficie, producto de la movilización y depositación de estos. Gran parte de estos eventos de precipitaciones extraordinarias se correlacionan con anomalías climáticas, como por ejemplo episodios de El Niño (Aceituno et al., 2009; Schulz et al., 2012; Sepúlveda et al.; 2006; Vargas et al., 2006).

Entre el 23 y 26 de marzo de 2015 (en adelante 25M 2015), un episodio de lluvias intensas y esporádicas generó inundaciones aluvionales en las cuencas del extremo sur de Desierto de Atacama. Fueron afectadas tres regiones de Chile: Antofagasta, Atacama y Coquimbo, siendo la Región de Atacama la más golpeada por este evento. Entre los principales valles afectados están de norte a sur el de la Quebrada de Taltal, el de la Quebrada Pan de Azúcar, el del Río Salado, el del Río Copiapó, el del Río Huasco y el del Río Elqui. Desde el punto de vista meteorológico las lluvias se asociaron a un sistema de baja presión atmosférica, atrapado frente a las costas del océano Pacífico, 25 °S aproximadamente. Dicho sistema denominado “*cutoff-low*” es un sistema cerrado de baja presión que fue desplazado (*cutoff*) del flujo de vientos del oeste y se movió de manera independiente hacia las costas de la región de Atacama. La baja de presión estuvo asociada a una anomalía cálida de temperatura superficial del mar en las costas de Perú y Ecuador, y a un aumento de los flujos de viento desde el sur de Perú hacia Atacama, acarreado consigo un considerable contenido de agua precipitable (Barret *et al.*, 2016). Dicho fenómeno coincidió con un calentamiento extremo de las temperaturas superficiales que se registró en el centro, sur y zona austral de Chile, incluso también alcanzando la Antártica Chilena (Barret *et al.*, 2016). Esta tormenta presentó quizás la mayor extensión espacial de todas las tormentas ocurridas en el norte de Chile desde 1980, exhibiendo valores extremos de contenido total de vapor de agua y de estabilidad entre los niveles 900 y 500 hPa (DGF, 2015).

Los efectos de las inundaciones aluvionales del 25M 2015 ha sido extensamente estudiado desde el punto de vista cualitativo, en la infraestructura y en el paisaje de la cuenca del Río El Salado (Wilcox et al., 2016; Contreras et al., 2015; Grijalba, 2016). Escasos estudios se han publicado para el evento en la zona de estudio del presente trabajo, en la cuenca del Río Copiapó. En la ciudad de Copiapó y el sector de Tierra Amarilla se registraron importantes daños en viviendas, donde las alturas de inundación llegaron incluso a superar los 2 m (Ferrando *et al.*, 2015; Izquierdo *et al.*, 2016). En el valle del Río Huasco se reconocieron abundantes flujos de detritos y algunos que causaron daños en viviendas, infraestructura vial y provocaron represamiento del cauce de río (Alfaro et al., 2015). En este valle, mediciones semi-cuantitativas indican que el volumen de los depósitos varía entre 760 e 200.000 m³ y se estimó que se denudaron 1.2 ± 0.2 km³ de material durante este evento (Aguilar et al., 2015)

Durante la emergencia derivada de las inundaciones aluvionales, uno de los aspectos preocupantes para autoridades y la población fue la potencial afección de los numerosos pasivos mineros que se extienden a lo largo del Río Copiapó y Río El Salado. Algunos de estos pasivos mineros son muy antiguos, se encuentran muy cercano a los causes y no cuentan con las condiciones de prevención y mitigación adecuadas para un evento extremo como el 25M 2015. La erosión de los relaves mineros por estos eventos podría haber generado contaminación a lo largo del valle, e incluso en el ambiente marino adyacente como ha sido reportado en la costa de la Bahía de Chañaral (Gijalba, 2016), destacando a largo plazo, la influencia de la gestión de los

sedimentos contaminados por la minería. En respuesta, este trabajo estudia los cambios en la geoquímica de los sedimentos activos del río Copiapó luego del evento 25M 2015 y discute como estos cambios podrían estar asociados a la susceptibilidad, exposición y vulnerabilidad de los pasivos mineros que se distribuyen en la cuenca.

Este estudio relaciona la variación de las concentraciones de elementos en distintos puntos de la cuenca con los cambios registrados en el transporte de sedimentos ante la activación de los aluviones. El objetivo es conocer los cambios en la geoquímica de los sedimentos activos en un evento hidrometeorológico extremo evaluando la influencia de los pasivos mineros en estos cambios. El estudio combina la caracterización sedimentológica de uno de los peligros geológicos de mayor afección en los valles del norte de Chile, y lo que implican para la presencia de los pasivos mineros en las zonas afectadas, uno de los elementos de mayor preocupación desde el punto de vista ambiental en los valles del Norte de Chile.

1.2 Objetivos del Estudio

1.2.1 Hipótesis de Trabajo

Con la ocurrencia de inundaciones aluvionales se desarrolla un cambio en las concentraciones de metales en los sedimentos activos de los sistemas fluviales áridos del Desierto de Atacama, generando variación de las concentraciones en distintas posiciones. Un análisis granulométrico y geoquímico de los sedimentos permitirá trazar estos cambios y su relación en el tiempo y espacio, y con ello conocer como varían con los procesos de transporte y deposición ligados a las inundaciones aluvionales. Este estudio podría generar políticas ambientales para el manejo de los pasivos mineros existentes en las cuencas y para la localización futura de pasivos mineros en la región.

1.2.2 Objetivo Principal

Determinar los cambios geoquímicos de los sedimentos activos por la ocurrencia de inundaciones aluvionales en cuencas áridas del Desierto de Atacama.

1.2.3 Objetivos específicos

-Determinar cómo varía la dinámica de transferencia de los sedimentos activos del Río Copiapó luego del evento 25M 2015.

-Determinar cómo varía la geoquímica en los sedimentos activos del Río Copiapó luego del evento 25M 2015.

-Contrastar la dinámica de transferencia de sedimentos con las variaciones geoquímica en la cuenca del Río Copiapó luego del evento 25M 2015.

1.3 Ubicación y descripción del área de estudio

La cuenca del Río Copiapó se ubica en la Región de Atacama (Figura 1.1), comprendida entre un borde oriental, correspondiente a la divisoria de agua a escala continental dada por las altas cumbres de la Cordillera de los Andes, y por el oeste con el océano pacífico, en donde desemboca el río. A lo largo de sus cauces principales se emplazan ciudades cuya actividad económica se asocia a la minería y agricultura. Entre las ciudades más importantes se encuentra Copiapó (Figura 1.1). La ciudad de Copiapó es la capital regional, y capital de la provincia del mismo nombre que cuenta con una superficie de 16.881 km² y una población aproximada 171.786 habitantes (2015). Se ubica a 800 kilómetros hacia el norte de Santiago (por ruta 5 Norte) y junto con Caldera y Tierra Amarilla forman la provincia de Copiapó. La cuenca del Río Copiapó comienza en la confluencia de los ríos Jorquera y Pulido al sureste de la cuenca (Figura 1.1). El Río Copiapó se nutre de un tercer afluente, el río Manflas el cual desemboca en la cuenca 2,5 km río abajo. Antes de la ciudad de Copiapó, una extensa cuenca hidrográfica de características efímeras confluye en el río, se trata de la Quebrada de Paipote, que en dirección noreste limita hacia el Este con las cuencas intramontañas que constituyen los salares de las depresiones preandinas. El Río Copiapó posee un sentido noroeste cruzando las comunas de Tierra Amarilla y Copiapó (Figura 1.1) hasta su desembocadura en el mar (alrededor de los 27°17' de latitud Sur), con un largo de 162 km. La superficie de la cuenca del Río Copiapó (incluyendo toda la red hidrográfica) alcanza aproximadamente los 18.712 km². La cuenca presenta un relieve muy irregular y accidentado, predominando la alternancia de los valles en sentido transversal con interfluvios montañosos denominados serranías. Cabe destacar la presencia de un antiguo Tranque, hoy colmatado de sedimentos y prácticamente inoperativo, denominado Tranque Lautaro.

Las comunas de Copiapó y Tierra Amarilla, ubicadas ambas en la Provincia de Copiapó, Región de Atacama, han sido territorio de explotación minera de cobre, oro y plata desde el siglo XIX hasta el presente. Las actividades más importantes dentro del PIB Regional son, en orden de importancia, la minería (45%), la actividad silvoagropecuaria (11%) y el comercio (11%). Con una menor participación, se encuentran los sectores de pesca (4%), electricidad, gas y agua (2%) y la industria manufacturera (3%).

En la actualidad la principal actividad económica de la cuenca está dada por la actividad Minera de cobre y oro. Esta se concentra principalmente en la comuna de Copiapó, donde se han identificado 54 faenas mineras activas, mientras que en la comuna de Tierra Amarilla existe un total de 32 (CADE-IDEPE, 2004) (Figura 1.1). Sólo esta actividad productiva genera al año más de 5.000 empleos. Las principales empresas mineras de la región cercanas al Río Copiapó, o a sus afluentes, son: Caserones (cobre), Carola (cobre), Candelaria (cobre), Pucobre (cobre), Atacama Kozan (cobre), Ojos del Salado (cobre), Cerro Imán (hierro).

Según los registros de estaciones pluviométricas de la región se registraron un promedio de 45 mm en la Cuenca del Río Copiapó durante el evento 25M 2015. De acuerdo con Bozkurt *et al.*, (2016), en la región del Desierto de Atacama las intensidades de lluvia fueron más de 10 mm/hrs, provocando un importante aumento en el caudal del Río Copiapó, el cual fue parcialmente contenido por el Tranque Lautaro, disminuyendo así el impacto en la comuna de Tierra Amarilla. Sin embargo, aguas abajo, la Quebrada Paipote que confluye al Río Copiapó y que bajo condiciones normales se encuentra usualmente seco, registró un aumento significativo de su caudal directo (más de 1.500 m³/s), arrastrando un gran volumen de arena, arcilla y limo (Izquierdo *et al.*, 2016). Otros elementos antrópicos como por ejemplo escombros de viviendas, vehículos, y bienes muebles, también fueron arrastrados durante la crecida. Los flujos provenientes de la quebrada encontraron a su paso dos calles principales, paralelas al río, a través

de la ciudad, con una velocidad de avance entre 2,5-5,5 m/s, inundando un área total de 12,2 km², correspondiente al 72% del área urbana de Copiapó (Izquierdo *et al.*, 2016). Según la Oficina Nacional de Emergencias (ONEMI), el paso de dicho evento hidrometeorológico dejó 31 fallecidos, 86 desaparecidos y casi 30.000 damnificados con más de 5.000 casas dañadas (Naranjo y Olea-Encina, 2015).

1.4 Metodología de Trabajo

1.4.1 Muestreo en terreno

El presente estudio contempla la recolección de muestras de sedimentos activos después de ocurridos los aluviones en cinco puntos de muestreo en el Río Copiapó (Figura 1.1). Para todas las campañas de recolección de muestras, se consideraron los puntos de muestreo de sedimentos activos del trabajo de Rojas (2016).

Aguas arriba del Tranque Lautaro está el punto de muestreo que está más lejano aguas arriba (Figura 1.1), localizado por la ruta C-35, aproximadamente a unos 88 Km desde Copiapó hacia el Sureste, tomando el desvío en la ruta C-393 unos 200 metros para llegar al lecho del río. Este sector presenta una escorrentía superficial constante y aumenta con los deshielos de verano y por las lluvias de invierno. Durante los deshielos se puede apreciar que el agua contiene una mayor cantidad de sedimentos proveniente de la cordillera. La acumulación de sedimentos, principalmente depósitos fluviales y aluviales provenientes de quebradas menores, forman barras durante los períodos de descarga alta que van desviando al río. Aguas arriba de este punto de muestreo la minería y agricultura son menos frecuentes. Aguas abajo, el Tranque Lautaro es un lugar donde se deposita una enorme cantidad de sedimentos en bajo régimen de flujo.

El segundo punto de muestreo (Figura 1.1), Elisa de Bordos, se ubica en la misma ruta C-35 a unos 45 km desde Copiapó hacia el Sureste. Se aprecia una considerable actividad agrícola, dedicada a la plantación de uva, así como existe una considerable cercanía a zonas mineras y acopios de desechos mineros. En este sector también se puede observar escorrentía superficial durante todo el año. También se producen los mismos cambios que en el punto anterior: en verano los deshielos y lluvias invernales producen un aumento del caudal y de la cantidad de sedimento transportada por el río.

Cerrillos (tercer punto, Figura 1.1), se sitúa a unos 26 km de Copiapó hacia el Sureste. En este punto se puede apreciar una gran área agrícola cercana a faenas mineras, depósitos aluviales asociados al evento catastrófico ocurrido entre el 24 y 26 de marzo del 2015, que provinieron de la Quebrada Carrizalillo, y depósitos eólicos. El escenario prealuvión presentaba una leve escorrentía superficial en periodos invernales, y el transporte de sedimentos era causado principalmente sólo por los vientos. Posteriormente al evento aluvional el río presenta escorrentía superficial durante todo el año.

El punto de muestreo Paipote se ubica a 10 km de Copiapó hacia el Sureste (Figura 1.1), y está ubicado en pleno sector urbano. Este punto está en un lugar ya integrado plenamente en zona urbana, pero aún en presencia de zona rural y zona de faenas mineras. El carácter del río es similar al punto anterior, sin escorrentía superficial en fechas prealuvional, mientras que en la actualidad es una escorrentía constante durante todo el año. Los depósitos aluviales presentes en el sector, se atribuyen a flujos de detritos provenientes de la quebrada Paipote.

Por último, en María Isabel a 45 km al Oeste de Copiapó, por la ruta C-358 (Figura 1.1) se ubica el quinto punto de muestreo. En este lugar aflora el Río Copiapó para luego desembocar en el Océano Pacífico. Este punto de muestreo está situado en una zona netamente agrícola. El caudal y la geografía del valle favorecen el estancamiento de las aguas, la acumulación de sedimentos y su rápida depositación. También existe gran cantidad de material orgánico,

procedente de la flora y fauna, la cual es más abundante que en el resto de los puntos de muestreo. Esto puede jugar un rol favorable en las altas concentraciones de algunos elementos químicos (Marín et al., 2016). Tres campañas de muestreo fueron realizadas el año 2015 (30 de marzo, 14 abril y 18 de mayo), posteriores al evento 25M 2015, mientras que entre el 1 y 4 de junio de 2017 se realizó una visita a terreno donde se tomaron muestras en los mismos puntos. Se recolectaron 18 muestras desde el lecho del río con escorrentía superficial, teniendo una porción lo más representativa posible de la situación actual. Cada muestra pesa aproximadamente tres kilogramos, los utensilios usados fueron instrumentos de plástico para evitar contaminación de metales durante el muestreo, que incluyeron palas, baldes y un colador (4 mm) para una selección preliminar de las fracciones más finas (Figura 1.2). Las muestras fueron dispuestas en bolsas plásticas cerradas lo más herméticamente posible.

Para el escenario prealuvional, se utilizaron los datos recopilados por Rojos (2016), los cuales corresponden a granulometría, y geoquímica de sedimentos activos ubicados en los mismos puntos de muestreo descritos anteriormente. Entre mayo 2011 y abril 2012, se tomaron muestras mensualmente para su posterior análisis geoquímico, con respecto a las concentraciones de cobre, plomo, arsénico y mercurio. Para la granulometría, los datos están por estaciones del año, de las cuales se escogieron dos fechas, para ser comparadas con las muestras post evento.



Figura 1.2: Imagen de la izquierda corresponde a una fotografía de terreno capturada en el punto de muestreo Lautaro y la imagen de la derecha a una fotografía tomada en el punto Paipote.

1.4.2 Análisis de Laboratorio

1.4.2.1 Análisis granulométrico

El propósito de hacer un análisis granulométrico en los sedimentos activos del Río Copiapó caracterizando las condiciones estáticas, dinámicas y espaciales de la formación, transporte y depositación de los sedimentos. Se enfoca en la medición y graduación de los granos de una formación sedimentaria o de los materiales sedimentarios. El análisis sirve para conocer el origen, propiedades mecánicas y la abundancia de cada una de las poblaciones de los tamaños previstos por una escala granulométrica.

Las muestras recolectadas fueron secadas en un horno del Departamento de Ingeniería en Minas de la Universidad de Chile, durante un período de 3 a 5 días, a temperaturas 35-40 °C para evitar los cambios mineralógicos de baja temperatura, por ejemplo, en las arcillas. Posteriormente al secado, las muestras fueron tamizadas en mallas de acero inoxidable en el Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Se utilizó un agitador mecánico de tamices (Ro Tap), el cual

realiza dos movimientos, uno es agitar los tamices (movimientos rotatorios) y el otro es golpear una tapa de acero, puesta sobre la malla superior (#10). Este proceso se realizó para cada muestra por un tiempo aproximado de 20 minutos. Luego se agruparon las muestras por puntos de muestreo y por granulometría, se guardaron en bolsas plásticas y se pesaron, con la finalidad de concretar un análisis granulométrico. En la Tabla 1.1 están las mallas utilizadas y su respectiva equivalencia en milímetros.

Tabla 1.1: Cuadro comparativo de la escala milimétrica y la escala granulométrica en escala de valores phi equivalentes. Color verde indica límite entre gran grueso y fino (Wentworth, 1922)

Milímetros (mm)	Micrómetros (μm)	Phi (Φ)	Clase de Tamaño
2,000	2000	-1,00	arena muy gruesa
1,400	1400	-0,49	
1,000	1000	0,00	arena gruesa
0,500	500	1,00	arena media
0,355	355	1,49	
0,250	250	2,00	arena fina
0,180	180	2,47	
0,150	150	2,74	
0,125	125	3,00	arena muy fina
0,106	106	3,24	
0,090	90	3,47	
0,075	75	3,74	
<0,075	<75	4,30	limo gruesa

Ya teniendo las muestras tamizadas y separadas en bolsas plásticas por tamaño de grano, se utilizó la escala PHI (escala granulométrica) con el propósito de simplificar análisis estadísticos y estandarizar la terminología sedimentológica. Se decidió ocupar la escala PHI, porque de esta manera no se tendría problemas con el manejo de números irracionales. Se basa en los diámetros límites en la escala Udden-Wentworth (regular, geométrica no cíclica y no decimal), se expresan como potencias de 2 (Tabla 1.1), empleando el logaritmo en base 2 del diámetro como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\Phi = -\log_2 \text{diámetro (mm)}$$

Ecuación 1: Formula de escala de Udden-Wentworth

Ya definida la escala y los datos de las muestras, se procede a generar curvas granulométricas que permiten una mejor visualización de los datos obtenidos, y así poder interpretar a priori las características de la muestra analizada. En los gráficos de este estilo se trabajó con la escala PHI (abscisas) y el peso acumulado retenido (ordenada) para cada una de las muestras, agrupadas por puntos de muestreo.

1.4.2.2 Análisis geoquímico

Se separaron 180 gramos de las fracciones más finas (<0.075mm) de los sedimentos muestreados para análisis químico. Las muestras preparadas se enviaron al laboratorio Bureau Veritas Commodities Canada Ltd. en el que, mediante espectrometría de emisión (ICP-ES) y de masa (ICP-MS), determina la abundancia total de 11 óxidos mayores y menores, 31 elementos trazas incluyendo 12 metales, los cuales se especifican en la Tabla 1.2. Los valores para cada elemento están expresados en partes por millón (ppm) y para el oro en partes por billón (ppb).

Para los análisis por ICP-ES, se tomaron muestras de 0,2 gramos las cuales fueron descompuestas mediante una digestión por ácido nítrico y fusión con metaborato-tetraborato de litio (Acme Labs, 2009). Para el caso de los análisis por ICP-MS, se prepararon dos tipos de muestras: 1.-Para análisis de tierras raras y algunos elementos traza: misma preparación que para el ICP-ES; y 2.-Para análisis de metales preciosos y metales base: se tomaron muestras de 0,5 gramos, las cuales fueron digeridas en Agua Regia (Acme Labs, 2009).

Tabla 1.2: Elementos medidos.

Elementos Mayores	<i>SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O, MnO, TiO₂, P₂O₅ y Cr₂O₃</i>
Elementos traza	<i>Sc, Ba, Co, Cs, Ga, Hf, Nb, Rb, Sn, Sr, Ta, Th, U, V, W, Zr, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Mo, Cu, Pb, Zn, Ni, As, Cd, Sb, Bi, Ag, Au, y Hg</i>

1.4.3 Análisis de datos

1.4.3.1 Transporte de sedimentos y parámetros estadísticos

Para lograr determinar las poblaciones en las curvas granulométricas, se revisó el trabajo de Visher (1969), en el cual se detallan los tipos de transporte dentro de distintos flujos o corrientes a partir de datos granulométricos. El reconocimiento de poblaciones y/o subpoblaciones está asociado a mecanismos de transporte, los cuales se reconocen al analizar las distribuciones de tamaño de grano de las curvas granulométricas de un determinado flujo. Las distribuciones están relacionadas a un modo de transporte y depositación, proporcionando así un grado de importancia a la génesis de una unidad de arena. Los tres mecanismos de transporte son: (1) suspensión; (2) saltación; y (3) tracción, cada uno de estos se desarrolla como una subpoblación dentro de una distribución de tamaño de grano. La clasificación, tamaño, cantidad y mezcla de estas poblaciones varían en relación con la procedencia, y la dinámica de los sedimentos (Figura 1.3).

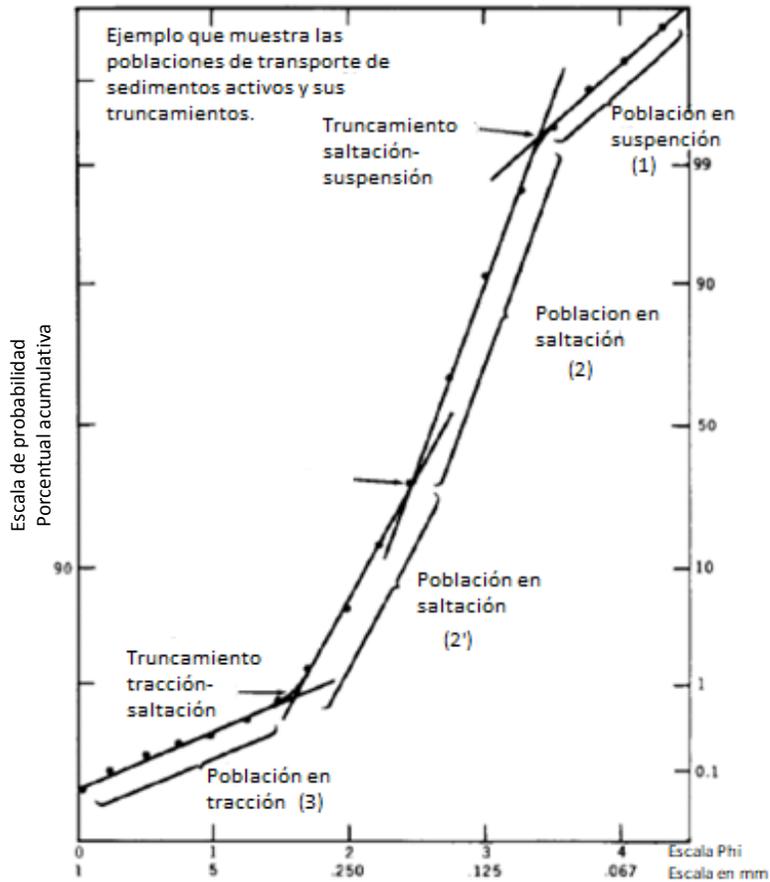


Figura 1.3: Relación de la dinámica del transporte de sedimentos con las poblaciones y puntos de truncamiento, en una distribución de tamaño de grano. Modificado de Visher (1969).

A partir de los gráficos se calcularon parámetros: Media gráfica ($X\phi$), Mediana ($Md\phi$), Desviación estándar (selección), Oblicuidad gráfica completa o Asimetría (Ski) y Curtosis (Kg) mediante el "Método de los momentos" (Anexo I). Se basa en formulas estadísticas que proporciona información acerca de los sedimentos transportados para determinar a partir de sus resultados, las características del caudal sedimentario (Anexo I; Folk, 1974 y Boggs 2009). Posteriormente, se construyeron gráficos de barra de los parámetros estadísticos granulométricos calculados para cada fecha de muestreo, con el propósito de comparar la variación de estos a lo largo del cauce del río.

Los datos fueron graficados junto con las curvas y parámetros estadísticos obtenidos desde los datos de Rojas (2016) para los mismos puntos de muestreo, pero, en una condición anterior a las inundaciones aluvionales del 25M 2015(2011-2012). De igual forma se presentan los datos postaluvionales del 2015 y 2017.

1.4.3.2 Análisis de concentraciones elementales por estación de muestreo

Las concentraciones obtenidas de las muestras postaluvionales se exponen en gráficos 2D para cada estación y fechas de muestreo. Se identificó que elementos presentaban valores anómalos en relación a la composición geoquímica de formaciones geológicas (Oyarzún et al., 2016) y con la composición de la corteza continental (Rudnick et al., 2003). El objetivo es identificar si hubo variación geoquímica espacial y temporal de los sedimentos activos entre los

años 2015 y 2017. Además, se calcula el factor de enriquecimiento de las dieciocho muestras con respecto a la Corteza Continental y con respecto a la unidad geológica predominante en la cuenca del Río Copiapó que vendría siendo la volcánico-sedimentario mesozoico, también llamada “Main andesites” (Oyarzún et al., 2016).

Finalmente se agrupan los elementos en Litófilos, Calcófilos y Siderófilos (Goldshmidt, 1937) con el objetivo de poder explicar las concentraciones de los elementos mayores y trazas en los sedimentos activos del Río Copiapó.

1.4.3.3 Factor de enriquecimiento

Se realizó análisis del Factor de Enriquecimiento para todos los elementos de este estudio, que tiene como fin el establecer la posible influencia de las fuentes naturales y antrópicas en las concentraciones medidas de los elementos analizados. Este método se desarrolló inicialmente para ser utilizado en estudios atmosféricos, de aguas lluvia o de agua marina (Chester y Stoner, 1973; Zoller et al., 1974). Progresivamente su uso fue extendido al estudio de suelos o sedimentos lacustres entre otros (Loska et al., 1997). A pesar de los cuestionamientos realizados por algunos autores a su uso en sedimentos, el presente estudio consideró al Factor de Enriquecimiento como una herramienta útil para una fase exploratoria de las posibles fuentes que pueden estar impactando el área de estudio. El uso de este Factor otorga una primera orientación, la cual es evaluada junto a una serie de análisis, espaciales y estadísticos. La ecuación para calcular el Factor de Enriquecimiento (FE) se puede generalizar a partir de los trabajos de Chester y Stoner (1973) y Zoller et al. (1974).

$$FE \text{ elemento } x = \frac{\left[\frac{C_{\text{elemento } x}}{C_{\text{elemento referencia } x}} \right]_{\text{muestra}}}{\left[\frac{C_{\text{elemento } x}}{C_{\text{elemento referencia } x}} \right]_{\text{corteza continental}}}$$

Ecuación 2: Fórmula de cálculo del Factor de Enriquecimiento (FE)

El FE se basa en la normalización de las concentraciones elementales del elemento a evaluar ($C_{\text{elemento } x}$) con respecto a un elemento conservativo representativo de la corteza superficial ($C_{\text{elemento referencia}}$), el cual puede ser *Al*, *Th* o *Zr*, elegidos por su estabilidad en la mayoría de los procesos ambientales. En este trabajo se utilizó el aluminio como elemento de referencia, ya que, según los valores obtenidos en el laboratorio, demostró ser el más conservativo. Posteriormente, los valores se comparan con su equivalente representativo natural normalizado, obtenido a partir de valores referenciales del medio geológico, para estos efectos se utilizó la compilación de Rudnick et al., (2003) y una unidad geológica volcánico sedimentaria, llamada “Main Andesites” por Oyarzún et al., 2016.

Los resultados obtenidos en el análisis de FE permiten reconocer diferencias en el nivel de influencia de la fuente en el origen de los elementos según tres categorías distintas, las cuales se detallan en el cuadro a continuación (Tabla 1.3).

Tabla 1.4: Criterios de análisis de resultados del Factor de Enriquecimiento

Rango	Origen
FE<1	Natural, litogénico
1<FE≤10	Fuentes naturales como antrópicas
FE>10	Importante contribución antropogénica.

Reimann & De Caritat (2005, 2000) no recomiendan el uso indiscriminado de análisis de FE locales como único método para asumir que altos valores obtenidos implican contaminación antropogénica. Los valores del FE pueden ser altos o bajos debido a varias razones, de las cuales, la contaminación es solo una. El uso del FE es utilizado como una herramienta más de un análisis integrado que considera un análisis espacial (distribución) y de proveniencia de la información levantada, que busca diferenciar fuentes antropogénicas de fuentes naturales.

1.4.3.4 Análisis espacio-temporal de las concentraciones de cobre, plomo, arsénico y mercurio

Se confeccionaron gráficos 2D para cada elemento a modo de comparar las concentraciones prealuvionales y postaluvionales. Las estaciones de muestreo se ordenaron de oeste a este (Izquierda a derecha), los datos de Rojos (2016) se simbolizaron con triángulos amarillos y los postaluvión con triángulos rojos. Esto permite comprobar si hubo un enriquecimiento o empobrecimiento de estos elementos a lo largo del cauce del Río Copiapó después del evento.

Se calcula el Factor de Enriquecimiento para cobre, plomo arsénico y mercurio, que tiene como fin el establecer la posible influencia de las fuentes naturales y antrópicas en las concentraciones medidas de los elementos analizados.

1.4.3.5 Análisis Integrado (FE y sedimentología)

Para terminar este estudio, se integró mediante gráficos 2D, el Factor de enriquecimiento del cobre, plomo, arsénico y mercurio, población en suspensión de los sedimentos activos, y los datos granulométricos de las muestras prealuvionales y postaluvionales. El propósito es comprobar si existe una correlación entre las concentraciones de estos elementos y la granulometría de las muestras, asociado a características propias de inundaciones aluvionales en la cuenca del Río Copiapó.

2 Marco Geológico, hidrológico y meteorológico

2.1 Marco Geológico Regional

La Región de Atacama es parte del margen continental activo de América del Sur, correspondiente al sistema tectónico genético de los Andes. La deformación de primer orden en la zona ha estado íntimamente ligada al arco magmático y controlada principalmente por el ángulo de convergencia de subducción, lo que ha permitido el desarrollo de mega sistemas de fallas de rumbo de orientación Norte - Sur. Estos sistemas son el Sistema de Fallas de Atacama (SFA), que se formó en conjunto con el arco magmático Jurásico y está situado en la posición actual de la Cordillera de la Costa (Grocott et al., 1994; Dallmeyer et al., 1996), y el Sistema de Elisa de Bordos, el cual coincide con la segmentación fisiográfica del antearco entre la Cordillera de la Costa y la Cordillera Frontal, asociada al arco magmático del Cretácico Superior-Paleógeno (Martínez et al., 2015). Todo lo anterior determina la distribución de forma elongada en dirección NNE-SSW de las distintas unidades geológicas (Figura 2.1). La geología incluye rocas pertenecientes a las raíces de un complejo ígneo y metamórfico del Carbonífero-Pérmico desarrolladas en el antearco del margen de subducción de Gondwana (Hervé et al., 1981; Ramos *et al.*, 1986; Mpodozis y Ramos, 1989). Sobre este basamento se depositaron grandes volúmenes de rocas sedimentarias y volcánicas desde Permo-Triásico al Jurásico inferior en cuencas extensionales de orientación NNW-SSE, ligadas a un ambiente de fusión cortical y rifting (Charrier, 1979). Finalmente, después del jurásico inferior, rocas y depósitos con diferentes grados de consolidación representan el relleno de cuencas volcano-sedimentarias desarrolladas en bloques marginales del orógeno andino, asociado con la apertura del supercontinente Pangea-Gondwana (Mpodozis y Ramos, 1989). Estas unidades han sido fuertemente deformadas durante las etapas de compresión y extensión del ciclo de deformación andina. Con el retorno de la subducción y comienzo de la orogenia andina se desarrollaron arcos magmáticos y frentes de deformación, que migran desplazándose hacia el este hasta la actualidad (Martínez et al., 2015).

La inversión tectónica de estas cuencas marginales y la exhumación de raíces ígneas-metamórficas del paleozoico, definen las distintas unidades fisiográficas de la vertiente occidental de los Andes Centrales en estas latitudes. Las dos principales unidades fisiográficas de los Andes Centrales en la zona de estudio son la Cordillera Frontal y Cordillera de la Costa. Sistemas fluviales se desarrollan de manera transversal a estas unidades fisiográficas, desarrollando cuencas hidrográficas que limitan con la divisoria de agua continental o con depresiones intramontañas andinas. La cuenca Río Copiapó es uno de estas cuencas que cruzan la vertiente occidental de los Andes Centrales.

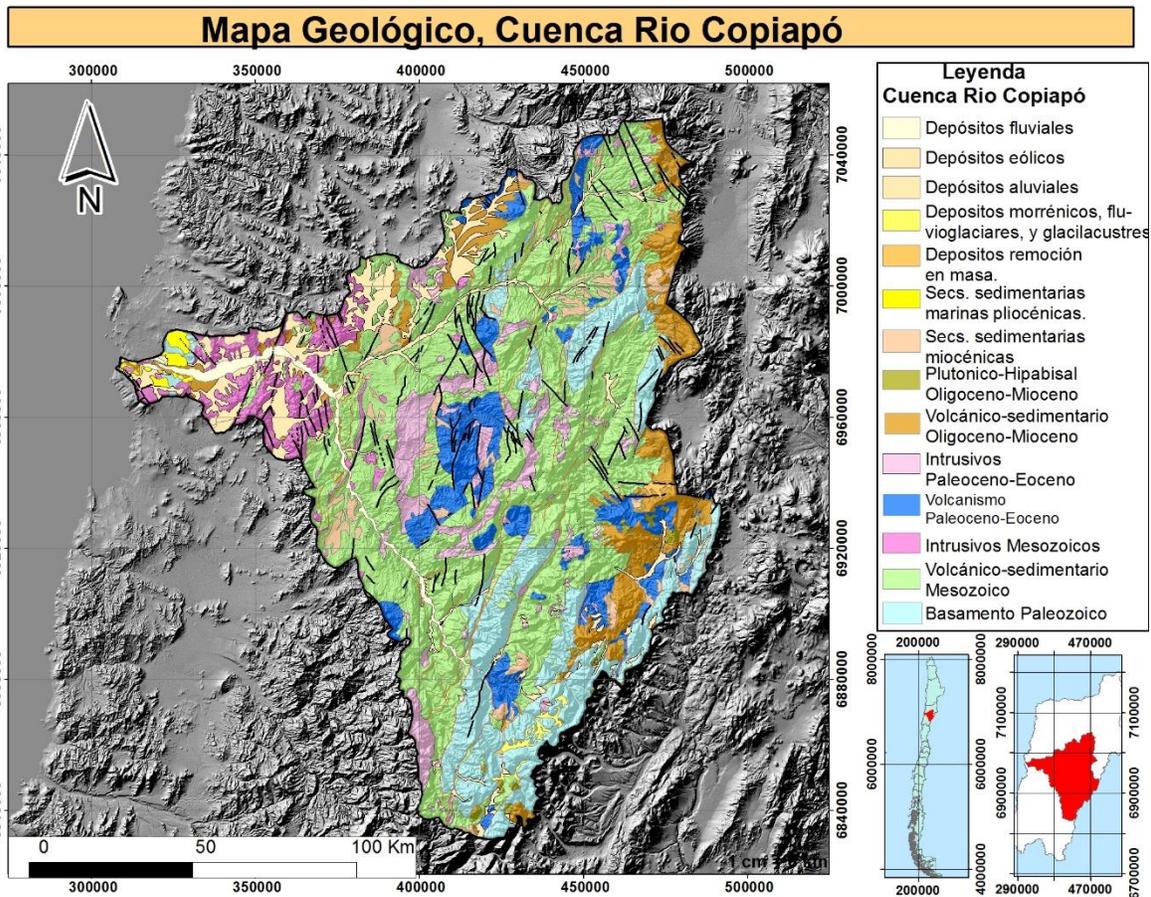


Figura 2.1: Marco geológico de la Cuenca del Río Copiapó, región de Atacama, Chile.

2.1.1 Cordillera de la Costa

En la Cordillera de Costa la altitud no supera los 2.000 m s.n.m. y descienden progresivamente hacia el Sur de la cuenca. La altura de los pedimentos alcanza los 1500 m s.n.m y descendiendo a 500 m s.n.m cerca del borde costero. Los ejes de drenaje se aprecian tanto en el cauce principal del Río Copiapó, con una incisión vertical de 200 m y en una red de drenaje proveniente del océano pacífico que no llega al eje central longitudinal de esta unidad fisiográfica.

El basamento de la Cordillera de la Costa, en la zona de estudio, consiste en rocas metasedimentarias correspondientes al Paleozoico superior, intruidas por complejos plutónicos, con edades K/Ar, Ar/Ar y U/Pb de 190-180, 150-140, 120- 130 y 110 - 90 Ma (Martínez et al., 2015). Los complejos plutónicos presentan una gran variedad petrográfica de gabros a granitos, con elongaciones en dirección NNE-SSW, paralelas a la dirección del segmento más austral del Sistema de Fallas de Atacama. Este Sistema representa el eje del arco magmático Jurásico-Cretácico que facilitó el emplazamiento de los complejos plutónicos y secuencias volcánicas (García, 1967; Mpodozis y Ramos, 2008; Oliveros et al., 2006). Las sucesiones jurásicas incluyen flujos andesíticos, brechas basálticas andesíticas y volcánicas correspondientes a las formaciones La Negra y Punta del Cobre (Lara y Godoy, 1998; Marschik y Fontboté, 2001; Oliveros et al., 2006; Taylor et al., 2007). El sistema extensional se asocia a un contexto geodinámico de subducción “roll-back” establecido en el oeste de América del Sur durante la ruptura de Gondwana (Aguirre-Urreta, 1993; Franzese y Spalletti, 2001; Grocott y Taylor, 2002; Mpodozis y Kay, 1990; Mpodozis y Ramos, 1990, 2008; Pindell y Dewey, 1982; Ramos, 2009) (Figura 2.1).

Al este de la Cordillera de la Costa, La Formación Punta del Cobre está parcialmente solapada por aproximadamente 4.000 m de depósitos de Syn-rift calcáreos y siliciclásticos del Cretácico Inferior que definen al Grupo Chañarcillo (Arévalo, 1999; Mourgues, 2004; Price et al., 2008; Segerstrom, 1960; Segerstrom y Parker, 1959; Segerstrom y Ruiz, 1962). El Grupo Chañarcillo está cubierto discordantemente por 4000 m de (Macksaev et al., 2009) sucesiones conglomeráticas y volcanoclásticas del Cretáceo Tardío (110.7 ± 1.7 y 99.7 ± 1.6 Ma U-Pb) definidas como la Formación Cerrillos (Arévalo, 1994, 2005a, 2005b; Jensen y Vicente, 1976; Marschik y Fontboté, 2001; Segerstrom y Ruiz, 1962). La Formación Cerrillos es sobreyacida discordantemente por depósitos del Cretácico Superior-Paleoceno (Figura 2.1) que corresponden a la Formación Hornitos, la cual está compuesta por intercalaciones de areniscas rojas, brechas volcánicas, conglomerados, ignimbritas y diferentes flujos volcánicos que son intruidos por diferentes complejos plutónicos del Paleoceno (Arévalo, 1994, 2005b; Arévalo y Welkner, 2008; Peña et al., 2013; Segerstrom, 1960).

Finalmente, sedimentos no consolidados continentales del Mioceno medio (Gravas de Atacama) compuestos de paquetes horizontales de arenas y gravas (Mortimer, 1973; Willis, 1929) cubren discordantemente los depósitos plegados y fallados del Cretácico y Paleoceno en esta región (Figura 2.1). Estas gravas serían el resultado como productos sinorogénicos del alzamiento andino y la respuesta erosiva (Sillitoe *et al.*, 1968; Mortimer, 1973) (Figura 2.1). Las Gravas de Atacama se exponen extensamente en el extremo sur del Desierto de Atacama a lo largo de la Cordillera Frontal y Cordillera de la Costa. Sin embargo, en la cuenca del Río Copiapó, Huasco y Elqui, las gravas están principalmente en la Cordillera de la Costa (Paskoff, 1970). En la Región de Atacama, las gravas presentan una gradación vertical que va desde facies sedimentarias fluviales en la base, a facies sedimentarias aluviales en el techo. Esta gradación resulta de la progresiva desecación climática del Mioceno medio, que origina la actual condición hiperárida del Desierto de Atacama, y del progresivo alzamiento y basculamiento de la región de antearco (Riquelme *et al.*, 2003, 2007; Nalpas *et al.*, 2008).

2.1.2 Cordillera Frontal

En la Cordillera Frontal las cumbres alcanzan los 5800 m s.n.m., altura que disminuye hacia el sur del área de estudio. Los principales drenajes corresponden a cañones que representan hasta 2.000 m de incisión y que dan paso, aguas arriba, a empinadas paredes, mientras que los interfluvios planos están dominados por pedimentos de baja pendiente.

El basamento de la Cordillera Principal está compuesta por bloques graníticos del Paleozoico tardío, principalmente granodioritas, granitos y monzogranitos que tienen edades K/Ar que van desde 263 a 228 Ma (Jensen, 1976; Moscoso et al., 2010; Mpodozis y Kay, 1990). Estos bloques graníticos son sobreyacidos por sucesiones volcano-sedimentarias syn-rift asignadas a la Formación La Ternera (Triásico superior), que están cubiertas por depósitos compuestos por conglomerados, areniscas e intercalaciones calcáreas que corresponden a las formaciones Lautaro y Lagunillas (Jurásico) (Figura 2.1). Los depósitos mesozoicos están cubiertos discordantemente por casi 1.000 metros de depósitos volcánicos y sedimentarios del Paleoceno (conglomerados, areniscas rojas, andesitas y brechas volcánicas) que corresponden a la Formación Quebrada Seca (Jensen, 1976; Moscoso et al., 2010; Soffia, 1989). La Formación Quebrada Seca está recubierta discordantemente por aproximadamente 200 metros de conglomerados y areniscas lacustres del Mioceno Inferior, definidas como la Formación Potrerillos (Jensen, 1976), así como por sucesiones volcánicas que consisten en tobas ignimbríticas de composición riolítica, lavas de composición dacítica, aglomerados volcánicos y brechas de la Formación Doña Ana (Martin et al., 1997; Thiele, 1964) (Figura 2.1).

2.1.3 Geología del cuaternario

Los valles de la zona de estudio se labran en el sustrato rocoso generando paisajes de relieve muy irregular, con la alternancia de valles profundos limitados por laderas escarpadas (cañones) y con interfluvios montañosos denominados por serranías donde se preservan superficies de pedimentación y paleovalles del mioceno. Los valles que cruzan la Cordillera Frontal y Cordillera de la Costa se encuentran rellenos por depósitos no consolidados fluviales, constituidos por gravas, arenas y limos. Estos depósitos se encuentran contiguos al curso actual de los ríos mayores, constituyendo terrazas y llanuras de inundación del Plio-cuaternario. Desde aguas arriba los sedimentos que rellenan los valles varían dependiendo de los procesos geomorfológicos presentes en cada unidad fisiográfica (Figura 2.1).

En la Cordillera de la Costa, las quebradas que constituyen la cuenca del valle del Río Copiapó están rellenas de depósitos aluviales detríticos constituidos por ripios, gravas y arena. Su formación se atribuye a la acumulación de flujos gravitacionales densos como corrientes de barro y/o flujos de detritos (Godoy y Lara, 1998). Depósitos coluviales gravas y ripios de bloque sueltos mal seleccionados, constituidos por fragmentos monomícticos de formas angulosas, se depositan en superficies de mayor pendiente. Estos depósitos aluviales y coluviales engranan lateralmente con depósitos Fluviales asociados a escorrentía superficial del Río Copiapó y que forman el relleno principal del valle (Figura 2.1). Están formados por ripios, gravas y arenas bien seleccionadas con abundantes niveles de limos intercalados. Se encuentran además depósitos eólicos del holoceno, constituidos por arenas medias a finas, en el sector más occidental y costero del valle del Río Copiapó (Figura 2.1). Todos estos depósitos son en general permeables ante la infiltración, y se acumularon y depositaron sobre una capa basal impermeable (Arévalos, 2005a).

La geomorfología fluvial de los tributarios Jorquera, Pulido y Manflas en la Cordillera Frontal se caracterizan por formas juveniles, de paredes abruptas y canales dominados por sistemas trenzados con escaso desarrollo de meandros. Predominan los materiales gruesos y sólo localmente hay depositación de elementos finos producto de condiciones lacustrinas o pantanosas originadas por sedimentos de las quebradas que obstruyeron parcialmente el río. Dos grandes afluentes más drenan desde la Cordillera Frontal, pero sus confluencias con el Río Copiapó se localizan aguas abajo en el contexto de la Cordillera de la Costa. La Quebrada Carrizalillo supera los 4.000 m s.n.m. a más de 40 km de su confluencia con el Río Copiapó localizada a los 585 m s.n.m. La Quebrada Paipote en su mayor proporción se ubica en la Cordillera de la Costa, con una extensión de 135 Km desde su confluencia a los 520 m s.n.m. hasta las cumbres que superan los 3600 m s.n.m. en la Cordillera Principal (Figura 1.1).

2.3 Marco Hidrometeorológico

2.3.1 Clima

La cuenca hidrográfica del Río Copiapó, se extiende desde la latitud 26°43' por el norte, hasta la latitud 28°34' por el sur. Según la clasificación de Köeppen y Geiger (actualizada por Kottek *et al.*, 2006), la cuenca del Río Copiapó presenta un clima desértico que se encuentra influenciado por la Corriente de Humboldt, la subsidencia atmosférica y el relieve, lo cual determina principalmente tres subclimas.

El **Desierto costero con nubosidad abundante**, en zonas más litorales y Cordillera de la Costa, se caracteriza una densa nubosidad matinal, acompañada de lluvias y lloviznas, que penetran al interior del valle de Copiapó. Las precipitaciones son de tipo frontal que ocurren casi exclusivamente en invierno y alcanzan los 27 mm al año en la ciudad de Caldera, 12 mm al año en

Chañaral y 32 mm al año en Totoral. Las temperaturas anuales promedian 16,1°C, llegando a máximas y mínimas que fluctúan entre 11,3°C y 22,3°C, con humedad relativa de 74% (DGA, 2013).

El clima Desértico Marginal Bajo corresponde al clima predominante en la cuenca cubre desde el comienzo de la Cordillera Frontal (2.000-2.300 m s.n.m.) hasta la influencia marítima intensa por el oeste. La amplitud térmica entre el mes más cálido y más frío es de 7 a 8 ° C en Copiapó, en la zona costera este rango es menor a 6°C. Existe una diferencia térmica diaria más intensa si se compara con la zona costera, con amplitud térmica diaria que alcanza del orden de 13°C a 15°C. Las precipitaciones se concentran en el invierno y van en aumento a medida que la altura y la latitud se incrementan en la zona. Precipitaciones de 12 mm en Copiapó (291 m s.n.m.), 19 mm en El Salvador (2.400 m), 32 mm en Vallenar (470 m) y 34 mm en Los Loros (948 m s.n.m.) son ejemplos de ello (DGA, 2013).

La tundra de alta montaña representa una zona en la Cordillera Principal con variaciones de temperatura por debajo y sobre los 0°C, y que en el verano no se superan los 10°C. La altitud aproximada en la que se ve reflejado este clima va desde los 3.500 hasta sobre los 5.000 m s.n.m. de altura. Las precipitaciones son variables, ya que dependen de la latitud (27 a 28,5°S), y se producen por lo general en forma de nieve, con una línea de nieve cercana a los 3.300 m s.n.m. (IREN-CORFO, 1972).

2.3.2 Hidrología

Como se describió anteriormente, el río Copiapó se forma al juntarse los ríos Pulido y Jorquera, en el sector de La Junta a 1.230 m s.n.m. La subcuenta del Río Jorquera posee una superficie aproximada de 4.185 km², la cuenca del Río Pulido se acerca a los 2.000 km² y la cuenca del Río Manflas contiene una superficie de 1.200 km². El río de mayor aporte es el Pulido (1,4 m³/s; tabla 4), pese a que su hoya es aproximadamente la mitad que la del Jorquera (0,7 m³/s; Tabla 2.1). Esto se debe a la existencia de ventisqueros en las cabeceras de los ríos Los Helados y Montosa, dos de los afluentes del Río Pulido (DGA, 2003). El Río Manflas, además de tener una cuenca más pequeña, accede desde el sur de la cuenca, drenando menos agua de precipitación de la cordillera (0,6 m³/s; Tabla 2.1). Prácticamente estos tres ríos son los únicos que aportan caudales superficiales, lo que implica que sólo aproximadamente un tercio de la hoya hidrográfica es activa. Cuencas tributarias efímeras se distribuyen a lo largo de la cuenca, resaltando entre ellas por su extensa área las cuencas de la Quebrada Paipote y en menor medida Carrizalillo. La Quebrada Paipote representa el afluente de mayor superficie de drenaje con 6.600 km² aproximadamente y se extiende por 90 km, mientras que la Quebrada Carrizalillo tiene un área de 1.120 km². La cuenca del Río Copiapó cuenta con regulación artificial dada por la presencia del tranque Lautaro cuya capacidad de almacenamiento es de 40 millones de m³ (IGM, 1984).

Una vez formado el Río Copiapó en La Junta, su cauce toma un rumbo hacia el NNW hasta la confluencia de la Quebrada de Paipote. A partir de este punto, describe un arco suave hacia el NW para tomar, a la altura de la ciudad de Copiapó, en franco rumbo al W. Los caudales que ingresan al Tranque Lautaro, registrados en la Estación Río Copiapó en Pastillo alcanzan un valor medio anual de 2,3 m³/s, mientras los caudales de salida del Tranque alcanzan un valor medio de 1,3 m³/s registrados en la estación Río Copiapó en By Pass Lautaro. Esa diferencia se explica en parte por la variación en el volumen. Al avanzar hacia el oeste, el caudal medio anual en el sector de la estación Río Copiapó en La Puerta aumenta, esto debido a los afloramientos de aguas subterráneas que se producen en este sector. Aguas abajo, desde la estación Río Copiapó en La Puerta a la ciudad de Copiapó los caudales disminuyen debido a la extracción de las aguas superficiales que realizan las organizaciones de regantes (Golder Associates, 2006), alcanzando un caudal promedio anual de 1 m³/s, aunque por largos períodos el cauce se mantiene seco. Ya en su

tramo final, el río a la altura de la estación Río Copiapó en Angostura presenta afloramientos de agua subterránea que alcanzan un promedio anual de 0,5 m³/s. (Tabla 2.1).

Tabla 2.1: Estaciones fluviométricas de la cuenca del Río Copiapó. (Fuente: DGA 2003)

Estación	Coordenadas		Altitud (m s.n.m.)	Años de registro	Promedio Caudal (m ³ /s)
	Este	Norte			
Río Jorquera en Vertedero	406.060	6.897.739	1250	1947-2000	0,7
Río Pulido en Vertedero	407.600	6892.980	1310	1954-2000	1,4
Río Manflas en Vertedero	402.510	6.885.893	1550	1964-2000	0,6
Río Copiapó en Pastillo	404.151	6.902.323	1300	1927-2000	2,3
Río Copiapó en By Pass Lautaro	401.850	6.905.180	1200	1931-2000	1,3
Río Copiapó en La Puerta	389.169	6.924.018	758	1927-2000	2,4
Copiapó en la Ciudad	367.579	6.972.680	-	1983-2000	1
Río Copiapó en Angostura	318.130	6.976.824	48	1963-2000	0,5

3 Resultados

3.1 Caracterización granulométrica de los sedimentos del Río Copiapó

En este capítulo se exponen las características granulométricas de los sedimentos activos del Río Copiapó en base a la construcción de curvas de frecuencia acumulativas de las muestras recolectadas en otoño del 2011, es decir cuatro años antes de ocurridos los aluviones del 25M 2015 (Rojos, 2016), de aquellas recolectadas en las semanas posteriores a ocurridos los aluviones (30/03/2015, 14/04/15 y 18/05/17) y en aquellas recolectadas el 4 de junio del año 2017 (Anexo IV). A partir de los datos representados en las curvas se calcularon la Media, Mediana, Selección, Asimetría y Curtosis (Tabla 3.1).

Tabla 3.1: Parámetros estadísticos granulométricos prealuvionales y postaluvionales ordenados por estación de muestreo.

Fecha de Muestreo	Poblacion Suspensión			Parámetros sedimentológicos estadísticos					Coordenadas	Elevación (metros)
	Min ϕ	Max ϕ	%	media	mediana	selección	asimetría	curtosis		
Lautaro										
04-06-2017	3,4	4,3	30	2,57	2,91	1,40	-0,78	2,05	28°0'15.51"S	
18/05/15	2,3	4,3	55	1,99	2,26	1,45	-0,15	1,42	/	1163
14/04/15	2,5	4,3	60	2,86	2,77	0,98	-1,20	4,36	69°58'36.42"O	
30/03/15	2,4	4,3	17	1,71	1,70	1,23	-0,16	1,51		
Rango prealuvión	2	4								
promedio prealuvión			5	-0,36	-1,93	1,50	1,05	2,94		
Desviación Estandar				0,41	0,23	0,26	0,53	1,12		
Elisa de Bordos										
04-06-2017	2,5	4,3	30	2,65	2,38	0,83	-1,03	5,40	27°42'57.32"S	
18/05/15	2,8	4,3	55	2,54	3,13	1,53	-0,69	1,67	/	752
14/04/15	2,4	4,3	60	2,53	3,23	1,55	-0,67	1,62	70°11'45.83"O	
30/03/15	3,7	4,3	30	1,83	1,42	1,64	0,16	1,14		
Rango prealuvión	1,7	4								
promedio prealuvión			5	-0,13	-0,90	1,65	0,76	2,23		
Desviación Estandar				0,58	0,98	0,26	0,71	1,49		
Cerrillos										
04-06-2017	3,4	4,3	30	3,24	3,12	0,70	-1,20	4,95	27°33'45.27"S	
18/05/15	3,5	4,3	10	1,78	1,98	1,45	0,09	1,37	/	577
14/04/15	2,4	4,3	60	2,58	2,96	1,41	-0,79	2,04	70°15'48.28"O	
30/03/15	3	4,3	5	0,95	0,25	1,21	1,32	3,09		
Rango prealuvión	1	4								
promedio prealuvión			20	0,34	0,19	1,64	0,22	1,87		
Desviación Estandar				0,19	0,08	0,15	0,37	0,42		
Paipote										
04-06-2017	3,2	4,3	75	3,68	3,91	0,35	-2,00	5,00	27°25'45.35"S	
18/05/15	2,8	4,3	40	2,88	2,69	0,88	-1,11	4,86	/	452
14/04/15	2,4	4,3	70	3,13	3,08	0,75	-1,08	4,91	70°16'7.78"O	
30/03/15	2,4	4,3	65	3,06	2,96	0,76	-0,95	4,77		
Rango prealuvión	2,7	4								
promedio prealuvión			25	0,01	-0,45	1,67	0,59	2,03		
Desviación estandar				0,39	0,69	0,32	0,33	0,59		
Maria Isabel										
04-06-2017	3,8	4,3	20	1,89	1,60	1,65	0,09	1,13	27°20'40.55"S	102
14/04/15	3,8	4,3	20	1,72	1,46	1,55	0,24	1,28	70°46'38.04"O	
Rango prealuvión	1	4								
promedio prealuvión			20	0,31	0,15	1,61	0,20	1,88		
Desviación estandar				0,25	0,35	0,06	0,23	0,08		

3.1.1. Caracterización granulométrica pre-aluviones

Las muestras recolectadas agua arriba del tranque Lautaro y en el sector de Elisa de Bordos en junio de 2011 (Lau-080611 y Eli-080611), presentan una población de tracción predominante, que representa el 60 y 70% de la muestra respectivamente, con truncamiento tracción-saltación muy marcada en $-1,8 \phi$. El rango de ϕ para la población de saltación es entre $-1,8$ y $1,2$, abarcando el 35 y 25% respectivamente, caracterizada por una pendiente baja. La población en suspensión ($\phi > 1,2$) abarca un porcentaje menor, 5% para ambas muestras (Tabla: 3.1; Figura 3.1a). Muestras recolectadas en estos mismos puntos en marzo de 2012 (Lau-160312-Eli-160312) indican similar tendencia, pero con una población de tracción menos importante, que representa aproximadamente el 45% y, con truncamiento tracción-saltación muy marcado en $-2,2 \phi$. En Lautaro el rango de ϕ para la población de saltación es entre $-1,8$ y $1,2 \phi$, abarcando el 50% de la muestra, caracterizada por una pendiente alta (Figura 6b). La población en suspensión ($\phi > 1,2$) abarca un porcentaje menor de la muestra (5%), lo que puede indicar bajas concentraciones de sedimentos suspendidos en el fluido y posiblemente una depositación más lenta (flujo con baja turbulencia). Y en Elisa de Bordos, la población de saltación esta entre $-1,8$ y $2,2 \phi$, 55% de los sedimentos transportados, y una suspensión que engloba solo el 5% de la muestra (Tabla: 3.2; Figura 3.1b).

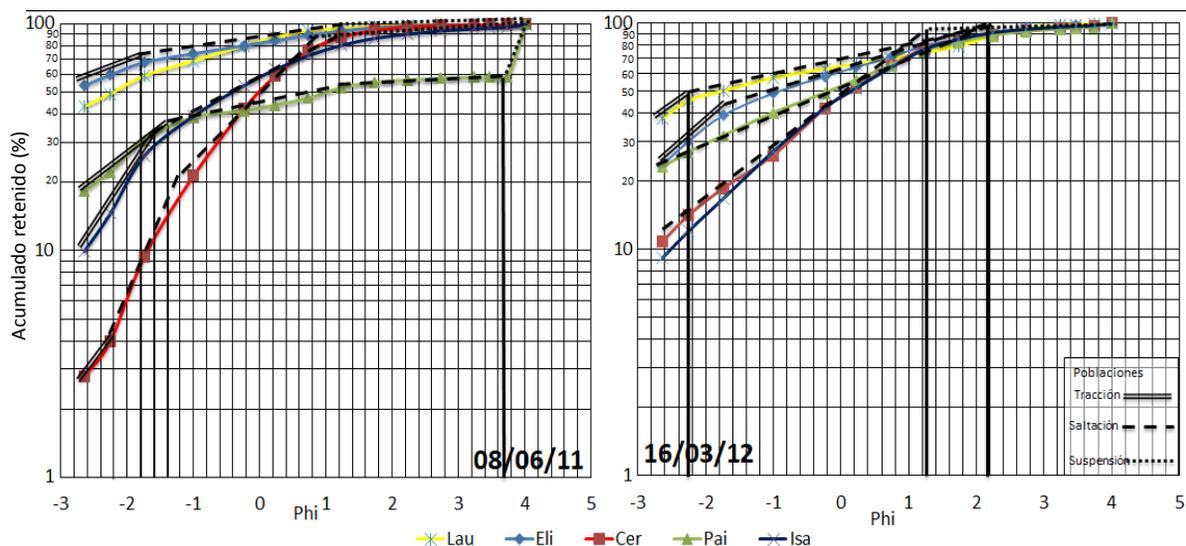


Figura 3.1: Curvas granulométricas, a escala logarítmica, para sedimentos activos durante el año 2011 y 2012 (Rojos, 2016). Líneas verticales en negrita marcan truncamientos.

Tabla 3.2: Valores numéricos de parámetros granulométricos, tamaño de grano y porcentaje de poblaciones correspondientes a las muestras 080611 y 160312.

Parámetros Granulométricos						Poblaciones					
						Tracción		Saltación		Suspensión	
Muestras	Media	Mediana	Selección	Asimetría	Curtosis	Tamaño (ϕ)	% Muestra	Tamaño (ϕ)	% Muestra	Tamaño (ϕ)	% Muestra
Lau-080611	-0,89	-2,20	1,13	1,71	4,52	(-2,64 a -1,8)	60	(-1,8 a 1,2)	35	(1,2 a 4)	5
Eli-080611	-0,87	-2,60	1,17	1,79	4,97	(-2,64 a -1,8)	70	(-1,8 a 1,2)	25	(1,2 a 4)	5
Cer-080611	0,17	0,05	1,42	-0,04	1,65	(-2,64 a -2)	4	(-2 a 1)	80	(1 a 4)	16
Pai-080611	1,05	1,00	2,22	-0,09	1,18	(-2,64 a -1,4)	38	(-1,4 a 3,5)	20	(3,5 a 4)	42
Isa-080611	0,01	-0,45	1,67	0,59	2,03	(-2,64 a -1,6)	30	(-1,6 a 1,2)	50	(1,2 a 4)	20
Lau-160312	-0,18	-1,80	1,74	0,93	2,39	(-2,64 a -2,2)	45	(-2,2 a 2,6)	50	(2,6 a 4)	5
Eli-160312	-0,13	-0,90	1,65	0,76	2,23	(-2,64 a -1,8)	40	(-1,8 a 2,2)	55	(2,2 a 4)	5
Cer-160312	0,34	0,19	1,64	0,22	1,87	-	0	(-2,64 a 1)	80	(1 a 4)	20
Pai-160312	0,17	-0,20	1,71	0,46	1,89	-	0	(-2,64 a 2)	90	(2 a 4)	10
Isa-160312	0,31	0,15	1,61	0,20	1,88	-	0	(-2,64 a 1)	80	(1 a 4)	20

En las muestras recolectadas en junio de 2011 y marzo de 2012 en el sector de Cerrillos (Cer-080611-Cer-160312), se aprecia una curva granulométrica con truncamientos graduales, en donde es difícil identificar las poblaciones de los sedimentos. En junio de 2011, la tracción abarca valores entre $-2,64$ y -2ϕ , distribuidos en una tendencia de alta pendiente, que equivale al 4%, mientras que marzo 2012 no presenta esta población. La saltación es el mecanismo de transporte predominante de sedimentos, presenta un truncamiento en 1ϕ , representando el 80% (Tabla 3.2). La población correspondiente a la suspensión presenta una concentración de sedimentos del 20 % de las muestras (Figura 3.1).

En la muestra recolectada en junio de 2011, agua arriba de la confluencia de la Quebrada Paipote (PAI 080611), se refleja una curva granulométrica con sus poblaciones bien marcadas. La tracción presenta un truncamiento en $-1,4 \phi$, abarcando el 38% de la muestra (Figura 3.1a). Una amplia población en saltación se presenta en esta muestra, con rangos de entre $-1,4$ y $3,5 \phi$, que equivalen al 20% de la muestra, con una tendencia de baja pendiente. La población de suspensión es muy notoria y predominante, con un 42% de la muestra (Tabla 3.2). En la muestra de marzo de 2012 (PAI-160312) cambia el comportamiento de los sedimentos. La población en tracción desaparece, y la población de saltación predomina con un 90% de la muestra, mientras que con un truncamiento en 2ϕ solo el 10 % es transportado por suspensión (Figura 3.1b).

En la curva de la muestra recolectada en junio de 2011 en el sector María Isabel (Isa-080611), la población en tracción es escasa y se desarrolla hasta $-1,6 \phi$ abarcando un 30% de la muestra (Figura 3.1). En la muestra de marzo de 2012 (Isa-160312) esta población no está presente en el registro (Figura 3.1b). El rango para la población en saltación es entre $-1,6$ y $1,2 \phi$, abarcando 50 % de los sedimentos para junio de 2011, mientras que en marzo de 2012 la población en saltación es de 80% (Tabla 3.2). El truncamiento saltación-suspensión en estas muestras no es muy notorio, con una población en suspensión de baja pendiente, que implica un 20 % de la muestra (Figura 3.1).

Se destaca que, en las curvas granulométricas correspondientes a las muestras de junio del 2011, la población en tracción disminuye aguas abajo, Lautaro 70% y en María Isabel 30 %, lo que indica que el sedimento se hace menos grueso de este a oeste. Mientras que las muestras del año 2012 la población en tracción desaparece, en los sectores de cerrillos, Paipote y María Isabel. Entre Cerrillos y María Isabel predomina el transporte por saltación entre un 80 y 90 % de las muestras. En la Figura 3.2 se grafican los parámetros estadísticos obtenidos de las muestras recolectadas por Rojos (2012) en otoño del 2011 y verano de 2012.

Los parámetros reflejan el predominio de la población en tracción, con rangos de tamaño de grano grueso mayores a 4mm en las muestras recolectadas en los sectores altos de la cuenca, específicamente aguas arriba del tranque Lautaro y en el sector de Elisa de Bordos (Figura 3.2). La media y mediana en Lautaro y Elisa de Bordos son valores negativos que indican una mayor presencia de sedimentos gruesos (Figura 3.2). Las muestras indica moderada a pobre selección y asimetría con presencia de finos (asimetrías muy positivas) de acuerdo a Boggs (2009) (Figura 3.2a y b). Lo anterior coincide con el observado en las curvas de frecuencia acumulativas (Figura 3.1), que indican bajas concentraciones de sedimentos suspendidos en el fluido y un flujo con baja turbulencia.

Entre Cerrillos y María Isabel, la media es positiva, lo que indica que los sedimentos finos aumentaron, pero que no son más que los gruesos, y la mediana es levemente positiva, salvo en Paipote, donde este parámetro es igual a $-0,2$ (Figura 3.2). La selección en todos los puntos de muestreo es pobre. La asimetría disminuye de este a oeste, pero siempre se mantiene positiva, por lo tanto, la cola de finos está presente en todas las muestras. Lautaro, Elisa y Paipote son

asimetrías muy positivas, y en Cerrillos y María Isabel son positivas. La Curtosis indica una condición muy leptocúrtica para todos los puntos, que va disminuyendo de este a oeste.

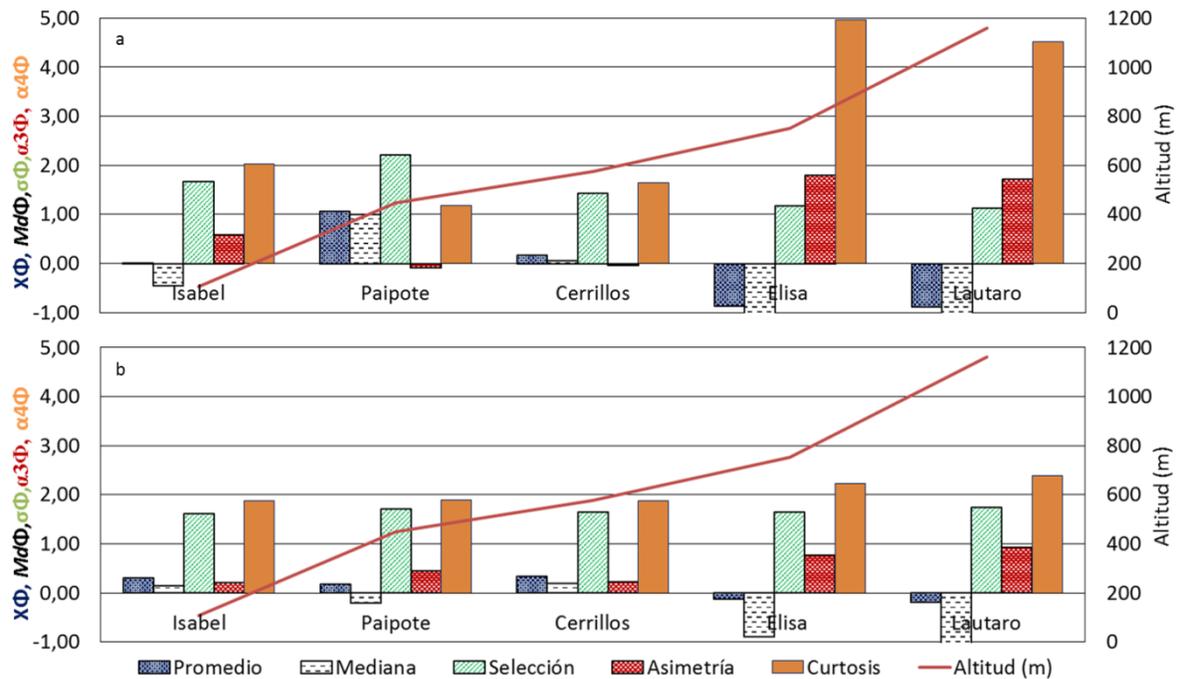


Figura 3.2: Gráficos, parámetros granulométricos. a) Muestras 080611 y b) Muestras 160312.

Los parámetros de las muestras recolectadas aguas abajo en el sector Cerrillos (Figura 3.2a y b), reflejan la disminución de los sedimentos gruesos y con ello del porcentaje de la muestra que se mueve por tracción. En cambio, aumenta en porcentaje la población que se mueve por saltación con tamaños de grano entre 1 y 0,5 mm. La muestra indica pobre selección, aunque se observa simetría y característica muy leptocúrtica que refleja mejor selección en el centro (Folk, 1974). Lo anterior se condice con la señal de flujo turbulento que indica la curva de frecuencia acumulativa (Figura 3.2a y b).

En la estación localizada aguas arriba de la confluencia de la Quebrada Paipote, el rango de grano más fino aumenta considerablemente, en relación a las muestras de aguas arriba, además los parámetros cambian considerablemente, el promedio y mediana es mayor a 1, lo que refleja un aumento en la carga de sedimentos transportados por suspensión, selección muy pobre y la Curtosis tiende a ser mesocúrtica (Figura 3.2a y b).

Finalmente, en el sector María Isabel, los granos gruesos, entre 4 y 0,5 mm son los más abundantes, promedio muy cercano a cero ($X\phi \approx 0$), mediana negativa ($Md\phi = -0,5$; Tabla: 3.1), selección pobre, presencia de cola de finos y mejor selección en el centro, leptocúrtica. Las curvas de frecuencia acumulativa muestran el predominio del transporte de sedimentos por saltación, aumento de los sedimentos finos, indicando una posible depositación de baja energía en el flujo.

A modo de resumen, la carga por tracción transporta en todos los puntos de muestreo representa un tamaño de grano correspondiente a grava (guijarro y granulo). Esta carga predomina en sectores como Lautaro y Elisa, sin embargo, desde Cerrillos a María Isabel, esta población disminuye, incluso en las muestras 160312 se hizo despreciable. La carga por saltación, en Lautaro y Elisa de Bordos, a través del tiempo aumentó llegando a la mitad de los sedimentos en la fecha 160312, la cual indica un tamaño de grano predominante, arena gruesa a media. Aguas abajo, la saltación aumenta siendo predominante en la mayoría de los puntos de muestreo. La

suspensión de aguas arriba a aguas abajo, fue aumentando su carga, transportando principalmente arena fina a muy fina. En Cerrillos y María Isabel la población transportada corresponde a un quinto de muestra, mientras que en Paipote la carga por suspensión disminuye desde un 42% a 10 % de las muestras 080611 y 160312, respectivamente.

3.1.2. Caracterización granulométrica post-aluvión

Las muestras recolectadas posteriormente a las inundaciones aluvionales se obtuvieron en cuatro fechas. La primera campaña de muestreo se desarrolló solo cinco días después de los aluviones (30-03-15), luego se efectuaron dos campañas, la segunda a los veinte días de ocurridos los flujos aluvionales (14-04-15) y una tercera toma de muestras a los cincuenta y cuatro días de ocurridos (18-05-15). Una cuarta campaña de muestreo se desarrolló en el mes de junio de 2017, es decir dos años después de los aluviones (04-06-17).

3.1.2.1. Cinco días después del aluvión (30-03-2015)

En la muestra obtenida agua arriba del Tranque Lautaro, se presenta una curva granulométrica continua, con un truncamiento tracción- saltación en $-0,4 \phi$, y un 7% de muestra transportado por tracción, lo cual indica una disminución en esta población si se compara con las muestras prealuvionales (Tabla 3.3). La población transportada por saltación es predominante con un 70-80% de los sedimentos, truncamiento en $2,4 \phi$ con una curva de pendiente alta (Figura 3.3). La suspensión solo abarca entre 13 y 23 % de la muestra, con gran variabilidad en el tamaño del grano y con una curva de baja pendiente. Esta muestra presenta un aumento en la población por saltación y suspensión con respecto a las muestras prealuvionales, lo que indica un carácter turbulento en el flujo transportado, mientras que antes del evento, esto no se vio reflejado (Figura 3.3).

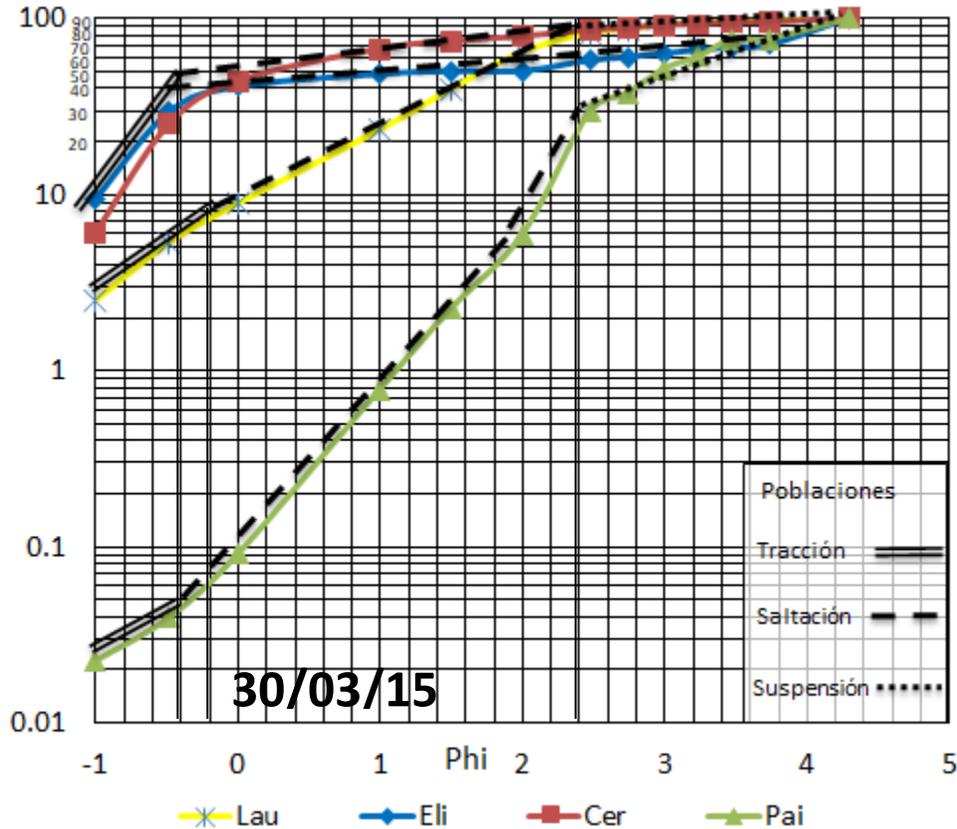


Figura 3.3: curvas granulométricas, muestras 300315. Líneas verticales en negra marcan truncamientos.

Tabla 3.3: Valores numéricos de parámetros granulométricos, tamaño de grano y porcentaje de poblaciones correspondientes a las muestras 300315.

Muestras	Parámetros Granulométricos					Poblaciones					
	Media	Mediana	Selección	Asimetría	Curtosis	Tracción		Saltación		Suspensión	
						Tamaño (ϕ)	% Muestra	Tamaño (ϕ)	% Muestra	Tamaño (ϕ)	% Muestra
Lau-300315	1,71	1,70	1,23	-0,16	1,51	(-1 a -0,4)	7	(-0,4 a 2,4)	70 a 80	(2,4 a 4,3)	13 a 23
Eli-300315	1,83	1,42	1,64	0,16	1,14	(-1 a -0,4)	40	(-0,4 a 3,7)	30	(3,7 a 4,3)	30
Cer-300315	0,95	0,25	1,21	1,32	3,09	(-1 a 0)	50	(0 a 3)	45	(3 a 4,3)	5
Pai-300315	3,06	2,96	0,76	-0,95	4,77	(-1 a -0,4)	0,05	(-0,4 a 2,4)	35	(2,4 a 4,3)	65

La muestra obtenida en el Sector Elisa de Bordos, muestra un pronunciado truncamiento en $-0,4 \phi$, con una población que alcanza el 40% de la muestra que se mueve por tracción, con una curva de pendiente pronunciada, abarcando granulometrías entre -1 a $-0,4 \phi$ (Figura 3.3). La población por saltación presenta una variación en el tamaño de sedimentos bastante amplia que va desde $-0,4$ a $3,7 \phi$ aproximadamente, con pendiente más baja, representando solo el 30% de la muestra (Tabla 3.3). El truncamiento en $3,7 \phi$ es muy marcado, la suspensión muestra una pendiente elevada, mostrando el transporte de sedimentos más finos que representan el 30% de la muestra, bastante mayor si se compara con el 5% obtenido en las muestras prealuvión.

En la muestra recolectada en el sector de Cerrillos se ve una curva granulométrica con un truncamiento abrupto, en cambio las muestras prealuvión eran suaves y casi inexistentes, lo que podría indicar un flujo más turbulento en relación a las muestras recolectadas aguas arriba (Figura 3.3). El transporte de sedimentos por tracción abarca valores entre -1 y 0ϕ y representa una

población que equivale al 50% de la muestra, mientras que antes del 25M el transporte por tracción prácticamente no existía (Tabla 3.3). En marzo del 2015, la población que se transporta por saltación representa el 45%, que va de 0 a 3 ϕ , en donde el truncamiento es muy sutil hacia la población en suspensión que solo representa el 5% (Figura 3.3), valor bajo en comparación con muestras prealuvión que poseen un 20% en esta población.

La muestra recolectada en el sector de Paipote presenta una pendiente más elevada en relación a la recolectada en Cerrillos, y con un truncamiento gradual entre tracción y saltación a los -0,4 ϕ . La población en tracción representa el 0,05% de la muestra, mientras que la población en saltación, que abarca valores de -0,4 a 2,4 ϕ , representa el 35% (Figura 3.3). El transporte por suspensión está representado notoriamente por un 65% de la muestra, con una curva granulométrica que indica un cambio muy rápido en la granulometría, aumentando los sedimentos finos (Figura 3.3). En muestras prealuvión no había escorrentía en el cauce del río ni en la Quebrada Paipote, sedimentos muy influenciados por el viento y factores antrópicos, lo que refleja en parte el menor porcentaje de sedimentos finos (Figura 3.1).

En la Figura 3.4 se grafican los parámetros estadísticos obtenidos de las muestras recolectadas a cinco días de ocurridos los aluviones. Los parámetros como la media y mediana, en sectores como Lautaro y Elisa de Bordos, presentan valores cercanos a 1,7 ϕ , límite entre sedimentos gruesos y finos, pobremente seleccionada, Leptocúrtica y la asimetría varía de levemente negativa a levemente positiva, lo que refleja un leve aumento de sedimentos finos en Elisa, coincidiendo con frecuencias acumulativas que denotan mayor presencia de sedimentos de tamaño fino (30%, Figura 3.3). Las muestras prealuvión, en cambio, indican medias y medianas negativas, lo que refleja las bajas concentraciones de sedimentos finos (<5%, Figura 3.1).

En Cerrillos los rangos de grano predominante son en general más gruesos (Figura 3.3) que aguas arriba, entre 1,5 y 0,5 mm, pobremente seleccionados, con asimetría muy positiva (cola de finos) y muy leptocúrtica (mejor selección en el centro, figura 3.4). Sin embargo, parámetros como la media y mediana son más altos en esta fecha si se comparan con fechas prealuvión, lo que refleja una concentración mayor de sedimentos finos suspendidos en el fluido.

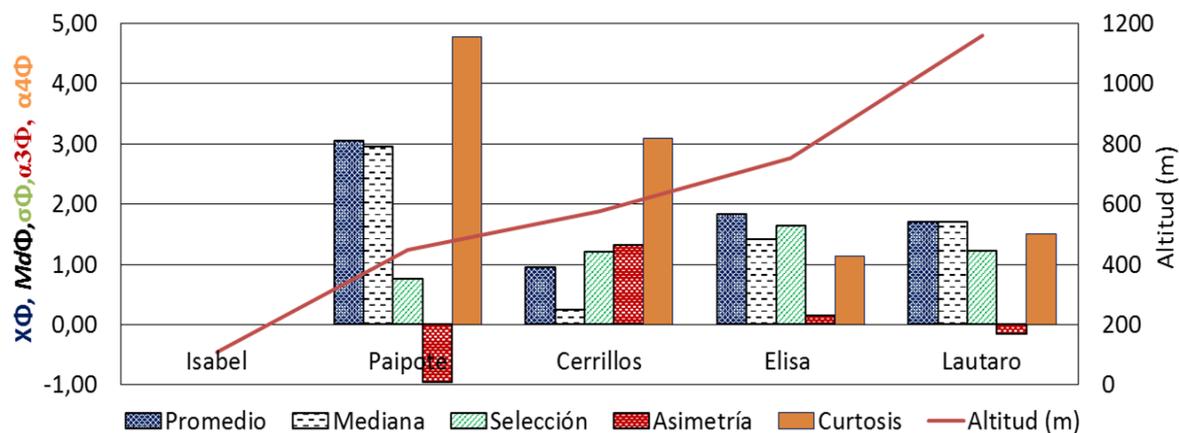


Figura 3.4: Gráfico con parámetros granulométricos para las muestras 300315.

En Paipote, la distribución granulométrica cambia y el rango de grano más fino aumenta (90 % de la muestra, figura 3.3) comparado con los otros puntos localizados aguas arriba. Los parámetros cambian considerablemente, selección moderadamente buena, presencia de gruesos muy marcada (asimetría negativa) y la Curtosis tiende a ser extremadamente leptocúrtica (Figura 3.4). Estos parámetros reflejan un claro aumento y predominancia de los sedimentos finos

suspendidos en el fluido, muy opuesto a las muestras prealuvión del sector donde dominaban sedimentos más gruesos.

Dada la condición de emergencia y escasa conectividad durante este periodo de muestreo, para esta fecha no se cuenta con muestras para el sector de María Isabel.

1.2.2 veinte días después del aluvión (14-04-2015)

Luego de veinte días de ocurridos los aluviones, la muestra recolectada aguas arriba del Tranque Lautaro posee un marcado transporte por tracción hasta 1ϕ , y con una pendiente baja (4% de la muestra). El transporte por saltación presenta una pendiente alta, va de 1 a $3,5 \phi$, abarcando un 36 % del total de sedimentos de la muestra. Finalmente, la suspensión se aprecia bien marcada, con baja pendiente, entre $2,5$ a $4,3 \phi$ que corresponden a los sedimentos más finos 60 %, lo que es un indicio de que el flujo es de alta energía (Figura 3.5). Con respecto a lo prealuvional, se agudiza la diferencia, disminuye aún más la tracción, disminuye la saltación, pero aumenta considerablemente la suspensión.

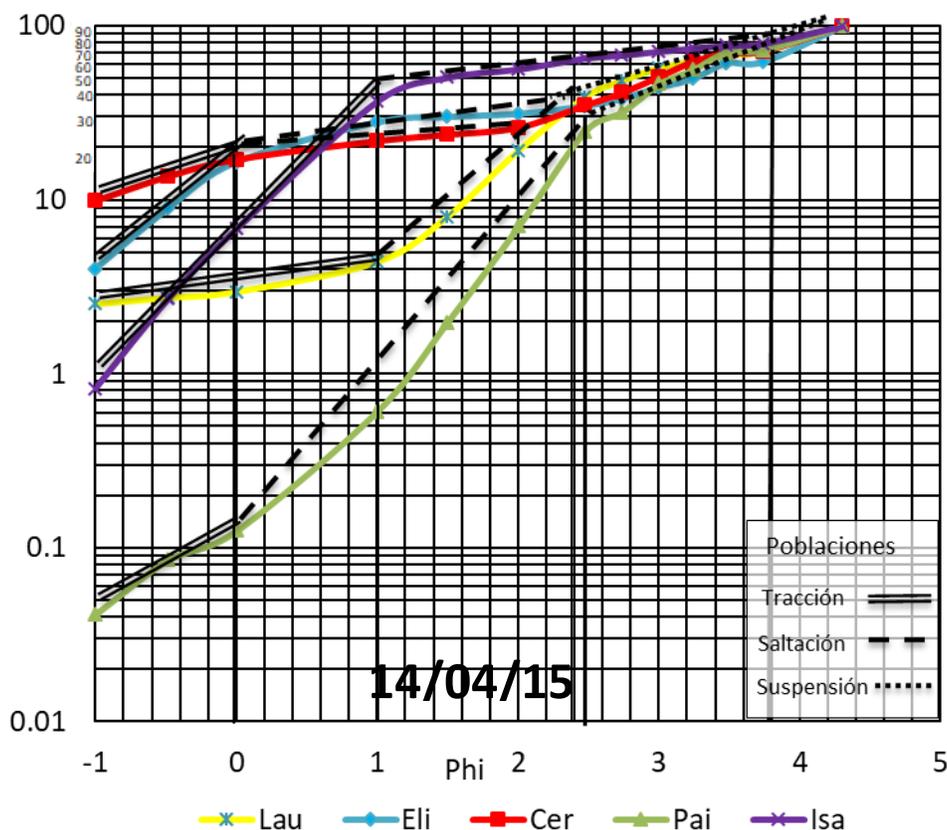


Figura 3.5: curvas granulométricas, muestras 140415. Líneas verticales en negra marcan truncamientos.

Tabla 3.4: Valores numéricos de parámetros granulométricos, tamaño de grano y porcentaje de poblaciones correspondientes a las muestras 140415.

Parámetros Granulométricos						Poblaciones					
Muestras	Media	Mediana	Selección	Asimetría	Curtosis	Tracción		Saltación		Suspensión	
						Tamaño (ϕ)	% Muestra	Tamaño (ϕ)	% Muestra	Tamaño (ϕ)	% Muestra
Lau-140415	2,86	2,77	0,98	-1,20	4,36	(-1 a 1)	4	(1 a 2,5)	36	(2,5 a 4,3)	60
Eli-140415	2,53	3,23	1,55	-0,67	1,62	(-1 a 0)	15	(0 a 2,4)	25	(2,4 a 4,3)	60
Cer-140415	2,58	2,96	1,41	-0,79	2,04	(-1 a 0)	20	(0 a 2,4)	20	(2,4 a 4,3)	60
Pai-140415	3,13	3,08	0,75	-1,08	4,91	(-1 a 0)	menor a 1	(0 a 2,4)	30	(2,4 a 4,3)	70
Isa-140415	1,72	1,46	1,55	0,24	1,28	(-1 a 1)	50	(1 a 3,8)	30	(3,8 a 4,3)	20

En la muestra de Elisa de Bordos la carga de sedimentos transportados por tracción va de -1 a 0ϕ , con un porcentaje de muestra del 15%, disminuyendo considerablemente en relación con la de cinco días después del evento. La población de saltación se ve más prolongada a lo largo de la curva granulométrica, llegando a un 25% de la muestra, con un valor de truncamiento $2,4 \phi$, un tamaño correspondiente arena fina (Figura 3.3; Tabla 3.4). La suspensión de esta muestra es muy similar a la de Lautaro a veinte días del evento, con la diferencia que en Elisa hay un mayor porcentaje de sedimentos finos transportados, correspondientes a un 60%, aumenta el sedimento fino en relación con la muestra a cinco días del evento, y con mayor razón con respecto a las prealuvión.

La muestra recolectada en el sector Cerrillos posee una curva granulométrica gradual, donde el truncamiento en 0ϕ es sutil. La población de tracción abarca un 20% de la muestra con una pendiente baja, mostrando una disminución considerable respecto a la después de tres días. La población en saltación representa el 20% de la muestra hasta $2,4 \phi$, con una baja pendiente. La población en suspensión ($>2,4 \phi$, tabla 3.4) representa un 60% de la muestra, la cual aumenta en relación a la muestra de cinco días después del evento (Tabla 3.3).

En el sector Paipote la muestra recolectada presenta más del 95% de sedimentos finos ($<0,25 \text{ mm}$). La población en tracción es inferior al 1% y llega hasta 0ϕ . La población en saltación representando el 30% de los sedimentos, con una pendiente alta. La población en suspensión es la que predomina con el 70%, y se expresa una pendiente baja con una granulometría entre $2,4$ y $4,3 \phi$ (Tabla 3.4). En relación a la muestra cinco días después del aluvión, la curva granulométrica no presenta cambios en sus poblaciones.

En la muestra recolectada en el Sector María Isabel la curva granulométrica presenta truncamientos bien definidos La población en tracción llega hasta 1ϕ , con pendiente alta que corresponde a un 50 % de muestra. La saltación posee una pendiente más baja, 30% de los sedimentos y un truncamiento superior en $3,8 \phi$. Finalmente en el último tramo de la curva, la pendiente aumenta, la suspensión transporta el sedimento más fino $3,8$ a $4,3 \phi$, que corresponde al 20% de los sedimentos (Tabla 3.3).

En la Figura 3.6 se grafican los parámetros estadísticos obtenidos de las muestras recolectadas veinte días después de ocurridos los aluviones. Los valores del promedio y la media son similares para todas las muestras, con la excepción de aquella recolectada en el sector de María Isabel, con valores que indican mayor presencia de sedimentos gruesos. La selección varía desde moderada en el sector del Tranque Lautaro a pobre en Elisa de Bordos y Cerrillos, para ser moderadamente buena en el sector de Paipote y finalmente pobre en el sector de María Isabel. La asimetría es en general negativa para todas las muestras, con excepción en María Isabel que es positiva ($\alpha_3 \phi = 0,24$). La asimetría es muy negativa en Lautaro y Paipote, con valores entre $-1,2$ y $-1,1$, mientras que en Elisa de Bordo y Cerrillo la asimetría es negativa, pero con valores >-1 , lo que refleja una leve presencia de sedimentos más gruesos.

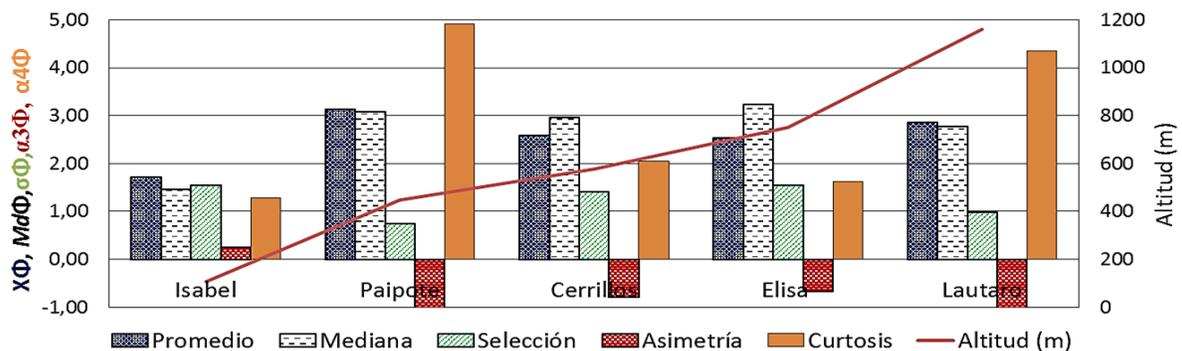


Figura 3.6: Gráfico con parámetros granulométricos para las muestras 140415.

La Curtosis indica una condición extremadamente leptocúrtica para las muestras obtenidas en el Sector Tranque Lautaro y en Paipote, mientras que para las muestras obtenidas en los otros puntos la Curtosis indica una condición leptocúrtica de menor cuantía. Claramente en esta fecha, a lo largo de la cuenca hay una mayor presencia de sedimentos finos en relación a las muestras prealuvión y a la muestra cinco días después del evento.

3.1.2.3 54 días después de los aluviones (18-05-2015)

La muestra de Lautaro presenta una curva con un marcado transporte por tracción, 25% de la muestra, valor que aumentó en comparación a los veinte días postaluvión y con una pendiente alta hasta $-0,4 \phi$. La saltación abarca el 20 %, valor que disminuyó en relación a las muestras recolectadas cinco y veinte días después de los aluviones. Presenta un truncamiento sutil en $2,3 \phi$ y una pendiente baja. La suspensión predomina con un transporte del 55% de la muestra, bastante similar a la fecha anterior (Figura 3.7), pero muy por encima de la de cinco días después del evento.

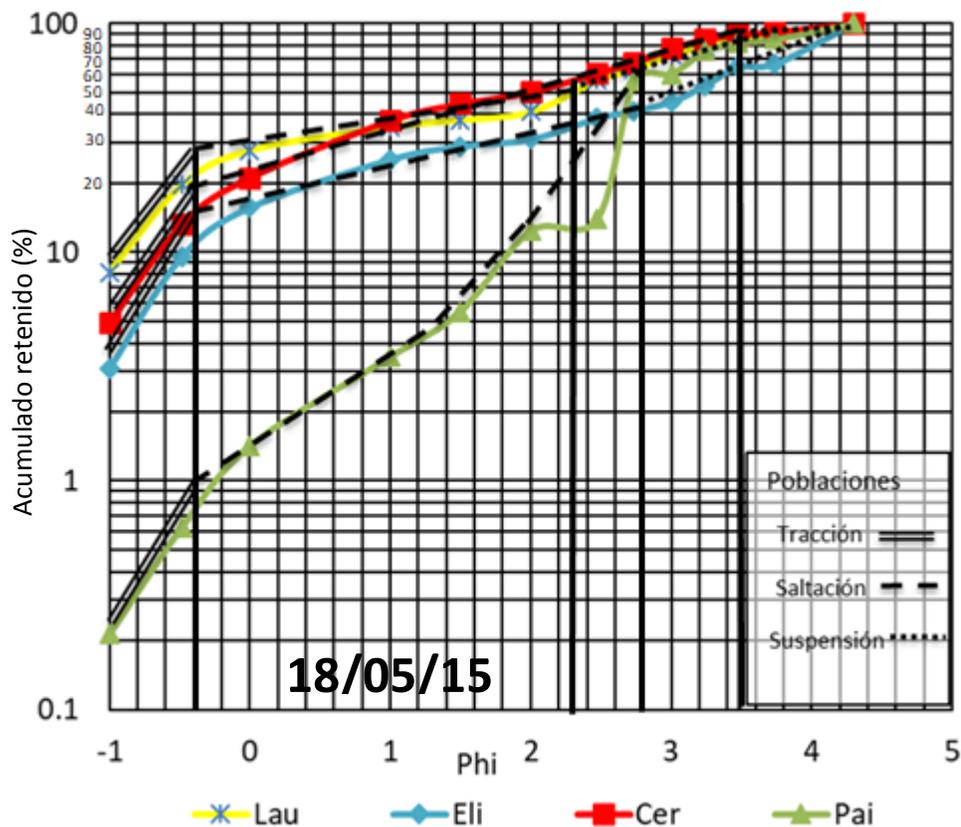


Figura 3.7: curvas granulométricas, muestras 180515. Líneas verticales en negra marcan truncamientos.

Tabla 3.5: Valores numéricos de parámetros granulométricos, tamaño de grano y porcentaje de poblaciones correspondientes a las muestras 180515.

Parametros Granulométricos						Poblaciones					
Muestras	Media	Mediana	Selección	Asimetría	Curtosis	Tracción		Saltación		Suspensión	
						Tamaño (ϕ)	% Muestra	Tamaño (ϕ)	% Muestra	Tamaño (ϕ)	% Muestra
Lau-180515	1,99	2,26	1,45	-0,15	1,42	(-1 a -0,4)	25	(-0,4 a 2,3)	20	(2,3 a 4,3)	55
Eli-180515	2,54	3,13	1,53	-0,69	1,67	(-1 a -0,4)	15	(-0,4 a 2,8)	30	(2,8 a 4,3)	55
Cer-180515	1,78	1,98	1,45	0,09	1,37	(-1 a -0,4)	20	(-0,4 a 3,5)	70	(3,5 a 4,3)	10
Pai-180515	2,88	2,69	0,88	-1,11	4,86	(-1 a -0,2)	1,5	(-0,2 a 2,8)	58,5	(2,8 a 4,3)	40

La curva granulométrica de Elisa de Bordos, es muy similar a la de Lautaro, presenta los mismos valores de truncamiento entre tracción y saltación, pero la diferencia esta que el porcentaje de muestra transportado por tracción es un 15%, saltación un 30 %, y la suspensión con un 55% (Tabla 3.5). Estas dos curvas indican flujos turbulentos, ya que los truncamientos asociados a las distintas poblaciones, son sutiles. El truncamiento entre saltación-suspensión es $2,8 \phi$ (Figura 3.7; Tabla 3.5).

En Cerrillos la curva granulométrica posee el truncamiento tracción-saltación marcado en $-0,4 \phi$, la carga por tracción corresponde a un 20 % de la muestra, disminuye comparada con la muestra recolectada el 30 de marzo de 2015, presenta pendiente alta. El transporte de sedimentos por saltación aumenta en relación a muestras postaluvión anteriores, con un 70% de la muestra. La suspensión influye en el 10% más fino de los sedimentos, truncamiento gradual en $3,5 \phi$ (Figura 3.7).

En Paipote, la carga por tracción es un 1,5 % de la muestra sedimentos gruesos, hasta $-0,2 \phi$ (arena gruesa); La saltación vuelve a ser la población predominante, 58,5% de los sedimentos en Paipote, pendiente alta, con quiebres que indican un aumento en el porcentaje en tamaños de granos correspondiente a arena fina, hasta el truncamiento bien marcado en $2,8 \phi$. La carga por suspensión es un 40% de la muestra entre $2,8$ a $4,3 \phi$, arena muy fina (30%) a limo grueso (10%) (Tabla 3.4). De acuerdo a la Figura 3.7, los valores de saltación y suspensión se invierten en comparación a muestras postaluvión anteriores.

En la Figura 3.8 se observa los parámetros estadísticos obtenidos de las muestras 54 días después de las inundaciones aluvionales. Los valores del promedio van en aumento de este a oeste (2 a 2,8), la mediana ($Md \phi$) va entre 2 y 3,2, lo que refleja un porcentaje mayor de sedimentos finos sobre los gruesos. La selección también disminuye de este a oeste, de pobre a moderadamente seleccionada. La asimetría presenta valores negativos, disminuyendo de este a oeste salvo en cerrillos, el cual presenta un valor más bien simétrico. Paipote en cambio, presenta un valor muy negativo, indicando que la presencia de sedimentos gruesos existe, pero que es muy inferior en comparación a los finos (figura 3.8). La curtosis entre Lautaro y Cerrillos son valores entre 1,3 y 1,7, condición leptocúrtica, excepto en Paipote, donde la curtosis aumenta a 4,9 lo que significa una condición extremadamente leptocúrtica.

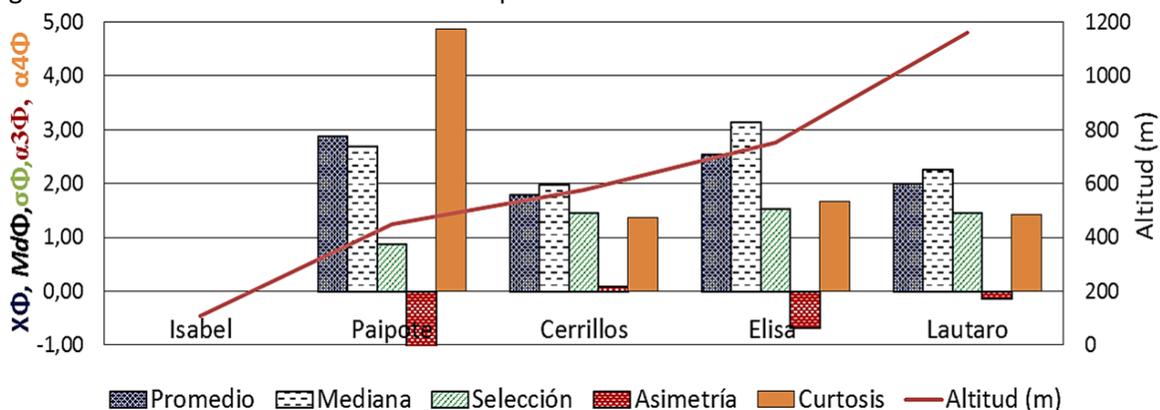


Figura 3.8: Gráfico con parámetros granulométricos para las muestras 180515.

En relación a la fecha postaluvión anterior, hay una disminución de los sedimentos finos, reflejado en la disminución de la media y mediana en los puntos de Lautaro y Cerrillos. En el primer punto, el porcentaje de finos se reduce de un 80 a un 40% y en el segundo de un 70-75% a un 50% (Figuras 3.4 y 3.6). Mientras que en Elisa de Bordos y Paipote el porcentaje de sedimentos

finos se mantienen similares a fechas anteriores, evidenciado en la leve disminución de los parámetros mencionados.

3.1.2.4 Dos años después de los aluviones (04-06-2017)

La población por tracción disminuye en la muestra Lautaro en relación a su antecesora, Lau-180515, de un 25% a un 10% de la muestra, con una curva granulométrica con truncamientos graduales, y carga por tracción hasta 0 ϕ (Figura 3.9). Al comparar las poblaciones de saltación y suspensión con Lau-180515 los valores se invierten, la saltación abarca un 60% de los sedimentos, de 0 a 3,4 ϕ ; la carga por suspensión transporta el 30% de los granos más finos. Los truncamientos son muy sutiles, lo que indica un flujo turbulento (Figura 3.9).

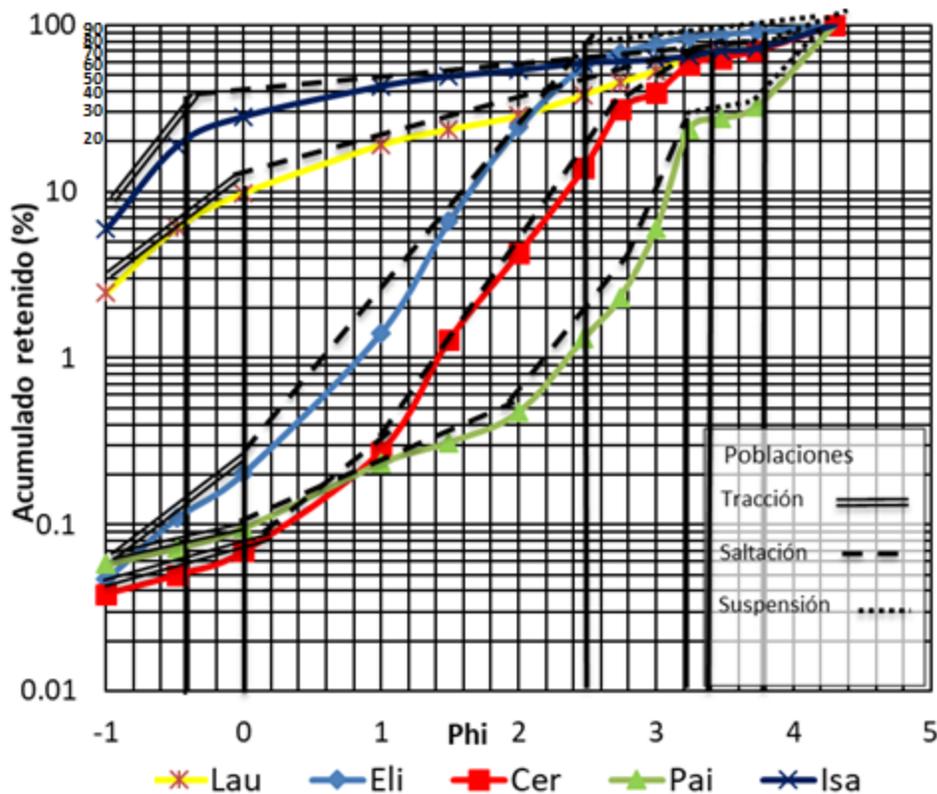


Figura 3.9: curvas granulométricas, muestras 040617. Líneas verticales en negra marcan truncamientos.

Tabla 3.6: Valores numéricos de parámetros granulométricos, tamaño de grano y porcentaje de poblaciones correspondientes a las muestras 040617.

Muestras	Parámetros Granulométricos					Poblaciones					
	Media	Mediana	Selección	Asimetría	Curtosis	Tracción		Saltación		Suspensión	
						Tamaño (ϕ)	% Muestra	Tamaño (ϕ)	% Muestra	Tamaño (ϕ)	% Muestra
Lau-040617	2,57	2,91	1,40	-0,78	2,05	(-1 a 0)	10	(0 a 3,4)	60	(3,4 a 4,3)	30
Eli-040617	2,65	2,38	0,83	-1,03	5,40	(-1 a 0)	menor a 1	(0 a 2,5)	70	(2,5 a 4,3)	30
Cer-040617	3,24	3,12	0,70	-1,20	4,95	(-1 a -0,4)	menor a 1	(-0,4 a 3,4)	70	(3,4 a 4,3)	30
Pai-040617	3,68	3,91	0,35	-2,00	5,00	(-1 a 0,2)	menor a 1	(0,2 a 3,2)	25	(3,2 a 4,3)	75
Isa-040617	1,89	1,60	1,65	0,09	1,13	(-1 a -0,4)	40	(-0,4 a 3,8)	40	(3,8 a 4,3)	20

En Elisa la carga por tracción disminuye en comparación a la fecha anterior, siendo despreciables, ya que no alcanza el 1% de la muestra. Si se compara con Elisa de Bordos cincuenta y cuatro días después del evento, la saltación aumenta de un 30% a un 70% desde 0 a 2,5 ϕ , gran distribución del tamaño de grano (Tabla 3.6). En cambio, la suspensión solo transporta el 30 % de

los sedimentos, disminuye en relación a Eli-180515, presentan una pendiente baja, en donde los sedimentos más finos como limo grueso, son poco predominantes en la muestra (Figura 3.9).

Cerrillos posee los mismos porcentajes para cada población que en Elisa, la diferencia está en un 10% más de sedimentos finos presentes en la muestra (Tabla 3.6). Esta observación, se respalda al comparar con muestras anteriores la tracción disminuye (<1%), y la suspensión aumenta (30%, Figura 3.9).

En Paipote los truncamientos son bien marcados, con una población de tracción menor al 1%. Respecto a Paipote cincuenta y cuatro días después del evento, la carga por saltación y suspensión se invierten por segunda vez. La primera posee un 25% de la muestra, con valores de 0,2 a 3,2 ϕ (Tabla 3.5), pendiente alta y con un quiebre, lo que puede indicar que la energía del flujo iba disminuyendo, y suspensión (Figura 3.9). La segunda representa el 75% de los sedimentos, 25% de arena muy fina y 50% de limo.

En María Isabel, Isa-040617 comparada con Isa-140415, disminuye su carga por tracción, 40% de la muestra, y aumentan los sedimentos finos y con ello la carga por saltación a un 40%. La suspensión transporta los sedimentos más finos, 3,8 a 4,3 ϕ correspondientes a limo grueso, abarcando un 20 % de la muestra (Tabla 3.6).

En la figura 3.10 los parámetros granulométricos de las muestras postaluvión presentan una clara disminución en el tamaño de grano de este a oeste, donde el sedimento más fino abarca un porcentaje mayor a medida que nos acercamos a zonas más pobladas. Entre Lautaro y Paipote los valores del promedio van en aumento desde 2,6 a 3,7, lo mismo sucede con la mediana, valores entre 2,9 a 3,9. La selección va desde pobre a muy bien seleccionada, la asimetría es más negativa de este a oeste, reflejando que los sedimentos gruesos disminuyen, y la curtosis va entre muy leptocúrtica a extremadamente leptocúrtica. Condiciones que no se ven reflejadas en María Isabel, ya que los parámetros en este punto exhiben un aumento en el tamaño de grano. El promedio y la mediana reflejan valores más cercanos a sedimentos gruesos, aunque la presencia de sedimentos finos también es un porcentaje considerable, 40-50% de la muestra (Figura 3.9). Pobrementemente seleccionada, simétrica y mesocúrtica. Características muy similares se aprecian en los parámetros de la muestra 180515, sin embargo, el porcentaje de sedimentos finos es mayor en la muestra del año 2017.

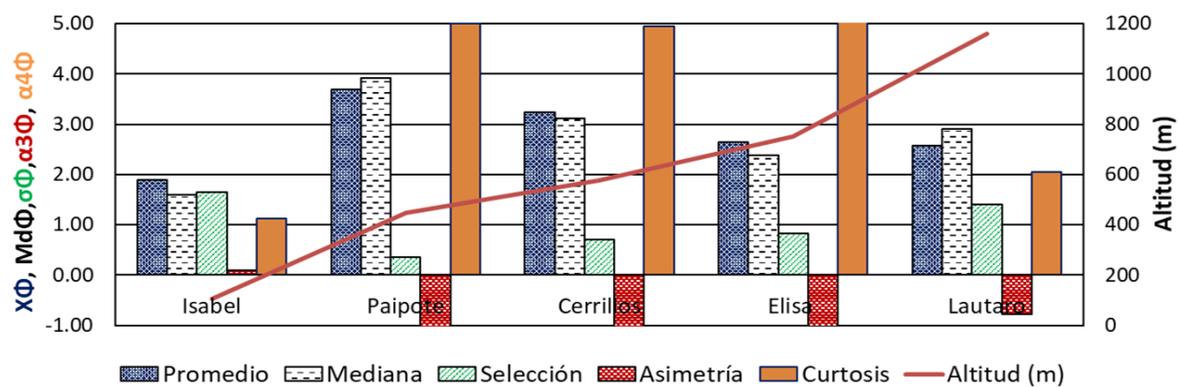


Figura 3.10: Gráfico con parámetros granulométricos para las muestras 040617.

3.2 Caracterización geoquímica de los sedimentos del Río Copiapó

3.2.1. Elementos mayores y trazas

Se grafican por punto de muestreo las concentraciones de los elementos presentes en las dieciocho muestras de sedimentos fluviales < 0,075mm recolectados luego de ocurrido los aluviones de marzo de 2015 (Figura 3.11). En esta figura se exponen las concentraciones de la corteza continental y la unidad geológica “Main Andesites” (25°30’S – 35°00’S), llamada así en el estudio de Oyarzun et al., 2016 que corresponde al volcanismo sedimentario del mesozoico (Figura 2.1). Además se exponen los Factores de enriquecimiento de las 18 muestras (Anexo II), calculados en relación a las concentraciones de la corteza continental (Rudnick et al., 2003) y a la unidad “Main Andesites” (Oyarzun et al., 2016).

En la figura 3.11 se observa el patrón composicional de las dieciocho muestras de este estudio. El propósito de exponer las curvas geoquímicas es ver similitudes y diferencias entre los distintos puntos de muestreo y comparar entre fechas. Se observa que las concentraciones en los elementos mayores tales como SiO₂, Al₂O₃, FeO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, TiO₂, P₂O₅, y MnO presentan variaciones entre 45-55%; 13-16%; 6-12%; 2-3%; 7-11%; 2-3%; 1,5-2%; 1-1,6%; 0,2-0,3%; y 0,1-0,15% respectivamente. Valores que al parecer son similares, se verifican al calcular y comparar los factores de enriquecimiento entre las distintas fechas. Según el Anexo II los valores del FE de estos elementos son semejantes entre fechas y puntos de muestreo, van entre 1 y 2, lo que refleja que las muestras representan la composición de la corteza continental en cuanto a los elementos mencionados. Hay excepciones como el Mg que presenta un factor de enriquecimiento similar en todas las fechas con valores de FE cercanos a 0,6, lo cual quiere decir que las muestras están empobrecidas en este elemento con respecto a la corteza continental. Para el Ti y el P ocurre lo contrario, es decir las muestras están más enriquecidas en estos elementos. La unidad “Main Andesites” puede estar enriqueciendo a los sedimentos activos del Río Copiapó, ya que contiene concentraciones de estos dos elementos similares a las muestras.

Con respecto a las concentraciones observadas en los elementos traza tales como Sc, Ba, Co, Cs, Ga, Nb, Rb, Sn, Sr, Ta, Th, U, V, W, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Mo, Zn, Ni, Cd, Sb, Bi, Ag, y Au presenta concentraciones similares en todos los puntos de muestreo, con rangos de valores que se adjuntan en la siguiente tabla.

Tabla 3.7: Comparación de concentraciones de elementos traza con valores de la Corteza Continental (Cc: Corteza continental). Color celeste marca concentraciones de elementos trazas mayores a los registrados en la Corteza continental.

Elemento Traza	Rango ppm	C.c. ppm	Elemento Traza	Rango ppm	C.c. ppm	Elemento Traza	Rango ppm	C.c. ppm
Sc	15-19	21,9	W	1-2	1	Tm	0,3-0,7	0,3
Ba	430-650	456	Y	21-40	21	Yb	2-4	2
Co	16-25	26,6	La	23-41	20	Lu	0,3-0,8	0,31
Cs	4-10	2	Ce	48-87	43	Mo	1-2,5	0,8
Ga	14-18	17,5	Pr	6-10	4,9	Zn	90-200	72
Nb	8-13	8	Nd	22-40	20	Ni	15-40	59
Rb	50-81	49	Sm	5-8	3,9	Cd	0,2-0,4	0,09
Sn	1-5	1,7	Eu	1-1,5	1	Sb	0,2-1	0,4
Sr	370-470	320	Gd	4-6	4	Bi	0,2-0,5	0,16
Elemento Traza	Rango ppm	C.c. ppm	Elemento Traza	Rango ppm	C.c. ppm	Elemento Traza	Rango ppm	C.c. ppm
Ta	0,7-1	0,9	Tb	0,6-1	0,7	Ag	0,05-0,7	53

Th	7-15	5,6	Dy	4-5	3,9	Au	0,001-0,03	0,0015
U	2-4	1,3	Ho	0,8-1,5	0,83	As	8-30	2,5
V	120-300	138	Er	2-4	2,3	Pb	12-38	11
Zr	150-1040	132	Hf	4-22	3,7	Cu	110-620	28
Hg	0,005-0,7	0,03						

Al comparar el rango de las concentraciones de los elementos traza presentes en las muestras se verifica que estos valores representan la composición de la corteza continental, lo que se verifica también con los valores de los factores de enriquecimiento, cuáles que al igual que en los elementos mayores, los trazas presentan FE entre 1 y 2 (Anexo II). Sin embargo hay excepciones como el circonio, cobre, y arsénico que presentan concentraciones mayores a valores propios de la corteza continental en más de un orden de magnitud (Figura 3.11; Tabla 3.7; y Anexo II).

El circonio registra concentraciones cercanas a 823 y 1040 ppm en las muestras pertenecientes al sector de Lautaro a cinco y a cincuenta y cuatro días del aluvión respectivamente.

El cobre y el arsénico registran en todas las muestras concentraciones muy superiores a la corteza continental (Figura 3.11; Tabla 3.7; Anexo II).

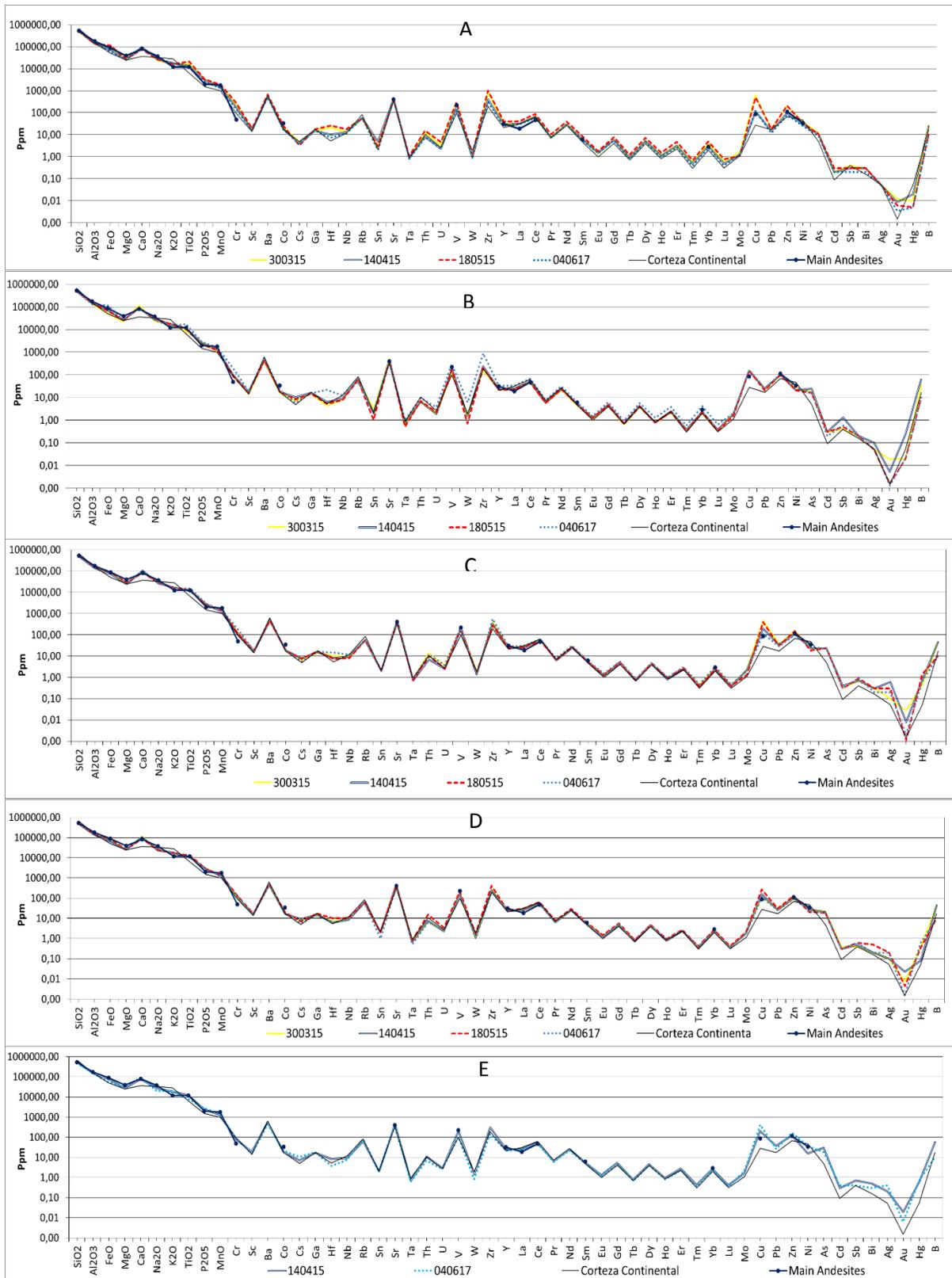


Figura 3.11: Concentraciones de elementos mayoritarios, y trazas para las muestras postaluvión en el cauce del Río Copiapó. Puntos de Muestreo: A) Lautaro, B) Elisa de Bordos, C) Cerrillos, D) Paipote, y E) María Isabel.

3.2.2. Metales pesados (Cu, Pb, Hg) y arsénico (As)

En este subcapítulo se exponen las variaciones de concentración de Cu, Pb, As, y Hg en los sedimentos activos a lo largo del cauce del Río Copiapó, antes y después de ocurridos las inundaciones aluvionales de marzo de 2015. Los datos expuestos son de doce muestras recolectadas cada mes entre mayo 2011 y abril 2012, que representan la situación prealuvión durante un año (Rojos, 2016). El escenario postaluvión se muestra partir de dieciocho muestras recolectada en cuatro fechas (30/03/2015, 14/04/15, 18/05/15 y 04/06/17. Ver Anexo II).

3.2.2.1 Caracterización geoquímica prealuvión, Cobre (Cu)

Aguas arriba del Tranque Lautaro, los valores de cobre antes de la inundación aluvional muestran una gran dispersión, con valores que fluctúan entre 48 ppm y 4340 ppm, pero con un rango de valores más acotado entre 50 y 130 ppm de cobre (Figura 3.12a). Solo la muestra recolectada en mayo 2011 presenta valores un orden de magnitud mayor (4340 ppm). Aguas abajo, en el punto localizo en el sector Elisa de Bordo, los valores de cobre en los sedimentos se concentran entre 120 y 220 ppm de cobre, volviendo a mostrar valores un orden de magnitud más alta la muestra recolectada en mayo 2011 (1240 ppm; Figura 3.12a). En Cerrillos y Paipote las muestras prealuvión tienen valores de cobre en general más altos en relación a las muestras recolectadas aguas arriba (Figura 3.12a). Mientras que en Cerrillo es amplio el rango de valores de cobre (320 a 2440 ppm). Las concentraciones en Paipote muestran menor dispersión, con un rango más restringido entre 720 y 1180 ppm. En María Isabel los valores son en general menores, con una dispersión que fluctúan entre 30 y 220 ppm, aunque la muestra de mayo 2011 vuelve a mostrar más altos valores de cobre, alcanzando los 744 ppm (Figura 3.12a).

A partir de las muestras pre-aluvionales se puede identificar una tendencia a lo largo del valle del Copiapó que da cuenta de que las concentraciones de Cu tienden a incrementar, donde el río es efímero y la actividad minera es más importante, en el sector entre Cerrillos y Paipote.

3.2.2.2 Caracterización geoquímica postaluvión, Cobre (Cu)

Los valores de cobre en las muestras postaluvionales recolectadas en el Tranque Lautaro están dentro del rango de las medidas efectuadas en las muestras prealuvionales, con excepción de la muestra de mayo de 2011(Figura 3.12a). La muestra recolectada cinco días después de ocurrido los aluviones presenta altos valores con 622 ppm de cobre, mientras que la muestra recolectada 20 días después solo alcanzan los 113 ppm de cobre (Figura 3.12a). En la muestra recolectados 54 días después nuevamente aumentan los valores de cobre a 489 ppm. Finalmente, en junio de 2017, es decir dos años después de los aluviones, los valores de cobre bajan a 120 ppm. En Elisa de Bordos los valores postaluvión son similares entre sí (152-163 ppm) y se mantienen en el rango de los valores medidos en las muestras prealuvionales, aunque nuevamente con la excepción de la muestra de mayo de 2011 (Figura 3.12a). En Cerrillos, las muestras en general poseen menores contenidos de cobre que las prealuvionales, con rangos de 112 a 450 ppm (Figura 3.12a). En Paipote está diferencia se marca aún más, las muestras postaluvión poseen significativamente menores ppm de cobre que las prealuvión, con un rango entre 110 y 250 ppm. Cabe destacar, que en este caso los valores fueron incrementando durante el año 2015, pero en el año 2017, los valores de cobre descienden a 112 ppm (Figura 3.12a). En María Isabel la muestra recolectada 5 días después de los aluviones tiene 200 ppm de cobre, mientras que en la de junio de 2017 el valor aumenta a 422,1 ppm, superando a las concentraciones de las muestras prealuvionales, con excepción de la muestra de mayo de 2011 (Figura 3.12a). En las concentraciones post-aluvionales presentan periodos de enriquecimiento y

empobrecimiento, el cual por un lado podría explicarse por cambios climáticos, relacionados a variaciones en la proveniencia y modos de transporte luego del evento 25 M 2015.

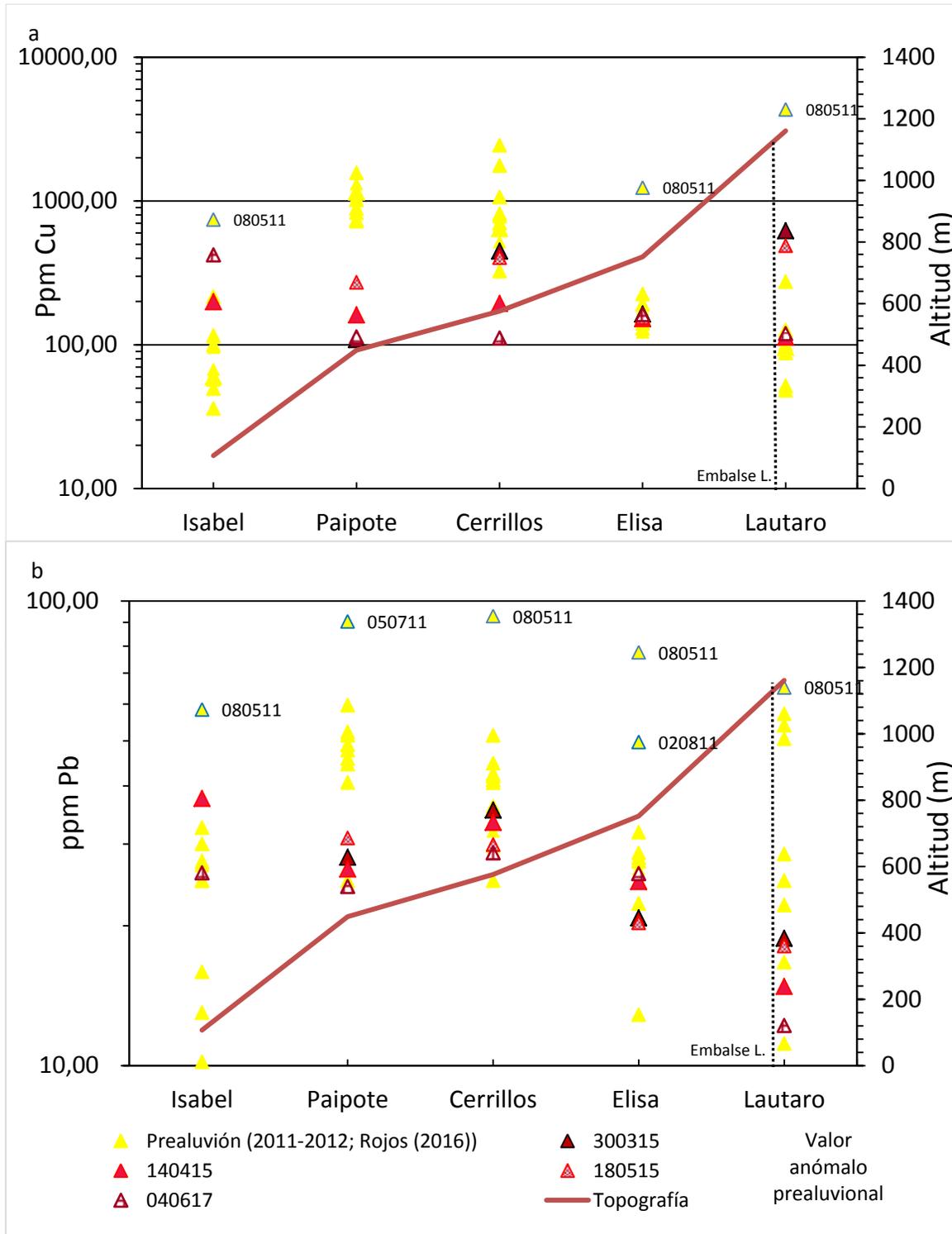


Figura 3.12: Distribución espaciotemporal, concentraciones de Cu (a), y Pb (ppm) (b) en las muestras de sedimentos recolectados en cinco puntos del Rio Copiapó. Los Triángulos amarillos son muestras prealuvión y los rojos corresponden a muestras postaluvión.

3.2.2.3 Caracterización geoquímica prealuvión, Plomo (Pb)

En el caso del plomo, en el Tranque Lautaro se observan valores que varían entre 11 y 65 ppm para las muestras prealuvionales (Figura 3.12b). Las ocho muestras de otoño-invierno-primavera presentan valores bajos en plomo, de entre 10 y 30 ppm, con excepción de la muestra de mayo 2011 (65 ppm). Las muestras de verano (diciembre-enero-febrero) presentan valores más altos, de entre 50 y 65 ppm de plomo. En Elisa de Bordos, los ppm de plomo presentan en general un rango más alto que el punto anterior (12-31 ppm de plomo; Figura 3.12b). Dos muestras se escapan de este rango, la muestra de agosto 2011 (50 ppm) y nuevamente la muestra de mayo de ese mismo año (78 ppm). En las muestras prealuvión recolectadas en Cerrillos y Paipote los valores de plomo son más altos en relación con las muestras recolectadas aguas arriba (Tranque Lautaro y Elisa de Bordos), con rangos de entre 25 y 60 ppm (Figura 3.12b), con la excepción de las muestras recolectadas en los meses de mayo y julio 2011, en los puntos de Cerrillos y Paipote respectivamente (92 y 90 ppm). En María Isabel los valores descienden con respecto al punto localizados aguas arriba, fluctuando entre 10 y 33 ppm de plomo, donde nuevamente la muestra recolectada en mayo de 2011 se escapa de ese rango con un valor de 58 ppm.

En general se observa una tendencia de este a oeste donde las concentraciones de Pb tienden a incrementar aguas abajo. Se observan dos enriquecimientos puntuales, uno correspondiente a Lautaro donde las más altas concentraciones corresponden a muestras tomadas en épocas de verano, donde probablemente estas se relacionan a factores climáticos mencionados en Rojas (2016). El otro es similar al cobre en Cerrillos y Paipote, donde las concentraciones prealuvión son más altas en relación a los otros puntos de muestreo.

3.2.2.4 Caracterización geoquímica postaluvión, Plomo (Pb)

Las concentraciones de plomo en muestras postaluvión del sector del Tranque Lautaro, se encuentra en el rango más bajo de las muestras prealuvionales, con valores de entre 12 y 19 ppm, es decir en el rango de aquellas recolectadas durante otoño-invierno-primavera del periodo 2011-2012 (Figura 3.12b). En Elisa de Bordos los valores aumentan a un rango de 20-26 ppm en comparación con Tranque Lautaro, indicando que los contenidos de plomo siguen la tendencia de aumento aguas abajo, similar a la observada en las muestras prealuvionales (Figura 3.12b).

El contenido de plomo en las muestras postaluvión, Cerrillos (29-35 ppm) y Paipote (24-31 ppm), están dentro del rango de las prealuvionales, pero en este último punto, la tendencia es a la disminución (Figura 3.12b). En ambos puntos de muestreo, los valores correspondientes a cinco días después de los aluviones, son más altos en relación a aquellas recolectadas con posterioridad. Sin embargo, la muestra 180515, no cumple con esta observación, ya que el plomo contenido en Paipote es mayor, en relación a las demás muestras postaluvión. En María Isabel los valores de plomo vuelven a aumentar, la muestra veinte días después del evento contiene 38 ppm superando a los valores prealuvionales, exceptuando la muestra de mayo de 2011. En 040617 se mantiene en el rango de las prealuvión, 26 ppm, mostrando un leve aumento, con respecto a Paipote. En base a la figura las muestras prealuvión descienden sus valores de plomo en el sector de María Isabel, mientras que las postaluvión se mantienen o aumentan sus valores.

3.2.2.5 Caracterización geoquímica prealuvión, arsénico (As)

En el Tranque Lautaro y Elisa de Bordos las muestras prealuvión están en un rango acotado de entre 10 y 26 ppm de arsénico, con excepción de la muestra de mayo de 2011 recolectada en el Tranque Lautaro (73 ppm; Figura 3.13a). En Cerrillos y Paipote los valores de arsénico en las muestras prealuvión son similares entre sí (15-42 ppm), y en general son más altas que aguas arriba (Lautaro y Elisa de Bordos; figura 3.13a). En María Isabel los valores de las

muestras descienden con respecto al punto anterior, fluctúan 10-21 ppm de arsénico (Figura 3.13a).

3.2.2.6 Caracterización geoquímica postaluvión, arsénico (As)

En el Tranque Lautaro, las muestras postaluvionales poseen valores de arsénico (8,6-12 ppm) que están en el segmento más bajo del rango de las prealuvionales (Figura 3.13a). En Elisa de Bordos y Cerrillos, el arsénico contenido en estas muestras está en un rango de entre 17 y 24 ppm (Figura 3.13a). Similar a las muestras del Tranque Lautaro, en Cerrillos estas se encuentran en el segmento inferior del rango de las prealuvionales, sin embargo, para el caso de Elisa de Bordos, los valores son en general más altos en relación a las muestras prealuvión. En las muestras postaluvionales de Paipote, los valores de arsénico están en el segmento inferior del rango de las muestras prealuvionales (Figura 3.13a). Los valores tienden a disminuir con el tiempo, las muestras recolectadas días después de los aluviones presentan bajos valores de arsénico (23 y 21 ppm), mientras que la muestra recolectada posteriormente en junio de 2017 alcanza 19 ppm de arsénico. En María Isabel los valores postaluvión están en el rango de las prealuvionales. La muestra más cercana al día del evento está más enriquecida que la muestra tomada en el presente año 2017 (Figura 3.13a).

3.2.2.7 Caracterización geoquímica prealuvión, mercurio (Hg)

En las muestras pre aluvión del Tranque Lautaro los valores de mercurio están en un rango entre 0,07 y 0,33 ppm (Figura 3.13b). En Elisa de Bordos, el rango de valores de mercurio es más acotado, con valores entre 0,3 y 0,8 ppm. El rango en Cerrillos vuelve a ser más amplio, abarcando entre 0,1 y 1,35 ppm (Figura 3.13b). En Paipote se observa un aumento en los valores en relación con los puntos muestreados aguas arriba, con valores que van desde 0,5 a 1,8 ppm de mercurio. En María Isabel, la dispersión y el rango de los ppm de mercurio aumentan en relación con aguas arriba (Figura 3.13b). En invierno-primavera-verano los valores no superan los 5 ppm (julio 2011-marzo 2012) y en otoño (abril-junio) aumentan hasta 21 ppm de mercurio.

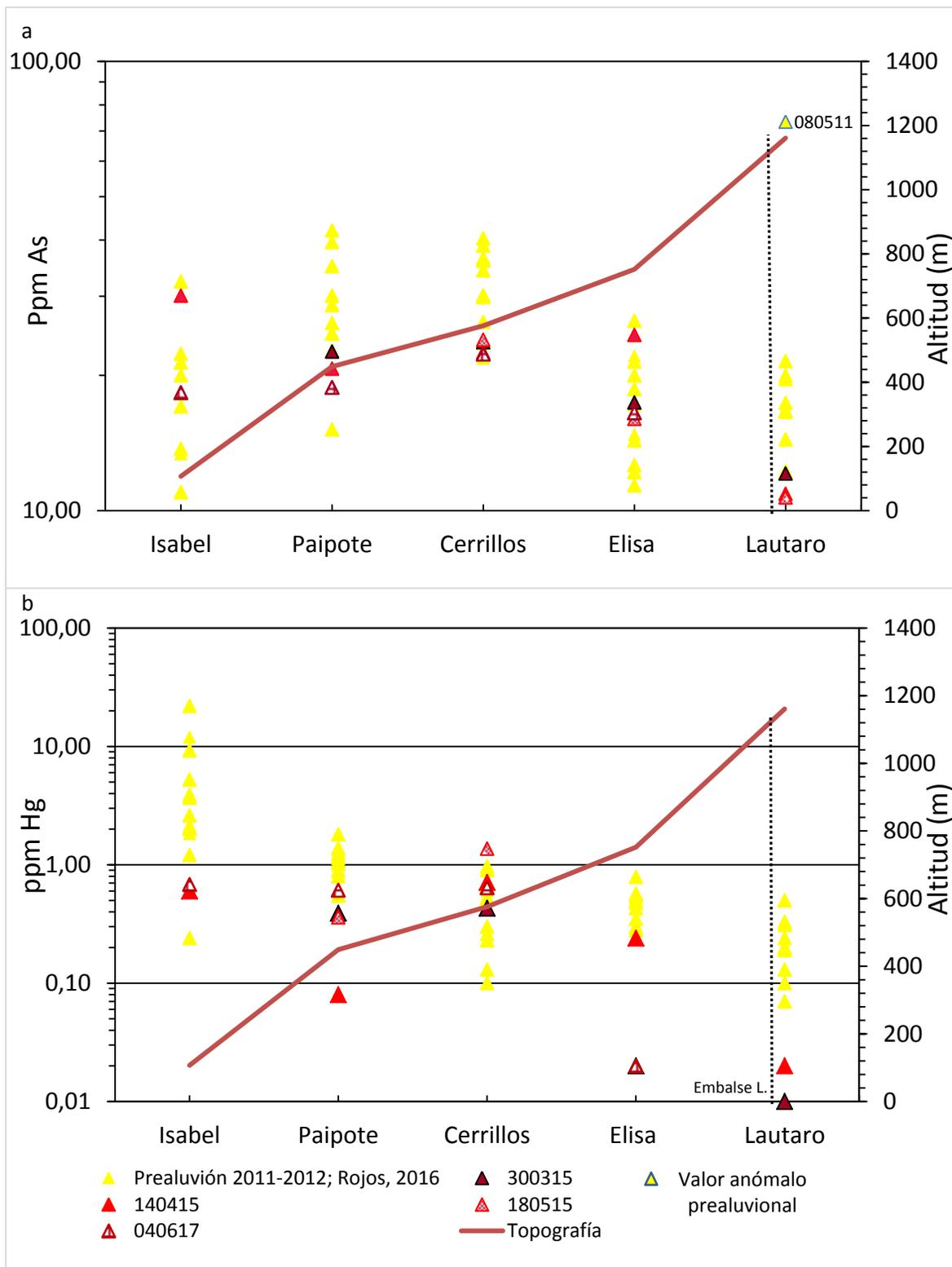


Figura 3.13: Distribución espaciotemporal, concentraciones de As (a), y Hg (ppm) (b) en las muestras de sedimentos recolectados en cinco puntos del Rio Copiapó. Los Triángulos amarillos son muestras prealuvión y los rojos muestras postaluvión.

3.2.2.8 Caracterización geoquímica postaluvión, mercurio (Hg)

Para las muestras recolectadas postaluvionales en el Tranque Lautaro los valores de mercurio (0,005 y 0,02 ppm) disminuyen en relación a las muestras prealuvionales (Figura 3.13b). Similar tendencia de disminución se observa para la muestra recolectada en Elisa de Bordos días después de ocurridos los aluviones (0,02 a 0,24ppm; Figura 3.13b). Para estos dos puntos de muestreo se aprecia que las concentraciones disminuyen abruptamente pocos días después de ocurrido los aluviones. En el caso de Elisa de Bordos, luego de un par de semanas los valores de mercurio vuelven a estar en el rango de las muestras prealuvionales (en torno a 0,24 ppm). Sin embargo, en el caso de Lautaro, después de semanas los valores continúan siendo bajos en relación a las muestras prealuvionales (Figura 3.13b). Los valores de mercurio en las muestras recolectadas en Cerrillos días después de los aluviones (0,4 – 0,7 ppm), están en el segmento superior del rango de las prealuvionales (Figura 3.13b). Cabe destacar que los valores de mercurio días después de los aluviones, son más bajos que el de las muestras recolectadas con posterioridad. Los valores de mercurio en las muestras recolectada en Paipote el año 2015, están en el límite inferior del rango de las muestras prealuvionales, mientras que la muestra recolectada en junio 2017 está dentro del rango prealuvional (Figura 3.13b). La muestra recolectada en Paipote un par de semanas después del evento presenta valores de mercurio (0,08 ppm) un orden de magnitud menor en relación a todas las muestras de este punto (Figura 3.12b). En María Isabel las muestra postaluvionales (0,6-0,7 ppm de mercurio) están en el límite inferior del amplio rango de valores de mercurio de las muestras prealuvionales (Figura 3.13b).

En resumen, la tendencia general del cobre, plomo, y arsénico es un enriquecimiento aguas abajo en las muestras prealuvión, salvo en el sector de María Isabel en donde se empobrecen. En el caso del mercurio es distinto, ya que sus concentraciones prealuvionales disminuyen levemente en Cerrillos, pero finalmente entre Paipote y María Isabel se registra una mayor concentración, sobre todo en este último, en comparación con los demás puntos de muestreo.

En las muestras postaluvión, la tendencia general del plomo es de incrementar las concentraciones desde Lautaro a Cerrillos, en Paipote disminuyen un poco, pero sus concentraciones tienden a mantenerse o incluso aumentar en el caso de la muestra de abril del 2015 en la estación María Isabel. La muestra en cuestión presenta un patrón inversamente proporcional a la tendencia del valle, es decir algún factor climático o antrópico provocó el aumento de este elemento hacia el oeste. El arsénico presenta una tendencia similar al cobre, aumenta de Lautaro a Cerrillos, en Paipote disminuye levemente y aumenta o se mantiene en María Isabel. En la mayoría de las estaciones se observa una disminución en las concentraciones del elemento, con excepción de la última estación María Isabel. En este último punto de muestreo los valores de cobre postaluvión aumentan en relación a Paipote, contrario a lo que se percibe en las muestras prealuvión. El mercurio presenta concentraciones de un orden de magnitud menor al arsénico, pero en cuanto a la tendencia general es muy similar. Se observa una disminución de las concentraciones postaluvionales con respecto a las prealuvión excepto en Cerrillos, en donde los valores postaluvión están dentro del rango prealuvión. Lo interesante es la comparación entre valores postaluvión, porque a medida que pasaron los días, meses y años el mercurio aumentó en vez de presentar una disminución. Esto se ve reflejado en todos los puntos de muestreo.

3.2.3 Factor de enriquecimiento para cobre, plomo, arsénico y mercurio

Se calcularon los factores de enriquecimiento para las muestras prealuvión y postaluvión, para el cobre, plomo, arsénico y mercurio (Tabla 3.8). Las muestras de Rojos (2016) se tomaron mensualmente desde mayo 2011 a abril 2012. En esas muestras, para cada elemento, se calculó el promedio del factor de enriquecimiento en cada una de las estaciones.

Tabla 3.8: Valores de Factor de enriquecimiento para periodo prealuvión y postaluvión

Fechas de Muestreo	Factor de enriquecimiento			
	Cu	Pb	As	Hg
Lautaro				
04-06-2017	4,56	1,18	3,67	0,18
18-05-2015	20,16	1,90	4,93	0,19
14-04-2015	4,53	1,51	4,89	0,75
30-03-2015	26,07	2,01	5,68	0,39
Prealuvión (promedio)	17,74	3,11	8,38	8,00
Elisa de Bordos				
04-06-2017	6,86	2,79	7,82	0,79
18-05-2015	5,91	1,97	6,82	0,71
14-04-2015	5,82	2,43	10,55	8,57
30-03-2015	6,72	2,17	8,00	0,77
Prealuvión (promedio)	9,59	3,07	7,37	16,20
Cerrillos				
04-06-2017	4,58	3,00	10,25	24,52
18-05-2015	15,43	2,91	10,27	48,87
14-04-2015	7,82	3,43	10,17	26,74
30-03-2015	18,02	3,63	10,65	16,10
Prealuvión (promedio)	35,94	3,99	13,30	19,37
Paipote				
04-06-2017	4,55	2,48	8,43	22,81
18-05-2015	10,87	3,14	8,42	13,43
14-04-2015	6,42	2,69	9,23	2,97
30-03-2015	4,47	2,95	10,43	15,00
Prealuvión (promedio)	40,63	4,54	12,04	39,37
María Isabel				
04-06-2017	15,03	2,36	7,30	22,59
14-04-2015	7,42	3,57	12,56	20,87
Prealuvión (promedio)	5,56	2,62	7,06	195,49

En las muestras postaluvión se expusieron todos los valores FE porque es importante verificar la proveniencia de estos elementos, ya que se pueden asociar a concentraciones provenientes de pasivos mineros que se encuentren cercanos al cauce del Río. En general se observan valores de FE mayores a 1 lo que indica un enriquecimiento de estos elementos en los sedimentos activos del río Copiapó, al ser comparados con las concentraciones de la corteza continental. Los valores de FE prealuvionales en general son mayores a los postaluvionales en casi todas las fechas de muestreo y a medida que nos encontramos en zonas con mayor presencia de pasivos mineros estos aumentan.

En las muestras postaluvionales, en los sectores de Lautaro y Elisa de Bordos el factor de enriquecimiento presenta valores menores a 10, en casi todas las fechas de muestreo. A cinco, y cincuenta y cuatro días del evento los valores de cobre superan el promedio prealuvión. También en el sector de Elisa de Bordos a veinte días del aluvión, el FE para el arsénico es mayor que al registrado en el promedio prealuvional. En Cerrillos a pesar de que en la mayoría de las fechas prealuvional presentan valores mayores a los postaluvión, se debe considerar que estos últimos presentan valores mayores a 10 en varias fechas lo que significa un probable origen antropogénico de esas concentraciones. Solo el mercurio registra valores mayores a condiciones prealuvionales, destacando la fecha cincuenta y cuatro días después del evento, ya que presenta un FE muy alto en comparación a los demás valores de este elemento.

Paipote no presenta factores de enriquecimiento postaluvional mayores a los prealuvional. Sin embargo, se destacan ciertos valores de FE superiores a 10 como es en el caso del cobre en la fecha a cincuenta y cuatro días, el arsénico a cinco días de ocurrido las inundaciones aluvionales, y el mercurio que supera el promedio prealuvión en todas las fechas salvo a veinte días del 25M 2015.

Finalmente, en María Isabel, se muestran valores postaluvionales mayores a los prealuvión en ambas fechas. El cobre, arsénico y mercurio registran valores mayores a 10, el primero a dos años, el segundo a veinte días del evento y tercero en ambas fechas.

4 Discusiones

4.1 Cambios en las condiciones de transporte y sedimentación del Río Copiapó durante las inundaciones aluvionales de marzo de 2015

En este trabajo se determinó que hubo cambios en el mecanismo de transporte de sedimentos activos del Río Copiapó después del evento aluvional, producto de las condiciones climáticas ocurridas entre el 24 y 26 de marzo del 2015. Las intensas precipitaciones, aumento en el caudal del río (Tabla 2.2), y flujos de detritos provenientes de quebradas como Paipote y Carrizalillo (Izquierdo et al., 2016; Sánchez et al., 2015), provocaron que la granulometría de los sedimentos fuera más fina, al ser comparada a fechas prealuvionales (Rojos, (2016)). Desde que ocurrió el evento a junio del 2017 las condiciones del río dejaron de ser efímeras en los sectores de Cerrillos y Paipote, presentando un régimen perenne o continuo durante todo el año.

En los sectores de Tranque Lautaro y Elisa de Bordos, a cinco días de ocurrido las inundaciones aluvionales presentan una población transportada por suspensión alta (13 y 30 respectivamente) en relación con las muestras recolectadas antes de ocurridas las inundaciones aluvionales (5%). Esto se debe principalmente a intensas precipitaciones entre el 24 y 26 de marzo (Tabla 2.2), velocidades del viento de 8 kt hacia el SW, y el aumento en el caudal del Río Copiapó (Tabla 2.2), provocaron flujos más turbulentos y el transporte de sedimentos más finos como arena, arcilla y limo (Izquierdo *et al.*, 2016). En el escenario prealuvión el transporte de sedimentos finos es menor debido a las condiciones áridas y ambientes montañosos del norte de Chile, (Vargas et al., 2006) situación reflejada en los parámetros estadísticos granulométricos como en las medias y medianas prealuvionales que son negativas en contraste con las postaluvionales que son positivas, las cuales reflejan concentraciones de sedimento fino más altas (Tabla 3.1). Durante el mes de abril y mayo del 2015 muestran una agudización de la tendencia en el sector del Tranque Lautaro y en Elisa de Bordos, con un aumento de la población transportada por suspensión (55 y 60%) y truncamientos marcados. Estas observaciones de los datos hablan de que el flujo entre Lautaro y Elisa de Bordo aumento su energía, su carácter es más turbulento y los sedimentos transportados y depositados por el flujo corresponden principalmente de arena fina a limo grueso. En estas fechas no hubo precipitaciones, un caudal entre 5 a 6 m³/s, y vientos entre 7 a 8 kt en dirección SW, provocó que la carga por suspensión aumentara en relación a la fecha anterior y por consiguiente mayor contenido de sedimentos finos en comparación a las muestras prealuvión (Rojos (2016)). En junio del 2017, el flujo se estabiliza debido a que no ha ocurrido otro evento catastrófico similar, el transporte de sedimentos finos es del 30% de la muestra. Sin embargo, el tiempo transcurrido no ha sido el necesario para que el río vuelva a ser similar a las fechas prealuvionales.

En Cerrillos, a cinco días del aluvión, la carga por suspensión disminuye a un 5% con respecto a la situación prealuvional (16 a 20%), debido a flujos de detritos provenientes de la Quebrada Carrizalillo, y la conformación de un abanico aluvial en su confluencia con el Río Copiapó en el sector (Sánchez et al., 2015). A veinte días del evento la suspensión aumenta a 60%, y a los cincuenta y cuatro días se estabiliza en torno a los valores documentados antes de los aluviones (10%). No hubo precipitaciones, y los vientos se mantienen constantes a fechas anteriores, por lo que el caudal del río es el responsable de las variaciones en la carga por suspensión, siendo un flujo constante, tipo perenne que transporta sedimentos finos desde aguas arriba y se depositan en este sector. En la muestra del año 2017, por lluvias y aumento del caudal, provocaron que este transporte de sedimentos desde aguas arriba aumentara y se depositaran en este punto.

En el sector de Paipote, al igual que en Cerrillos, el Río Copiapó presenta una escorrentía superficial constante en el escenario postaluvional. Las curvas granulométricas postaluvionales casi no presentan tracción (entre 0 y 1,5%), la carga por saltación y suspensión aumentaron en relación a las muestras prealuvionales. A cinco días de ocurrido del evento catastrófico, la carga por suspensión, 65%, es mayor a la registrada en periodos prealuvionales, 42%, porque el transporte de sedimentos finos y depositación de estos en el sector fue mayor que en otros puntos de muestreo. Los flujos de detritos provenientes de la quebrada Paipote (1200 a 1500 m³/s (Izquierdo et al., 2016)), poseían una granulometría más fina que los sedimentos prealuvionales, lo que se refleja en los parámetros estadísticos granulométricos calculados en este estudio (tabla 3.1 y 3.2). La media y mediana aumentan, y la asimetría se hace más negativa, lo que indica una mayor predominancia del sedimento fino. A medida que pasan los meses y los años, la carga por suspensión va en aumento, llegando al 75% de los sedimentos en la muestra del año 2017.

Finalmente, María Isabel era una zona desconectada, ya que en sectores como Cerrillos y Paipote no presentaban agua durante el año a excepción de periodos de deshielo y precipitaciones. Después del aluvión el río transporta sedimentos provenientes desde aguas arriba hacia este sector y la desembocadura del río. Es una zona de sedimentación de baja energía asociada a cercanía con la desembocadura del Río Copiapó, y con el ensanchamiento y pérdida de pendiente del lecho. Situación que se refleja en la carga por suspensión que no supera el 20% de la muestra prealuvional.

El Valle del Río Copiapó es una depresión transversal, donde el transporte de sedimentos estará siempre relacionado principalmente a las condiciones climáticas propias de la cuenca. En épocas de sequía y bajas precipitaciones reflejan una predominancia de sedimentos gruesos, transportados por arrastre (tracción) y por saltación. Eventos meteorológicos como el ocurrido entre el 24 y 26 de marzo de 2015 producen que la granulometría de los depósitos sea más fina, carga por suspensión predominante a lo largo de la cuenca, por consiguiente, la energía del flujo será mayor y más turbulento. Finalmente, al ausentarse por periodos largos de tiempo eventos meteorológicos similares, las características granulométricas tienden a volver a su configuración sedimentológica prealuvional, sin embargo, la envergadura del evento, luego de dos años de ocurridas las inundaciones aluvionales el río aún no vuelve a su condición prealuvional.

4.2 Cambios en la geoquímica de los sedimentos del río Copiapó durante las inundaciones aluvionales de marzo de 2015

Las condiciones geológicas, meteorológicas, geomorfológicas del río y la influencia antropogénica en cada una de las estaciones juegan un rol importante en la geoquímica de los sedimentos activos del Río Copiapó, ya que dependiendo de estas habrá un mayor enriquecimiento o empobrecimiento de elementos. Para un mejor entendimiento de cómo se comportan los elementos se ocupará la clasificación de Goldshmidt (Goldshmidt, 1937), la cual consiste en agruparlos de acuerdo a su afinidad químicas y comportamiento geoquímico (Tabla 4.1 y Anexo II); se tomó en cuenta su radio iónico, valencia, fuerza iónica y electronegatividad. Los grupos se exponen en la siguiente tabla:

Tabla 4.1: Clasificación de Goldschmidt, (1937) para los elementos mayores y trazas.

Litófilos	Si, Na, K, Mg, Ca, Sr, Ba, Sc, Y, La, Ce, Sm, Yb, U, Al, P, B, Si, Zr, Hf, Th, W, Rb, V, Cs, Ta, Pr, Nd, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu.
Calcófilos	Mo, Cu, Ag, Zn, Cd, Hg, Pb, As, Sb, Ga, Bi
Siderófilos	Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Au, Sn

Los litófilos son aquellos elementos que se concentran en la fase de silicato y se combinan fácilmente con el oxígeno en la corteza terrestre. Tienen un bajo potencial iónico, baja electronegatividad y, por lo tanto, pasan fácilmente a la solución iónica durante el desgaste químico de los silicatos. Por lo tanto, estos elementos tienen una gran movilidad en el ciclo exógeno.

Los Calcófilos su afinidad es hacia el azufre, formando sulfuros. Por otro lado, Pb^{2+} puede reemplazar Ca^{2+} durante la cristalización magmática. Cu, Ag, Zn, Cd y Hg están más concentrados en las rocas máficas, mientras que Mo y Pb tienen mayores contenidos en los félsicos.

Los Siderófilos presentan afinidad con elementos como Fe y Mg, se asocian principalmente con minerales ferromagnesianos, en la serie alta de Bowen (olivino, piroxeno), óxidos y espinela. El Fe, Co y Ni también pueden combinarse fácilmente con el azufre (carácter calcófilo) formando minerales ferromagnesianos (Goldschmidt, 1937; Oyarzún et al., 2016).

Para los elementos alcalinos como el Na evidencian un empobrecimiento en los sedimentos activos, con respecto a la corteza continental, debido a que es un elemento soluble en agua. El K también presenta estas características solubles, pero el FE al elemento en todos los puntos de muestreo arroja valores entre 1-1,2, lo que quiere decir que hay un enriquecimiento del elemento que proviene de las unidades geológicas del sector, como por ejemplo las “Main Andesites” (Oyarzún et al., 1993 y 2016). Mientras que la movilidad de los elementos como el Ca, Sr y Ba está limitada por el producto de baja solubilidad de sus carbonatos y sulfatos, los cuales son relativamente abundantes debido a las condiciones áridas del clima, con valores de FE mayores a 1 (Anexo II) (Goldschmidt, 1937; Oyarzún et al., 2016). El Mg se observa un poco empobrecido en relación a la corteza continental, debido a que la unidad “Main Andesites” presenta bajos valores del elemento, por lo que el aporte a los sedimentos activos es bajo.

Las concentraciones de Sc, Y, La, Ce, Sm, Yb, U, Al, P en la unidad geológica y en la corteza continental son bastante similares entre sí. En los sedimentos activos del Río Copiapó se observa que las concentraciones de estos elementos son bastante similares, aunque con un cierto enriquecimiento, ya que sus FE son mayores a 1 (Anexo II). Esto se debe a que poseen un potencial iónico alto, factor responsable de la hidrólisis de los cationes +3 y su posterior captura en minerales de arcilla e hidróxidos de hierro.

Los elementos Siderófilos Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni y Sn se ven similares los factores de enriquecimiento entre la unidad geológica Main Andesites y la corteza continental (Anexo II). El Cromo se ve empobrecido en los sedimentos activos, ya que sus concentraciones prealuvionales estaban dadas por sedimentos antiguos producto de la actividad minera. Los flujos de detritos del pasado 25 de marzo del 2015, diluyeron las concentraciones de este elemento (Hernández et al., 2017). El Ti, V, Fe, Sn se muestran enriquecidos en comparación a la corteza continental y a la unidad “Main Andesites”.

Los elementos Calcófilos como Mo, Cu, Ag, Zn, Cd, Hg, Pb, As, Sb, Ga, Bi están enriquecidos en los sedimentos con respecto a la corteza continental y con respecto a la unidad geológica “Main Andesites”.

Además, los depósitos presentes en la zona de estudio como depósitos vetiformes de Cu y Cu-Au-Ag (Distrito Punta del Cobre y Mina Candelaria), Estratoligados de Fe, Vetas y Mantos de Ag (Grupo Chañarcillo) entre otros tipos de yacimientos y zonas de alteración representadas por fallas que canalizan los fluidos que generaron la alteración-mineralización. Los factores de enriquecimiento principalmente para el cobre, arsénico, plomo, mercurio y Cinc representan un contenido absoluto que se puede considerar un riesgo ambiental relacionado al transporte de metales en las aguas del Río Copiapó.

Como se muestra el Anexo II, el enriquecimiento del Cobre en los sedimentos es bastante alto, con respecto a la corteza y a la unidad geológica Main Andesites, producto de la contribución de los depósitos minerales meteorizados y las zonas de alteración hidrotérmica. Sin embargo, a lo largo del cauce se registra una disminución de las concentraciones de cobre con respecto a fechas prealuvionales, lo que refleja un grado de limpieza en los sedimentos activos del Río Copiapó.

4.2.1 Escenario Prealuvión vs Postaluvión, análisis de concentraciones para cobre, plomo, arsénico y mercurio

A partir de las muestras prealuvionales y el factor de enriquecimiento, se puede identificar una tendencia a lo largo del valle del Río Copiapó que da cuenta del enriquecimiento de cobre, plomo, arsénico y mercurio donde el río es efímero y en lugares donde hay actividad minera, como Paipote y Cerrillos. Este enriquecimiento está estrechamente asociado a la actividad minera de la zona y posiblemente a los pasivos mineros (Rojos, 2016). Se destaca el sector de María Isabel, donde las concentraciones de mercurio son altas, probablemente asociado a la fijación de este elemento por parte de la abundante materia orgánica que contienen los sedimentos de un ambiente de humedal costero (Rojo, 2016).

Los factores de enriquecimiento de cobre, plomo, arsénico y mercurio para las muestras postaluvión, presentan un empobrecimiento en comparación con los valores prealuvionales. Esto se debe principalmente al evento meteorológico anómalo entre el 24-26 de Marzo del 2015, que consistió en intensas precipitaciones (promedio 45mm), en la alta cordillera (Barrett et al., 2016), que superaron la capacidad de absorción de los sedimentos ubicados en las principales quebradas afluentes al río (Ferrando et al., 2015), provocando que flujos de detritos empobrecidos en estos elementos confluyeran al Río Copiapó, inundaron las principales comunas de la cuenca y se depositaron sedimentos con valores de cobre, plomo, arsénico y mercurio menores a lo que existían antes del evento catastrófico, mejorando la calidad de los sedimentos activos del Río Copiapó (Hernández et al., 2017).

A continuación, se analiza en detalle para cada elemento las distintas concentraciones registradas en las muestras postaluvionales.

4.2.1.1 Cobre:

Los factores de enriquecimiento en el sector de Lautaro se muestran altos en dos fechas, a cinco días, FE=26,07 y a cincuenta y cuatro días FE=20,16 del aluvión. Si bien la existencia de pasivos mineros en este sector es escasa (solo 2 relaves, Figura 1.1), se asume que el enriquecimiento de cobre es de origen natural, dada las altas concentraciones, 86 ppm de cobre (Anexo II) en la unidad geológica “Main Andesites” desde donde drenaron los flujos aluvionales (Oyarzún et al., 2016). Las condiciones climáticas áridas a semiáridas de la región mitigan el riesgo ambiental relacionado con la presencia de yacimientos de minerales ricos en sulfuros y las

operaciones mineras, porque en estas condiciones el suelo y el agua de drenaje generalmente muestran condiciones de pH alcalino, por lo tanto, se reduce la movilidad del cobre, el cual se incorpora a la fracción fina de los sedimentos (Oyarzún et al., 2016). Para el sector de Elisa de Bordos se observa similares valores de enriquecimiento para el cobre entre las condiciones pre y postaluvionales. En este caso la barrera que establece el Tranque Lautaro para el transporte de los sedimentos, impidió el avance hasta este sector de los flujos provenientes desde aguas arriba, lo que implicó una baja fluctuación del Factor de Enriquecimiento después de ocurridos los aluviones. En los sectores de Cerrillos y Paipote, el factor de enriquecimiento para concentraciones de cobre postaluvión se muestran más empobrecido en comparación con el promedio prealuvional. A pesar que la actividad minera toma gran importancia con la presencia de relaves, 114 aproximadamente (Hernández et al., 2017), el nuevo régimen perenne del Río Copiapó y los flujos de detritos provenientes de las quebradas Carrizalillo y Paipote cercanos a 1200 m³/s (Izquierdo et al., 2016) produjeron un empobrecimiento del elemento. En el último punto de muestreo, María Isabel, el río se conecta con los puntos de aguas más arriba producto de su nuevo régimen perenne, lo cual permite que un enriquecimiento de cobre de 5,5 valor prealuvional promedio a 15,03 valor postaluvional (Tabla 3.7). Esto se asocia a la llegada de sedimentos aguas arriba, por la conexión con los flujos aluvionales.

4.2.1.2 Plomo

Los factores de enriquecimiento de plomo postaluvión que de 2,01 a 1,18 son levemente empobrecidos en comparación a los prealuvión que presentan un promedio igual a 3,11. El empobrecimiento estaría asociado a los flujos sedimentarios provenientes de quebradas que contenían sedimentos con una composición similar a la unidad geológica “Main Andesites” (Oyarzún et al., 2016). En Elisa de Bordos los valores de FE postaluvión y prealuvión son similares al punto anterior, a Cerrillos y a Paipote (Tabla 3.7). Esto quiere decir que las concentraciones de plomo son bajas y un poco más enriquecidas que los valores naturales (Rudnick et al., 2003), por lo tanto, la influencia de los relaves en los depósitos de sedimentos activos del río Copiapó es muy baja o nula en lo que respecta a este elemento. En María Isabel, el plomo presenta la misma tendencia del cobre, debido a la activación del río, en zonas anteriormente inactivas, se produjo un enriquecimiento de plomo aguas abajo, ya que el acarreo del elemento por efecto del río fue mayor, en relación a condiciones prealuvionales.

4.2.1.3 Arsénico

Los valores de FE postaluvión en el sector de Lautaro van entre 5,68 a 3,67, los cuales presentan un carácter empobrecido si se comparan con los prealuvionales (8,38). Al igual que con el plomo, el empobrecimiento de este elemento está ligado a flujos de sedimentos provenientes de quebradas que albergaban sedimentos de composiciones similares a las formaciones geológicas presentes en la zona de estudio, como por ejemplo la “Main Andesites” (Oyarzún et al., 2016). En Elisa de Bordos ocurre lo contrario, ya que se aprecia un leve enriquecimiento en las muestras postaluvión con valores entre 6,82 y 10,55. En Cerrillos y Paipote el factor de enriquecimiento en las muestras postaluvión se empobrece con respecto a los valores prealuvionales, asociado a los flujos de detritos provenientes de las Quebradas Carrizalillo y Paipote, los cuales estaban más empobrecido en arsénico. En María Isabel la tendencia es similar a la del cobre y plomo, se registra un enriquecimiento de este elemento producto del transporte de sedimentos antiguos aguas arriba con mayor contenido de arsénico.

4.2.1.4 Mercurio

La tendencia general de las muestras prealuvionales es aumentar los valores de mercurio de aguas arriba a aguas abajo el factor de enriquecimiento es mayor desde Lautaro a María Isabel. Las muestras postaluvionales poseen la misma tendencia, pero las concentraciones son más bajas en todos los puntos de muestreo, salvo en Cerrillos. En la tabla 3.7 se aprecia un fuerte empobrecimiento del mercurio en el sector de Lautaro, que alcanza dos órdenes de magnitud menos (Valores FE entre 0,39 y 0,18). Esto se debe a que mientras el Río contenga agua el mercurio será más móvil y se desplazará aguas abajo, si la zona de muestreo cercana al tranque estuviera seca, el mercurio se concentraría en los sedimentos finos (Ávila, 2002). Lo mismo sucede en el sector de Elisa de Bordos, presenta valores del factor de enriquecimiento menores a 1, con excepción de la muestra veinte días después del evento que marca un valor FE=8,57. Esto probablemente se deba a que la muestra presenta una composición similar a los pasivos mineros cercanos al punto de muestreo. Además, no solo el mercurio en esta fecha presenta un FE alto, el arsénico también posee un factor de enriquecimiento mayor. En Cerrillos el mercurio presenta valores FE mayores a los prealuvión (Tabla 3.7), esto se debe a la movilidad del elemento, y al aporte de los relaves del sector, ya que comparado con los puntos de aguas más arriba, las concentraciones de Hg son mayores en un orden de magnitud. En Paipote, las concentraciones postaluvión son más bajas a las prealuvión, debido a su movilidad. Sin embargo, al igual que en Cerrillos los relaves condicionan la concentración de este elemento en los sedimentos activos del sector en algunas fechas postaluvión (cinco, cincuenta y cuatro días y dos años del evento). Finalmente, en María Isabel el empobrecimiento del FE postaluvión es de un orden magnitud en relación al promedio prealuvional. Se debe principalmente al arribo de sedimentos empobrecidos de mercurio en relación a los que ya existían en el sector. Sin embargo, se observa que las concentraciones del sector alcanzan los 0,7 ppm, mayores en un orden de magnitud a la composición de la corteza continental, lo que se explica por la presencia significativa de materia orgánica (Marín et al., 2016).

4.3 Rol de los eventos extraordinarios de transferencia de materia en los cambios de la geoquímica de sedimentos activos

Para cerrar el capítulo de discusiones se realizó distintas comparaciones con el objetivo de encontrar una o varias correlaciones entre los datos granulométricos y geoquímicos. Se tomaron las concentraciones de cobre, plomo, arsénico y mercurio versus el porcentaje de población en suspensión, y los parámetros granulométricos calculados en capítulos anteriores, la media, mediana, selección, asimetría y curtosis. Para esta correlación se escogieron los sedimentos más finos porque es la granulometría que mejor representa los depósitos de relaves y pasivos mineros existentes en la cuenca del Río Copiapó (Figura 4.1, 4.2, 4.3, y 4.4).

La ocurrencia de inundaciones aluvionales desarrolla un cambio en las concentraciones de metales pesados en los sedimentos activos de los sistemas fluviales áridos del Desierto de Atacama, generando diluciones y concentraciones en distintas posiciones. El análisis granulométrico y geoquímico de los sedimentos permitió trazar estos cambios y su relación en el tiempo y espacio, y con ello conocer como varían con los procesos de transporte y deposición ligados a las inundaciones

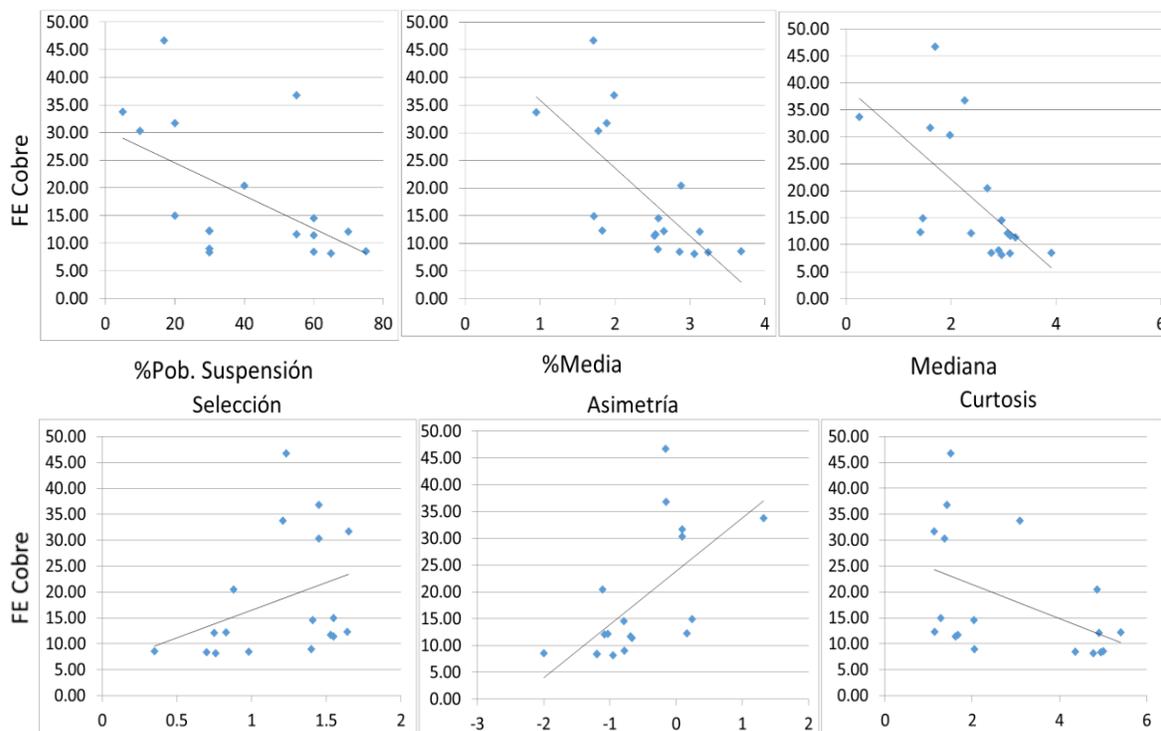


Figura 4.1: Análisis comparativo entre la sedimentología (Eje x) y factores de enriquecimiento del cobre, (Eje y)

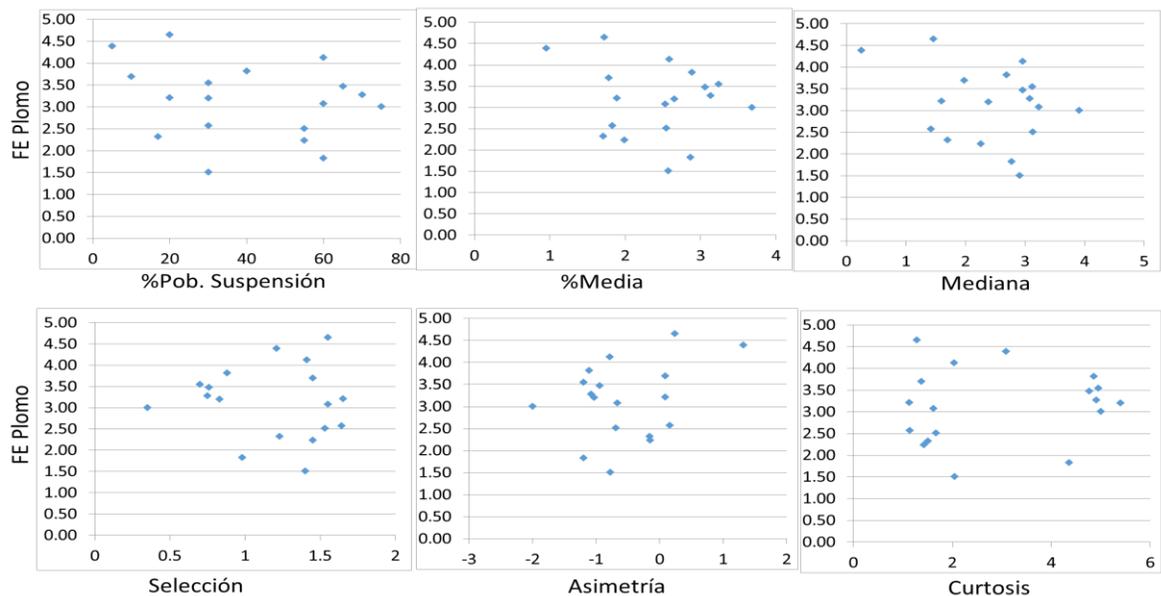


Figura 4.2: Análisis comparativo entre la sedimentología (Eje x) y factores de enriquecimiento del plomo, (Eje y)

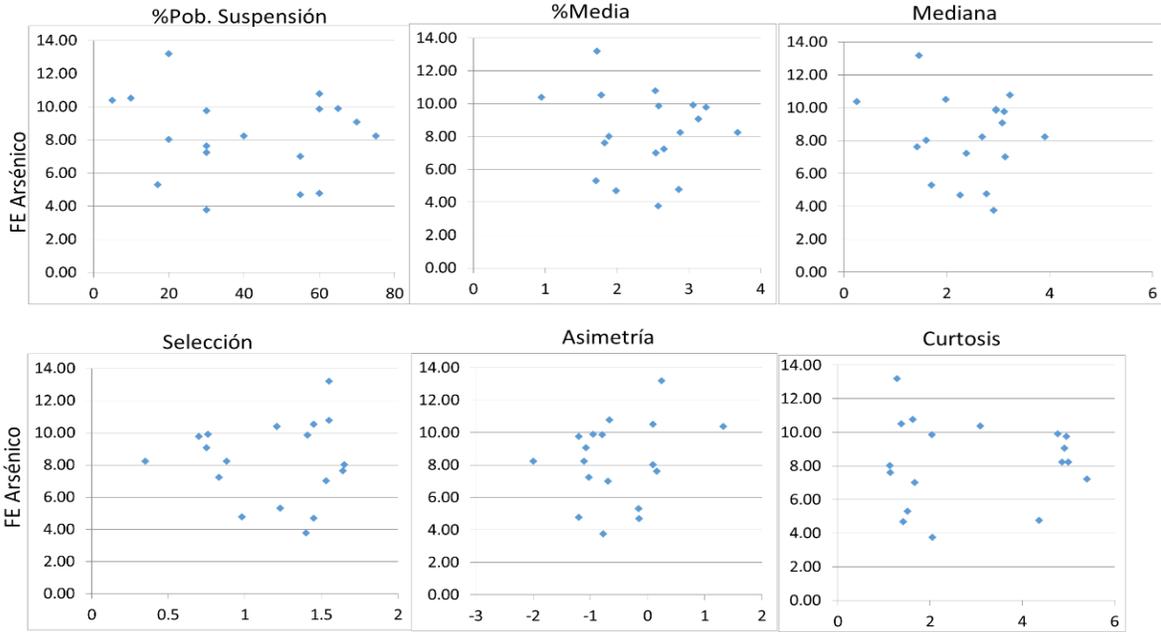


Figura 4.3: Análisis comparativo entre la sedimentología (Eje x) y factores de enriquecimiento del arsénico, (Eje y)

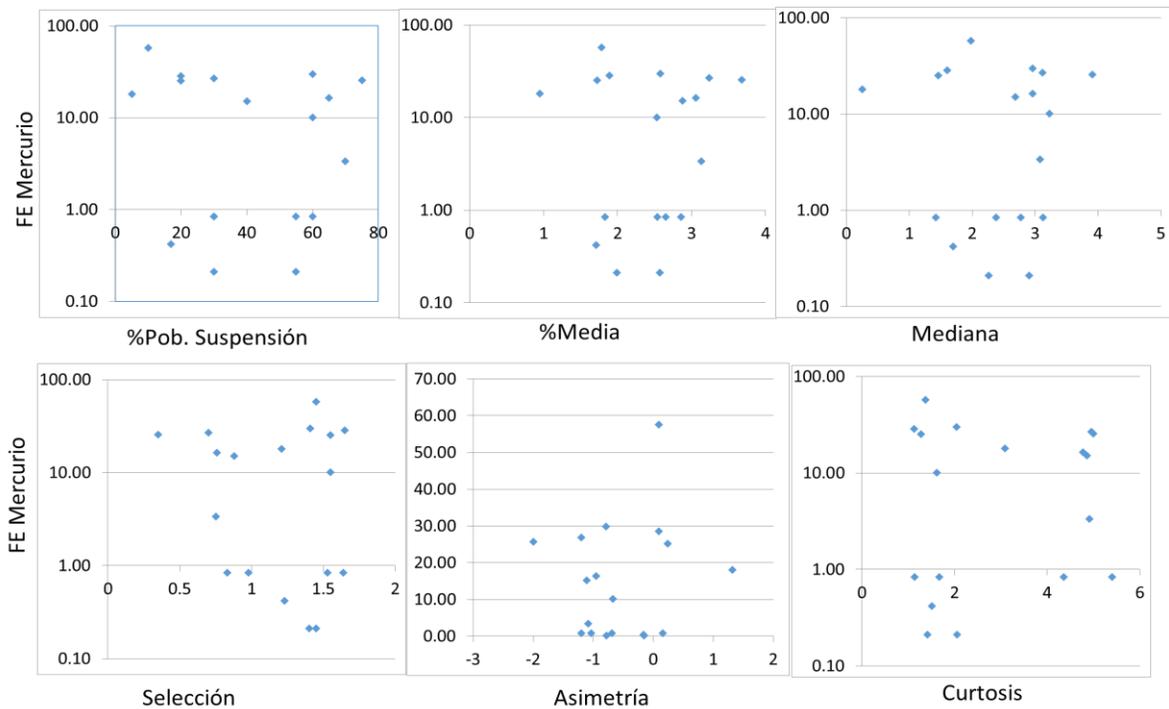


Figura 4.4: Análisis comparativo entre la sedimentología (Eje x) y factores de enriquecimiento del mercurio, (Eje y)

5 Conclusiones

La ocurrencia de inundaciones aluvionales desarrolla un cambio en las concentraciones de metales pesados en los sedimentos activos de los sistemas fluviales áridos del Desierto de Atacama, generando diluciones y concentraciones en distintas posiciones. El análisis granulométrico y geoquímico de los sedimentos permitió trazar estos cambios y su relación en el tiempo y espacio, y con ello conocer como varían con los procesos de transporte y deposición ligados a las inundaciones aluvionales. Producto de las inundaciones aluvionales se registró un aumento de la población en suspensión en los puntos de muestreo Tranque Lautaro, Elisa de Bordo, Cerrillos y Paipote. Esto implica un cambio hacia una condición de mayor turbulencia de los flujos y un caudal que se presentaba con un gran contenido de sedimentos finos. Esta condición se extendió por meses en la cuenca e incluso dos años después del evento aún se pueden apreciar la herencia de este fenómeno. Una excepción se aprecia en la muestra obtenida en el sector de Cerrillos, cinco días después de ocurrido los aluviones, que presenta una disminución del sedimento transportado por suspensión en relación a los datos prealuvionales. Esta situación particular se explicaría por la influencia directa del flujo de detritos que drenan desde la cuenca de la Quebrada Carrizalillo y la conformación de un abanico aluvial en su confluencia con el Río Copiapó en el sector (Sánchez et al., 2015). En María Isabel no hay cambios significativos en el porcentaje transportado por suspensión entre las muestras pre y post aluvionales. Esta zona continuamente ha sido una zona de sedimentación de baja energía asociada a la cercanía con la desembocadura del Río Copiapó, y con el ensanchamiento y pérdida de pendiente del lecho.

Río arriba del Tranque Lautaro, la herencia en el paisaje, el ecosistema y la sociedad que ejerce la industria minera es menos relevante en relación a las zonas más bajas y donde se concentran zonas habitadas. En las zonas altas de la cuenca, a varias decenas de kilómetros de distancia del Tranque Lautaro, existen sectores de potencial exploratorio de cobre de gran importancia. La muestra de sedimentos transportados en suspensión recolectada inmediatamente aguas arriba del tranque, mostro un enriquecimiento cobre, mercurio y plomo luego de ocurridas las inundaciones aluvionales, en particular de cobre, que posiblemente muestra el drenaje de sedimentos enriquecidos en esos elementos desde esos sectores prospectivos. Este enriquecimiento podría estar ligado al mayor poder erosivo y de transporte de la escorrentía superficial generada por las lluvias en relación con aquellas derivadas del deshielo de nieve que se desarrolla usualmente en esas zonas. Para la zona de Elisa de Bordo, no se registran cambios en las concentraciones, probablemente debido a la presencia del Tranque Lautaro localizado algunos kilómetros aguas arriba, que limita la transferencia de sedimento en suspensión aguas abajo durante las inundaciones aluvionales. Por otro lado, no se presentan grandes cuencas tributarias entre el tranque y este punto de muestreo que pudieran haber aportado caudal sedimentario.

Para el segmento entre Cerrillos y Paipote, donde se incrementa la industria minera, así como la presencia de los pasivos que ella origina, se observa un empobrecimiento en las concentraciones de cobre en los sedimentos transportados en suspensión, en relación con las muestras pre-aluvionales. Las concentraciones de plomo, arsénico y mercurio se mantienen similares en estos dos puntos de muestreo. Este segmento coincide con aquel cuyo caudal se mantuvo en condición efímera antes de las inundaciones aluvionales, al menos hasta el periodo de muestreo de Rojas (2016) y donde grandes cuencas tributarias se mantenían sin caudal durante los últimos años (Quebrada Carrizalillo y Quebrada de Paipote). Las concentraciones de cobre postaluvionales son más acordes con aquellos de medios naturales sin intervención antrópica, como lo indica el menor factor de enriquecimiento que se observa después de las inundaciones aluvionales. Los caudales sedimentarios que drenaron desde la cuenca de la Quebrada Carrizalillo y Quebrada Paipote, en particular desde este último, sumado al caudal sedimentario proveniente

del río troncal del Copiapó, determinaron la deposición de sedimentos alóctonos transportados en suspensión durante y luego de las inundaciones aluvionales, con concentraciones más parecidas a la corteza andina regional, en relación con las condiciones cercanas con mayor influencia antrópica.

En María Isabel, el arribo de sedimentos alóctonos transportado en suspensión es evidente luego de las inundaciones aluvionales, incluyendo desde las zonas de mayor actividad minera. Antes de las inundaciones aluvionales, este punto de muestreo estuvo superficialmente aislado hídricamente de las zonas de fuerte explotación minera. El arribo de sedimentos en suspensión desde esas zonas, determinaron el aumento de las concentraciones de cobre, plomo y arsénico, en particular de cobre. Cabe señalar que el punto de muestreo se localiza en el área de influencia de un ambiente de humedal costero desértico que se establece con la desembocadura en el océano del delta del Río Copiapó. Paisaje y ecosistema sensibles y protegidos a nivel regional por su riqueza natural, vital para la fauna aves migratorias que conectan con la primera escorrentía fluvial después de atravesar el Desierto de Atacama. En futuros trabajos, el impacto del aumento de concentraciones, aunque discreto, debería ser evaluado en la flora y fauna para conocer el efecto de una conexión más permanente en el tiempo ante el pronóstico de aumento de los caudales de los ríos en el Desierto de Atacama que se espera con el cambio climático.

Claramente los procesos fluviales, al menos el transporte en suspensión, nos son los principales agentes de transporte de sedimentos finos enriquecidos en metales pesados que explican las altas concentraciones reportadas por otros trabajos en el Río Copiapó. En un sistema fluvial tan desconectado desde el punto de vista de escorrentía superficial, como lo es el Copiapó antes de ocurridas las inundaciones aluvionales, el rol principal lo cumple la deflación eólica y la difusión de pasivos mineros. Cuando ocurre la conexión por las inundaciones aluvionales en general se observa un empobrecimiento de las concentraciones y los valores son más acordes con los naturales de la corteza.

El Río Copiapó es un sistema fluvial con stress hídrico dado por la explotación de los caudales en un periodo particularmente árido ocurrido hasta el 2015. Ello, junto con la extrema aridez propia del Desierto de Atacama, implicó la permanencia durante un largo periodo de tiempo de sedimentos finos con altas concentraciones de metales pesados en los lechos fluviales del río, en particular en las zonas donde se concentra la población. Luego de las inundaciones aluvionales estos sedimentos enriquecidos en metales pesados, fueron cubiertos por sedimentos con menor concentración provenientes de otras zonas no antropizadas. La prevalencia de sedimentos finos con altas concentraciones de metales pesados en el lecho se ve fomentada y reforzada por la explotación de los recursos hídricos y la inexistencia de un caudal ecológico que distribuya y homogenice a escala de cuenca las altas concentraciones que se generan entre Cerrillos y Paipote, que a los niveles medidos podrían ser nocivos para la salud de las personas y el ecosistema fluvial. Finalmente, este estudio podría generar políticas ambientales para el manejo y localización futura de pasivos mineros en la región, al relacionar la carga de material fino transportado por suspensión y las concentraciones de cobre presentes en las principales cuencas hidrográficas del norte de Chile.

6 Bibliografía

Aceituno P., Prieto MR., Solari ME., Martínez A., Poveda G. y Falvey M., 2009: El episodio de El Niño de 1877-1878: Impactos asociados en América del Sur. *Cambio Climático*, 92, 389 - 416, doi: <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9470-5> . [Crossref](#)

Acme Labs, Acme Analytical Laboratories (Vancouver) Ltd., Price Brouchure 2009.

Aguilar G., Cabre A., Guaita C., González F., Ortega F., Carretier S., Riquelme R., y Comte D., 2015.

Denudación por flujos de detritos durante las lluvias torrenciales de marzo de 2015 en Atacama. pp 816-818.

Aguirre-Urreta, B., 1993. Neocomian ammonite biostratigraphy of the Andean basins of Argentina and Chile. *Rev. Española de Paleontología* 8, 57–74.

Alfaro A., Fuentes F., Murillo I. 2015. Efectos geológicos del evento meteorológico de marzo de 2015 en la comuna de alto del Carmen: Descripción de los aluviones y áreas propuestas para evacuación, campamentos de emergencia y acopio de sedimentos en los valles de los ríos del Carmen y el Tránsito. Subdirección Nacional de Geología, SERNAGEOMIN.

Arévalo, C., 1994. Mapa geológico de la Hoja Los Loros, Región de Atacama (1:100.000). Servicio Nacional de Geología y Minería, Documentos de, Trabajo No#6.

Arévalo, C., 1999. The Coastal Cordillera–Precordillera boundary in the Copiapó area, northern Chile, and the structural setting of the Candelaria Cu–Au ore deposit. Unpublished Ph.D. Thesis. Kingston University, Kingston-upon-Thames, UK, 244 p.

Arévalo, C., 2005a. Carta Copiapó, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Santiago. 91, 54 p, scale: 1:100.000.

Arévalo, C., 2005b. Carta los Loros, Región de Atacama, Carta Geológica Básica. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. 92, 54 p, scale: 1:100.000.

Arévalo, C., Welkner, D., 2008. Carta Carrizal Bajo-Chacritas, Región de Atacama, Carta Geológica Básica. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, scale: 1:100.000.

Bahlburg, H., Breikreuz, C. 1993. Differential response of Devonian–Carboniferous platform-deeper basin system to sea-level change and tectonics, N. Chilean Andes. *Basin res.* Pp. 21-40

Barrett, B. S., D. A. Campos, J. Vincencio Veloso, and R. Rondanelli. 2016. Extreme temperature and precipitation events in March 2015 in central and northern Chile. *J. Geophys. Res. Atmos.* 121, 4563–4580.

Bell, C.M. 1984. Deformation produced by the subduction of a Paleozoic turbidite sequence in northern Chile. *J. Geol. Soc.*, 141 (1984), pp. 339 – 347

Boggs, S. J. (2009). Petrology of sedimentary rocks. New York, United States: Cambridge University Press.

Bozkurt D., Rondanelli R., Garreaud R., y Arriagada A. 2016. Impact of warmer eastern tropical Pacific SST on the March 2015 Atacama floods, *Mon. Weather Rev.*, 144, 4441–4460.

Cade-Idepe (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, Cuenca del río Biobío. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. Inédito.

Cembrano, J.; Zentilli, M.; Grist, A.; Yáñez, G. 2003. Nuevas edades de trazas de fisión para Chile Central (30°-34°S): Implicancias en el alzamiento y exhumación de los Andes desde el Cretácico. *In* Congreso Geológico Chileno, No. 10, CD Rom. Concepción.

Charrier, R. 1979. El Triásico en Chile y regiones adyacentes de Argentina: Una reconstrucción paleogeográfica y paleoclimática. pp. 1 - 47

Charrier, R., Pinto, L., Rodríguez, M.P., 2007. Tectono-stratigraphic Evolution of the Andean Orogen in Chile. In *The Geology of Chile* (Moreno, T., Gibbons, W., editors). The Geological Society of London, Special Publication: p. 21-116.

Chester. R. & Stoner J. H. 1973. Pb in particulates from the lower atmosphere of the eastern Atlantic. *Nature* 1973; 245:27– 8.

Contreras, J.P., Ramírez, C., Garrido, N., y Núñez, G. 2015. Caracterización hídrica y geológica de los aluviones del 25 y 26 de marzo de 2015 en la cuenca del Río El Salado, Región de Atacama, Chile.

En: XIV CONGRESO GEOLÓGICO Chileno: AT3, SIM12 Los aluviones de Atacama: context, causas y efectos: 6 de octubre de 2015. Chile, La Serena, Casino Enjoy Coquimbo. Sociedad Geológica de Chile. pp. 4.

Dallmeyer, D.R., Brown, M., Grocott, J., Graeme, T.K., Treloar, P.J. 1996. Mesozoic magmatic and tectonic events within the Andean Plate Boundary Zone, 26°–27°30'S, North Chile: constraints from ⁴⁰Ar/³⁹Ar Mineral Ages. *J. Geol.*, 104 (1996), pp. 19-40

Departamento de Geofísica Universidad de Chile (DGF). 2015. Caracterización Meteorológica de la tormenta del 24 al 26 de marzo de 2015 en Atacama y Antofagasta. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geofísica. pp. 23.

Dhana-Raju, R., 2009. Handbook of Geochemistry. Geological Society of India, Bangalore.

Días M.C. 2012. Geología, alteración y mineralización aurífera en el proyecto San Antonio, franja Chañarillo, región de atacama. Pp 17-18.

Dirección General de Aguas (DGA). 2003. Evaluación de los recursos hídricos subterráneos del valle del río Copiapó, Departamento de Estudios y Planificación. Informe Técnico. S.I.T. N° 87.

Dirección General de Aguas (DGA). 2010. Análisis Integrado de Gestión en la cuenca del río Copiapó, División de Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Informe Técnico. S.I.T. N° 211.

Dirección General de Aguas (DGA). 2011. Información pluviométrica, fluviométrica, estado de embalses y aguas subterráneas. Boletín N°411.

Dirección General de Aguas (DGA). 2011. Información pluviométrica, fluviométrica, estado de embalses y aguas subterráneas. Boletín N°404.

Dirección General de Aguas (DGA). 2012. Información pluviométrica, fluviométrica, estado de embalses y aguas subterráneas. Boletín N°416.

Dirección General de Aguas (DGA). 2015. Información pluviométrica, fluviométrica, estado de embalses y aguas subterráneas. Boletín N°443.

Dirección General de Aguas (DGA). 2017. Información pluviométrica, fluviométrica, estado de embalses y aguas subterráneas. Boletín N°474.

Ferrando, R., Fuentes, F., Coloma, F., y Merino, R. 2015. Efectos geológicos del evento meteorológico del 24 y 25 de 2015: Fotointerpretación y reconocimiento en terreno del efecto de aluviones e inundaciones en las zonas de Tierra amarilla y Nantoco: zona de inundación y zonas propuestas para evacuación, campamento y acopio (Sernageomin).

Francisco Ramírez. 2015. Caracterización del peligro geológico en la Quebrada El Carrizo, Región de Atacama, Chile. *Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Beauchef 850, Santiago, Chile.*

Franzese, J.R., Spalletti, L.A., 2001. Late Triassic–early Jurassic continental extension in southwestern Gondwana: tectonic segmentation and pre-break-up rifting. *J. S. Am. Earth Sci.* 14, 257–270.

Folk, R. L. 1974. Petrology of sedimentary rocks. Austin, United States: Hemphill Publishing Co.

García, F. 1967. Geología del Norte Grande de Chile. In Symposium sobre el Geosinclinal Andino, sociedad Geológica de Chile, Vol. 3 p. 138.

Germán, A., Riquelme, R., Martinod, J., Darrozes, J., 2013. Rol del clima y la tectónica en la evolución geomorfológica de los Andes Semiáridos chilenos entre los 27-32°S. *Andean Geology* 40 (1): 79-101. January, 2013, doi: 10.5027/andgeoV40n1-a04

Golder Associates. 2006. Diagnóstico de los Recursos Hídricos de la Cuenca del río Copiapó y Proposición de un modelo de Explotación Sustentable. INFORME FINAL.

Goldschmidt, 1937. Principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. The seventh Hugo Müller Lecture, delivered before the Chemical Society on March 17th, 1937 *J. Chem. Soc.* (1937), pp. 655-673

Glosario técnico minero. Ministerio de minas y energía. República de Colombia. Bogotá D.C, agosto de 2003.

Grijalba V. 2016. Geología y Analisis Historico-Meteorológico del aluvi3n de marzo 2015 en Chañaral, Atacama. Memoria para optar al título de ge3logo. Pp 18-20.

Godoy, E; Marquardt, C; Blanco, N. 2003. Carta Caldera, Regi3n de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología B3sica, No 76, 39 p., 1 mapa escala 1:100000

Godoy, E.; Lara, L., 1998. Hojas Chañaral y Diego de Almagro, Regi3n de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geol3gicos No. 5-6, 1 mapa escala 1:100.000, Santiago

Grocott, J., Brown, M., Dallmeyer, G., Taylor, G. & Treloar, P. 1994. Mechanism of continental grow in extensional arcs: an example from the Andean Plate Boundary Zone. *Geology*, 22, 391-394.

Grocott, J., G. Taylor, G. 2002. Magmatic arc fault systems, deformation partitioning and emplacement of granitic complexes in the Coastal Cordillera, north Chilean Andes (25°30' to 27°00'S). *J. Geol. Soc. Lond.*, 159 (2002), pp. 425-442

Haug, E. W., Kraal, E. R., Sewall, J. O., Van Dijk M., and Diaz, G. 2010. Climatic and geomorphic interactions on alluvial fans in the Atacama Desert, Chile. *Geomorphology* 121 (2010) p. 184–196.

Herve, F., J. Davidson, E. Godoy, C. Mpodozis, and V. CovacevichT, 1981. The Late Paleozoic Chile: Stratigraphy, structure and tectonic framework. *Acad. Bras. Cienc.*, 53, 361-373,

Instituto Geogr3fico Militar (IGM). 1984. Geografía de Chile. Tomo VIII, Hidrografía. Naturaleza educativa S/A. Geología, GEODINÁMICA INTERNA, Tectónica de placas - 6ª parte. Leído 26 de noviembre en: http://www.natureduca.com/geol_geodinint_tectonica6.php

Iriarte S., Ar3valo C., Mpodozis C. Y Rivera O. 1996. Mapa Geol3gico de la Hoja Carrera Pinto, Regi3n de Atacama. Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería. Esc. 1:100.000.

Iriarte S., Ar3valo C., Y Mpodozis C 1999. Mapa Geol3gico de la Hoja La Guardia, Regi3n de Atacama. Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería. Esc. 1:100.000.

Izquierdo T., Abad M., Bern3rdez E. 2016. Catastrophic flooding caused by a mudflow in the urban area of Copiap3 (Atacama Desert, northern Chile). *International Conference on Urban Risks*.

Jensen O., Vicente J.C. 1976. Estudio geol3gico del 3rea de "Las Juntas" del rio Copiap3 (Provincia de Atacama-Chile). *Rev. Asoc. Geol. Argent.* 21, 145–173.

Jensen O., 1976. Geología de las nacientes del r3o Copiap3, entre los 27°53' y 28°20' de latitud Sur, provincia de Atacama. Memoria de T3tulo (In3dito), Universidad de Chile, Departamento de Geología, Chile (249 pp.).

Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., and Rubel F. 2006. World Map of the K3ppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.*, 15, pp. 259-263.

Lara, L and Godoy, E., 1998. Mapa Geol3gico de la Hoja Quebrada Salitrosa, Regi3n de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, scale: 1:100.000

Loska, K., Cebula, J., Pelczar, J., Wiechula, D., Kwapilinski, J. 1997. Use of enrichment and contamination factors together with geoaccumulation indexes to evaluate the content of Cd, Cu, and Ni in the Rybnik water reservoir in Poland. *Water, Air, and Soil Pollution* 1997; 93:347– 65.

Maksaev, V., Munizaga, F., Valencia, V., Barra, F., 2009. LA-ICP-MS zircon U–Pb geochronology to constrain the age of post-Neocomian continental deposits of the Cerrillos Formation, Atacama Region, northern Chile: tectonic and metallogenic implications. *Andean Geol.* 36, 264–287.

Marschik R., and Fontboté, L. 2001. The Candelaria–Punta del Cobre iron oxide Cu–Au (–Zn–Ag) deposits, Chile *Econ. Geol.*, 96 (2001), pp. 1799-1826

Mpodozis, C., Kay, S., 1990. Provincias magmáticas ácidas y evolución tectónica de Gondwana: Andes chilenos (28–31°S). *Rev. Geol. Chile* 17, 153–180.

Marín A., González V., Lapo B., Molina E., Lemus M., 2016. **Mercury in sediments at El Oro province, Ecuador.** Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador. Pp 147-153

Martin M., Clavero R., Mpodozis, C., 1997. Eocene to late Miocene magmatic development of El Indio belt, 30°S, North Central Chile, paper presented at VIII° Congreso Geológico Chileno. 1 pp. 149–153 (Antofagasta).

Martinez F., Arriagada C., Peña M., Deckart K., Charrier R., 2015. Tectonic styles and crustal shortening of the Central Andes “Pampean” flat-slab segment in northern Chile (27–29°S). Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile. PP 144-162.

Mercado, M., 1978. Avance geológico de la hoja de Caldera. Región e Atacama escala 1:250000, Mapa N°1.

Miller, H., 1973. Neues zur Geologie von Chile. *Zlb. Geol Palaont.* (1, 2), 74-140.

Mortimer, C., 1973. The Cenozoic history of the southern Atacama Desert, Chile. *J. Geol. Soc. Lond.* 129, 505–526.

Mourgues, F.A., 2004. Advances in ammonite biostratigraphy of the marine Atacama basin (Lower Cretaceous), northern Chile, and its relationship with the Neuquén basin, Argentina. *J. S. Am. Earth Sci.* 17, 3–10.

Moscoso R., Mpodozis C., Nassi C., Ribba L., Arévalo C (Compilador), 2010. Geología de la Hoja El Tránsito, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile, Serie Preliminar, 7, scale: 1:250.000, 3 anexos, Santiago.

Mpodozis C., y Ramos V.A., 1989. The Andes of Chile and Argentina; in: Ericksen, G.E., Cañas, M.T. and Reinemund, J.A. (Editors) *Geology of the Andes and Its Relation to Hydrocarbon and Energy Resources*; Circum-Pacific Council for Energy and Hydrothermal Resources, American Association of Petroleum Geologists, Earth Science Series, Houston, Texas, Vol. 11, p. 59-90.

Mpodozis C., Ramos, V., 1990. The Andes of Chile and Argentina. In: Ericksen, G.E., Cañas Pinochet, M.T., Reinemud, J.A. (Eds.), Geology of the Andes and its relation to hydrocarbon and mineral resources: Circumpacific Council for Energy and Mineral Resources. Earth Science Series 11, pp. 59–90.

Mpodozis, C., and Ramos, V.A.2008. Tectónica jurásica en Argentina y Chile: Extensión, Subducción Oblicua, Rifting, Deriva y Colisiones. Rev. Geol. Argent., 63 (2008), pp. 479-495

Nalpas, T.; Dabard, M-P.; Ruffet, G.; Vernon, A.; Mpodo-zis, C.; Loi, A.; Hérail, G. 2008. Sedimentation and preservation of the Miocene Atacama Gravels in the Pedernales-Chañaral Area, Northern Chile: Climatic or tectonic control? Tectonophysics 459: 161-173.

Naranjo, A., Puig, A. 1984. Hojas Taltal y Chañaral, Regiones de Antofagasta y Atacama Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago (1984), pp. 62-63 (140 pp.)

Naranjo, J. A., Olea-Encina, P. 2015. *Descargas aluviales durante la tormenta del desierto de Atacama en marzo de 2015, Chile.* SERNAGIOMIN.

Olea, P., Arce, S. 2015. Informe Preliminar N° 2. Caracterización de las principales cuencas afectadas durante el evento meteorológico del 24 y 26 de marzo de 2015. Informe inédito producto de la emergencia. SERNAGEOMIN.

Oliveros V., Féraud G., Aguirre L., Fornari M., Morata D. 2006. The Early Andean Magmatic Province (EAMP): $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating on Mesozoic volcanic and plutonic rocks from the Coastal Cordillera, Northern Chile. J. Volcanol. Geotherm. Res., 157 (2006), pp. 311-330

Oyarzún J., Levi B., Nystrom J.O. A Within-Plate Geochemical Signature and Continental Margin Setting for the Mesozoic-cenozoic Lavas of Central Chile (Second), ISAG, Oxford (UK) (1993), pp. 419-422.

Oyarzún J., Oyarzún R., Lillo J., Higuera P., Maturana H., Oyarzún R. Distribution of chemical elements in calc-alkaline igneous rocks, soils, sediments and tailings deposits in northern central Chile. Departamento Ingeniería de Minas, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Serena, Casilla 554, La Serena, Chile. Pp 25-42.

Paskoff, R. 1970. Le Chili semi-aride, recherches géo-morphologiques. Biscaye Frères: 420 p. Bordeaux.

Paula Olea-Encina* y Diana Quevedo-Tejada, 2015. Distribución espacio-temporal de la precipitación durante el evento meteorológico del 24 a 26 de marzo de 2015 y sus efectos sobre la generación de flujos aluviales (Sernageomin)

Peña, M., Arriagada, C., Martínez, F., Becerra, J., 2013. Carta Geológica Yerbos Buenas-Tres Morros, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, scale: 1:100.000.

Ávila, P. 2004. Distribución de mercurio en agua y sedimento de una presa mexicana. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Centro Nuclear “Dr. Nabor Carrillo Flores” Departamento de Estudios del Ambiente.

Pindell, J., Dewey, J., 1982. Permo-Triassic reconstruction of western Pangea and the evolution of the Gulf of Mexico/Caribbean region. *Tectonics* 1, 179–211.

Price, G., Dashwood, B., Taylor, G., Kalin, M., Ogle, N., 2008. Carbon isotope and magnetostratigraphy of the Cretaceous (Barremian and Aptian) Pabellón Formation, Chañarcillo Basin, Chile. *Cretac. Res.* 29, 183–191.

Ramos, V. A., Jordan, T. E., Allmendinger, R. W., Mpodozis, C., Kay, S.M., Cortés, J.M., and Palma, M. 1986. Paleozoic terranes of the central argentine-chilean andes.

Ramos, V.A., 2009. Anatomy and global context of the Andes: main geologic features and the Andean orogenic cycle. In: Kay, S.M., Ramos, V.A., Dickinson, W.R. (Eds.), *Backbone of the Americas: shallow subduction, plateau uplift, and ridge and terrane collision*. The Geological Society of America. *Memoir* 204, pp. 31–65.

Reimann, C. & de Caritat, P. 2000. Intrinsic flaws of element enrichment factors (EFs) in environmental geochemistry. *Environmental Science & Technology*, 34, 5084-5091.

Reimann, C. & de Caritat, P. 2005. Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment: regional geochemical surveys versus enrichment factors. *Science of the Total Environment*, 337, 91-107.

Riquelme, R.; Martinod, J.; Hérail, G.; Darrozes, J.; Charrier, R. 2003. A geomorphological approach to determining the Neogene to Recent tectonic deformation in the Coastal Cordillera of northern Chile (Atacama). *Tectonophysics* 361: 255-275.

Riquelme, R.; Herail, G.; Martinod, J.; Charrier, R.; Darrozes, J. 2007. Late Cenozoic geomorphologic signal of Andean forearc deformation and tilting associated with the uplift and climate changes of the Southern Atacama Desert (26 degrees S-28 degrees S). *Geomorphology* 86: 283-306.

Rojos Colville, S. (2016). Determinación de la dinámica de transferencia de plomo, cobre, arsénico y mercurio en la cuenca del Río Copiapó. Región de Atacama, Chile.

Rudnick, R. L. and Gao, S. (2003). Composition of the continental crust, in *Treatise on Geochemistry* (eds. H. D. Holland and K. K. Tur ekian), Elsevier, vol. 3, pp. 47-54

Segerstrom, K., 1960. Cuadrángulo Quebrada Paipote, Provincia de Atacama, Carta Geológica de Chile. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago de Chile (35 pp.)

Segerstrom, K., Ruiz, C., 1962. Cuadrángulo Copiapó, Provincia de Atacama, Carta Geológica de Chile. 6. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago de Chile (115 pp.).

Segerstron, K., Parker, 1959. Cuadrángulo Los Loros, Provincia Atacama, Carta Geológica de Chile. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago de Chile (33 pp.).

Sepúlveda, S., Rebolledo, S., and Vargas, G., 2006. Recent catastrophic debris flows in Chile: Geological hazard, climatic relationships and human response. *Quaternary International* 158 (2006) 83–95.

Scheuber, E., Bogdanic, T., Jensen, A. And Reutter, K.J., 1994. Tectonic Development of the North Chilean Andes in Relation to Plate Convergence and Magmatism since the Jurassic; in: Reutter, K.-J., Scheuber, E. & Wigger, P. (editores): *Tectonics of the Southern Central Andes*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, p. 121-139.

Scheuber E., Andriessen PAM, 1990. The kinematic and geodynamical significance of the Atacama Fault Zone, northern Chile. *J Struct Geol* 12: 243-257.

Scheuber, E. y Reutter, K.J., 1992. Relation between Tectonics and Magmatism in the Andes of Northern Chile and Adjacent Areas between 21° and 25°S. *Tectonophysics*, Vol. 205, p. 127-140.

Schulz, N. , JP Boisier, y P. Aceituno, 2012 : Cambio climático a lo largo de la costa árida del norte de Chile . *En t. J. Climatol. , 32 , 1803 - 1814 , doi: <https://doi.org/10.1002/joc.2395> . [Crossref](#)*

Sillitoe, R.H.; Mortimer, C.; Clark, A.H. 1968. A chronology of landform evolution and supergene mineral alteration, Southern Atacama Desert, Chile. *Institute of Mining and Metallurgy Transactions (Section B)* 27: 166-169.

SNGM 2016, ‘Atlas de Depósitos de Relaves de Chile’ Sernageomin - Gobierno de Chile; viewed 2nd June 2016: <http://relaves.sernageomin.cl/#/home>

Soffia, J.M., 1989. Estratigrafía y geología estructural del área del río Jorquera, Región de Copiapó. Memoria de Título (Inédito). Universidad de Chile, Departamento de Geología (159 pp.).

Soublette, N., Heyer, J., Cortés, I. (2011): INFORME FINAL. “Investigación preliminar y confirmatoria de suelos con potencial presencia de contaminantes (SPPC). Comunas de Copiapó y Tierra Amarilla.”.

Stuart N. Lane* And Keith S. Richards., 1997. Linking river channel form and process: time, space and causality revisited. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol 22, p. 249-260.

Taylor, G., Grocott, J., Dashwood, B., Gipson, M., Arévalo, C. 2007. Implications for crustal rotation and tectonic evolution in the central Andes forearc: new paleomagnetic results from the Copiapó region of northern Chile, 26°–28°S *J. Geophys. Res.*, 112 (2007), [10.1029/2005JB003950](https://doi.org/10.1029/2005JB003950)

Thiele, R., 1964. Reconocimiento geológico de la Alta Cordillera de Elqui, Universidad de Chile, Departamento de Geología. 27. Publicaciones, pp. 1–73.

Thiele, R. y Hervé, F., 1984. Sedimentación y tectónica de antearco en los terrenos preandinos del Norte Chico de Chile. *Rev. Geol. Chile*, No. 22, p. 61-75.

Valdés-Pineda, R., Valdés, J. B., García-Chevesich, P. 2017. Mudflow Modeling in the Copiapó Basin, Chile. *Ingeniería del agua*, 21(2), 135-152. <https://doi.org/10.4995/ia.2017.7366>

Vargas G., Rutilant J. y Ortlieb L. 2006. ENSO tropical-extratropical climate teleconnections and mechanisms for Holocene debris flows along the hyperarid coast of western South America (17°-24°S). *Earth and Planetary Science Letters* 249:467-483.

Visher G. 1969. Grain size distributions and depositional processes. *Journal of Sedimentary Petrology* 39(3):1074-1106.

Wentworth, C.K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *J. Geol.*, 4: 377-392.

Willis, B., 1929. Earthquake conditions in Chile. *Carnegie Inst. Publ.* 382 (178 pp.).

Wilcox, A. C., and Coauthors. 2016. An integrated analysis of the March 2015 Atacama floods. *Geophys. Res. Lett.*, 43, 8035–8043, doi:10.1002/2016GL069751.

Yurisch T. 2016. “Situación de los pasivos ambientales mineros en Chile. El caso de depósitos de relaves”, 3-24.

Zoller, W. H., Gladney, E. S., Duce, R. A. 1974. Atmospheric concentrations and sources of trace metals at the South Pole. *Science* 1974; 183:199– 201.

7 Anexos

7.1 Anexo I: Método de las Momentos

7.1.1 Primer Momento o Promedio

Corresponde al primer momento (1), de acuerdo con Boggs (2009), la fórmula matemática que los calcula se expresa en:

$$\sum_{k=1}^N \frac{((Porcentaje\ de\ peso) * (Phi\ medio))}{100} = X\phi \quad (1)$$

$X\phi$: grano medio en escala phi

F: frecuencia o abundancia de los diferentes grados de tamaño de grano presente en el sedimento (porcentaje peso).

$M\phi$: es el punto medio de cada grado de tamaño de grano en escala phi (phi medio).

El primer momento (1) determina el tamaño promedio de la muestra y agrega la característica de este proceso al estudio del sedimento, la cual se indica en tamaños como limo, arena fina, arena media, arena gruesa, y grava, los cuales serán evaluados según la tabla para tamaño de sedimentos Udden-Wentworth (Figura 3).

7.1.2 Mediana

Corresponde al diámetro de las partículas que están en la mitad exacta de la población, es decir ϕ_{50} , pues este valor está en la escala phi (Folk, 1974).

$$Md\phi = P50$$

7.1.3 Desviación estándar

Es el resultado del segundo momento (2) y de acuerdo con Boggs (2009) la fórmula matemática que lo calcula se expresa en:

$$\sqrt{\sum_{k=1}^N \frac{(Porcentaje\ de\ peso) * (Phi\ medio - promedio)^2}{100}} = \sigma\phi \quad (2)$$

Dicho resultado representa el grado de selección de la muestra (Fig. 99), un dato importante a la hora de definir la procedencia del sedimento. Esta cualidad nos indica qué tan similares son los tamaños de todas las partículas que componen la muestra, dando paso a la deducción del transporte y la roca fuente del ejemplar analizado (Folk, 1974).

La Fig. 99 representa la homogeneidad de las partículas que conforman un sedimento, es decir: si las partículas son de dimensiones muy parecidas, se dice que la muestra se encuentra muy bien seleccionada (primer recuadro), y así a medida que los tamaños van variando, se va perdiendo la afinidad en la muestra y se clasificará como moderadamente seleccionada, o como pobremente seleccionada cuando los tamaños ya muestran grandes diferencias. La interpretación verbal de la desviación se realiza mediante una clasificación de los resultados numéricos (Tabla 2).

Tabla 7.1. Indicadores de la selección a partir del resultado del segundo momento (2). Fuente: Folk, 1974

$\sigma\phi$	Grado de Selección
menor que 0.35	Muy bien seleccionada
0.35 — 0.50	Bien seleccionada
0.50 — 0.70	Moderadamente bien seleccionada
0.70 — 1.00	Moderadamente seleccionada
1.00 — 2.00	Pobremente seleccionada
2.00 — 4.00	Muy pobremente seleccionada
> 4.00	Extremadamente pobremente seleccionada

7.1.3 Asimetría (Skewness)

Es el tercer momento (3), el cual se calcula con la siguiente fórmula (Boggs, 2009):

$$\sum_{k=1}^N \frac{(\text{Porcentaje de peso}) * (\text{Phi medio} - \text{promedio})^3}{100 * (\text{Desviación estándar})^3} \quad (3)$$

Este procedimiento indica el exceso, carencia, o buena distribución de partículas, de un determinado tamaño en el sedimento; por ejemplo, una asimetría negativa (Fig. 100) significa un exceso de partículas tamaño grueso en la muestra, así como una asimetría positiva (Fig. 100) indica el exceso de partículas de grano fino en la misma. Esta ecuación depende de la desviación estándar (2), así cuando el segundo momento es cero no podrá ser calculado. De aquí se parte al uso de un método diferente para analizar este dato, y es cuando se utiliza el método gráfico. Por esta razón el algoritmo incorpora un par de gráficas las cuales hacen posible y facilitan dicho análisis. La interpretación verbal del resultado obtenido se hace mediante una clasificación (Tabla 3.) propuesta por (Folk, 1974).

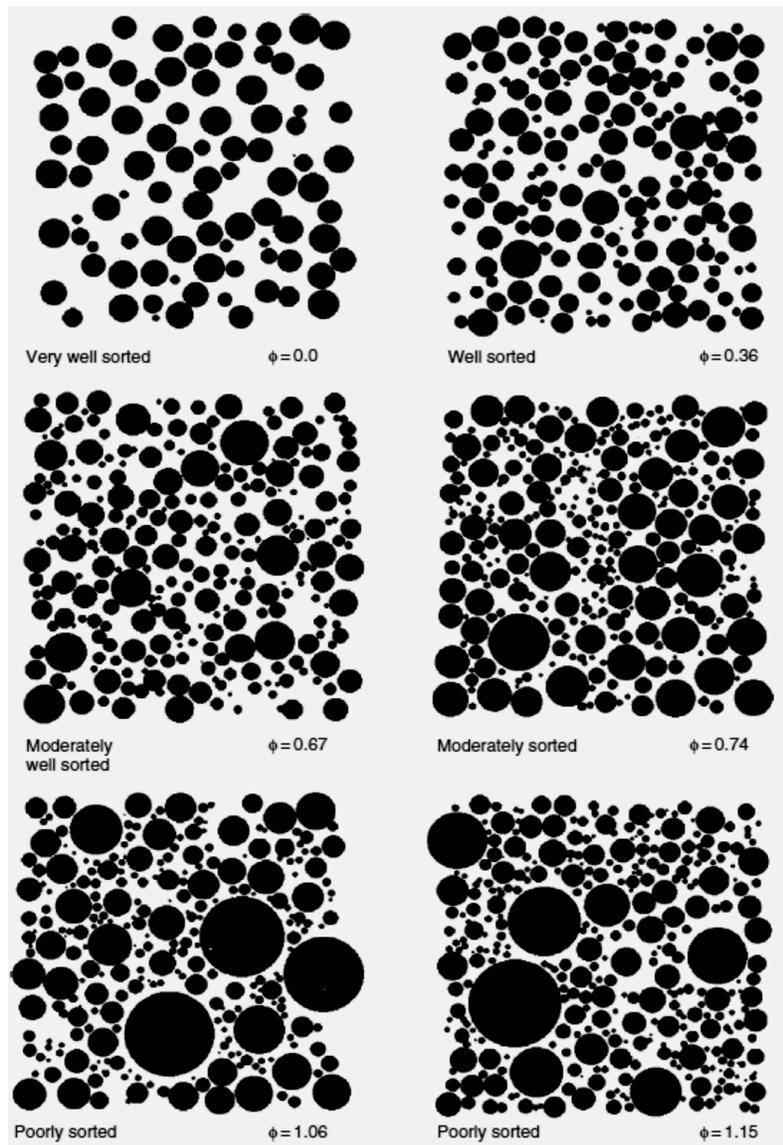


Figura 7.1: Comparación textural del decrecimiento de la selección en una muestra de sedimento. Boggs, 2009

Tabla 7.2: Indicadores de asimetría según el resultado del tercer momento. Boggs, 2009.

Ski	Asimetría	Sesgo
> 0.3	Muy positiva	Muy fino
0.3 a 0.1	Positiva	Fino
0.1 a -0.1	Simétrica	Simétrico
-0.1 a -0.3	Negativa	Grueso
-0.3 a -1.0	Muy negativa	Muy grueso

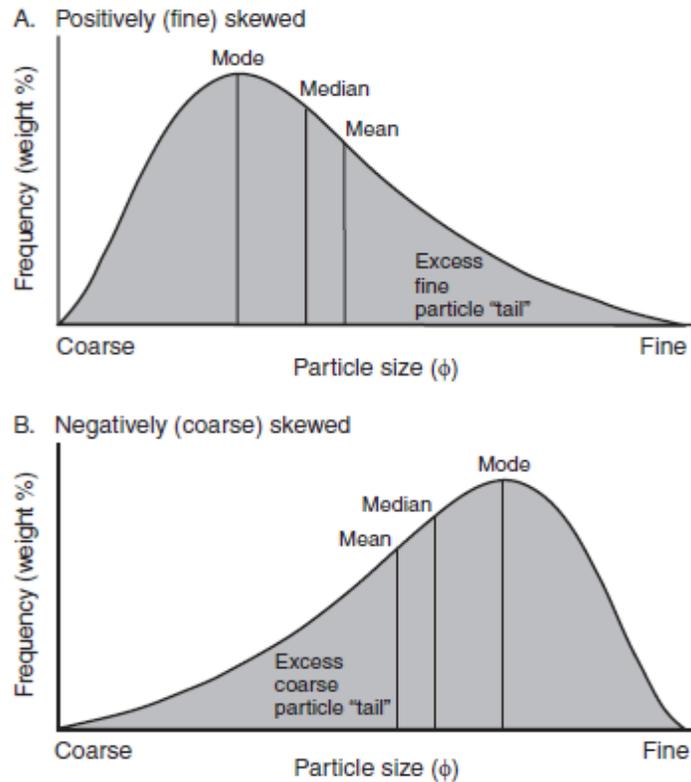


Figura 7.2: Curvas de frecuencia de tamaño sesgadas, mostrando la diferencia entre una asimetría con tendencia a tamaños gruesos (A) y otra con una tendencia a tamaños finos (B). Boggs, 2009

7.1.4 Kurtosis

Corresponde al resultado de la medición del cuarto momento (4), y se calcula de la siguiente manera (Boggs, 2009):

$$\sum_{k=1}^N \frac{(\text{Porcentaje de peso}) * (\text{Phi medio} - \text{promedio})^4}{100 * (\text{Desviación estandar})^4}$$

Es una medida que relaciona la selección entre la porción central de la curva y sus extremos. A mejor seleccionada en los extremos, la curva es Platicúrtica, y si es mejor en el centro es Leptocúrtica. Es una comprobación estadística que ayuda a corroborar la asimetría y selección de la muestra (Tabla 4).

Tabla 7.3: Muestra los grados de kurtosis a partir del valor entregado por la fórmula de Boggs, 2009:

Curtosis	KΦ
<i>Muy platicúrtica</i>	<0.67
<i>Platicúrtica</i>	0.67-0.90
<i>Mesocúrtica</i>	0.90-1.11
<i>Leptocúrtica</i>	1.11-1.50
<i>Muy leptocúrtica</i>	1.50-3.00
<i>Extremadamente leptocúrtica</i>	>3.00

7.2 Anexo II: Geoquímica de Muestras postaluvionales

Tabla 7.4: Composición geoquímica de las muestras postaluvión (ppm).

	Elisa de Bordos				Lautaro				Corteza Continental	Main Andesites
	300315	140415	180515	40617	300315	140415	180515	40617		
SiO ₂	490300	496200	527300	478000	474800	513000	501600	540000	606000	531000
Al ₂ O ₃	133900	143700	144600	130000	131200	137300	133600	144400	154000	176000
FeO	50850	71550	65520	119340	99990	71460	114660	62370	67100	88000
MgO	22800	25600	26900	26000	27100	25300	27000	25100	46600	39000
CaO	117400	93300	87000	92500	94800	93900	75800	84900	64100	80000
Na ₂ O	23600	27600	30300	26100	24100	27100	26300	29800	32700	37000
K ₂ O	16600	17400	16900	14600	15800	17200	16100	17800	18100	12000
TiO ₂	8600	11200	10400	17600	16200	13100	20800	11600	7200	12000
P ₂ O ₅	2700	2600	2300	2900	3300	3000	3300	2600	1500	2000
MnO	1100	1300	1200	1600	1500	1400	1900	1300	1000	1800
Cr ₂ O ₃	90	100	90	200	230	180	280	140	135	49
Sc	14	18	16	19	18	16	19	16	21.9	19.7
Ba	391	440	417	549	543	555	678	510	456	435
Co	16	18	18	22	21	18	25	17	26.6	34
Cs	7	10	8	6	5	4	3	4	2	-
Ga	14	16	15	15	16	15	18	15	17.5	-
Hf	4	6	5	22	21	10	26	8	3.7	-
Nb	8	9	8	13	13	13	18	12	8	-
Rb	60	64	59	49	53	57	55	60	49	-
Sn	3	2	1	2	3	5	3	2	1.7	-
Sr	497	452	446	413	398	433	379	472	320	-
Ta	1	1	1	1	1	1	1	1	0.9	-
Th	6	7	7	10	12	8	15	8	5.6	-
U	2	2	2	4	3	2	5	2	1.3	0.8
V	123	189	166	310	250	178	299	147	138	222
W	2	2	1	6	1	1	1	1	1	-
Zr	158	242	198	883	823	405	1038	299	132	-
Y	22	23	22	33	32	29	40	25	21	31.4
La	24	25	23	34	32	31	42	30	20	18.6
Ce	48	49	46	67	68	65	87	59	43	46.5
Pr	6	6	6	8	8	8	10	7	4.9	-
Nd	22	24	23	31	31	29	40	29	20	-
Sm	4	5	5	6	6	6	8	6	3.9	6.1
Eu	1	1	1	2	1	2	2	1	1	-
Gd	4	5	5	6	6	6	8	5	4	-
Tb	1	1	1	1	1	1	1	1	0.7	-
Dy	4	4	4	6	5	5	7	5	3.9	-
Ho	1	1	1	1	1	1	2	1	0.83	-
Er	2	2	2	4	3	3	5	3	2.3	-
Tm	0	0	0	1	1	1	1	0	0.3	-
Yb	2	2	2	4	4	3	5	3	2	2.9
Lu	0	0	0	1	1	1	1	0	0.31	-
Mo	2	2	2	2	2	1	1	1	0.8	-
Cu	164	152	155	162	622	113	490	120	28	86
Pb	21	25	20	26	19	15	18	12	11	6
Zn	96	100	102	105	196	99	208	79	72	114
Ni	27	20	20	28	37	29	34	25	59	30
As	17	25	16	17	12	11	11	9	2.5	7
Cd	0	0	0	0	0	0	0	0	0.09	-
Sb	0	1	1	1	0	0	0	0	0.4	-
Bi	0	0	0	0	0	0	0	0	0.16	-
Ag	0	0	0	0	0	0	0	0	53	-
Au	0	0	0	0	0	0	0	0	1.5	-
Hg	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03	-
B	35	62	10	10	28	24	10	10	17	-

Tabla 7.4: Composición geoquímica de las muestras postaluvión (ppm).

ID Muestra	María Isabel			Paipote			Cerrillos			
	140415	40617	300315	140415	180515	40617	300315	140415	180515	40617
SiO ₂	528500	472200	487800	495600	515800	507300	506000	498700	510000	488300
Al ₂ O ₃	147600	154500	133500	138100	137600	137300	137100	136300	143900	134000
FeO	76050	54540	70920	64980	85320	65340	82350	72270	84960	96750
MgO	26700	32500	24400	25100	24900	25000	25000	24600	28600	25900
CaO	76200	93000	111700	104400	86400	103300	92900	102000	83000	97300
Na ₂ O	27600	19500	22900	23300	25700	28200	25600	26000	29400	27300
K ₂ O	17900	20400	16000	17500	16900	15900	16700	16400	15900	15200
TiO ₂	11900	7900	11300	10600	13000	11300	12500	11500	12700	14900
P ₂ O ₅	2400	2800	3000	2900	2900	2800	2800	2700	2600	2900
MnO	1300	1400	1300	1200	1300	1200	1400	1200	1400	1400
Cr ₂ O ₃	80	90	110	100	130	130	120	110	110	180
Sc	18	15	17	16	17	16	18	17	19	18
Ba	573	441	419	458	521	450	450	462	442	550
Co	19	21	17	16	20	18	19	18	19	20
Cs	7	11	7	9	7	6	7	8	7	6
Ga	17	18	15	15	17	14	14	15	17	16
Hf	8	4	7	6	10	6	10	8	7	15
Nb	9	8	9	9	10	9	9	9	8	12
Rb	63	80	57	63	62	55	58	57	54	52
Sn	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2
Sr	447	374	475	463	445	437	458	462	402	432
Ta	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Th	11	7	7	8	16	7	14	7	10	12
U	3	3	2	2	3	2	4	3	3	4
V	200	108	175	161	210	157	215	183	213	243
W	2	1	1	1	2	1	2	1	2	1
Zr	303	141	271	244	411	219	383	328	282	561
Y	25	22	24	23	24	25	27	24	25	28
La	26	24	27	27	31	27	28	25	25	30
Ce	53	49	55	54	63	52	57	59	53	62
Pr	7	6	6	6	8	7	7	6	7	8
Nd	25	22	25	25	30	26	28	25	27	31
Sm	5	5	5	5	6	5	5	5	5	6
Eu	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Gd	5	5	5	5	6	5	5	5	5	6
Tb	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Dy	5	4	4	4	5	5	4	4	5	5
Ho	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Er	3	2	3	2	3	2	3	2	3	3
Tm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Yb	3	2	2	2	3	2	3	2	3	3
Lu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mo	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2
Cu	199	422	109	161	272	113	449	194	404	112
Pb	38	26	28	27	31	24	36	33	30	29
Zn	124	167	91	102	122	90	154	109	151	100
Ni	15	37	27	27	20	23	23	24	18	26
As	30	18	23	21	19	19	24	23	24	22
Cd	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sb	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
Bi	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Ag	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Au	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hg	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1
B	57	10	39	45	10	10	47	45	10	10

Tabla 7.5: Factores de enriquecimiento de los elementos químicos, pertenecientes a las muestras postaluvión (CC: con respecto a la corteza continental; M.A.: con respecto a Main Andesites (Oyarzún et al., 2016)).

Estacion de Muestreo	Fechas	CC	M. A.																				
		Si	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Ti	P	Mn	Cr											
Lautaro	30-03-2015	0.92	1.20	1.00	1.00	1.75	1.52	0.69	0.93	1.74	1.59	0.87	0.87	1.02	1.77	2.64	1.81	2.58	2.21	1.77	1.03	1.00	2.15
	14-04-2015	0.95	1.24	1.00	1.00	1.19	1.04	0.61	0.83	1.64	1.50	0.93	0.94	1.07	1.84	2.04	1.40	2.24	1.92	1.58	0.92	0.75	1.61
	18-05-2015	0.95	1.24	1.00	1.00	1.97	1.72	0.67	0.91	1.36	1.25	0.93	0.94	1.03	1.77	3.33	2.28	2.54	2.17	2.20	1.28	1.20	2.58
	04--06--2017	0.95	1.24	1.00	1.00	0.99	0.86	0.58	0.78	1.41	1.29	0.97	0.98	1.05	1.81	1.72	1.18	1.85	1.58	1.39	0.81	0.56	1.19
Elisa de Bordos	30-03-2015	0.93	1.21	1.00	1.00	0.87	0.76	0.57	0.77	2.11	1.93	0.83	0.84	1.05	1.82	1.37	0.94	2.07	1.77	1.27	0.74	0.38	0.83
	14-04-2015	0.88	1.14	1.00	1.00	1.14	1.00	0.59	0.80	1.56	1.43	0.90	0.91	1.03	1.78	1.67	1.14	1.86	1.59	1.40	0.82	0.40	0.86
	18-05-2015	0.93	1.21	1.00	1.00	1.04	0.91	0.62	0.84	1.45	1.32	0.99	1.00	0.99	1.71	1.54	1.05	1.63	1.40	1.29	0.75	0.36	0.76
	04--06--2017	0.93	1.22	1.00	1.00	2.11	1.84	0.66	0.90	1.71	1.57	0.95	0.96	0.96	1.65	2.89	1.99	2.29	1.96	1.91	1.11	0.88	1.89
Cerrillos	30-03-2015	0.94	1.22	1.00	1.00	1.38	1.20	0.61	0.82	1.63	1.49	0.88	0.89	1.04	1.79	1.95	1.34	2.10	1.80	1.58	0.92	0.50	1.08
	14-04-2015	0.93	1.21	1.00	1.00	1.22	1.06	0.60	0.81	1.80	1.65	0.90	0.91	1.02	1.76	1.80	1.24	2.03	1.74	1.36	0.79	0.46	0.99
	18-05-2015	0.90	1.17	1.00	1.00	1.36	1.18	0.66	0.90	1.39	1.27	0.96	0.97	0.94	1.62	1.89	1.29	1.85	1.59	1.51	0.88	0.44	0.94
	04--06--2017	0.93	1.22	1.00	1.00	1.66	0.95	0.64	0.82	1.74	1.66	0.96	0.98	0.97	1.70	2.38	1.21	2.22	1.79	1.62	0.79	0.77	1.16
Paipote	30-03-2015	0.93	1.21	1.00	1.00	1.22	1.06	0.61	0.82	2.01	1.84	0.81	0.82	1.02	1.76	1.81	1.24	2.31	1.98	1.51	0.88	0.47	1.01
	14-04-2015	0.91	1.19	1.00	1.00	1.08	0.94	0.60	0.82	1.82	1.66	0.79	0.80	1.08	1.86	1.64	1.13	2.16	1.85	1.35	0.78	0.41	0.89
	18-05-2015	0.95	1.24	1.00	1.00	1.42	1.24	0.60	0.82	1.51	1.38	0.88	0.89	1.04	1.80	2.02	1.39	2.16	1.85	1.46	0.85	0.54	1.16
	04--06--2017	0.94	1.22	1.00	1.00	1.09	0.95	0.60	0.82	1.81	1.66	0.97	0.98	0.99	1.70	1.76	1.21	2.09	1.79	1.35	0.79	0.54	1.16
María Isabel	14-04-15	0.91	1.19	1.00	1.00	1.18	1.03	0.60	0.82	1.24	1.14	0.88	0.89	1.03	1.78	1.72	1.18	1.67	1.43	1.36	0.80	0.31	0.67
	04--06--2017	0.78	1.01	1.00	1.00	0.81	0.71	0.70	0.95	1.45	1.32	0.59	0.60	1.12	1.94	1.09	0.75	1.86	1.59	1.40	0.82	0.33	0.72

Estacion de Muestreo	Fechas	CC	M. A.																				
		Th	U	V	W	Zr	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm											
Lautaro	30-03-2015	2.40	-	2.78	-	1.98	-	1.09	-	6.82	-	1.69	1.29	1.74	2.14	1.72	1.82	1.75	-	1.70	-	1.68	1.23
	14-04-2015	1.60	-	1.94	-	1.41	-	0.98	-	3.35	-	1.52	1.16	1.71	2.10	1.64	1.74	1.67	-	1.58	-	1.67	1.22
	18-05-2015	3.01	-	3.87	-	2.37	-	1.42	-	8.60	-	2.07	1.58	2.29	2.81	2.22	2.34	2.32	-	2.17	-	2.33	1.70
	04--06--2017	1.50	-	1.94	-	1.17	-	1.20	-	2.48	-	1.32	1.01	1.66	2.04	1.50	1.59	1.64	-	1.60	-	1.58	1.15
Elisa de Bordos	30-03-2015	1.25	-	1.51	-	0.98	-	1.75	-	1.31	-	1.16	0.88	1.29	1.58	1.23	1.30	1.25	-	1.20	-	1.26	0.92
	14-04-2015	1.31	-	1.60	-	1.50	-	1.64	-	2.00	-	1.20	0.92	1.36	1.67	1.25	1.32	1.32	-	1.31	-	1.43	1.04
	18-05-2015	1.39	-	1.94	-	1.32	-	0.77	-	1.64	-	1.12	0.86	1.28	1.57	1.17	1.23	1.29	-	1.26	-	1.37	1.00
	04--06--2017	1.90	-	3.20	-	2.46	-	6.56	-	7.31	-	1.71	1.31	1.83	2.25	1.70	1.80	1.75	-	1.72	-	1.68	1.23
Cerrillos	30-03-2015	2.70	-	3.03	-	1.70	-	1.97	-	3.17	-	1.38	1.06	1.55	1.90	1.46	1.54	1.52	-	1.53	-	1.44	1.05
	14-04-2015	1.35	-	2.10	-	1.45	-	1.53	-	2.71	-	1.25	0.96	1.38	1.70	1.50	1.58	1.44	-	1.36	-	1.47	1.08
	18-05-2015	1.95	-	2.19	-	1.69	-	1.75	-	2.34	-	1.30	0.99	1.39	1.71	1.34	1.41	1.47	-	1.45	-	1.53	1.12
	04--06--2017	2.36	-	3.20	-	1.93	-	1.42	-	4.65	-	1.45	1.00	1.66	1.78	1.57	1.40	1.67	-	1.67	-	1.63	1.10
Paipote	30-03-2015	1.29	-	1.94	-	1.39	-	1.09	-	2.24	-	1.26	0.96	1.46	1.79	1.40	1.48	1.45	-	1.38	-	1.47	1.07
	14-04-2015	1.47	-	1.94	-	1.28	-	1.31	-	2.02	-	1.21	0.93	1.45	1.78	1.37	1.45	1.42	-	1.38	-	1.39	1.02
	18-05-2015	3.03	-	2.86	-	1.66	-	1.97	-	3.41	-	1.26	0.96	1.68	2.07	1.61	1.70	1.68	-	1.62	-	1.68	1.23
	04--06--2017	1.29	-	2.02	-	1.24	-	1.09	-	1.81	-	1.31	1.00	1.45	1.78	1.33	1.40	1.48	-	1.40	-	1.51	1.10
María Isabel	14-04-15	2.13	-	2.44	-	1.59	-	1.64	-	2.51	-	1.31	1.00	1.41	1.73	1.36	1.44	1.45	-	1.38	-	1.51	1.10
	04--06--2017	1.37	-	2.19	-	0.86	-	0.88	-	1.17	-	1.16	0.89	1.29	1.58	1.24	1.31	1.29	-	1.20	-	1.39	1.01

Estacion de Muestreo	Fechas	CC	M. A.																				
		Sc	Ba	Co	Cs	Ga	Hf	Nb	Rb	Sn	Sr	Ta											
Lautaro	30-03-2015	0.90	-	1.30	1.56	0.86	0.77	2.63	-	0.98	-	2.89	-	3.93	-	1.19	-	1.93	-	1.36	1.24	1.09	-
	14-04-2015	0.80	-	1.33	1.60	0.74	0.66	2.30	-	0.95	-	1.38	-	3.87	-	1.28	-	3.22	-	1.48	1.35	1.09	-
	18-05-2015	0.95	-	1.63	1.95	1.04	0.93	1.81	-	1.13	-	3.54	-	5.26	-	1.24	-	1.93	-	1.29	1.18	1.34	-
	04--06--2017	0.80	-	1.22	1.47	0.72	0.64	2.02	-	0.96	-	1.03	-	3.43	-	1.34	-	1.29	-	1.62	1.47	0.97	-
Elisa de Bordos	30-03-2015	0.70	-	0.94	1.12	0.67	0.60	3.94	-	0.89	-	0.59	-	2.34	-	1.34	-	1.93	-	1.70	1.55	0.85	-
	14-04-2015	0.90	-	1.06	1.26	0.72	0.64	5.53	-	0.99	-	0.86	-	2.57	-	1.42	-	1.29	-	1.54	1.40	0.85	-
	18-05-2015	0.80	-	1.00	1.20	0.73	0.65	4.49	-	0.93	-	0.72	-	2.22	-	1.33	-	0.64	-	1.52	1.39	0.61	-
	04--06--2017	0.95	-	1.32	1.58	0.90	0.81	3.12	-	0.96	-	3.02	-	3.76	-	1.10	-	1.29	-	1.41	1.28	1.22	-
Cerrillos	30-03-2015	0.90	-	1.08	1.29	0.80	0.71	3.67	-	0.89	-	1.42	-	2.78	-	1.29	-	1.29	-	1.57	1.42	0.97	-
	14-04-2015	0.85	-	1.11	1.33	0.75	0.67	4.16	0.00	0.96	0.00	1.11	0.00	2.72	-	1.28	-	1.29	-	1.58	1.44	0.85	-
	18-05-2015	0.95	-	1.06	1.27	0.79	0.70	3.99	-	1.04	-	1.01	-	2.34	-	1.21	-	1.29	-	1.38	1.25	0.85	-
	04--06--2017	0.90	-	1.32	1.29	0.83	0.65	3.06	-	0.98	-	1.98	-	3.40	-	1.16	-	1.29	-	1.48	1.36	0.97	-
Paipote	30-03-2015	0.85	-	1.01	1.20	0.71	0.63	3.94	-	0.95	-	0.96	-	2.72	-	1.28	-	1.29	-	1.62	1.48	0.97	-
	14-04-2015	0.80	-	1.10	1.32	0.67	0.60	4.87	-	0.96	-	0.85	-	2.54	-	1.40	-	1.29	-	1.58	1.44	0.85	-
	18-05-2015	0.85	-	1.25	1.50	0.81	0.72	3.83	-	1.06	-	1.38	-	2.99	-	1.38	-	1.29	-	1.52	1.39	0.97	-
	04--06--2017	0.80	-	1.08	1.29	0.73	0.65	3.17	-	0.89	-	0.81	-	2.63	-	1.23	-	0.64	-	1.50	1.36	0.61	-
María Isabel	14-04-15	0.90	-	1.37	1.65	0.77	0.69	3.83	-	1.05	-	1.12	-	2.69	-	1.40	-	1.29	-	1.53	1.39	0.85	-
	04--06--2017	0.75	-	1.06	1.27	0.86	0.77	5.74	-	1.13	-	0.51	-	2.28	-	1.80	-	1.29	-	1.28	1.16	0.73	-

Tabla 7.5: Factores de enriquecimiento de los elementos químicos, pertenecientes a las muestras postaluvión (CC: con respecto a la corteza continental; M.A.: con respecto a Main Andesites (Oyarzún et al., 2016)).

Estacion de Muestreo	Fechas	CC		M. A.		CC		M. A.		CC		M. A.		CC		M. A.		CC		M. A.	
		Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Mo										
Lautaro	30-03-2015	1.51 -	1.62 -	1.45 -	1.51 -	1.49 -	1.58 -	2.08 -	2.09	1.65	2.19 -	3.06 -									
	14-04-2015	1.68 -	1.58 -	1.41 -	1.47 -	1.48 -	1.47 -	1.82 -	1.66	1.31	1.76 -	2.29 -									
	18-05-2015	1.97 -	2.13 -	1.88 -	2.00 -	2.00 -	2.25 -	2.52 -	2.74	2.16	2.75 -	2.10 -									
	04-06-2017	1.60 -	1.46 -	1.27 -	1.31 -	1.32 -	1.31 -	1.39 -	1.47	1.16	1.41 -	2.49 -									
Elisa de Bordos	30-03-2015	1.28 -	1.20 -	1.00 -	1.05 -	1.00 -	1.04 -	1.20 -	1.11	0.88	1.13 -	3.63 -									
	14-04-2015	1.39 -	1.30 -	1.11 -	1.20 -	1.04 -	1.16 -	1.39 -	1.31	1.03	1.34 -	3.63 -									
	18-05-2015	1.39 -	1.24 -	1.06 -	1.10 -	1.04 -	1.08 -	1.20 -	1.22	0.96	1.20 -	3.06 -									
	04-06-2017	1.64 -	1.71 -	1.47 -	1.57 -	1.69 -	1.84 -	2.08 -	2.26	1.78	2.29 -	3.82 -									
Cerrillos	30-03-2015	1.41 -	1.39 -	1.19 -	1.23 -	1.23 -	1.24 -	1.57 -	1.43	1.13	1.48 -	4.40 -									
	14-04-2015	1.35 -	1.27 -	1.09 -	1.19 -	1.03 -	1.13 -	1.31 -	1.29	1.02	1.34 -	4.40 -									
	18-05-2015	1.43 -	1.41 -	1.20 -	1.28 -	1.25 -	1.31 -	1.35 -	1.39	1.10	1.38 -	2.68 -									
	04-06-2017	1.63 -	1.50 -	1.31 -	1.38 -	1.31 -	1.47 -	1.71 -	1.73	1.01	1.66 -	3.82 -									
Paipote	30-03-2015	1.41 -	1.37 -	1.13 -	1.21 -	1.09 -	1.20 -	1.31 -	1.31	1.03	1.34 -	4.02 -									
	14-04-2015	1.36 -	1.34 -	1.14 -	1.20 -	1.05 -	1.12 -	1.31 -	1.26	0.99	1.27 -	3.44 -									
	18-05-2015	1.62 -	1.52 -	1.31 -	1.35 -	1.27 -	1.29 -	1.50 -	1.47	1.16	1.52 -	3.82 -									
	04-06-2017	1.40 -	1.38 -	1.19 -	1.30 -	1.17 -	1.18 -	1.42 -	1.28	1.01	1.31 -	3.25 -									
María Isabel	14-04-15	1.40 -	1.46 -	1.17 -	1.28 -	1.21 -	1.31 -	1.53 -	1.43	1.13	1.45 -	3.06 -									
	04-06-2017	1.31 -	1.26 -	1.09 -	1.16 -	1.08 -	1.09 -	1.24 -	1.27	1.00	1.24 -	4.02 -									

Estacion de Muestreo	Fechas	CC		M. A.		CC		M. A.		CC		M. A.		CC		M. A.		CC		M. A.	
		Cu	Pb	Zn	Ni	As	Cd	Sb	Bi	Ag	Au	Hg	B								
Lautaro	30-03-2015	26.07	9.04	2.01	0.21	3.20	2.15	0.73 -	5.68	2.16	2.61 -	1.17 -	2.20 -	0.0011 -	0.01 -	0.39 -	1.76 -				
	14-04-2015	4.53	1.64	1.51	0.16	1.54	1.09	0.55 -	4.89	1.95	2.49 -	0.84 -	2.10 -	0.0011 -	0.01 -	0.75 -	1.51 -				
	18-05-2015	20.16	7.12	1.90	0.20	3.33	2.28	0.66 -	4.93	1.91	3.84 -	0.86 -	2.16 -	0.0011 -	0.00 -	0.19 -	0.00 -				
	04-06-2017	4.56	1.74	1.18	0.13	1.17	0.87	0.46 -	3.67	1.54	2.37 -	0.53 -	1.33 -	0.0010 -	0.00 -	0.18 -	0.00 -				
Elisa de Bordos	30-03-2015	6.72	2.38	2.17	0.23	1.53	1.05	0.53 -	8.00	3.11	3.83 -	1.15 -	1.44 -	0.0011 -	0.01 -	0.77 -	2.20 -				
	14-04-2015	5.82	2.21	2.43	0.27	1.49	1.10	0.37 -	10.55	4.39	3.57 -	3.48 -	1.34 -	0.0020 -	0.00 -	8.57 -	3.89 -				
	18-05-2015	5.91	2.26	1.97	0.22	1.51	1.12	0.37 -	6.82	2.86	3.55 -	1.33 -	1.33 -	0.0010 -	0.00 -	0.71 -	0.00 -				
	04-06-2017	6.86	2.36	2.79	0.28	1.73	1.15	0.56 -	7.82	2.95	2.63 -	1.78 -	1.48 -	0.0011 -	0.00 -	0.79 -	0.00 -				
Cerrillos	30-03-2015	18.02	6.53	3.63	0.39	2.40	1.69	0.44 -	10.65	4.23	3.74 -	1.97 -	2.11 -	0.0021 -	0.02 -	16.10 -	2.95 -				
	14-04-2015	7.82	2.82	3.43	0.37	1.71	1.20	0.46 -	10.17	4.02	5.02 -	1.98 -	2.12 -	0.0128 -	0.01 -	26.74 -	2.82 -				
	18-05-2015	15.43	5.87	2.91	0.33	2.24	1.66	0.33 -	10.27	4.29	3.57 -	2.41 -	2.01 -	0.0061 -	0.00 -	48.87 -	0.00 -				
	04-06-2017	4.58	1.65	3.00	0.27	1.60	0.99	0.50 -	10.25	3.36	3.83 -	2.59 -	1.44 -	0.0043 -	0.00 -	24.52 -	0.00 -				
Paipote	30-03-2015	4.47	1.58	2.95	0.31	1.46	1.00	0.52 -	10.43	4.04	5.13 -	1.15 -	1.44 -	0.0022 -	0.01 -	15.00 -	2.45 -				
	14-04-2015	6.42	2.35	2.69	0.29	1.58	1.12	0.51 -	9.23	3.70	3.72 -	1.39 -	1.39 -	0.0021 -	0.02 -	2.97 -	2.82 -				
	18-05-2015	10.87	3.95	3.14	0.34	1.90	1.34	0.38 -	8.42	3.36	3.73 -	1.68 -	3.50 -	0.0042 -	0.00 -	13.43 -	0.00 -				
	04-06-2017	4.55	1.65	2.48	0.27	1.40	0.99	0.44 -	8.43	3.36	3.74 -	1.68 -	1.40 -	0.0042 -	0.00 -	22.81 -	0.00 -				
María Isabel	14-04-15	7.42	2.89	3.57	0.41	1.80	1.36	0.27 -	12.56	5.38	3.48 -	1.83 -	3.26 -	0.0039 -	0.01 -	20.87 -	3.58 -				
	04-06-2017	15.03	6.14	2.36	0.29	2.31	1.83	0.62 -	7.30	3.27	4.43 -	1.00 -	1.87 -	0.0075 -	0.00 -	22.59 -	0.00 -				

7.2.1 Clasificación de Goldshmidt

Tabla 7.6: Propiedades químicas de los grupos de elementos. Dhana-Raju (2009)

	Litófilos																
	Na	K	Mg	Ca	Sr	Ba	Sc	Y	La	Ce	Sm	Yb	U	Al	P		
Grupo PT	1A	1A	2A	2A	2A	2A	3B	3B	3B	3B	3B	3B	3B	3A	3A		
Valencia	1+	1+	2+	2+	2+	2+	3+	3+	3+	3+	3+	3+	4+	3+	5+		
Radio iónico (Å)	0.97	1.33	0.71	0.99	1.12	1.34	0.82	0.92	1.14	1.14	1.10	1.10	1.00	0.51	0.35		
Potencial iónico	1.03	0.75	2.82	2.02	1.79	1.49	3.66	3.26	2.63	2.73	2.73	3.00	4.00	5.88	14.30		
Electronegatividad	0.9	0.8	1.2	1.0	1.0	0.9	1.3	1.3	1.1	1.1	1.1	1.2	1.7	1.5	2.1		
Afinidad geoquímica	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O		
	Siderófilos							Calcófilos									
	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo	Cu	Ag	Zn	Cd	Hg	Pb	As	Sb	S
Grupo PT	4B	5B	6B	7B	8	8	8	6B	1B	1B	2B	2B	2B	4A	5A	5A	6A
Valencia	4+	4+	3+	2+	2+	2+	2+	4+	2+	1+	2+	2+	2+	2+	3+	3+	2-
Radio iónico (Å)	0.68	0.65	0.63	0.80	0.74	0.72	0.69	0.63	0.69	1.26	0.74	0.97	1.10	1.20	0.69	0.90	1.84
Potencial iónico	5.88	6.15	4.76	2.50	2.70	2.78	2.90	6.35	2.90	0.79	2.70	2.06	1.82	1.67	4.35	3.33	
Valencia				4+	3+	3+	2+	6+							5+		6+
Radio iónico (Å)				0.60	0.64	0.6		0.62							0.46		0.29
Potencial iónico				6.67	4.69	4.76		9.68							10.9		23.1
Electronegatividad	1.5	1.6	1.6	1.5	1.8	1.8	1.8	1.8	1.9	1.9	1.6	1.7	1.9	1.8	2.0	1.9	2.5
Afinidad geoquímica	O, Si	O, Si	O, Si	O, Si	O, Si, Ca	O, Si, Ca	O, Si, Ca	Ca	Ca	Ca	Ca	Ca	Ca	Ca	Ca	Ca	Ca

7.3 Anexo III: Condiciones meteorológicas durante las fechas de muestreo

Tabla 7.7: Condiciones climáticas cuenca Río Copiapó (fuente: Aeronáutica Chile y DGA 2011-2017)

Año	2011	2012	2015			2017
Condiciones Climáticas Cuenca Río Copiapó	junio	marzo	marzo	abril	mayo	junio
Lautaro						
Precipitaciones	50	36,8	70	0	0	77
Vel. Viento (kt) y dirección	6-SW	7-SW	8-SW	8-SW	7-SW	9-SW
Caudal (m ³ /s)	0,9	1,8		6,2	6,5	27,3
Elisa de Bordos						
Precipitaciones	50	36,8	70	0	0	77
Vel. Viento (kt) y dirección	6-SW	7-SW	8-SW	8-SW	7-SW	9-SW
Caudal (m ³ /s)	0,8	1,6		5,3	5,6	22,4
Cerrillos						
Precipitaciones	16,4	42,3	23,4	0	0	73
Vel. Viento (kt) y dirección	6-SW	7-SW	8-SW	8-SW	7-SW	9-SW
Caudal (m ³ /s)	0,25	0,34				
Paipote						
Precipitaciones	16,4	42,3	23,4	0	0	73
Vel. Viento (kt) y dirección	6-SW	7-SW	8-SW	8-SW	7-SW	9-SW
Caudal (m ³ /s)	0,15	0,3		0,88	0,36	
María Isabel						
Precipitaciones	16,4	42,3	23,4	0	0	73
Vel. Viento (kt) y dirección	6-SW	7-SW	8-SW	8-SW	7-SW	9-SW
Caudal (m ³ /s)						

7.4 Anexo IV: Granulometría de Muestras

Tabla 7.8: Datos granulométricos, Punto de muestreo Lautaro

Lautaro							
30-03-15							
Peso muestra (gr)	Malla ASTM	Abertura (micrómetros)	Escala phi	Peso total	Porcentaje de muestra(%)	Acumulados (%)	
						Retenido	Pasante
3305.18	#10	2000	-1.00	83.19	2.52	2.52	97.48
	#14	1400	-0.49	93.19	2.82	5.34	94.66
	#18	1000	0.00	118.19	3.58	8.91	91.09
	#35	500	1.00	478.65	14.48	23.39	76.61
	#45	355	1.49	533.65	16.15	39.54	60.46
	#60	250	2.00	822.24	24.88	64.42	35.58
	#80	180	2.47	597.24	18.07	82.49	17.51
	#100	150	2.74	143.19	4.33	86.82	13.18
	#120	125	3.00	177.24	5.36	92.18	7.82
	#140	106	3.24	73.19	2.21	94.40	5.60
	#170	90	3.47	43.19	1.31	95.70	4.30
	#200	75	3.74	28.19	0.85	96.56	3.44
	#<200	<75	4.30	113.83	3.44	100.00	0.00
14-04-15							
Peso muestra (gr)	Malla ASTM	Abertura (micrómetros)	Escala phi	Peso total	Porcentaje de muestra(%)	Acumulados (%)	
						Retenido	Pasante
3263.24	#10	2000	-1.00	82.24	2.52	2.52	97.48
	#14	1400	-0.49	7.24	0.22	2.74	97.26
	#18	1000	0.00	7.24	0.22	2.96	97.04
	#35	500	1.00	47.24	1.45	4.41	95.59
	#45	355	1.49	117.24	3.59	8.00	92.00
	#60	250	2.00	367.24	11.25	19.26	80.74
	#80	180	2.47	647.24	19.83	39.09	60.91
	#100	150	2.74	312.24	9.57	48.66	51.34
	#120	125	3.00	292.24	8.96	57.62	42.38
	#140	106	3.24	177.24	5.43	63.05	36.95
	#170	90	3.47	182.24	5.58	68.63	31.37
	#200	75	3.74	107.24	3.29	71.92	28.08
	#<200	<75	4.30	916.36	28.08	100.00	0.00
18-05-15							
Peso muestra (gr)	Malla ASTM	Abertura (micrómetros)	Escala phi	Peso total	Porcentaje de muestra(%)	Acumulados (%)	
						Retenido	Pasante
4297.87	#10	2000	-1.00	351.26	8.17	8.17	91.83
	#14	1400	-0.49	490.87	11.42	19.59	80.41
	#18	1000	0.00	356.26	8.29	27.88	72.12
	#35	500	1.00	321.26	7.47	35.36	64.64
	#45	355	1.49	105.87	2.46	37.82	62.18
	#60	250	2.00	141.26	3.29	41.11	58.89
	#80	180	2.47	665.87	15.49	56.60	43.40
	#100	150	2.74	285.87	6.65	63.25	36.75
	#120	125	3.00	415.87	9.68	72.93	27.07
	#140	106	3.24	270.87	6.30	79.23	20.77
	#170	90	3.47	245.87	5.72	84.95	15.05
	#200	75	3.74	110.87	2.58	87.53	12.47
	#<200	<75	4.30	535.87	12.47	100.00	0.00
4/6/2017							
Peso muestra (gr)	Malla ASTM	Abertura (micrómetros)	Escala phi	Peso total	Porcentaje de muestra(%)	Acumulados (%)	
						Retenido	Pasante
2667.6	#10	2000	-1.00	66	2.47	2.47	97.53
	#14	1400	-0.49	96	3.60	6.07	93.93
	#18	1000	0.00	100.3	3.76	9.83	90.17
	#35	500	1.00	246	9.22	19.05	80.95
	#45	355	1.49	121.4	4.55	23.61	76.39
	#60	250	2.00	130.2	4.88	28.49	71.51
	#80	180	2.47	256	9.60	38.08	61.92
	#100	150	2.74	196	7.35	45.43	54.57
	#120	125	3.00	194	7.27	52.70	47.30
	#140	106	3.24	277.6	10.41	63.11	36.89
	#170	90	3.47	130	4.87	67.98	32.02
	#200	75	3.74	108.1	4.05	72.03	27.97
	#<200	<75	4.30	746	27.97	100.00	0.00

Tabla 7.9: Datos granulométricos, Punto de muestreo Elisa de Bordos

Elisa de Bordos							
30-03-15							
Peso muestra (gr)	Malla ASTM	Abertura (micrómetros)	Escala phi	Peso total	Porcentaje de muestra(%)	Acumulados (%)	
						Retenido	Pasante
2961.63	#10	2000	-1.00	282.24	9.53	9.53	90.47
	#14	1400	-0.49	588.65	19.88	29.41	70.59
	#18	1000	0.00	347.24	11.72	41.13	58.87
	#35	500	1.00	212.24	7.17	48.30	51.70
	#45	355	1.49	58.65	1.98	50.28	49.72
	#60	250	2.00	2.24	0.08	50.35	49.65
	#80	180	2.47	222.24	7.50	57.86	42.14
	#100	150	2.74	72.24	2.44	60.30	39.70
	#120	125	3.00	92.24	3.11	63.41	36.59
	#140	106	3.24	82.24	2.78	66.19	33.81
	#170	90	3.47	72.24	2.44	68.63	31.37
	#200	75	3.74	67.24	2.27	70.90	29.10
	#<200	<75	4.30	861.93	29.10	100.00	0.00
14-04-15							
Peso muestra (gr)	Malla ASTM	Abertura (micrómetros)	Escala phi	Peso total	Porcentaje de muestra(%)	Acumulados (%)	
						Retenido	Pasante
3797.51	#10	2000	-1.00	152.24	4.01	4.01	95.99
	#14	1400	-0.49	187.24	4.93	8.94	91.06
	#18	1000	0.00	287.24	7.56	16.50	83.50
	#35	500	1.00	437.24	11.51	28.02	71.98
	#45	355	1.49	77.24	2.03	30.05	69.95
	#60	250	2.00	47.24	1.24	31.30	68.70
	#80	180	2.47	132.24	3.48	34.78	65.22
	#100	150	2.74	132.24	3.48	38.26	61.74
	#120	125	3.00	237.24	6.25	44.51	55.49
	#140	106	3.24	202.24	5.33	49.83	50.17
	#170	90	3.47	437.24	11.51	61.35	38.65
	#200	75	3.74	37.24	0.98	62.33	37.67
	#<200	<75	4.30	1430.63	37.67	100.00	0.00
18-05-15							
Peso muestra (gr)	Malla ASTM	Abertura (micrómetros)	Escala phi	Peso total	Porcentaje de muestra(%)	Acumulados (%)	
						Retenido	Pasante
6530.12	#10	2000	-1.00	201.26	3.08	3.08	96.92
	#14	1400	-0.49	420.87	6.45	9.53	90.47
	#18	1000	0.00	401.26	6.14	15.67	84.33
	#35	500	1.00	636.26	9.74	25.42	74.58
	#45	355	1.49	235.87	3.61	29.03	70.97
	#60	250	2.00	140.87	2.16	31.18	68.82
	#80	180	2.47	481.86	7.38	38.56	61.44
	#100	150	2.74	191.26	2.93	41.49	58.51
	#120	125	3.00	261.26	4.00	45.49	54.51
	#140	106	3.24	520.87	7.98	53.47	46.53
	#170	90	3.47	740.87	11.35	64.82	35.18
	#200	75	3.74	110.87	1.70	66.51	33.49
	#<200	<75	4.30	2186.74	33.49	100.00	0.00
4/6/2017							
Peso muestra (gr)	Malla ASTM	Abertura (micrómetros)	Escala phi	Peso total	Porcentaje de muestra(%)	Acumulados (%)	
						Retenido	Pasante
3181.9	#10	2000	-1.00	1.5	0.05	0.05	99.95
	#14	1400	-0.49	2	0.06	0.11	99.89
	#18	1000	0.00	3	0.09	0.20	99.80
	#35	500	1.00	38.7	1.22	1.42	98.58
	#45	355	1.49	165	5.19	6.61	93.39
	#60	250	2.00	559.1	17.57	24.18	75.82
	#80	180	2.47	1027	32.28	56.45	43.55
	#100	150	2.74	364	11.44	67.89	32.11
	#120	125	3.00	280	8.80	76.69	23.31
	#140	106	3.24	238.5	7.50	84.19	15.81
	#170	90	3.47	97.3	3.06	87.25	12.75
	#200	75	3.74	117.6	3.70	90.94	9.06
	#<200	<75	4.30	288.2	9.06	100.00	0.00

Tabla 8.0: Datos granulométricos, Punto de muestreo, Cerrillos

Cerrillos							
30-03-15							
Peso muestra (gr)	Malla ASTM	Abertura (micrómetros)	Escala phi	Peso total (gr)	Porcentaje de muestra(%)	Acumulados (%)	
						Retenido	Pasante
5430.84	#10	2000	-1.00	331.26	6.10	6.10	93.90
	#14	1400	-0.49	1027.24	18.91	25.01	74.99
	#18	1000	0.00	1042.24	19.19	44.21	55.79
	#35	500	1.00	1247.24	22.97	67.17	32.83
	#45	355	1.49	366.26	6.74	73.92	26.08
	#60	250	2.00	286.26	5.27	79.19	20.81
	#80	180	2.47	371.26	6.84	86.02	13.98
	#100	150	2.74	138.19	2.54	88.57	11.43
	#120	125	3.00	148.19	2.73	91.30	8.70
	#140	106	3.24	123.19	2.27	93.56	6.44
	#170	90	3.47	73.19	1.35	94.91	5.09
	#200	75	3.74	23.19	0.43	95.34	4.66
	#<200	<75	4.30	253.13	4.66	100.00	0.00
	14-04-15						
Peso muestra (gr)	Malla ASTM	Abertura (micrómetros)	Escala phi	Peso total (gr)	Porcentaje de muestra(%)	Acumulados (%)	
						Retenido	Pasante
5392.42	#10	2000	-1.00	533.65	9.90	9.90	90.10
	#14	1400	-0.49	203.65	3.78	13.67	86.33
	#18	1000	0.00	186.26	3.45	17.13	82.87
	#35	500	1.00	256.26	4.75	21.88	78.12
	#45	355	1.49	102.24	1.90	23.78	76.22
	#60	250	2.00	126.26	2.34	26.12	73.88
	#80	180	2.47	483.65	8.97	35.09	64.91
	#100	150	2.74	343.49	6.37	41.46	58.54
	#120	125	3.00	531.26	9.85	51.31	48.69
	#140	106	3.24	598.65	11.10	62.41	37.59
	#170	90	3.47	421.26	7.81	70.22	29.78
	#200	75	3.74	92.24	1.71	71.93	28.07
	#<200	<75	4.30	1513.55	28.07	100.00	0.00
	18-05-15						
Peso muestra (gr)	Malla ASTM	Abertura (micrómetros)	Escala phi	Peso total (gr)	Porcentaje de muestra(%)	Acumulados (%)	
						Retenido	Pasante
4412.69	#10	2000	-1.00	216.26	4.90	4.90	95.10
	#14	1400	-0.49	367.24	8.32	13.22	86.78
	#18	1000	0.00	351.26	7.96	21.18	78.82
	#35	500	1.00	726.26	16.46	37.64	62.36
	#45	355	1.49	301.26	6.83	44.47	55.53
	#60	250	2.00	251.26	5.69	50.16	49.84
	#80	180	2.47	466.26	10.57	60.73	39.27
	#100	150	2.74	302.24	6.85	67.58	32.42
	#120	125	3.00	451.26	10.23	77.81	22.19
	#140	106	3.24	331.26	7.51	85.31	14.69
	#170	90	3.47	182.24	4.13	89.44	10.56
	#200	75	3.74	112.24	2.54	91.99	8.01
	#<200	<75	4.30	353.65	8.01	100.00	0.00
	4/6/2017						
Peso muestra (gr)	Malla ASTM	Abertura (micrómetros)	Escala phi	Peso total (gr)	Porcentaje de muestra(%)	Acumulados (%)	
						Retenido	Pasante
2604.1	#10	2000	-1.00	1	0.04	0.04	99.96
	#14	1400	-0.49	0.3	0.01	0.05	99.95
	#18	1000	0.00	0.5	0.02	0.07	99.93
	#35	500	1.00	5.4	0.21	0.28	99.72
	#45	355	1.49	26.3	1.01	1.29	98.71
	#60	250	2.00	77	2.96	4.24	95.76
	#80	180	2.47	250	9.60	13.84	86.16
	#100	150	2.74	450.2	17.29	31.13	68.87
	#120	125	3.00	209.2	8.03	39.17	60.83
	#140	106	3.24	482.7	18.54	57.70	42.30
	#170	90	3.47	148.2	5.69	63.39	36.61
	#200	75	3.74	175.3	6.73	70.12	29.88
	#<200	<75	4.30	778	29.88	100.00	0.00

Tabla 8.1: Datos granulométricos, Punto de muestreo, Paipote

Paipote							
30-03-15							
Peso muestra (gr)	Malla ASTM	Abertura (micrómetros)	Escala phi	Peso total	Porcentaje de muestra(%)	Acumulados (%)	
						Retenido	Pasante
3341.52	#10	2000	-1.00	0.75	0.02	0.02	99.98
	#14	1400	-0.49	0.57	0.02	0.04	99.96
	#18	1000	0.00	1.71	0.05	0.09	99.91
	#35	500	1.00	23.19	0.69	0.78	99.22
	#45	355	1.49	48.19	1.44	2.23	97.77
	#60	250	2.00	123.19	3.69	5.91	94.09
	#80	180	2.47	788.65	23.60	29.52	70.48
	#100	150	2.74	268.19	8.03	37.54	62.46
	#120	125	3.00	476.26	14.25	51.79	48.21
	#140	106	3.24	303.19	9.07	60.87	39.13
	#170	90	3.47	496.26	14.85	75.72	24.28
	#200	75	3.74	28.19	0.84	76.56	23.44
	#<200	<75	4.30	783.18	23.44	100.00	0.00
14-04-15							
Peso muestra (gr)	Malla ASTM	Abertura (micrómetros)	Escala phi	Peso total	Porcentaje de muestra(%)	Acumulados (%)	
						Retenido	Pasante
4585.01	#10	2000	-1.00	1.9	0.04	0.04	99.96
	#14	1400	-0.49	2	0.04	0.09	99.91
	#18	1000	0.00	1.84	0.04	0.13	99.87
	#35	500	1.00	22.24	0.49	0.61	99.39
	#45	355	1.49	62.24	1.36	1.97	98.03
	#60	250	2.00	232.24	5.07	7.03	92.97
	#80	180	2.47	817.24	17.82	24.86	75.14
	#100	150	2.74	327.24	7.14	31.99	68.01
	#120	125	3.00	665	14.50	46.50	53.50
	#140	106	3.24	435	9.49	55.99	44.01
	#170	90	3.47	672.24	14.66	70.65	29.35
	#200	75	3.74	97.24	2.12	72.77	27.23
	#<200	<75	4.30	1248.59	27.23	100.00	0.00
18-05-15							
Peso muestra (gr)	Malla ASTM	Abertura (micrómetros)	Escala phi	Peso total	Porcentaje de muestra(%)	Acumulados (%)	
						Retenido	Pasante
5109.96	#10	2000	-1.00	10.87	0.21	0.21	99.79
	#14	1400	-0.49	20.87	0.41	0.62	99.38
	#18	1000	0.00	40.87	0.80	1.42	98.58
	#35	500	1.00	105.87	2.07	3.49	96.51
	#45	355	1.49	100.87	1.97	5.47	94.53
	#60	250	2.00	355.87	6.96	12.43	87.57
	#80	180	2.47	80.87	1.58	14.01	85.99
	#100	150	2.74	2158.65	42.24	56.26	43.74
	#120	125	3.00	195.87	3.83	60.09	39.91
	#140	106	3.24	801.74	15.69	75.78	24.22
	#170	90	3.47	310.87	6.08	81.86	18.14
	#200	75	3.74	175.87	3.44	85.31	14.69
	#<200	<75	4.30	750.87	14.69	100.00	0.00
4/6/2017							
Peso muestra (gr)	Malla ASTM	Abertura (micrómetros)	Escala phi	Peso total	Porcentaje de muestra(%)	Acumulados (%)	
						Retenido	Pasante
3462	#10	2000	-1.00	2	0.06	0.06	99.94
	#14	1400	-0.49	0.5	0.01	0.07	99.93
	#18	1000	0.00	0.8	0.02	0.10	99.90
	#35	500	1.00	4.8	0.14	0.23	99.77
	#45	355	1.49	2.7	0.08	0.31	99.69
	#60	250	2.00	5.6	0.16	0.47	99.53
	#80	180	2.47	29.2	0.84	1.32	98.68
	#100	150	2.74	34.1	0.98	2.30	97.70
	#120	125	3.00	128.6	3.71	6.02	93.98
	#140	106	3.24	605.6	17.49	23.51	76.49
	#170	90	3.47	134	3.87	27.38	72.62
	#200	75	3.74	178.2	5.15	32.53	67.47
	#<200	<75	4.30	2336	67.48	100.00	0.00

Tabla 8.2: Datos granulométricos, Punto de muestreo, María Isabel

María Isabel							
14-04-15							
Peso muestra (gr)	Malla ASTM	Abertura (micrómetros)	Escala phi	Peso total	Porcentaje de muestra(%)	Acumulados (%)	
						Retenido	Pasante
4388.65	#10	2000	-1.00	36.26	0.83	0.83	99.17
	#14	1400	-0.49	82.24	1.87	2.70	97.30
	#18	1000	0.00	181.26	4.13	6.83	93.17
	#35	500	1.00	1323.65	30.16	36.99	63.01
	#45	355	1.49	596.26	13.59	50.58	49.42
	#60	250	2.00	261.26	5.95	56.53	43.47
	#80	180	2.47	387.24	8.82	65.35	34.65
	#100	150	2.74	117.24	2.67	68.03	31.97
	#120	125	3.00	156.26	3.56	71.59	28.41
	#140	106	3.24	127.24	2.90	74.49	25.51
	#170	90	3.47	122.24	2.79	77.27	22.73
	#200	75	3.74	102.24	2.33	79.60	20.40
	#<200	<75	4.30	895.26	20.40	100.00	0.00
	4/6/2017						
Peso muestra (gr)	Malla ASTM	Abertura (micrómetros)	Escala phi	Peso total	Porcentaje de muestra(%)	Acumulados (%)	
						Retenido	Pasante
2870.5	#10	2000	-1.00	170	5.92	5.92	94.08
	#14	1400	-0.49	370	12.89	18.81	81.19
	#18	1000	0.00	270	9.41	28.22	71.78
	#35	500	1.00	420	14.63	42.85	57.15
	#45	355	1.49	180	6.27	49.12	50.88
	#60	250	2.00	130	4.53	53.65	46.35
	#80	180	2.47	160	5.57	59.22	40.78
	#100	150	2.74	30	1.05	60.27	39.73
	#120	125	3.00	50	1.74	62.01	37.99
	#140	106	3.24	80	2.79	64.80	35.20
	#170	90	3.47	150	5.23	70.02	29.98
	#200	75	3.74	70	2.44	72.46	27.54
	#<200	<75	4.30	798	27.80	100.26	-0.26