



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

**ANÁLISIS DEL APORTE DE RESIDUOS MINEROS A SUELOS MEDIANTE
ESTUDIO DE CASO EN PUNTA DEL COBRE Y CONSIDERACIONES PARA
LA NORMATIVA VIGENTE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

LUNA ARACELI PÉREZ PÉREZ

PROFESORA GUÍA

LUISA PINTO LINCOÑIR

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

MANUEL CARABALLO MONGE

SEBASTIÁN URETA ICAZA

LUIS ENRIQUE LARA PULGAR

SANTIAGO DE CHILE

2018

**RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE GEÓLOGA**

POR: Luna Araceli Pérez Pérez

FECHA: 06/06/2018

PROFESORA GUÍA: Luisa Pinto Lincoñir

**ANÁLISIS DEL APORTE DE RESIDUOS MINEROS A SUELOS MEDIANTE
ESTUDIO DE CASO EN PUNTA DEL COBRE Y CONSIDERACIONES PARA LA
NORMATIVA VIGENTE**

Según datos de SERNAGEOMIN, actualmente se producen más de un millón y medio de toneladas de depósitos de relaves al día; con un total de 740 catastrados en todo el país. Como resultado de procesos de erosión eólica y aluvial de relaves fuera de operación, puede ocurrir una dispersión de sedimentos desde los relaves hacia el entorno; los que usualmente tienen altas concentraciones de metales pesados. Considerando que en Chile se producen residuos mineros hace más de un siglo y que recién desde el año 2011 existe una ley que regula el cierre de faenas y operaciones mineras; los sedimentos que se dispersan por erosión superficial de residuos probablemente están presentes en la conformación de suelos cercanos. Junto con lo anterior, en Chile no existe una norma de calidad de suelos; solo existe una guía metodológica del Ministerio del Medio Ambiente para gestión de suelos con potencial presencia de contaminantes.

Esta investigación tuvo como objetivo analizar el aporte de material de residuos mineros a suelos de dos predios agrícolas ubicados en el valle del río Copiapó, en la localidad de Punta del Cobre. Para ello, se realizó un análisis mineralógico mediante XRD y microscopía óptica; y un análisis estadístico y geoestadístico de datos geoquímicos obtenidos mediante digestión ácida y análisis elemental por ICP-MS. Los resultados indican que existe un aporte directo de 3 relaves que están contiguos a los predios, atribuido posiblemente a un transporte aluvial y eólico y a la rotura de una tubería de agua de procesos. Sin embargo, también se identificó una alta concentración de Hg que sobrepasa las concentraciones medidas en los relaves contiguos y en algunas rocas de la zona. Descartando otras fuentes de enriquecimiento –tales como pesticidas y fertilizantes–, se postula que el aporte de Hg provendría de la formación temprana de estos suelos, que corresponden esencialmente a fluvisoles; o a un aporte de fuentes lejanas aguas arriba del río Copiapó, donde existen residuos mineros con altas concentraciones de Hg. Estos resultados invitan a profundizar el entendimiento de la dinámica de suelos y resaltan la importancia de comprender el alcance de la dispersión de material de residuos mineros, lo cual debería ser considerado en el levantamiento de líneas base y normas de calidad. Además, se remarca la importancia de entender el suelo como una entidad dinámica, la cual necesita ser abordada de manera compleja y multidisciplinaria.

DEDICATORIA

Dedicado a los nortinos, que habitan en el enriquecedor, bello, seco y, a la vez, deletéreo mundo que paga el sueldo de Chile.

AGRADECIMIENTOS

Gracias en primer lugar a quienes forman parte de mi comisión: Luisa, Manuel, Sebastián y Luis. Por estar ahí, por creer en mí y por darme las herramientas que necesité para construir este trabajo. Gracias también a los profesores de la carrera, a aquellos que, si bien no formaron parte de este proceso en particular, formaron parte de la antesala que forjó mis bases de conocimiento para enfrentar un trabajo de investigación. También agradezco a Manu Abad por su tremendo apañe durante el trabajo de terreno y a Álvaro; gracias por ser un muy buen compañero. Agradezco también la buena voluntad de Lina, Esteban y Oscar en mi visita a los predios.

Gracias a Blanca Baccola, la mejor secretaria del mundo. Y no solo eso, sino que una gran persona; fue siempre grato contar con alguien que ve a un estudiante más allá de una matrícula.

Gracias a esas personas que fueron compañeros de sufrimiento, emotividad y risas desde Bachillerato. Los llevo en el corazón... Natie, Felipe, Yari, Mafi, Cathy y otros varios, que aunque nos alejamos por tomar caminos distintos, siempre los recuerdo (Maudi, Kari, Nayi, Maca, Amaro, Braulio, Vicente, César, Víctor, etc.). Bachi en el corazón forever.

José, fuiste un apoyo muy importante en mis primeros años en Beauchef, en muchos sentidos, gracias a ti también y a tus padres. Agradezco también a mis amigos de El Abra... Javi, Cariolis, Óscar, Seba, Nico, los adoro. Ojalá nunca dejemos de vernos.

Gaby, gracias por tu amistad, fue muy bacán haberte conocido. A ti también Rodrigo. Los quiero.

No puedo dejar fuera a mis queridos compañeros de geología. Qué manera de encariñarme con todos ustedes. A mis amigos cercanos: Bonnie, Hugo y Agustín, los quiero muchísimo, gracias por estar en los momentos clave. También Felipe, Walter y Rodri, unos grandes. Antonio, fue muy enriquecedor crecer juntos profesionalmente. Eres una gran persona y un gran geólogo; te quiero mucho. Tami, que bacán habernos acercado antes de irnos de la carrera, eres una amiga la raja, te quiero ene; gracias por tanto. Marcelo, gracias por todo lo construido, fuiste muy importante en la fase final de este camino. Este espacio no alcanza para describir cuánto te quiero o agradezco tu apoyo; las palabras, los apañes, los ánimos, los abrazos.

Se me deben quedar muchas personas fuera, cada mano que uno recibe es parte del constructo final que se obtiene y estoy muy consciente de ello. Gracias múltiples.

Y por último, a mi familia: mi tata, Juan y mi madre. En especial a mi madre, motor de mi esfuerzo en numerosas ocasiones; quien iluminó el camino en mi vida para aspirar a ser luchadora, empática, ética, curiosa, crítica y, por sobre todas las cosas, una buena persona. Te admiro porque fuiste una mujer transgresora en tu juventud y porque eres capaz de dar amor de una manera que aún me cuesta creer que es posible. Gracias por absolutamente todo.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Formulación del problema	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Hipótesis de trabajo	3
1.4 Ubicación y accesos	3
2. ANTECEDENTES	4
2.1 Marco legal e histórico	4
2.1.1 Guía metodológica para la gestión de SPPC	5
2.2 Marco conceptual	8
2.2.1 Suelos	8
2.2.2 Relaves	9
2.2.2.1 Definición y tipos de relaves	9
2.2.2.2 Relaves en Chile	10
2.4 Marco geológico	11
3. METODOLOGÍA	15
3.1 Grillado y muestreo	15
3.1.1 Suelos	15
3.1.2 Residuos mineros	17
3.2 Preparación de muestras para análisis	19
3.3 Control de calidad de datos	19
3.3.1 Límite de detección	20
3.3.2 Test de outliers	20
3.3.3 Validación de datos de terreno	21
3.4 Análisis de procedencia antropogénica	21
3.4.1 Factor de enriquecimiento	21
3.4.2 Correlación múltiple	22
3.4.3 Análisis multivariable	23
3.5 Análisis de procedencia por parte de relaves aledaños	23

3.5.1 Abundancias comparadas	23
3.5.2 Distribución espacial	24
3.5.3 Análisis mineralógico	24
4. RESULTADOS	26
4.1 Análisis de procedencia antropogénica	27
4.1.1 Factor de enriquecimiento	27
4.1.2 Correlación múltiple	28
4.1.3 Análisis Factorial	30
4.2 Análisis de procedencia por parte de relaves aledaños	31
4.2.1. Abundancias comparadas	31
4.2.2 Distribución espacial	32
4.2.3 Análisis mineralógico	33
4.2.2.1 Aproximación con lupa binocular	33
4.2.2.2 Resultados de XRD	35
4.2.2.3 Observaciones en microscopio óptico	36
4.2.2.4 Síntesis de información mineralógica	39
5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	40
5.1 Procedencia antropogénica	40
5.1.1 Inferencias sobre factor de enriquecimiento	40
5.1.2 Correlaciones y análisis factorial	41
5.2 Rol de relaves aledaños	42
5.2.1 Relaciones geoquímicas y mineralógicas	42
5.2.2 Mecanismos de aporte de material	42
5.3 Fuente de enriquecimiento de Hg	47
5.4 Consideraciones para políticas públicas	48
5.5 Limitaciones de métodos utilizados	50
5.6 Recomendaciones técnicas finales	52
6. CONCLUSIONES	53
7. BIBLIOGRAFÍA	54
ANEXOS	59
A1. Fichas de descripción de terreno	59
A1.1 Muestreo de suelos	59

A1.2 Muestreo relaves	91
A2. Datos geoquímicos obtenidos con ICP-MS	95
A3. Mapas de interpolación	97
A4. Difractogramas	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos de elementos químicos obtenidos mediante ICP-MS.....	20
Tabla 2. Categorización de proveniencia geogénica y/o antropogénica de muestras	22
Tabla 3. Estadísticas básicas para datos geoquímicos obtenidos	26
Tabla 4. Categorización de rangos de FE. Valores $FE > 10$ implican un origen antropogénico; valores $1 \leq FE \leq 10$ implican un origen que puede ser antropogénico o geogénico; valores $FE < 1$ implican un origen geogénico.....	27
Tabla 5. Pares de elementos químicos correlacionados	29
Tabla 6. Matriz de componentes rotada. Se destacan en gris variables con factores de carga $> 0,5$	30
Tabla 7. Resumen de minerales identificados mediante lupa binocular, imán y HCl. Se expresa (?) aquellos minerales ante los cuales no se tiene certeza de su identificación. A saber: Qz=cuarzo, Cc=calcita, Plg=plagioclasa, K-Fel= feldespato potásico, Py=pirita, Px=piroxeno, Cpy=calcopirita	35
Tabla 8. Resumen de minerales identificados mediante XRD.	36
Tabla 9. Resumen de minerales encontrados en microscopio óptico.	38
Tabla 10. Síntesis de minerales encontrados en muestras de relaves y suelos. Lit: líticos, Qz: cuarzo, Cc: calcita, Plg: plagioclasa, K-Fel: feldespato potásico, Mgt: magnetita, Py: pirita, Px: piroxeno, Cpy: calcopirita, Bt: biotita, verdes: minerales verdes de alteración.	39
Tabla 11. Muestra P101	59
Tabla 12. Muestra P102.....	61
Tabla 13. Muestra P103.....	63
Tabla 14. Muestra P104.....	65
Tabla 15. Muestra P105.....	67
Tabla 16. Muestra P106.....	69
Tabla 17. Muestra P107.....	71
Tabla 18. Muestra P109.....	73

Tabla 19. Muestra P110.....	75
Tabla 20. Muestra P112.....	77
Tabla 21. Muestra P201.....	79
Tabla 22. Muestra P202.....	81
Tabla 23. Muestra P211.....	83
Tabla 24. Muestra P204.....	85
Tabla 25. Muestra P207.....	87
Tabla 26. Muestra P210.....	89
Tabla 27. Muestra R01.....	91
Tabla 28. Muestra R02.....	92
Tabla 29. Muestra R03.....	93
Tabla 30. Muestra R04.....	94
Tabla 31. Concentraciones químicas de 38 elementos de la tabla periódica en los suelos.	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación y accesos a la zona de estudio (imagen extraída y modificada de Google Earth).	3
Figura 2. Etapas de Guía metodológica para gestión de SPPC.....	6
Figura 3. SPPC a cabo del año 2015 (MMA, 2016).	8
Figura 4. Relaves por regiones administrativas según datos del último catastro emitido por SERNAGEOMIN (elaboración propia)	10
Figura 5. Mapa litológico de la zona, escala 1:80.000. Basado en las cartas geológicas de Copiapó (Arévalo, 2005a) y Los Loros (Arévalo, 2005b). Sistema de proyección UTM WGS84.	11
Figura 6. Grillas de muestreo I y II superpuestas con puntos de muestreo centrados en celdas. Sistema de proyección UTM WGS84.....	16
Figura 7. Cuadrantes utilizados para muestreo. A la izquierda: esquema en planta del suelo; a la derecha: fotografía de un muestreo que utiliza esta metodología (según Demetriades & Birke, 2015).....	17
Figura 8. a) Cubierta de grava sobre uno de los relaves aledaños a predios agrícolas; b) observación de afloramiento buscando sitio para toma de muestras; c) aspecto del material encontrado en afloramientos: limo-arcilloso y con cristales pequeños de brillo metálico; d) fotografía de un punto de muestreo (muestra R02).	18

Figura 9. Lóbulo aluvial oscuro identificado dentro del Predio 1. Se remarcó gris en imagen para mejor visualización.	18
Figura 10. Muestreo realizado en predios agrícolas y relaves mineros. Sistema de proyección UTM WGS84.	19
Figura 11. Ponderación obtenida con la interpolación por inverso de la distancia (izquierda) e inverso del cuadrado de la distancia (derecha). Imagen tomada de Emery (2015b).	24
Figura 12. Correlación entre el FE obtenido utilizando el V como elemento de referencia y FE relativo al Ti. Se utilizaron valores promedio de FE para cada elemento.	27
Figura 13. Resultados de FE promedio por predio utilizando V como elemento de referencia. Barras de error corresponden a desviación muestral.	28
Figura 14. FE por punto de muestreo para cada uno de los elementos medidos. Líneas negras rectas indican los niveles FE=20 y FE=40. Cuando $20 \leq FE \leq 40$ se habla de un enriquecimiento muy alto del elemento y cuando $FE > 40$ se habla de un enriquecimiento extremadamente alto, de acuerdo a la categorización de Sutherland (2000).	28
Figura 15. Matriz de correlación de datos geoquímicos	29
Figura 16. Abundancias comparadas entre Predio 1 (color mostaza), Predio 2 (color turquesa) y muestras de relaves estudiadas (tonos de grises). Sobre las barras de muestras de suelo se sobrepuso una barra de error correspondiente a la desviación muestral de los datos considerados.	32
Figura 17. Mapas de interpolación para los elementos: Cu, Co y Hg (la totalidad de las interpolaciones se encuentra en Anexos)	33
Figura 18. Fotografías de muestras vistas a través de lupa binocular con aumento 40x. (A) Muestra de suelo P103; presenta un aspecto característico de todas las muestras de suelo (grano muy fino, abundancia relativa mayor de granos minerales félsicos); (B) muestra de relave R03, cristales de magnetita apartados del resto con la ayuda de un imán; (C) muestra de relave R01, se señalan algunos de los minerales identificados.	34
Figura 19. Ejemplos de difractogramas. a) P101 y b) R02	36
Figura 20. Fotografías tomadas a las muestras en microscopio óptico. a) P105: vista general, b) P102: cristal de plagiocasa, c) P104: cristal de feldespato potásico, d) P104: cristales de cuarzo y calcita, e) P207: cristales cuarzo y calcita, f) P201: chert, g) P201: cristales de calcita y feldespato potásico, h) cristales de biotita y feldespato potásico, i) R02: vista general (abundancia de opacos), j) R03: cristal de pirita, k) R03: cristales de calcopirita y magnetita, m) P201: cristales de pirita, l) P201: cristal de pirita	38
Figura 21. Imágenes satelitales históricas que revelan aproximadamente cuando los relaves fueron cubierto por grava.	43
Figura 22. Imagen extraída de Google Earth; vista hacia el Este desde el borde suroriente del Predio 1. Muestra R03 señalada por flechas.	44

Figura 23. Imagen extraída de Google Earth; vista en planta al borde suroriente del Predio 1. Muestra R03 señalada por flechas negras. Flecha amarilla de imagen a la izquierda indica posible parte descubierta del lóbulo aluvial en 2004.....	45
Figura 24. Tubería que pasa por el borde sur del Predio 1 (fotografía tomada sobre relaves).....	46
Figura 25. Depósito de tierra oscura aledaña a la tubería que pasa por detrás (fotografía tomada dentro del Predio 1, borde sur)	46
Figura 26. Manguera de regadío en el borde sur de Predio 1.	47
Figura 27. Concentración de algunos elementos traza en fertilizantes (Rodríguez et al., 2014)..	48
Figura 28. Ingreso total de elementos traza al suelo (mg/ha^{-1}) por cada 100 unidades de fertilizante aplicados en suelos agrícolas, según el nutriente a utilizar; ya sea N, P o K (Rodríguez et al., 2014).....	48
Figura 29. Distribución de concentración de Cu.	51
Figura 30. Mapas de interpolación	103
Figura 31. Difractogramas con peaks identificados.....	107

ÍNDICE DE ECUACIONES

(1) Test de Grubbs.....	21
(2) Hipótesis nula de test de Grubbs.....	21
(3) Diferencia porcentual relativa (RPD).....	22
(4) Factor de enriquecimiento.....	23
(5) Coeficiente de correlación de Pearson.....	23

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Formulación del problema

La zona norte de Chile se caracteriza por poseer algunos de los depósitos minerales más importantes del planeta; particularmente de minerales metálicos, siendo Chile el principal productor de cobre en el mundo (Mikesell, 2013). Dicha producción data de hace más de un siglo de manera industrializada y acarrea consigo cambios en las condiciones geomorfológicas originales, debido a que las operaciones mineras necesitan extraer el material de interés de la corteza, y para ello se realizan voluminosas y numerosas excavaciones que mueven el material de un lugar a otro (ICOLD, 2001). Obviamente, toda intervención y ocupación humana modifica, de alguna manera, el entorno natural original. Sin embargo, las operaciones mineras poseen un carácter transformador mucho más profundo e incluso menos evidente, dado que pasan a formar parte del paisaje natural de manera desapercibida en muchos casos. Por ejemplo, sin artefactos humanos a la vista o sin contextualización, cualquier persona podría confundir un relave con una montaña más dentro de una cadena de montañas.

En particular, la producción de relaves asociada al segmento de la gran y mediana minería en Chile cubre extensas áreas y acumula hoy en día centenas de millones de toneladas de desecho (SERNAGEOMIN, 2015); con una producción actual de alrededor de 1.500.000 toneladas al día (SERNAGEOMIN, 2018b). Dadas las dimensiones de dicha producción y la antesala histórica de producción no formal y no catastrada en registros oficiales, se puede pensar en los relaves como agentes formadores de relieve, tal como lo son la actividad volcánica, los aluviones, los ríos, los glaciares, las dunas de arena, entre otros.

Usualmente, los residuos mineros son entendidos como fuentes de contaminación por parte de las comunidades que viven cerca de ellos; mientras que son entendidos como obras mineras puntuales para quienes legislan sobre ello y para quienes diseñan y operan su construcción. Dado este contexto, los esfuerzos por armonizar ambas miradas han consistido en aumentar la seguridad de los residuos mineros y hacer más rigurosas las medidas de cierre de mina, a través de la Ley que regula cierre de faenas y operaciones mineras (BCN, 2011) o proyectos como el Programa Tranque (Fundación Chile, 2017). Lo cierto es que los residuos mineros no necesariamente constituyen un factor contaminante sobre el entorno, pero sí pueden llegar a degradar los suelos; ya sea contaminándolos con un aumento en la concentración de metales pesados o mediante una posible disminución en fertilidad del suelo por acidificación, disminución de porosidad y permeabilidad, salinización o erosión inducida (Oyarzún *et al.*, 2011).

A pesar de todos los mecanismos de degradación del suelo, no existe en Chile una normativa transversal, integral ni efectiva para suelos degradados. Existen escasas normas y que además son solo parcialmente vinculantes a la institución que las emite. Por ejemplo, el Ministerio del Medio Ambiente emitió en 2012 una metodología para suelos con potencial presencia de contaminantes que indica pasos para la gestión de dichos suelos. Sin embargo, posee algunas deficiencias y solo es mandante (por la Resolución Exenta 406) para aquellos que hagan estudios de caso dentro de dicho ministerio.

La “Guía para la gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes (SPPC)” tiene como misión generar un levantamiento de información comparable a nivel nacional y el desarrollo de un diagnóstico general sobre la problemática ambiental. Sin embargo, se ve limitada por la información disponible sobre sitios potencialmente contaminados además de ser bastante exhaustiva y extensa. La metodología propuesta por la guía se pone en práctica mediante licitaciones que obtienen externos sobre un determinado sitio, lo cual no permite tener datos ni procesos de investigación alineados bajo un mismo enfoque ni nivel de detalle. Además, no toma en cuenta procesos de transporte de material, como por medio de aluviones o viento; siendo que eventos meteorológicos puntuales pueden desencadenar removilización de material por corrientes de aguas esporádicas o flujos de detritos, trasladando sedimentos incluso hacia otras cuencas. Esto último es relevante porque se explicita en la guía tomar en cuenta como límite de SPPC las divisorias de aguas y/o los altos topográficos.

Para este trabajo de investigación, se hará un estudio de caso en Atacama, en que los residuos mineros –activos, inactivos y abandonados– circundan predios agrícolas, viviendas, colegios y hospitales; y que en los últimos años han sido afectados por aluviones que pudieron removilizar material a entornos no inmediatos. Se escogió, particularmente, un sector ubicado en Punta del Cobre, con el propósito de analizar aspectos geoquímicos y mineralógicos de los suelos de dos predios agrícolas ubicados en medio del valle del río Copiapó. Se escogió esta zona bajo el contexto del proyecto Fondecyt 1170153: “*Enterrando el Antropoceno: ensamblando nuevos ecosistemas a partir de suelos degradados en Atacama*”, el cual financió parte de este estudio y que tiene por objetivo tratar de manera multidisciplinaria la afectación de estos suelos por actividad minera, bajo una mirada integradora que contemple las múltiples dimensiones de la problemática propuesta; como por ejemplo, la relación de los trabajadores con los predios y de los habitantes con el entorno. La metodología utilizada comprende un análisis elemental por ICP-MS y análisis mediante microscopía óptica y XRD de muestras de suelo y de relaves circundantes, con el propósito de identificar aporte de material de relaves y otros residuos mineros al suelo. Considerando que en Chile se producen residuos mineros hace más de un siglo y que recién desde el año 2011 existe una ley que regula el cierre de faenas y operaciones mineras; los sedimentos que se dispersan por erosión superficial de residuos probablemente están presentes en la conformación de suelos; es decir, es esperable encontrar enriquecimiento de minerales y/o elementos asociados a los residuos en los suelos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Analizar aporte de material de residuos mineros a suelos mediante estudio de caso y aportar consideraciones a líneas base de normativa vigente.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Analizar si la constitución de los suelos en estudio revela un origen antropogénico, particularmente asociado a los desechos de la minería local.
2. Determinar si en los suelos en estudio existe procedencia de sedimentos por parte de los residuos inmediatamente aledaños a ellos.

1.3 Hipótesis de trabajo

Los residuos mineros tienen un rol en la conformación de los suelos cercanos a ellos; especialmente los depósitos de tipo relave, por ser el tipo de residuo más abundante y también por tener una granulometría predominantemente muy fina, lo cual facilita su transporte hacia otros sitios.

1.4 Ubicación y accesos

Los suelos en estudio se encuentran en la localidad de Punta del Cobre (valle del río Copiapó), en la comuna de Tierra Amarilla, Región de Atacama, Chile (Figura 1); entre los $27^{\circ}29'4''\text{S}$ y $27^{\circ}29'9''\text{S}$, a lo largo de los $70^{\circ}16'\text{W}$.

Al lugar se puede acceder de varias formas: por la ruta 5 (Panamericana Norte) desde Caldera hacia Copiapó y luego mediante la ruta C-35 hacia el sur; o bien, si se procede desde el sur, se puede acceder desde Vallenar mediante la ruta 5 hacia Copiapó para luego tomar la ruta C-35. También existen caminos que llegan directamente a la ruta C-35 desde el SE: rutas C-459, C-453, C-401, C-379, C-385, entre otras; mientras que el acceso internacional desde Argentina se puede realizar por la ruta 31-CH hasta Paipote y luego hacia Tierra Amarilla por la ruta C-35.

Respecto a los puntos exactos de muestreo, existen caminos pavimentados que conectan los predios a estudiar y puentes que permiten cruzar el río Copiapó. Dadas las características del terreno (zona urbana) y que las distancias son cortas, la movilización es bastante viable con cualquier vehículo de tracción simple.

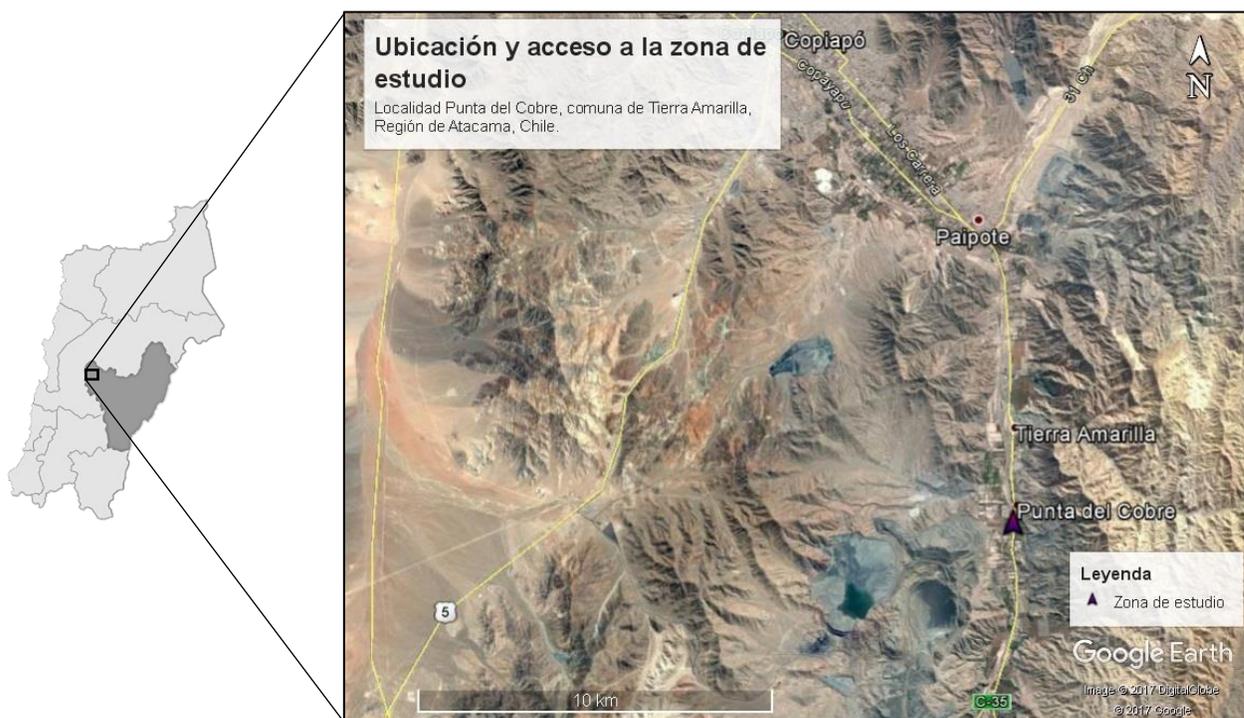


Figura 1. Mapa de ubicación y accesos a la zona de estudio (imagen extraída y modificada de Google Earth).

2. ANTECEDENTES

2.1 Marco legal e histórico

Actualmente, en Chile existe una preocupación creciente por el cuidado del medio ambiente. Se han cuestionado los efectos que las actividades humanas revisten en el entorno natural –y por extensión, en nosotros mismos– incluso desde la Colonia, insertándose en el ámbito de la sanidad e higiene pública (Puga, 1908). Sin embargo, una visión más global no fue incorporada sino hasta mediados del siglo XX. Producto del aumento de la población y de la industrialización, la contaminación ambiental –específicamente atmosférica– fue objeto de cuestionamiento por parte de la población. Recién en la década de 1970 se crean comisiones medioambientales (CGR, 1990).

Luego, si bien a través de la Constitución de 1980 se reconoció el derecho de todo ciudadano a gozar de un medioambiente libre de contaminación, por otra parte, se liberalizó el suelo y el transporte urbano, lo que repercutió directamente en los elevados índices de contaminación. Producto de la presión mediática y de la opinión pública, después de una década se creó CONAMA y se promulgó en 1994 la Ley N° 19.300 o Ley de Bases del Medio Ambiente, que reestructuró CONAMA, permitiéndole administrar el Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental pero solo hasta el 2010, año en que se dicta la Ley 20.417. En dicha ley se creó: el Ministerio del Medio Ambiente (o indistintamente MMA), encargado de definir las políticas medioambientales; el Consejo de Ministros para la sustentabilidad, que aprueban y regulan las políticas creadas por el Ministerio; el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), a cargo de las líneas de base y de la administración del SEIA; y por último, la Superintendencia del Medio Ambiente, a cargo de las fiscalizaciones. Luego, en el año 2012, se crearon los tribunales ambientales a partir de la Ley 20.600.

A pesar de este esfuerzo por centralizar la gestión del medio ambiente, aun así contamos con normas disgregadas en distintos decretos, a cargo de distintos organismos fiscalizadores. Esto ocurre tanto con el agua, con el aire, con la biosfera y el con el suelo, dada la multiplicidad de usos que tienen estos recursos.

En particular, la normativa chilena sobre el suelo es diversa y dispersa. De hecho, no existe en Chile una normativa general de calidad de suelos. Existen algunas normas especiales cuyo objetivo es muy específico (por ejemplo: Decreto Ley 3516 sobre división de predios rústicos; o el Decreto Ley 3557 sobre uso de pesticidas), a lo que se suma el hecho de la multiplicidad de organismos públicos con competencia sobre su regulación. Por ejemplo, el concepto de uso de suelo para planificación urbana se encuentra a cargo del Ministerio de Vivienda, los Gobiernos Regionales y las Municipalidades; y por su parte, la regulación del uso del suelo que se encuentra ubicado fuera de los límites urbanos, por regla general es de competencia del Ministerio de Agricultura.

Siendo esta la tendencia en la evolución que ha tenido el derecho ambiental en Chile, hace falta una política general de prevención y protección de este recurso que sirva de base a una regulación integral del uso del suelo, cumpliendo de esta forma con el principio establecido en el artículo 39 de la ley 19.300, de Bases Generales del Medio Ambiente:

Art. 39.- “La ley velará porque el uso del suelo se haga en forma racional, a fin de evitar su pérdida y degradación”.

En la Constitución Política de Chile no se hace mención directa al suelo. Tampoco aparece mencionado expresamente dentro del concepto de medio ambiente que da la Ley 19.300.

Ahora bien, el MMA (en conjunto con otras instituciones) elaboró en el año 2012 un informe llamado “Guía Metodológica para la Gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes”. El objetivo de la guía es definir los procedimientos para estandarizar la investigación de suelos con potencial presencia de contaminantes en el país. Dicha guía fue aprobada en mayo del año 2013 mediante la resolución exenta 406, por lo cual es la herramienta principal con la que cuenta el MMA para la gestión de suelos.

2.1.1 Guía metodológica para la gestión de SPPC

En esta guía, se define un suelo con potencial presencia de contaminantes (o SPPC) como aquel lugar o terreno delimitado geográficamente en el que se desarrollan o han desarrollado actividades potencialmente contaminantes. Incluye a suelos abandonados y activos o en operación. Tiene como misión generar un levantamiento de información comparable a nivel nacional y el desarrollo de un diagnóstico general sobre la problemática ambiental. Cabe mencionar que solo considera contaminantes correspondientes a sustancias químicas. Otro aspecto relevante, es que la implementación de la guía apunta fundamentalmente a funcionarios del MMA y sus respectivas Secretarías Regionales Ministeriales, pero también para otros servicios públicos con competencia ambiental, empresas potencialmente contaminantes, organizaciones no gubernamentales, universidades y a la comunidad en general interesada en la gestión de estos suelos. La metodología propuesta consta de tres etapas (Figura 2):

I) Identificación, priorización y jerarquización:

A nivel nacional y en términos generales, se insta a **identificar** los sectores, rubros o actividades productivas donde se producen, utilizan, manipulan, almacenan o disponen sustancias o residuos peligrosos que pudieron derivar en la generación de SPPC, tales como: actividades mineras; refinerías de petróleo; fundiciones, termoeléctricas y metalúrgicas; almacenamiento de plaguicidas; rellenos y/o vertederos; zonas de derrames o accidentes químicos ambientales; entre otras. Para ello, la guía entrega sugerencias de fuentes de información, tratándose en general de instituciones públicas. Una vez hecha la identificación, se indica que se deben georreferenciar los sitios y especificar empresas responsables, actividades contaminantes y si se trata de suelos abandonados o no (es decir, si en el suelo en cuestión, la actividad contaminante cesó, pero no tuvo un adecuado proceso de cierre). Luego se indica que se debe proceder a realizar una **priorización** de los suelos, en función de aspectos como: población residente, sistemas hídricos, uso del suelo y ecosistemas sensibles o de alta relevancia. Según ello, se asignan diferentes puntajes; por ejemplo, tiene mayor puntaje un suelo residencial que uno agrícola. Finalmente, se propone realizar una inspección de los sitios previamente priorizados, mediante un llenado de fichas que considere numerosos aspectos, pero que, explicado a grandes rasgos, abarquen: fuente de contaminación (actividad contaminante), ruta de exposición (medio a través del cual se puede traspasar la contaminación) y receptores (si se trata de personas, predios agrícolas, u

otros). Según los puntajes asignados a cada ítem, se realiza una **jerarquización** de los SPPC (Figura 2).

Nivel	Actividades	Principales Resultados
REGIONAL: Identificación, Priorización y Jerarquización	Levantamiento de Información	Actividades Potencialmente Contaminantes por Región
	Identificación y Georreferenciación de SPPC	Listado de SPPC Georreferenciado
	Priorización de SPPC	Listado Priorizado de SPPC
	Inspección de SPPC	Listado Jerarquizado SPPC
SITIO ESPECÍFICO: Evaluación Preliminar del Riesgo	Investigación Preliminar	Modelo Conceptual de la Situación de Contaminación
	Investigación Confirmatoria	Determinación Cuantitativa de la Presencia de Contaminantes
SITIO ESPECÍFICO: Evaluación del Riesgo y su Gestión	Evaluación de Riesgo Ambiental	Índices de Riesgo
	Plan de Acción	Gestión del Riesgo

Figura 2. Etapas de Guía metodológica para gestión de SPPC

II) Evaluación preliminar del riesgo:

Primero se insta a realizar una **investigación preliminar** –de carácter conceptual– sobre los sitios escogidos según la jerarquización realizada en el paso anterior. Esta investigación considera una investigación histórica, geográfica, del medio físico y de los receptores, para generar, posteriormente, un modelo conceptual (a modo de diagrama) que represente de la mejor manera los datos disponibles. En algunos casos, se indica que ha de ser necesaria una visita de reconocimiento. Según las conclusiones de la investigación preliminar, se señala que se puede proceder a una **investigación confirmatoria** que finalmente entrega datos concretos de contaminación en los suelos. Para ello, la guía indica paso a paso el procedimiento a concretar: revisión de información preexistente, plan de muestreo, ejecución y análisis de las mismas y, por último, una comparación con valores de referencia. En este último aspecto, Chile no cuenta con normativas para contaminación en suelos y por ende se debe acudir a normativas internacionales tales como las de Alemania, Canadá, Estados Unidos, Bélgica, España y otros, dependiendo del tipo de contaminante que se busca identificar.

III) Evaluación del riesgo y plan de acción para la gestión de SPPC:

Tras efectuada una evaluación preliminar del riesgo, se insta a realizar una **evaluación definitiva de riesgo ambiental**, partiendo por caracterizar adecuadamente los SPPC que en la etapa previa hayan sido identificados con presencia de sustancias químicas por sobre los valores de referencia en esta etapa aún no se habla determinadamente de un “suelo contaminado”). Tiene un enfoque de riesgo sobre la salud de las personas, por sobre otra clase de riesgos. Se indica que se debe evaluar el nivel de exposición y así también la toxicidad asociada a los contaminantes, de manera de caracterizar el tipo de riesgo presente. Una vez hecho eso, se señala que se debe hacer un análisis de incertidumbre; en este punto se refiere a incertidumbres en cuanto a cálculos y asunciones iniciales asociadas al proceso de investigación. Tras esto, la guía indica que se debe realizar una evaluación de los efectos mediante un monitoreo biológico y análisis de datos estadísticos de salud. Si se determina que se trata de un riesgo relevante, la guía señala que en última instancia se debe proceder a realizar un **plan de acción**. Este debe contar con medidas de corto, mediano y largo plazo. Para la implementación de medidas de corto plazo, se indica que se debe definir una estrategia general, que integre actores públicos y privados, así como identificación de fuentes de financiamiento; de este modo generar comunicación del problema a la comunidad y concretar acciones de control inmediatas, a partir de implementación de técnicas de contención sencillas. Para medidas de mediano y largo plazo, se propone plantear estrategias de remediación y en función de ellas evaluar efectividad de las mismas, así también aspectos de factibilidad –técnica y administrativa– y costos asociados. Algunas de las tecnologías de remediación que se mencionan son: bioaumentación, biotransformación de metales, estabilización fisicoquímica, sellado de suelos, incineración, pirolisis, entre otras.

Ya que esta guía fue aprobada el año 2013 y que las metodologías que propone son exhaustivas y poco expeditas, su aplicación ha sido limitada, pero actualmente ya existe una base de datos elaborada por el MMA con el detalle de SPPC a nivel nacional (Figura 3).

Actualmente, el MMA trabaja en la ejecución de proyectos de gestión de algunos suelos con presencia de contaminantes que representan importancia nacional. Estos se encuentran en Arica, Andacollo, Quintero-Puchuncaví, Los Andes, Olmué, San Esteban, Chañaral, Copiapó, Diego de Almagro y Tierra Amarilla (MMA, 2016). Sin embargo, pocos suelos han sido llevados a fases avanzadas de la metodología de gestión. Ahora bien, puntualmente en Tierra Amarilla, se desarrolló un estudio cuyos resultados se encuentran en el informe llamado: “Diagnóstico, evaluación de potenciales riesgos y plan de gestión de los sitios de Nantoco, Pabellón y Totoralillo” (CENMA, 2017). En dicho informe se menciona –a modo de conclusiones– que el SPPC asociado a Escorial Nantoco es un suelo con presencia de contaminantes (SPC) con Pb y As para los que se requiere gestión de riesgo. Los SPPC de relave Pabellón y relave Totoralillo, también fueron calificados como suelos con presencia de contaminantes (SPC) con Pb, Hg y As para los que, igualmente, se requiere gestión de riesgo. Dado que este exhaustivo informe fue realizado por el Centro Nacional de Medioambiente (CENMA) y no por el MMA, solo se presentan sugerencias detalladas para un plan de acción, pero no se ejecutan.

SUELOS CON POTENCIAL PRESENCIA DE CONTAMINANTES A NIVEL NACIONAL AL 2015

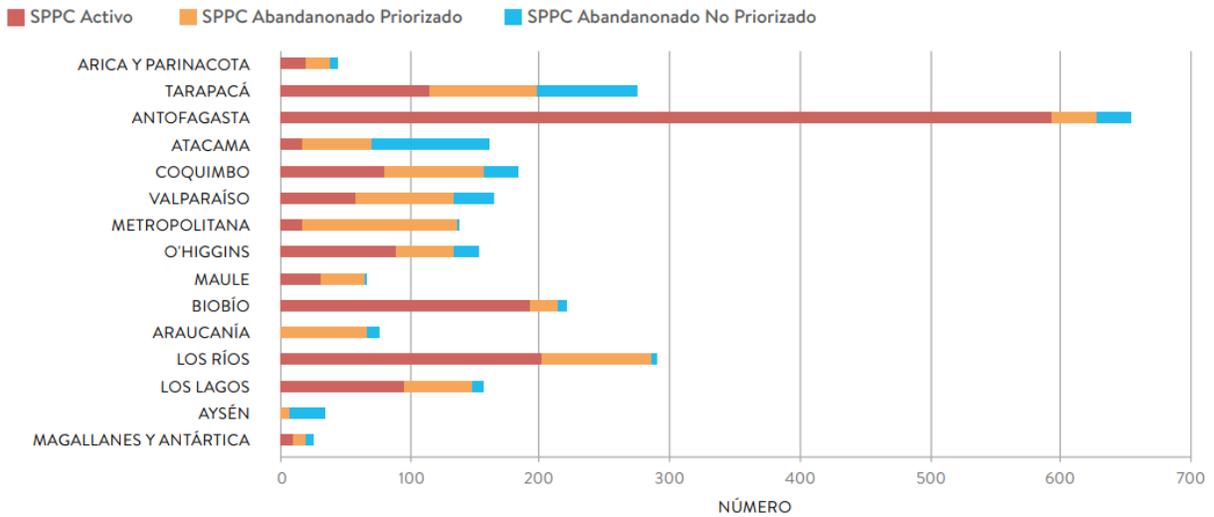


Figura 3. SPPC a cabo del año 2015 (MMA, 2016).

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Suelos

El suelo es la parte más superficial de la litósfera que se constituye por una mezcla variable y no consolidada de sedimentos (líticos, minerales, vítreos, entre otros), materia orgánica, agua, aire y compuestos químicos disueltos (Doménech, 1995). Puede estar presente en cantidades variables –o incluso ausente–, y su composición y zonificación química varía según distintos parámetros del entorno. Su origen se relaciona con procesos de meteorización química y física de las rocas.

El suelo representa el centro de casi todos los procesos de los que dependen los ecosistemas y, así también, el bienestar de la humanidad; proporciona, regula y hace de soporte de numerosos servicios de los ecosistemas, de los cuales dependen la seguridad alimentaria, el refugio, control de inundaciones, control de enfermedades y patrimonio cultural. Si un suelo es degradado, este tiende a presentar una reducción en su capacidad para producir de forma sostenible servicios ambientales, tanto directos como indirectos. Algunos de los factores que degradan el suelo son: pérdida de materia orgánica, salinización y alcalinización, acidificación, contaminación, erosión (Gardi *et al.*, 2014). La degradación de tipo física se refiere, por ejemplo, a la pérdida de su capacidad de retención de agua o permeabilidad, en tanto la biológica se refiere a una disminución de microorganismos, lo que afecta directamente su fertilidad. Finalmente, la degradación química está asociada a problemas de salinización, alcalinización, acidificación y toxicidad (MMA, 2016).

En Chile, existen diversos tipos de suelo, condicionados principalmente según la topografía, organismos presentes, litología de la roca madre y las condiciones climáticas. Estas varían de norte a sur desde zona desértica a zonas semiáridas, mediterráneas, húmedas y antárticas (entre otras; Leighton, 2010). En Copiapó, particularmente, el lugar de estudio de este trabajo, existen suelos altamente áridos y en general salinos que, según las fuentes consultadas

(Leighton, 2010; FAO–UNESCO, 2007), se clasifican como aridisoles, entisoles, litosoles y fluvisoles éutricos (en los valles). Ahora bien, a pesar de que en Chile el principal tipo de degradación presente en suelos es por la presencia de agroquímicos, salinización natural en zonas áridas y pérdida de suelo fértil debido a la expansión urbana (Gardi *et al.*, 2014), en zonas asociadas a actividades mineras se tiene un tipo de degradación fuertemente asociada a relaves. Sin embargo, los relaves y otros desechos mineros no son tóxicos por sí mismos, pues están constituidos en más de un 90% por silicatos. Se vuelven un factor contaminante cuando entran en contacto con aguas superficiales y se produce drenaje ácido de minas (disolución oxidativa de sulfuros, como la pirita), solubilizando metales pesados y otras sustancias químicas que representan amenazas para la salud de las personas, tales como: As, CN-, Cu, Zn, Cr, Pb. Pero también si poseen trazas abundantes de elementos potencialmente tóxicos, lo cual va a depender de la biodisponibilidad de los elementos.

2.2.2 Relaves

2.2.2.1 Definición y tipos de relaves

Los relaves son un tipo de residuo minero, tal como lo son los botaderos de estériles, los rípios de lixiviación o las escorias de fundición. Se constituyen por una combinación de materiales sólidos de grano fino (usualmente limo) que quedan después de que los metales y minerales recuperables se han extraído de la mena mediante el proceso de flotación. Son de consistencia lodosa debido a que estas partículas sólidas finas se desechan junto con el agua utilizada en el proceso de flotación, formando una “pulpa o lodo de relave” (DIIS, 2016). Esta pulpa fluctúa en la práctica con una razón aproximada de agua/sólidos que va del orden de 1:1 a 2:1. Las características y el comportamiento de esta pulpa dependerá de la razón agua/sólido, de las características de las partículas sólidas y de los aditivos químicos que sean empleados durante el proceso de flotación (Ramírez, 2007).

El tipo de almacenamiento depende de las propiedades físicas y naturaleza química del relave, de la topografía del sitio, de las condiciones climáticas, de regulaciones y restricciones ambientales y del contexto socioeconómico en el cual se encuentren las operaciones mineras y la planta de procesamiento. Existen básicamente tres opciones de contención de relaves en superficie (Ramírez, 2007):

- **Descarga de relave completo:** Se almacenan todos los relaves que se producirán durante la vida útil de la planta. Para ello se utilizan cavidades preexistentes tales como: rajos mineros abandonados, depresiones naturales en superficie, cavernas naturales, antiguas minas subterráneas abandonadas, etc. Este tipo de depósito de relaves se denomina **embalses de relaves**.
- **Construcción de muro con material de relave:** Se separa la fracción gruesa (arenas de relaves) de la fracción fina (lamas), para poder utilizar la primera como material para la construcción del muro perimetral y descargar la segunda a la cubeta de embalse. Al construir el muro utilizando las arenas de los relaves, es posible hacerlo de 3 formas o métodos de crecimiento distintas: crecimiento del muro hacia “aguas arriba” (no lo contempla la legislación actual en Chile), crecimiento del muro hacia “aguas abajo” y crecimiento del muro según el método llamado “eje central o mixto”. Cualesquiera de estos métodos constructivos conforman finalmente a los denominados **tranques de relaves**.

- **Material de relaves equivalente a un suelo húmedo:** Se extrae la mayor cantidad de agua a partir del relave, obteniendo así un material equivalente a un suelo húmedo, el cual puede ser depositado sin necesidad de un muro perimetral para su contención. Para este propósito existen distintos métodos: espesar los relaves, filtrar los relaves y generar una **pasta de relaves** (siendo esta última la alternativa más reciente).

2.2.2.2 Relaves en Chile

Según el último catastro levantado en el país (SERNAGEOMIN, 2018), existen 740 depósitos de relaves en Chile; siendo 600 de ellos tipo tranque de relave (81%), 118 de ellos tipo embalse (16%) y otros 22 depósitos correspondientes a pastas, pretilas, espesados y filtrados (3%). La mayor parte de los relaves del país se encuentran en el norte de Chile; en efecto, 74% de ellos se ubican entre las regiones de Atacama y Coquimbo (Figura 4).

De acuerdo al mismo catastro, un total de 463 relaves (62,5%) provienen de la explotación de cobre y menas secundarias, mientras que 261 (35,3%) provienen de la explotación de oro y menas secundarias. De este modo, apenas 16 relaves (2,2%) en el país provienen de la explotación de otro tipo de mena (hierro, zinc, caliza y otros). El relave más grande del país corresponde al tranque de relave de El Teniente (1.843.054.746 toneladas), seguido por el embalse de relave de Chuquicamata (1.711.587.518 toneladas).

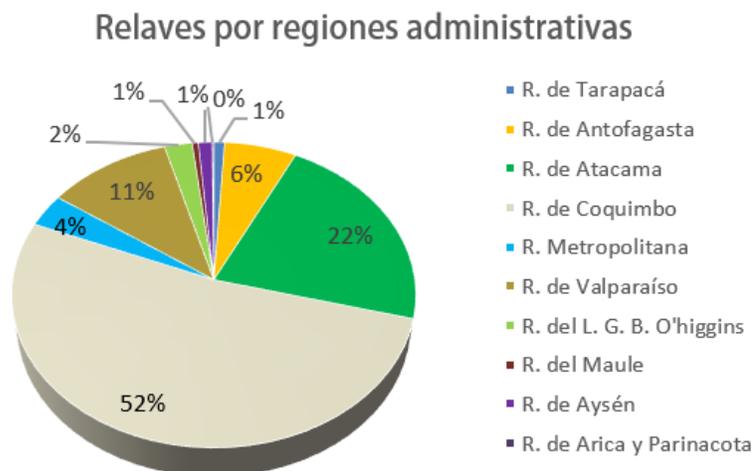


Figura 4. Relaves por regiones administrativas según datos del último catastro emitido por SERNAGEOMIN (elaboración propia)

Si bien la legislación minera indica normas de construcción y manejo de depósitos de relaves, existen muchos casos que no se rigen a dicha normativa durante la operación y cierre de las minas. Por ejemplo, se calcula que existen cerca de 170 relaves abandonados, cuyo operador se desconoce y sobre los cuales no se han efectuado medidas de cierre pertinentes (SERNAGEOMIN, 2015b). En general, la presencia de faenas abandonadas conlleva problemas tales como: hundimientos de tierra, tranques de relaves que filtran metales pesados hacia acuíferos o que tienen riesgo de colapso, botaderos de estériles, obras derrumbadas, generación de material particulado que se convierte en polvo en suspensión sobre ecosistemas naturales como glaciares (lo que acelera su derretimiento) y sobre comunidades aledañas (SERNAGEOMIN, 2015b).

Cabe mencionar, que la dispersión de metales de los relaves hacia los suelos mediante escorrentías superficiales está condicionada por propiedades fisicoquímicas implícitas en el lodo

de relave; por ejemplo: pH bajo, baja capacidad de retención de agua y baja capacidad de intercambio iónico (y por tanto, baja capacidad para retener metales) (Zazueta *et al.*, 2011).

2.4 Marco geológico

La generación de los grandes yacimientos minerales del centro-norte de Chile se deben al contexto geológico-tectónico en que se ubica el territorio nacional: una zona de subducción entre la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana. La convergencia entre ellas permite la generación de magmas alineados en dirección norte-sur, que, a su vez, permiten la generación de yacimientos de metales en sus proximidades. Estos arcos magmáticos se han situado en diferentes posiciones a lo largo del tiempo geológico, dando origen a franjas geológicas de yacimientos minerales conocidas como *franja metalogénica* (Sillitoe, 1976). El lugar de estudio se encuentra en la franja metalogénica del Cretácico Inferior, conocida también como la *franja ferrífera de Chile*, por tanto, la mineralización metálica suele estar acompañada por altos porcentajes de minerales de Fe, como magnetita y hematita; en efecto, los yacimientos tipo IOA más importantes de Chile se encuentran en la Cordillera de la Costa, entre las regiones de Atacama y Coquimbo (Maksaev *et al.*, 2007).

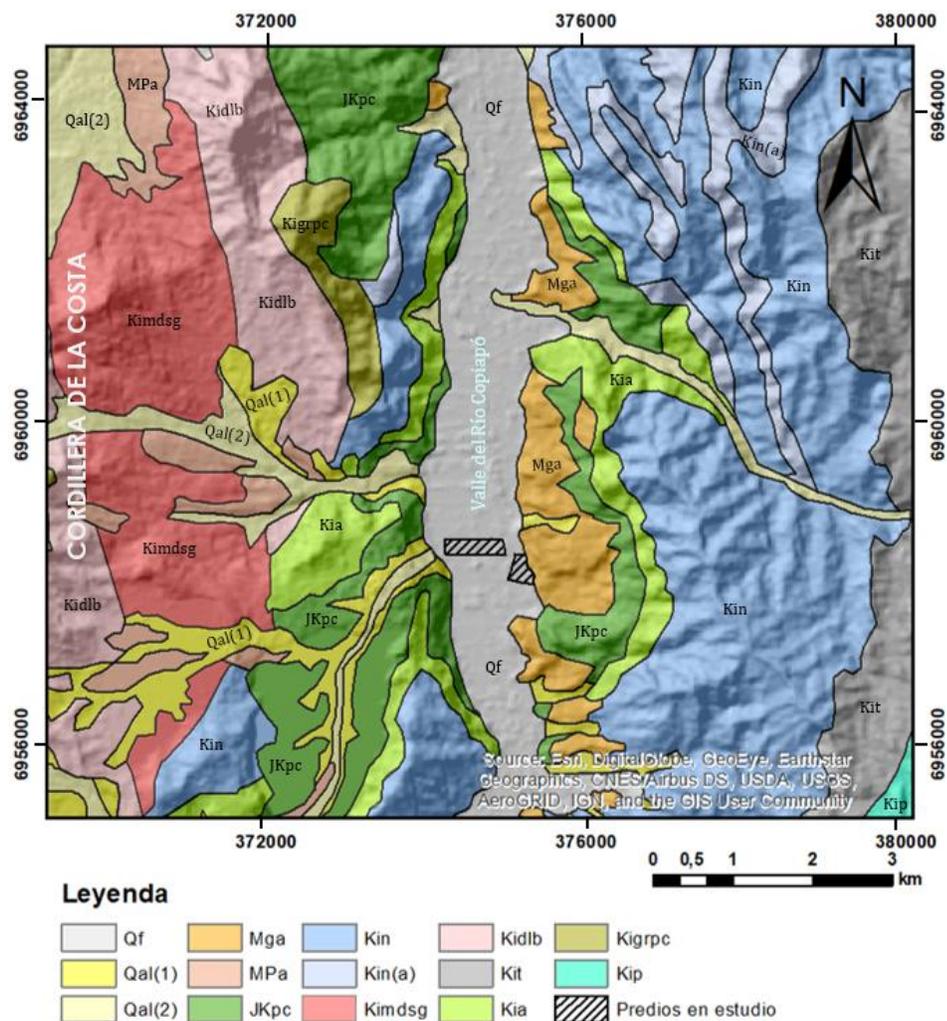


Figura 5. Mapa litológico de la zona, escala 1:80.000. Basado en las cartas geológicas de Copiapó (Arévalo, 2005a) y Los Loros (Arévalo, 2005b). Sistema de proyección UTM WGS84.

Particularmente, las litologías presentes en la zona son poco uniformes. Predominan secuencias sedimentarias calcáreas y, en segundo lugar, plutones y rocas volcánicas y volcanoclásticas (Figura 5). Los predios agrícolas en estudio se sustentan sobre depósitos fluviales desde miocenos a actuales. Así mismo, han ocurrido procesos aluvionales que se han encauzado por el valle principal, lo cual entrega composiciones y orígenes mixtos a los materiales presentes en el valle.

Jurásico – Cretácico Inferior

Formación Punta del Cobre (JKpc)

Se trata de una secuencia volcánica y sedimentaria que subyace concordantemente a los estratos de la Formación Abundancia (*Kia*) y sobreyace, con el mismo tipo de relación, a la Formación La Negra (Figura 5). Consta de capas de lavas andesíticas de gran continuidad areal seguidas por una sección clástica y volcánica de brechas macizas asociadas a pliegues sedimentarios, lutitas laminadas rojas y coladas de lavas andesítico-basálticas. Ubicada en zona precordillerana, aflora a ambos flancos del río Copiapó hacia el sur (en torno al área de estudio) y hacia el norte en torno a Paipote. Las rocas ubicadas al este del río Copiapó, en la localidad de Punta del Cobre, presentan una fuerte alteración a asociaciones de albita-cuarzo-clorita y feldespato potásico (y/o biotita)-cuarzo-clorita-sericita. En la ladera oeste, las rocas de la formación se presentan alteradas a una asociación de anfíbola-biotita-sericita. Las rocas de esta formación representarían la acumulación de sedimentos en una plataforma clástica o línea de costa, contemporánea con actividad volcánica submarina de tipo lávica y explosiva.

Cretácico Inferior

Formación Abundancia (Kia)

La formación se presenta como una serie sedimentaria de tipo calcáreo-arenosa, de alrededor de 200 m de espesor, que aparece cubierta en concordancia por las calizas de la Formación Nantoco (*Kin*) y sobreyace concordantemente, a su vez, a la Formación Punta del Cobre (*JKpc*) (Figura 5). Se conforma por calcilutitas y grauvacas verdes, intercaladas hacia la base con capas de volcarenitas verdes oscuras de grano fino a muy grueso, incluso conglomerádicas con gradación normal y bases erosivas. Esta formación aflora tanto en dominio precordillerano como en la Cordillera de la Costa. En el área de estudio se encuentran al oeste y este del río. Las fangolitas y grauvacas representarían la acumulación de turbiditas volcanoclásticas de grano fino, acompañadas por precipitación carbonatada en ambiente submareal profundo. Las volcarenitas representarían turbiditas de abanico medio.

Formación Nantoco (Kin)

Secuencia monótona de calizas grises cuyo espesor varía entre 600 y 1200 m, que se apoya, en concordancia, sobre los estratos de la Formación Abundancia (*Kia*) y subyace, de la misma manera, a las rocas de la Formación Totoralillo (*Kit*). Se encuentra constreñidamente distribuida en torno al río Copiapó, principalmente hacia el este. Se considera que esta formación se divide en dos miembros: *Kin 1* y *Kin 2*, pero para efectos de este estudio solo se hizo una distinción para la subunidad *Kin(a)*, perteneciente a *Kin 1*; todo lo demás fue tomado como *Kin* (Figura 5).

En la Formación Nantoco predomina la presencia de calcilutitas. El Miembro Inferior (*Kin 1*) está formado por 600 a 1000 m de calcilutitas y calcilutitas limosas (*mudstones*) en capas (10–80 cm

de espesor) con trazas de tipo *thalassinoide*, que culminan con un nivel persistente de calcarenitas bio e intraclásticas (*grainstones*). Por su parte, el Miembro Superior (*Kin 2*) es lateralmente muy continuo, alcanza cerca de 200 m de espesor en promedio y está formado por calcilutitas negras finamente laminadas y calcarenitas amarillentas. La subunidad '*Kin (1a)*', aquí tratada como *Kin(a)*, consta de facies de areniscas rojas y conglomerados bien estratificados (Figura 5).

Formación Totoralillo (Kit)

Secuencia de calcilutitas de aspecto muy uniforme en toda la extensión de sus afloramientos. Sobreyace, de manera concordante, a las rocas de la Formación Nantoco (*Kin*) y está cubierta, de la misma manera, por los estratos de la Formación Pabellón (*Kip*). El espesor de la formación varía mayormente entre 170 y 250 m y se encuentra constreñida en los entornos del río Copiapó, al este de la Formación Nantoco (*Kin*) (Figura 5).

Formación Pabellón (Kip)

Se trata de una secuencia calcárea arenosa de 450 a 700 m de espesor, que yace en concordancia sobre las calcilutitas de la Formación Totoralillo (*Kit*), aflorando en el lado oriental de esta. Consta de calcilutitas gris claras a amarillentas, calcilutitas bioturbadas y calcarenitas y calciruditas muy bioclásticas hacia el techo. Hacia la base, se encuentran fangolitas montmorilloníticas negras (Figura 5).

Diorita La Brea (Kidlb)

Se trata del cuerpo plutónico con mayor superficie expuesta en los entornos de la zona de estudio. Presenta su dominio en la Cordillera de la Costa y aflora hacia el oeste del valle del río Copiapó. El plutón está compuesto por dioritas con abundancia de clinopiroxeno, hornblenda, plagioclasa, cuarzo y biotita intersticial (Figura 5).

Monzodiorita San Gregorio (Kimdsg)

Plutón compuesto por monzodioritas homogéneas de hornblenda, biotita y clinopiroxeno con actinolita y turmalina ocasional y forma agregados seriados a equigranulares. La hornblenda, normalmente, bordea los cristales de piroxeno. La ortoclasa mirmequítica y el cuarzo son intersticiales. Los cristales de plagioclasa y hornblenda se encuentran frecuentemente orientados y definen una foliación penetrativa subvertical, ortogonal al eje mayor del plutón. No existe lineamiento mineral. Este plutón se encuentra esencialmente en la Cordillera de la Costa y aflora hacia el oeste de la zona de estudio (Figura 5).

Microgranitos y Aplitas del Portezuelo Cucharas (Kigrpc)

Unidad que aflora hacia el costado oeste del valle del río Copiapó. Se trata de una serie de stocks, sills y diques de microgranitos, microgranitos porfídicos y aplitas rosados a blanquecinos de reducida extensión al interior de la Cordillera de la Costa. Estas rocas en general constan de agregados de ortoclasa y cuarzo (plagioclasa ocasional) con textura sacaroidal. Hornblenda y biotita son escasas, y turmalina y titanita son los accesorios principales. La ortoclasa (micropertítica) y la plagioclasa aparecen moderadamente alteradas a caolinita y montmorillonita. (Figura 5).

Mioceno Medio

Gravas de Atacama (Mga)

Se trata de una unidad de gravas polimícticas, mal a medianamente consolidadas con niveles de cenizas intercaladas, que se reconocen como terrazas remanentes y que cubren unidades pre-miocenas en una amplia extensión en la Precordillera de Atacama, entre la Franja de Maricunga y la Cordillera de la Costa. En la zona de estudio afloran inmediatamente al este, en el flanco oriental del valle del río Copiapó. La litología es, en general, heterogénea y frecuentemente diferente de la composición de las rocas de los sustratos. La matriz de las gravas es variablemente arenosa, limosa o arcillosa. Este plutón aflora hacia el costado oeste del valle del río Copiapó (Figura 5).

Mioceno Superior – Plioceno

Depósitos Aluviales y Coluviales Antiguos (MPa)

Son depósitos distribuidos en diversos sectores de la región, consistentes en gravillas a ripios mal consolidados con matriz de arenas, limos o arcillas, que constituyen conos aluviales individuales o coalescentes, depósitos coluviales y llanuras de inundación, adosados a zonas topográficamente altas y que aparecen cubiertos por los depósitos aluviales cuaternarios (*Qal*). En general, preservan la morfología de abanico con zonas apicales estrechas, que rellenan secciones altas de quebradas y zonas distales más anchas. En general, la litología de las zonas proximales es similar a la de afloramientos cercanos, no así en zonas distales (Figura 5).

Cuaternario

Depósitos aluviales (Qal)

Corresponden a depósitos no consolidados de ripios, gravas y arenas polimícticas y subangulosas que han sido transportados como flujos gravitacionales, que ocupan laderas de baja pendiente y rellenan quebradas. Se encuentran vastamente distribuidos en distintas quebradas y valles. Se clasifican en depósitos aluviales inactivos (*Qal 1*) y depósitos aluviales activos (*Qal 2*). Los primeros son los sedimentos aluviales volumétricamente más importantes dentro de la zona y constituyen mantos extendidos lateralmente, que forman el relleno de anchas quebradas y valles. Los depósitos activos en cambio rellenan cursos disecados en los depósitos anteriores (Figura 5).

Depósitos fluviales (Qf)

Sobre estos depósitos se encuentra la zona de estudio. Se trata de depósitos no cohesivos a moderadamente consolidados del relleno del valle del río Copiapó, que constituyen parte tanto del lecho actual como de las terrazas adyacentes. Internamente, están formados por ripios de bolones, gravas y arenas bien seleccionadas y estratificación cruzada que forman bancos de base acanalada. Se intercalan niveles de arena y limos bien seleccionados y estratificados. Los clastos más gruesos son polimícticos, presentan formas discoidales y generalmente aparecen imbricados (Figura 5).

3. METODOLOGÍA

En la primera etapa de este trabajo, se elaboró un plan de muestreo que permitió estipular los protocolos técnicos a seguir. Se seleccionaron **grillas de muestreo** y se definieron **técnicas específicas para la recolección de muestras**. A continuación, teniendo ya las muestras en laboratorio, **estas se prepararon** (mediante pulverización, tamizaje, envasado) para los diversos análisis químicos y mineralógicos de interés.

Antes de trabajar con los datos geoquímicos, se realizó un **control de calidad de datos**, que incluyó una modificación sobre los datos con valores bajo el límite de detección y, por otra parte, detección y eliminación de *outliers*.

A continuación, se procedió a cumplir el **primer objetivo específico** de este trabajo, es decir, revelar el origen antropogénico de suelos asociado a obras mineras. Para ello, se analizó la composición geoquímica de las muestras para determinar enriquecimientos de determinados elementos y posibles correlaciones que pudiesen revelar una proveniencia asociada a residuos mineros.

Luego, se procedió a cumplir el **segundo objetivo específico** de este trabajo, es decir, analizar procedencia de material de los relaves aledaños a los suelos. Para ello, se realizó análisis mineralógico y se elaboraron mapas de distribución espacial.

3.1 Grillado y muestreo

3.1.1 Suelos

Se planificó un muestreo regular en dos predios agrícolas dentro de la localidad de Punta del Cobre a partir de dos grillas superpuestas, según distintos espaciamientos. Por un trato de discreción se omiten los nombres de los predios, los cuales serán identificados en adelante como Predio 1 y Predio 2. La primera grilla, de mayor densidad de puntos, constó en celdas de 100 x 100 m y la segunda grilla en celdas de 200 x 200 m (Figura 6); ambas fueron realizadas mediante el software ArcMap 10.3®, con la herramienta *Fishnet*.

En cada punto de muestreo se realizó una descripción del lugar y de la muestra en sí (Anexo A1), para lo cual se registró la siguiente información: ubicación, uso del suelo, geología del lugar, profundidad, horizontes visibles, presencia de orgánicos, entre otros.

Las técnicas utilizadas para el muestreo de suelos, a continuación descritas, fueron extraídas y levemente modificadas –para esta zona en particular– a partir del manual de mapeo geoquímico en topsoils urbanos, de acuerdo a Demetriades & Birke (2015).

Se planificó un muestreo centrado en las celdas, tomando en consideración un radio de seguridad de 10 m a partir de la coordenada central de cada celda en los casos en que el suelo no posee condiciones óptimas para el muestreo. Por ejemplo, se considera que existen condiciones no óptimas si hay mucha presencia de vegetación, basura, insectos, u otra clase de inconveniente.

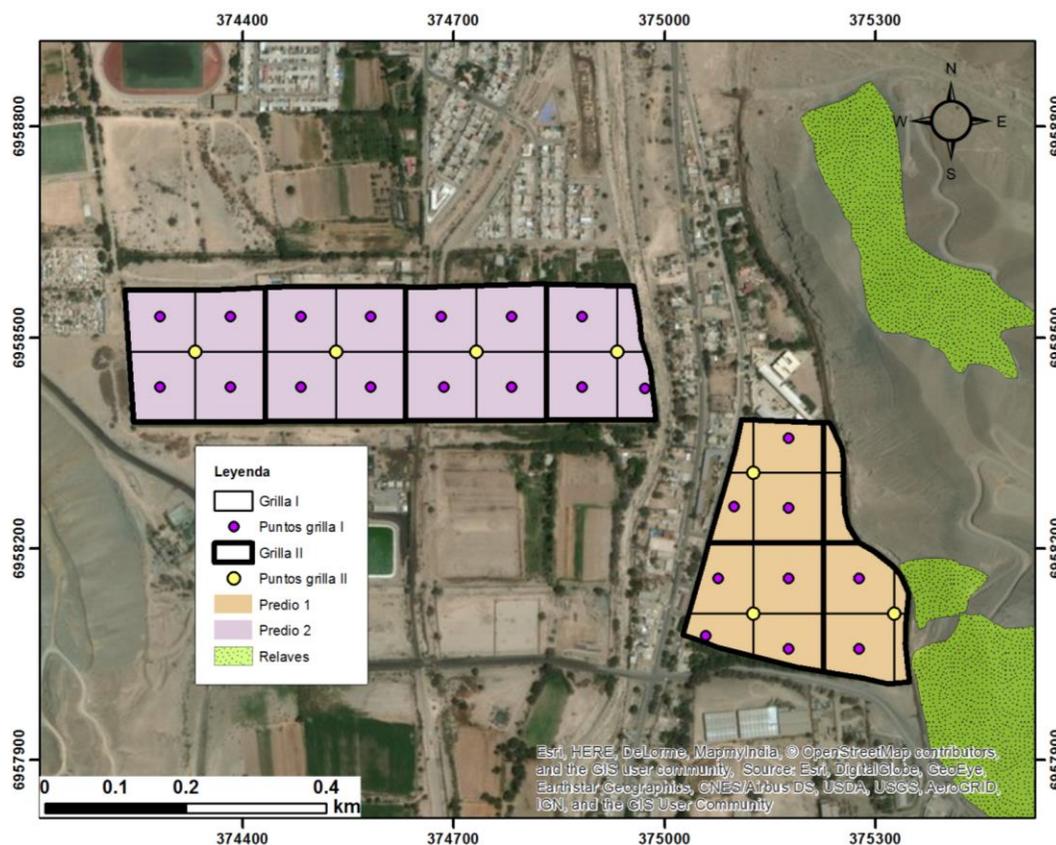


Figura 6. Grillas de muestreo I y II superpuestas con puntos de muestreo centrados en celdas. Sistema de proyección UTM WGS84.

Según los parámetros de la metodología escogida, sujeta a modificaciones, una vez ubicado el punto de muestreo, se traza un cuadrante de 50 x 50 cm al centro de cada celda y sobre él, dos diagonales con centro en el cuadrante; luego, se realiza un segundo cuadrante de 25 x 25 cm, con centro en el punto de intersección de las diagonales (Figura 7).

Para la delimitación de los cuadrantes y el muestreo en sí, se utilizaron las siguientes herramientas: GPS portátil, metro plegable, mapa, brújula, pala metálica grande, pala plástica chica (de polietileno), bolsas plásticas (PVC), amarracables, etiquetas de papel, plumón permanente, martillo, cámara, regla para escala, colador plástico con malla de 2 x 2 mm, toallas de papel y guantes.

Antes de empezar a muestrear, se limpia la superficie (extrayendo raíces o ramas, por ejemplo) y a continuación, se hace un agujero en el cuadrante de 25 x 25 cm a una profundidad de aproximadamente 25 cm con el objetivo de observar el perfil local del suelo. Se ubica la regla en el agujero –a modo de escala– y se fotografía. A continuación, se procede a agrandar el agujero hasta el cuadrante de 50 x 50 cm sistemáticamente (un lado a la vez), hasta una profundidad en el rango de 20–25 cm. Se deben remover clastos grandes, raíces, pedazos de plástico, vidrio y cualquier material similar.

Hecho esto, se procede a extraer el suelo de distintos puntos del área comprendida en el cuadrante de 50 x 50 cm (con el fin de homogenizar la muestra obtenida). Las muestras se extraen con pala de plástico y se pasan a través de un colador hacia las bolsas plásticas (el colador actúa como tamiz para descartar clastos rocosos). La bolsa se debe llenar hasta completar

cerca de 1 kg de muestra. Las bolsas se encuentran previamente etiquetadas con plumón permanente y con una etiqueta de papel. Para cerrar las bolsas se utilizaron amarracables (aunque también se puede utilizar cinta adhesiva), siendo nuevamente envueltas por una segunda bolsa, que también posee etiqueta.

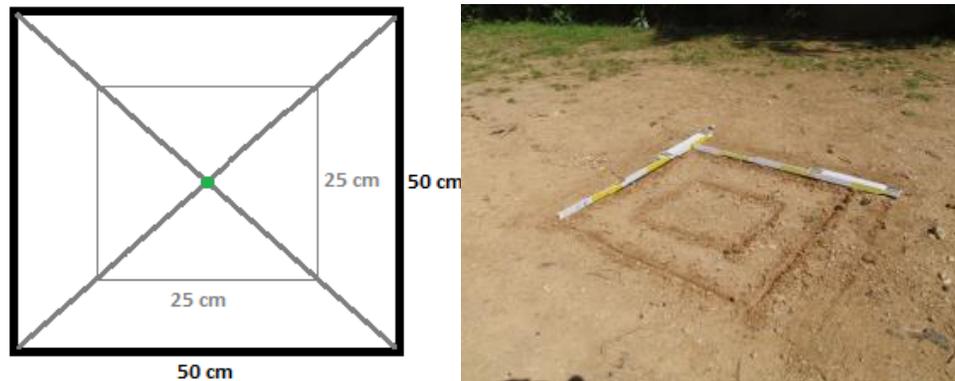


Figura 7. Cuadrantes utilizados para muestreo. A la izquierda: esquema en planta del suelo; a la derecha: fotografía de un muestreo que utiliza esta metodología (según Demetriades & Birke, 2015).

Se fotografía el entorno del punto de muestreo en cuatro direcciones: norte, sur, este, oeste; y además se marca en el mapa el punto muestreado, para tener respaldo en caso de que fallase el GPS. Se limpia el colador y pala antes de cada nuevo muestreo, para evitar contaminación cruzada.

En terreno se siguió el grillado original para algunas muestras, pero se concretó un muestreo dirigido para otras en función de criterios geológicos y logísticos. Finalmente, se tomaron 16 muestras de suelo más una muestra duplicada (tomada en el mismo lugar de muestreo de uno de los puntos).

3.1.2 Residuos mineros

El muestreo de los residuos no fue planificado, dado que vía imagen satelital no se tenía claridad de qué sectores iba a ser posible muestrear. Los residuos se identificaron presuntamente como tranques de relaves, pero una importante cubierta de grava impedía tener claridad al respecto (Figura 8a). Estando en terreno, algunas partes descubiertas (Figura 8b) permitieron corroborar que el depósito ubicado en el extremo sur del cuadrante consiste en un relave, puesto que consta de laminación paralela, con granulometría limo–arcillosa, de colores grises oscuro y alta abundancia aparente de cristales metálicos finos (Figura 8c). Para muestrear se hizo un agujero de 20 cm aproximadamente, en sentido horizontal –tipo madriguera– y luego se tomó una muestra de aproximadamente 1 kg, para evitar muestrear material superficial ajeno al relave (Figura 8d). El agujero y la toma de muestra fueron realizados con pala de plástico.

El mismo procedimiento se repitió en un punto más basal del relave, sumando de este modo dos muestras.

En el borde suroriental del Predio 1, se identificó un lóbulo aluvial con material muy similar al de los relaves (Figura 9). Este lóbulo se extiende por pocos metros en el margen sur del predio. Se muestreó de manera similar a las dos muestras de relave.



Figura 8. a) Cubierta de grava sobre uno de los relaves aledaños a predios agrícolas; b) observación de afloramiento buscando sitio para toma de muestras; c) aspecto del material encontrado en afloramientos: limo-arcilloso y con cristales pequeños de brillo metálico; d) fotografía de un punto de muestreo (muestra R02).

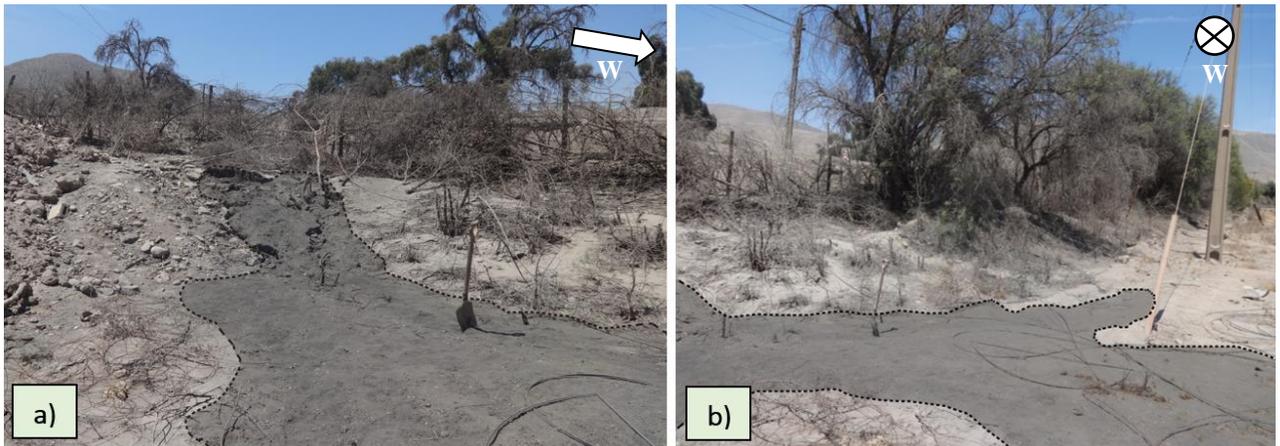


Figura 9. Lóbulo aluvial oscuro identificado dentro del Predio 1. Se remarcó gris en imagen para mejor visualización.

De esta forma, se tomaron un total de 20 muestras (Figura 10), las cuales fueron preparadas posteriormente para distintos análisis.

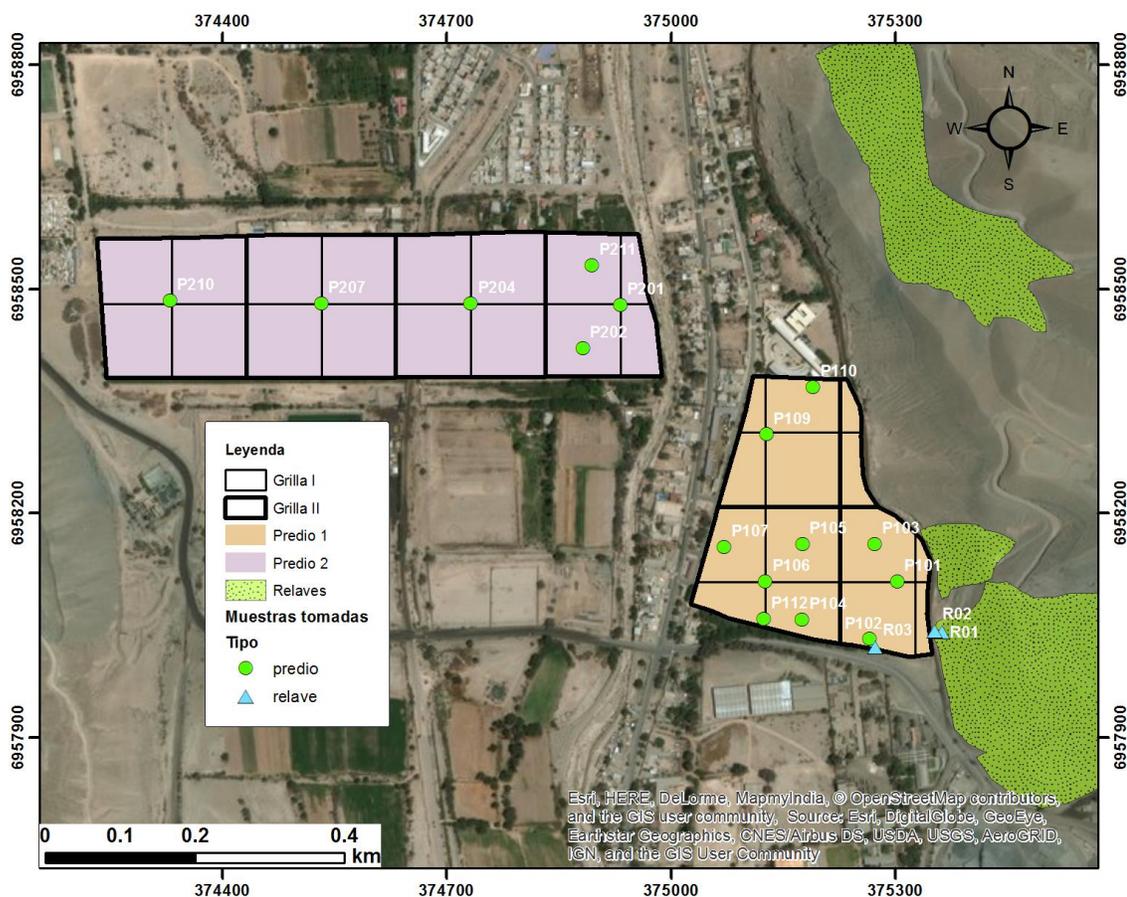


Figura 10. Muestreo realizado en predios agrícolas y relaves mineros. Sistema de proyección UTM WGS84.

3.2 Preparación de muestras para análisis

Una vez obtenidas todas las muestras, estas fueron llevadas al laboratorio de sedimentología del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Algunas fueron dispuestas a secar al sol en bandejas de vidrio (previamente limpiadas con agua destilada) y luego, fracciones de entre 5 y 10 g de muestra, fueron pulverizadas manualmente en un mortero de ágata y dispuestas en frascos de polipropileno. Se prepararon 3 frascos por muestra: 1 para XRD, 1 para ICP-MS y 1 para briquetas (esta última sin pulverizar).

A pesar de que las muestras poseían fracciones de materia no mineral (restos de raíces finas, plástico u otros), estas no fueron sometidas a tamización más fina de manera previa a la pulverización, dado que gran parte del material que compone estos suelos consta de pequeños terrones de tierra arcillosos, que al ser descartados por tamaño podrían –eventualmente– significar una pérdida importante de información geoquímica.

3.3 Control de calidad de datos

Antes de proceder a analizar los datos geoquímicos, se realizó un control de calidad de los mismos: límite de detección, identificación de *outliers* y validación de datos de terreno. Los datos geoquímicos corresponden a 38 elementos químicos (Tabla 1).

Tabla 1. Datos de elementos químicos obtenidos mediante ICP-MS

Elementos traza medidos	Al, Ag, As, Au, B, Ba, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, Hg, K, La, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, Sb, Sc, Se, Sr, Te, Th, Ti, Tl, U, V, W, Zn
--------------------------------	---

3.3.1 Límite de detección

Se utilizaron 0,5 g de suelo por punto de muestreo para digestión ácida con agua regia en laboratorios ACME de Bureau Veritas, con un equipo ICP-MS.

Antes de analizar los datos geoquímicos se hizo un reemplazo de datos para los elementos con valores bajo el límite de detección (LD). Dichos valores fueron reemplazados por la mitad del LD (Reimann *et al.*, 2008). Por ejemplo, si el límite de detección es igual a 1 ppm, para aquellos puntos con concentraciones <LD, el valor a utilizar en dichos puntos se reemplaza por 0,5 ppm. En este caso, solo el B presentó datos <LD. Dado que el LD del B son 20 ppm, 14 valores fueron reemplazados por 10 ppm.

3.3.2 Test de outliers

Un *outlier* corresponde a un dato anómalo, es decir, un dato que parece inconsistente con el resto de los valores de la muestra. Se detecta considerando que las muestras tienen una distribución Gaussiana, por lo cual, antes de proceder a hacer un test de outliers, se realizó un análisis de distribución estadística sobre cada variable mediante la herramienta *Real Statistics* de Excel®. La herramienta utiliza el test Shapiro Wilk de normalidad (test de normalidad mayormente utilizado y confiable) y QQ-plot, gráfica que compara la distribución de probabilidad de una población de la que se ha extraído una muestra aleatoria y una distribución usada para la comparación, en este caso, distribución normal (Reimann *et al.*, 2008).

Aquellas variables con distribución normal, se les efectuó el test de outliers de Grubbs, mediante la herramienta *Real Statistics* de Excel®. Dada una muestra de tamaño n , media experimental \bar{X} y varianza experimental s^2 , se define el parámetro G como:

$$G = \frac{\max(|X - \bar{X}|)}{s} \quad (1)$$

Este parámetro se compara con un valor crítico, que depende del tamaño de la muestra y del riesgo asumido. La hipótesis nula H_0 de no tener *outlier* se rechaza si:

$$G > \frac{n-1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{t_{n-2, \alpha/2n}^2}{n-2 + t_{n-2, \alpha/2n}^2}} \quad (2)$$

Siendo $t_{n, \alpha}$ el valor de la distribución de *Student* con n grados de libertad, que corresponde a una probabilidad acumulada $1-\alpha$ (Emery, 2015a).

Una vez detectados los outliers, se necesita utilizar un criterio extra-estadístico para decidir si eliminar o no el valor anómalo. Lo conservador es que no se debe eliminar sin antes

analizar si corresponde a un error instrumental, error de transcripción de datos u otro tipo de error (Emery, 2015a). Si el objetivo es caracterizar geoquímicamente una zona, también se pueden destacar datos correspondientes a contaminaciones locales, pero como en este estudio puede ser interesante encontrar anomalías relacionadas con contaminación, no se considera un factor de decisión, se consideran datos útiles.

Tras analizar los datos y hacer una conversión log-normal, se encontraron dos *outliers* para el Au. Sin embargo, se decide no eliminar estos datos, debido a que, si bien ambos son valores muy altos con respecto a los demás valores encontrados en otros puntos de muestreo, se encuentran dentro de rangos razonables de concentración y precisamente pertenecen a dos muestras de relave: R01 y R03, en los cuales es esperable encontrar una elevada concentración de metales.

3.3.3 Validación de datos de terreno

Usualmente se utiliza un coeficiente de variación para determinar la diferencia entre distintos análisis realizados en un mismo punto. En el caso de tratarse de solo dos muestras, se utiliza un índice llamado diferencia porcentual relativa o RPD (EPA, 2015), por sus siglas en inglés; que en realidad es una medida de precisión. Se calcula de la siguiente manera:

$$RPD = \frac{|x_1 - x_2|}{\left(\frac{x_1 + x_2}{2}\right)} \cdot 100\% \quad (3)$$

En que x_1 corresponde a un dato de la muestra original y x_2 corresponde al dato equivalente de la muestra duplicada. Este cálculo efectuado para cada uno de los datos geoquímicos arrojó una diferencia porcentual promedio de 10,5%, habiendo solo 2 diferencias porcentuales realmente elevadas (RPD=40%), por lo cual se considera que los datos son confiables.

3.4 Análisis de procedencia antropogénica

Para obtener la composición geoquímica de las muestras, estas fueron enviadas a los laboratorios de Bureau Veritas (Canadá) para ser analizadas mediante ICP-MS (espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente), técnica que detecta casi todos los elementos de la tabla periódica hasta concentraciones $<10 \text{ pg ml}^{-1}$ (Rollinson, 2014).

3.4.1 Factor de enriquecimiento

El Factor de Enriquecimiento (FE) es un índice que ayuda a determinar si las muestras de suelo se encuentran enriquecidas en determinado elemento químico, por sobre los valores esperados. Si ello ocurre, se puede inferir que existen aportes antropogénicos a la composición del suelo en estudio. Se basa en la estandarización de los elementos estudiados en relación a un elemento de referencia.

Este factor se ha utilizado aproximadamente desde la década de 1970 en estudios de contaminación atmosférica (Buat–Menard & Chesselet, 1979). Años después, este factor ha sido utilizado para calcular contaminación en aguas marinas y continentales, sedimentos y, finalmente, suelos.

Se calcula mediante la siguiente fórmula (adaptado a partir de Buat–Menard & Chesselet, 1979):

$$FE = \frac{\left(\frac{[X]}{[R]}\right)_{muestra}}{\left(\frac{[X]}{[R]}\right)_{corteza}} \quad (4)$$

En que [X] representa la concentración del elemento a evaluar y [R] la concentración de un elemento escogido como referencia (elementos “conservativos”, dada su estabilidad en procesos ambientales). Lo que se realiza es una normalización entre las concentraciones presentes en la muestra y las concentraciones presentes en la corteza continental. Con frecuencia, para sedimentos y suelos se utilizan como elementos conservativos Fe y Al, pero se pueden utilizar otros, tales como Ti, V, Th o Si (Loska et al., 1997; Nolting *et al.*, 1999; Manta *et al.*, 2002; Abraham & Parker, 2008; Bhuiyan *et al.*, 2010). En general, se escogen elementos sobre los cuales se tenga claro un origen geogénico, existan de manera escasa en el medio a analizar (Reimann & de Caritat, 1998; Sutherland, 2000) y que tengan valores similares a los del sistema background escogido. Los valores de FE que se obtienen se analizan básicamente bajo dos parámetros:

1) Tipo de proveniencia, según Nolting *et al.* (1999). Se clasifica según proveniencia geogénica y/o antropogénica (Tabla 2).

Tabla 2. Categorización de proveniencia geogénica y/o antropogénica de muestras

FE > 10	Origen antropogénico
1 ≤ FE ≤ 10	Origen geogénico o antropogénico
FE < 1	Origen geogénico

2) Niveles de enriquecimiento (asociado a contaminación) que establece Sutherland (2000), según lo cual:

- FE < 2 enriquecimiento **muy escaso o nulo**.
- 2 ≤ FE ≤ 5 refleja un enriquecimiento **moderado**.
- 5 ≤ FE ≤ 20 implica un enriquecimiento **significativo**.
- 20 ≤ FE ≤ 40 el enriquecimiento **es muy elevado**.
- FE > 40 el enriquecimiento es **extremadamente elevado**.

3.4.2 Correlación múltiple

La correlación indica el grado de proporcionalidad y tipo de relación lineal entre dos variables estadísticas. Esta se mide a través de distintos coeficientes de correlación, siendo el más ampliamente utilizado el coeficiente de correlación de Pearson. Este coeficiente es una medida de la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas, que se obtiene dividiendo la covarianza de dos variables entre el producto de sus desviaciones estándar.

$$\rho_{X,Y} = \frac{cov(X,Y)}{\sigma_X\sigma_Y} \quad (5)$$

El coeficiente de correlación de Pearson es sensible a la presencia de *outliers*, como así también a la presencia de relaciones no lineales entre las variables evaluadas.

3.4.3 Análisis multivariable

Se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) sobre los datos, el cual transforma el conjunto de variables originales en otro grupo con un número menor de variables sintéticas no correlacionadas, las cuales reciben el nombre de componentes principales. Si la base de datos consta de variables altamente dependientes entre ellas, es frecuente que un pequeño número de las nuevas variables explique la mayor parte de la variabilidad original de la base de datos (Filzmoser *et al.*, 2003). Los componentes obtenidos con ACP fueron rotados mediante el método de rotación Varimax (Kaiser, 1958), mediante el software IBM SPSS Statistics 22®. De esta forma, se realizó otro análisis multivariable, conocido como Análisis Factorial (AF). Esto fue hecho ya que la interpretabilidad de ACP es a menudo compleja debido a que los componentes están determinados por un criterio de máxima varianza. Entonces, una solución para mejorar la interpretabilidad es rotar algunos de los componentes principales, tal de que las variables se reduzcan a un componente (Reimann *et al.*, 2002).

El análisis factorial tiene por objetivo reducir la dimensionalidad de un set de datos. Los datos son descompuestos según puntajes y factores de carga. A diferencia de ACP, para el cálculo de análisis factorial se definen la cantidad de factores a utilizar, es decir, a cuántos subconjuntos de datos se quiere reducir la información. El AF está basado en la estructura de correlación de las variables, de una manera en que los factores no explican la variación total de los datos. Esto implica que pueden existir algunos factores únicos, que poseen un desarrollo completamente diferente al resto de factores (Reimann *et al.*, 2002). El análisis factorial es ideal para encontrar estructuras comunes, de este modo, el análisis de factores es geoquímicamente útil ya que permite detectar procesos comunes determinados por el comportamiento de los elementos.

Lo que se busca con el AF es poder identificar a través de las asociaciones geoquímicas las fuentes de las cuales proceden aquellos elementos. Para ello, se consideran aquellos elementos que tienen un factor de carga (*loading factor*) entre |0,| y |1| para cada factor en particular, además también se consideran asociaciones secundarias de elementos que tienen un factor de carga entre |0,3| y |0,5|. Es normal que algunos elementos se repitan en diversos factores, así como también es posible que se presente más de una asociación geoquímica por factor debido a lo complejo que puede ser la señal química, la cual depende de la múltiple cantidad de fuentes existentes.

3.5 Análisis de procedencia por parte de relaves aledaños

3.5.1 Abundancias comparadas

Para inferir si los relaves aledaños a los suelos han aportado material, se realizó un análisis de descarte simple, consistente en contrastar las concentraciones absolutas de los

elementos químicos en los relaves y en los suelos. Estos se compararon mediante gráficos de barras con datos agrupados, para cada uno de los elementos químicos medidos.

3.5.2 Distribución espacial

Para analizar la distribución espacial se utilizó el estimador de distancia inversa ponderada (IDW, por sus siglas en inglés). Dicha interpolación se realizó mediante el software ArcGIS v. 10.3®. IDW asigna a cada dato una ponderación inversamente proporcional a (una potencia de) su distancia al sitio a estimar (Figura 11).

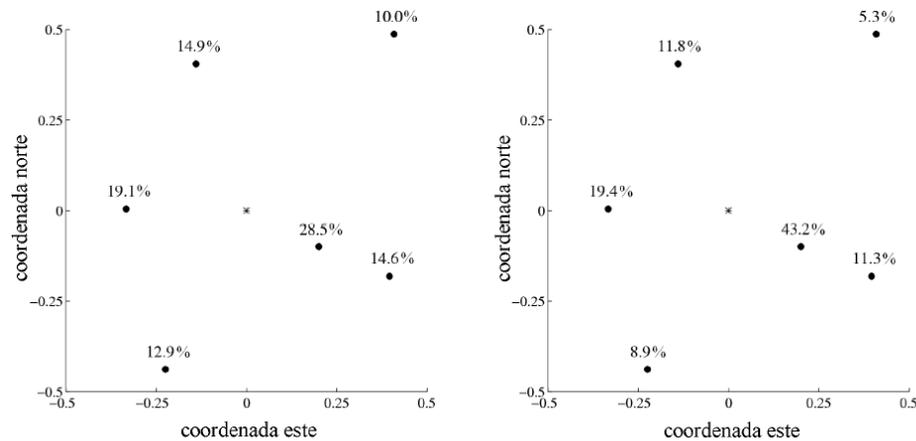


Figura 11. Ponderación obtenida con la interpolación por inverso de la distancia (izquierda) e inverso del cuadrado de la distancia (derecha). Imagen tomada de Emery (2015b).

Si la potencia es baja (cercana a cero), la distancia elevada a esta potencia es cercana a 1, por lo que el estimador asigna la misma ponderación a todos los datos (media aritmética de los datos). Al contrario, si la potencia es muy alta, el inverso de la distancia más pequeña se vuelve preponderante sobre todos los otros términos, y el estimador se convierte en el del más cercano vecino (Emery, 2015b).

También se han elaborado mapas de simbología gradual según rangos de concentración, tal de contrastar con la interpolación espacial y determinar cuál de las dos herramientas es más convenientes en este tipo de estudio.

3.5.3 Análisis mineralógico

En primera instancia, se realizó una observación con ayuda de una lupa binocular (estereomicroscopio *Optika*) de hasta 40x de aumento. La utilidad de este tipo de lupa es que entrega una visión estereoscópica, es decir, con relieve; y, dados los rangos de aumento y distancia que admite, es posible visualizar granos minerales más grandes que un microscopio petrográfico. Así mismo, se utilizó un imán y ácido clorhídrico diluido para identificar la presencia de minerales magnéticos y carbonatados.

Tras obtener una primera aproximación a la mineralogía presente en las muestras, se procedió a describir cortes transparentes y cortes pulidos mediante un microscopio petrográfico (cortes pulidos solo sobre algunas muestras, aquellas en que se identificó mayor presencia de minerales opacos mediante luz transmitida).

Finalmente, las muestras fueron sometidas a un análisis de difracción de rayos X (XRD) en el laboratorio de cristalografía y rayos X del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Se utilizó un difractómetro Siemens modelo *D5000* para polvo cristalino de geometría Bragg–brentano. Esta herramienta permite determinar cuantitativamente las fases cristalinas presentes en materiales tanto naturales como sintéticos. De este modo, mediante el análisis de difractogramas en el software X’Pert HighScore Plus® y en el software Match! 3® se identificó la presencia de los minerales presentes en mayor cantidad en las muestras. Se ocupó la biblioteca de datos PDF–2 (*Powder Diffraction File 2*) y COD (Crystallography Open Database), respectivamente para cada software.

4. RESULTADOS

El detalle de los datos geoquímicos obtenidos mediante ICP–MS se encuentra en la Anexo A2, mientras que en la Tabla 3 se encuentran las estadísticas básicas para cada variable medida.

Tabla 3. Estadísticas básicas para datos geoquímicos obtenidos

Elemento	N	Mín.	Máx.	Media	Mediana (50%)	Rango	$\sigma_{muestral}$	P ₁₀ (10%)	Q ₁ (25%)	Q ₃ (75%)	P ₉₀ (90%)
Mo (ppm)	19	1,42	13,6	3,5	1,87	12,18	3,45	1,5	1,74	3,77	9,36
Cu (ppm)	19	186,6	5658,3	1243,5	676,04	5471,6	1550,3	286,93	447,3	895,75	4724,5
Pb (ppm)	19	30,86	114,47	77,9	81,98	83,61	26,07	32,49	61,44	103,4	109,31
Zn (ppm)	19	99,2	226,8	168,2	166,9	127,6	32,81	125	146,2	189,4	213,8
Ag (ppb)	19	391	6380	2963,7	2772	5989	1655,3	398	1760	4262	5204
Ni (ppm)	19	17,4	120,2	32,0	23,7	102,8	23,17	18	22,3	29,5	47,1
Co (ppm)	19	13,2	197,5	33,5	17,3	184,3	44,57	14,1	15,1	21,1	87,2
Mn (ppm)	19	633	1804	945,2	941	1171	260,70	688	768	1005	1214
Fe (%)	19	2,98	15,7	4,9	3,34	12,72	3,80	3,02	3,16	3,71	12,55
As (ppm)	19	21,7	163,2	73,1	67,5	141,5	38,74	23,7	48,8	92,2	159,8
U (ppm)	19	0,5	2,4	1,7	1,9	1,9	0,52	0,8	1,3	2	2,2
Au (ppb)	19	8,1	1881,7	154,7	33,5	1873,6	424,19	8,9	21,2	99,3	318,4
Th (ppm)	19	0,9	8,9	3,7	3,7	8	1,63	1,4	3,3	4,2	5,1
Sr (ppm)	19	17,4	238,6	168,7	198,7	221,2	72,62	29,9	133,5	227,7	232
Cd (ppm)	19	0,4	1,14	0,7	0,74	0,74	0,19	0,44	0,62	0,86	0,98
Sb (ppm)	19	0,66	8,44	2,8	1,7	7,78	2,41	0,69	1,06	4,63	6,94
Bi (ppm)	19	0,53	5,77	2,1	1,91	5,24	1,26	0,77	1,17	2,64	3,98
V (ppm)	19	62	90	73,9	72	28	8,46	64	67	82	89
Ca (%)	19	2,09	5,15	4,0	4,25	3,06	0,84	2,88	3,31	4,73	4,86
P (%)	19	0,098	0,187	0,1	0,117	0,089	0,02	0,098	0,102	0,128	0,147
La (ppm)	19	10,7	26,2	16,2	15,9	15,5	3,10	13,2	14,6	17,2	19,2
Cr (ppm)	19	14,2	26,6	22,1	23,4	12,4	3,73	14,8	20,9	24,6	26,6
Mg (%)	19	0,93	1,47	1,2	1,21	0,54	0,15	0,95	1,09	1,3	1,46
Ba (ppm)	19	26,8	252,5	174,9	191	225,7	61,08	76,4	130,5	215,3	242,5
Ti (%)	19	0,029	0,113	0,1	0,097	0,084	0,03	0,037	0,083	0,104	0,111
B (ppm)	19	10	47	14,1	10	37	9,41	10	10	10	24
Al (%)	19	1,39	2,34	1,8	1,82	0,95	0,29	1,4	1,62	1,95	2,31
Na (%)	19	0,009	0,273	0,1	0,115	0,264	0,06	0,023	0,082	0,139	0,184
K (%)	19	0,08	0,35	0,2	0,23	0,27	0,08	0,09	0,17	0,27	0,32
W (ppm)	19	0,1	16,3	1,7	0,2	16,2	4,04	0,1	0,2	0,4	7,9
Sc (ppm)	19	4,5	7	5,7	5,6	2,5	0,71	4,6	5,4	6,1	6,8
Tl (ppm)	19	0,09	0,86	0,2	0,14	0,77	0,17	0,1	0,11	0,19	0,34
S (%)	19	0,1	4,5	0,6	0,22	4,4	1,05	0,11	0,15	0,34	1,65
Hg (ppb)	19	337	8570	3090,6	2749	8233	2514,6	576	746	5480	6848
Se (ppm)	19	0,2	4	0,8	0,6	3,8	0,84	0,3	0,5	0,7	1,5
Te (ppm)	19	0,07	1,02	0,2	0,16	0,95	0,24	0,07	0,08	0,27	0,51
Ga (ppm)	19	4,9	15,9	7,6	6,1	11	3,48	5,1	5,8	7,3	15,1
K (ppm)	19	800	3500	2205,3	2300	2700	754,6	900	1700	2700	3200
P (ppm)	19	980	1870	1192,1	1170	890	215,6	980	1020	1280	1470
Ti (ppm)	19	290	1130	866,3	970	840	253,3	370	830	1040	1110

A continuación, se indican los resultados obtenidos para cada metodología correspondientes a los respectivos objetivos específicos.

4.1 Análisis de procedencia antropogénica

4.1.1 Factor de enriquecimiento

Dado que la zona de estudio se ubica dentro de la Franja Ferrífera de Chile, no se puede escoger el Fe como un elemento de referencia, puesto que está fuertemente ligado a la mineralización de cobre y, por ende, posiblemente a los relaves. Por otra parte, si bien el Al no se ve involucrado en los procesos ambientales en estudio, está presente en muy bajas cantidades en las muestras con respecto a los valores de referencia para la corteza continental, por lo cual entrega valores de FE muy elevados para todos los elementos, lo cual dificulta la interpretación.

Se utilizó como trazador el V, ya que es un elemento abundante en la corteza terrestre, que tiene un marcado origen geogénico y un papel muy limitado en el metabolismo de las plantas (Oroz, 2011). Esto último es importante dado que los suelos pertenecen a predios agrícolas. El Ti también cumple con estas características, pero al igual que el Al, está presente en cantidades muy bajas en los suelos respecto a la corteza continental. Sin embargo, se estableció una comparativa de los FE obtenidos tanto con V como con Ti, y se aprecia que existe una buena correlación entre los dos (Figura 12), lo cual respalda el origen geogénico de estos elementos y que es adecuado pensarlos como elementos de referencia.

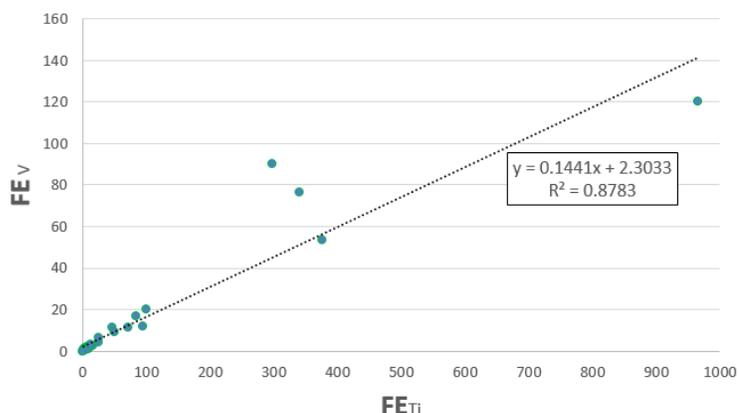


Figura 12. Correlación entre el FE obtenido utilizando el V como elemento de referencia y FE relativo al Ti. Se utilizaron valores promedio de FE para cada elemento.

Los elementos que en promedio poseen un FE mayor a 10 son: Hg, Ag, Au, Cu, Bi, As y Cd (Figura 13). Por ende, la presencia de estos elementos tendría un origen antropogénico. Mientras que elementos tales como Pb, Fe, Mo, Mn, Co podrían tener un origen antropogénico o geogénico (Tabla 4)

Tabla 4. Categorización de rangos de FE. Valores $FE > 10$ implican un origen antropogénico; valores $1 \leq FE \leq 10$ implican un origen que puede ser antropogénico o geogénico; valores $FE < 1$ implican un origen geogénico

FE > 10	Ag, As, Au, Bi, Cd, Cu, Hg
1 ≤ FE ≤ 10	B, Ca, Co, Mg, Mn, Mo, Fe, P, Pb, S, Sb, Se, Zn
FE < 1	Al, Ba, Cr, Ga, Na, La, Ni, Sc, Sr, Th, Ti, Tl, U, K, W

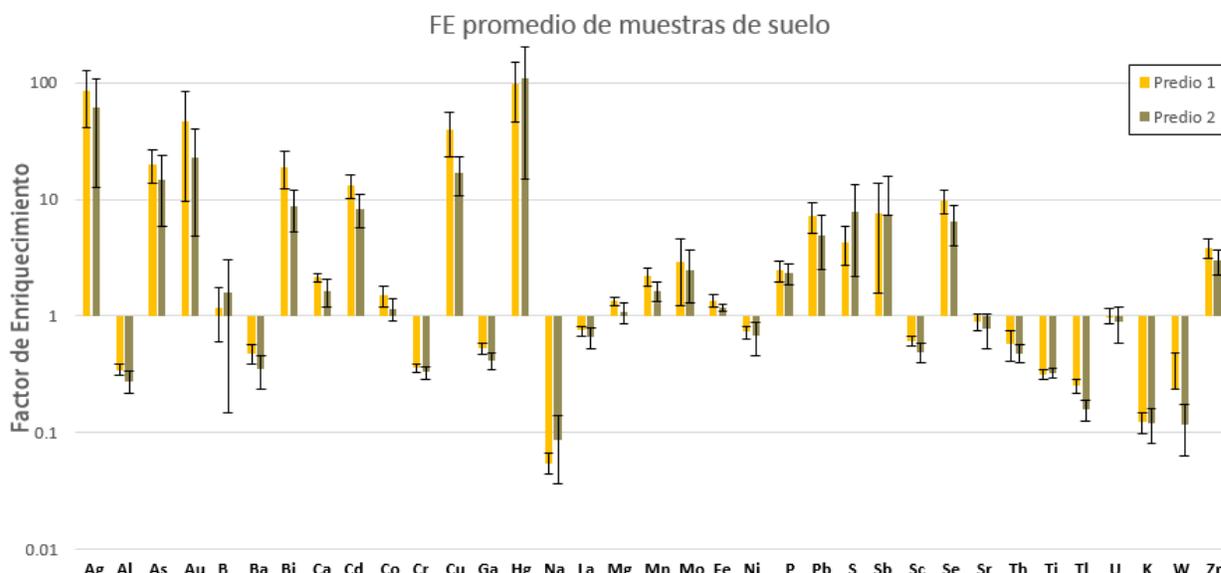


Figura 13. Resultados de FE promedio por predio utilizando V como elemento de referencia. Barras de error corresponden a desviación muestral.

Por otra parte, los elementos que poseen $FE > 20$ y $FE < 40$, *i.e.*, que poseen un **enriquecimiento muy elevado** en algunos puntos de muestreo son: Ag, As, Au, Bi, Cu, Hg y Sb; mientras que los elementos que poseen $FE > 40$, es decir, un **enriquecimiento extremadamente elevado** en algunos puntos de muestreo, son: Ag, Au, Cu y Hg (Figura 14).

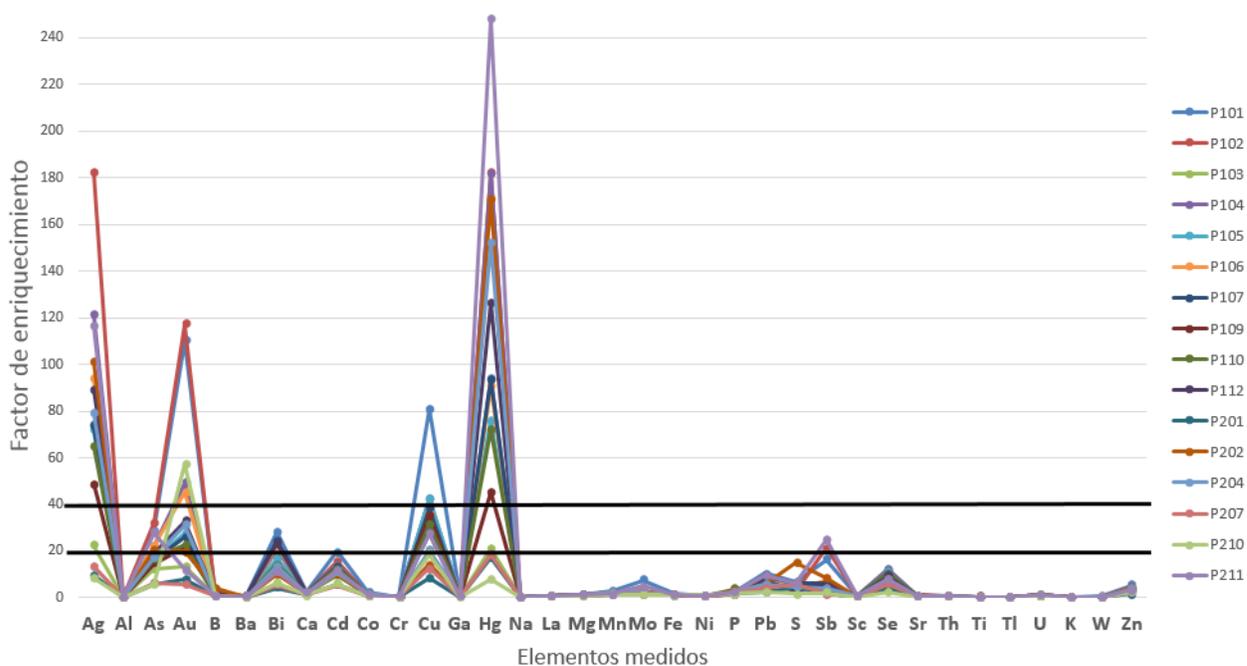


Figura 14. FE por punto de muestreo para cada uno de los elementos medidos. Líneas negras rectas indican los niveles $FE=20$ y $FE=40$. Cuando $20 \leq FE \leq 40$ se habla de un enriquecimiento muy alto del elemento y cuando $FE > 40$ se habla de un enriquecimiento extremadamente alto, de acuerdo a la categorización de Sutherland (2000).

4.1.2 Correlación múltiple

Se realizó una matriz de correlación con los datos geoquímicos utilizando el coeficiente de correlación de Pearson (Figura 15). Se considera que dos variables presentan correlación

cuando el coeficiente obtenido es $>0,5$ o $<-0,5$. De este modo, se analizaron los resultados según pares de variables correlacionadas, distinguiéndolas según su nivel de correlación (Tabla 5).

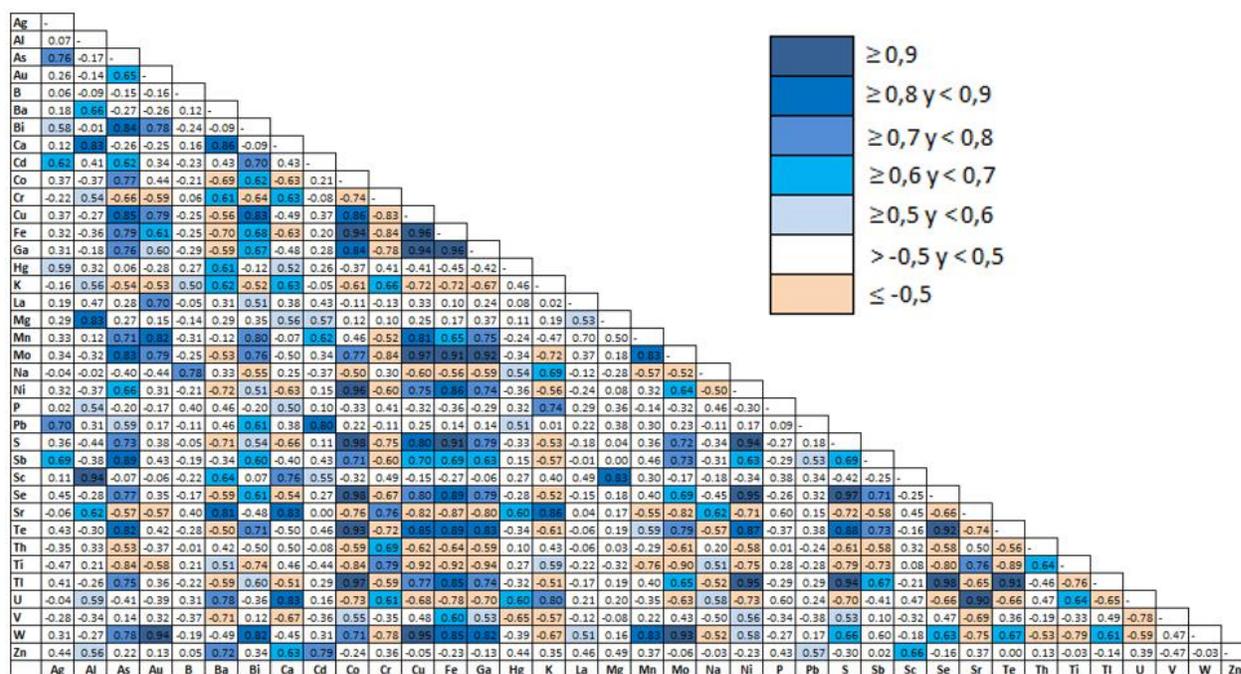


Figura 15. Matriz de correlación de datos geoquímicos

Tabla 5. Pares de elementos químicos correlacionados

Coefficiente de correlación	Elementos Correlacionados
Entre 0,9 y 1	Co-Tl, Co-Te, Co-Se, Co-S, Co-Ni, Co-Fe, Cu-W, Cu-Mo, Cu-Ga, Cu-Fe, Fe-Mo, Fe-S, Ga-Fe, Ga-Mo, Mo-W, Ni-Tl, Ni-Se, Ni-S, S-Tl, S-Se, Se-Tl, Se-Te-, Sr-U, Te-Tl
Entre 0,8 y 0,9	Ca-Al, Mg-Al, As-Te, As-Sb, Fe-W, Fe-Tl, Fe-Te, As-Mo, As-Cu, As-Bi, Au-Mn, Fe-Se, Fe-Ni, Ga-W, Ba-Sr, Ba-Ca, Bi-W, Bi-Mn, Ga-Te, K-Sr, Mg-Sc, Bi-Cu, Ca-U, Ca-Sr, Mn-W, Mn-Mo, Cd-Pb, Co-Ga, Co-Cu, Ni-Te, s-Te, Cu-Te, Cu-S, Cu-Mn, K-U
Entre 0,7 y 0,8	Ag-Pb, As-Ag, As-W, As-Tl, As-Se, Cr-Ti, Cr-Sr, As-S, As-Mn, As-Ga, As-Fe, As-Co, Cu-Tl, Cu-Se, Cu-Ni, Au-Mo, Au-La, Au-Cu, Au-Bi, b-Na, Ba-Zn, Ba-U, Bi-Te, Bi-Mo, Bi-Cd, Ga-Tl, Ga-Se, Ga-S, Ga-Ni, Ga-Mn, Ca-Sc, Mo-Te, Mo-Sb, Mo-S, Sb-Te, Sb-Se, Sr-Ti, Cd-Zn, Co-W, Co-Sb, Co-Mo
Entre 0,6 y 0,7	Ag-Sb, Ag-Cd, Al-Sr, Al-Ba, As-Ni, As-Cd, As-Au, Au-Fe, Ba-Sc, Ba-K, Ba-Hg, Ba-Cr, Bi-Se, Bi-Sb, Bi-Pb, Bi-Ga, Bi-Fe, Bi-Co, Ca-Zn, Ca-K, Ca-Cr, Cu-Sb, Cd-Mn, Cr-U, Cr-Th, Cr-K, Cu-Sb, Fe-V, Fe-Sb, Fe-Mn, Ga-Sb, Hg-U, Hg-Sr, K-Na, Mo-Tl, Mo-Se, Mo-Ni, Na-Sr, Ni-Sb, S-W, S-Sb, Sb-Zn, Se-W, Te-W, Th-Ti, Ti-U, Tl-W
Entre 0,5 y 0,6	Ag-Bi, Al-Zn, Al-P, Al-K, Al-Cr, As-Pb, b-K, Ba-Ti, Bi-S, Bi-Ni, Bi-La, Ca-P, Ca-Mg, Ca-Hg, Cd-Sc, Cd-Mg, Co-V, Ga-V, Hg-Pb, Hg-Na, La-W, La-Mg, Mn-Te, Na-U, Na-Ti, Ni-W, Ni-V, Pb-Zn, Pb-Sb, S-V
Entre -1 y -0,5	As-Ti, As-Th, As-Sr, As-K, As-Cr, Au-Ti, Au-Sr, Au-K, Au-Cr, Ba-V, Ba-Tl, Ba-Te, Ba-Se, Ba-S, Ba-Ni, Ba-Mo, Ba-Ga, Ba-Fe, Ba-Cu, Ba-Co, Bi-Ti, Bi-Na, Bi-K, Bi-Cr, Ca-V, Ca-Tl, Ca-Se, Ca-Se, Ca-S, Ca-Ni, Ca-Fe, Ca-Co, Co-U, Co-Ti, Co-Th, Co-Sr, Co-Na, Co-K, Co-Cr, Cr-W, Cr-Tl, Cr-Te, Cr-Se, Cr-Sb, Cr-S, Cr-Ni, Cr-Mo, Cr-Mn, Cr-Ga, Cr-Fe, Cr-Cu, Cu-U, Cu-Ti, Cu-Th, Cu-Sr, Cu-Na, Cu-K, Fe-U, Fe-Ti, Fe-Th, Fe-Sr, Fe-Na, Fe-K, Ga-U, Ga-Ti, Ga-Th, Ga-Sr, Ga-Na, Ga-K, Hg-V, K-W, K-V, K-Tl, K-Te, K-Sb, K-S, K-Ni, K-Mo, Mn-Ti, Mn-Sr, Mn-Na, Mo-U, Mo-Ti, Mo-Th, Mo-Sr, Mo-Na, Na-W, Na-Tl, Na-Te, Na-Ni, Ni-U, Ni-Ti, Ni-Th, Ni-Sr, S-U, S-Ti, S-Th, S-Sr, Sb-Ti, Sb-Th, Sb-Sr, Se-U, Se-Ti, Se-Th, S-Sr, Sr-W, Sr-V, Sr-Tl, Sr-Te, Te-U, Te-Th, Te-Tl, Th-W, Ti-W, Ti-Tl, Tl-U, U-V, U-W

4.1.3 Análisis Factorial

A partir de la generación de 37 componentes, equivalente a la cantidad de variables geoquímicas, se seleccionaron 5 de ellos para ser rotados mediante el método Varimax (Tabla 6).

Tabla 6. Matriz de componentes rotada. Se destacan en gris variables con factores de carga >0,5.

	Componentes				
	1	2	3	4	5
% de varianza	48,6%	16,5%	13,9%	7%	5%
Ag	0,300	0,868	0,194	0,204	-0,002
Al	-0,279	0,169	0,925	0,077	0,063
As	0,616	0,742	0,086	0,007	0,086
Au	0,742	0,329	-0,049	-0,310	0,342
B	-0,193	0,096	-0,125	0,810	0,044
Ba	-0,744	0,302	0,385	0,079	0,394
Bi	0,579	0,659	0,215	-0,168	0,185
Ca	-0,606	0,366	0,607	0,118	0,242
Cd	0,240	0,778	0,466	-0,215	0,137
Co	0,975	0,118	-0,022	-0,138	-0,072
Cr	-0,852	-0,052	0,362	-0,044	-0,206
Cu	0,882	0,295	0,151	-0,226	0,132
Fe	0,985	0,001	-0,056	-0,133	0,036
Ga	0,954	0,060	0,194	-0,123	0,064
Hg	-0,500	0,721	0,204	0,316	-0,061
K	-0,762	0,064	0,327	0,430	-0,201
La	0,043	0,140	0,517	0,113	0,794
Mg	0,294	0,250	0,893	0,069	0,024
Mn	0,674	0,271	0,394	-0,264	0,444
Mo	0,874	0,248	-0,109	-0,103	0,222
Na	-0,781	0,026	-0,046	0,487	-0,230
Ni	0,871	0,030	-0,048	-0,167	-0,257
P	-0,278	0,082	0,467	0,667	0,075
Pb	0,152	0,863	0,287	0,030	-0,039
S	0,859	0,064	-0,261	0,389	-0,009
Sb	0,564	0,721	-0,261	-0,026	0,050
Sc	-0,187	0,215	0,906	-0,122	0,136
Se	0,870	0,371	0,131	0,032	-0,160
Sr	-0,928	0,106	0,272	0,217	0,003
Te	0,786	0,384	0,139	-0,323	-0,011
Th	-0,875	-0,094	0,248	-0,125	0,123
Ti	-0,966	-0,169	0,061	0,076	-0,015
Tl	0,864	0,220	0,180	-0,238	-0,231
U	-0,808	0,209	0,321	0,272	0,250
V	0,564	-0,639	-0,050	-0,244	-0,142
W	0,903	0,170	-0,168	-0,149	0,243
Zn	-0,163	0,608	0,530	-0,060	0,261

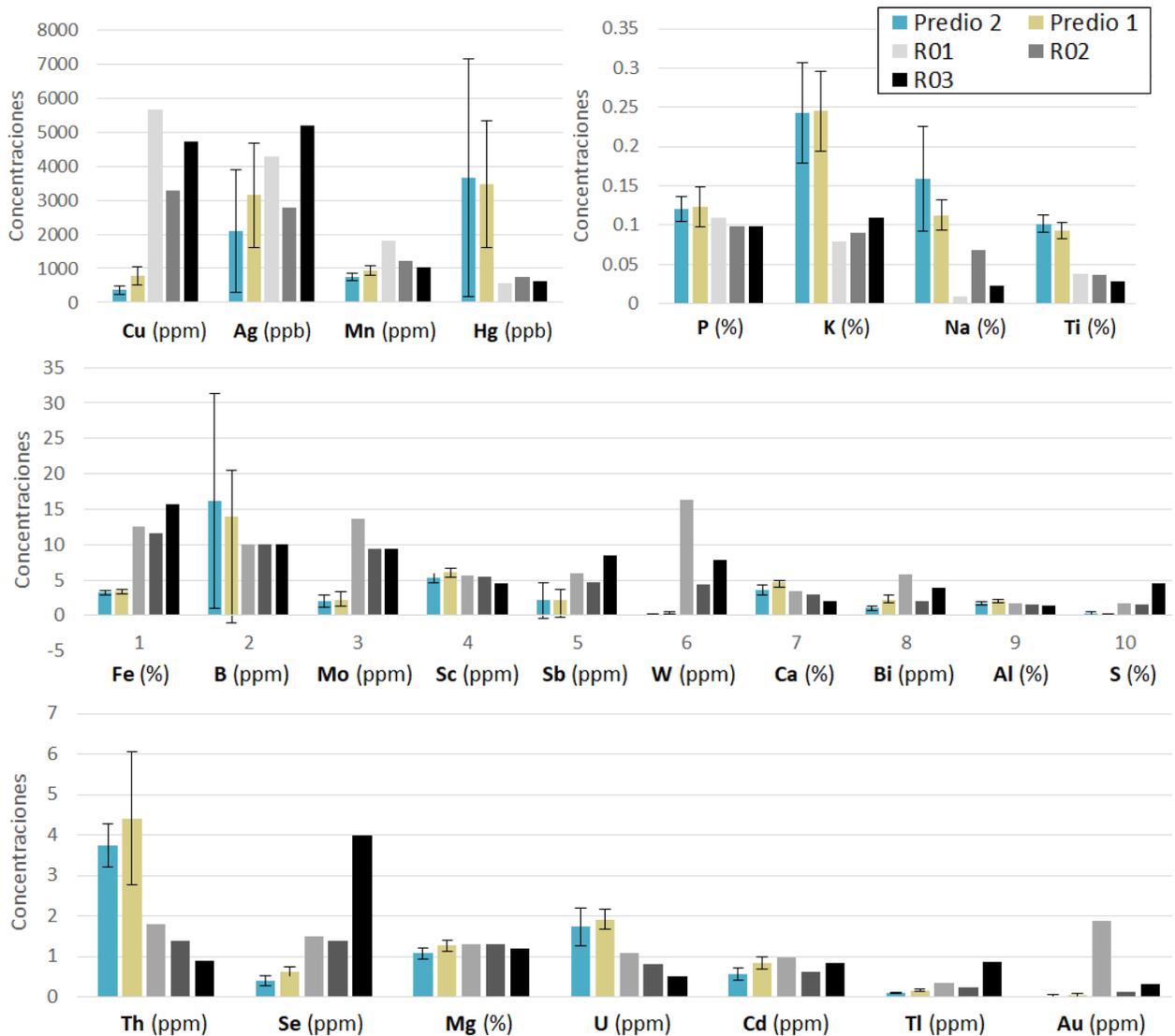
Destacan los 3 primeros componentes, los cuales representan 48,6%, 16,5% y 13,9% de la varianza total de los datos. De este modo, se obtienen tres factores principales:

- Factor 1: Co, Cu, Fe, Ga, Mn, Mo, Ni, Bi, Au, As, S, Sb, Se, Te, Tl, W;
- Factor 2: Ag, As, Bi, Cd, Hg, Pb, Sb, Zn
- Factor 3: Al, Ca, Mg, Sc

4.2 Análisis de procedencia por parte de relaves aledaños

4.2.1. Abundancias comparadas

Se realizaron gráficos de barra con datos de muestras agrupados. Para ello, se contrastó el promedio de los valores de las muestras de suelo con los valores de las muestras correspondientes a cada uno de los relaves (Figura 16).



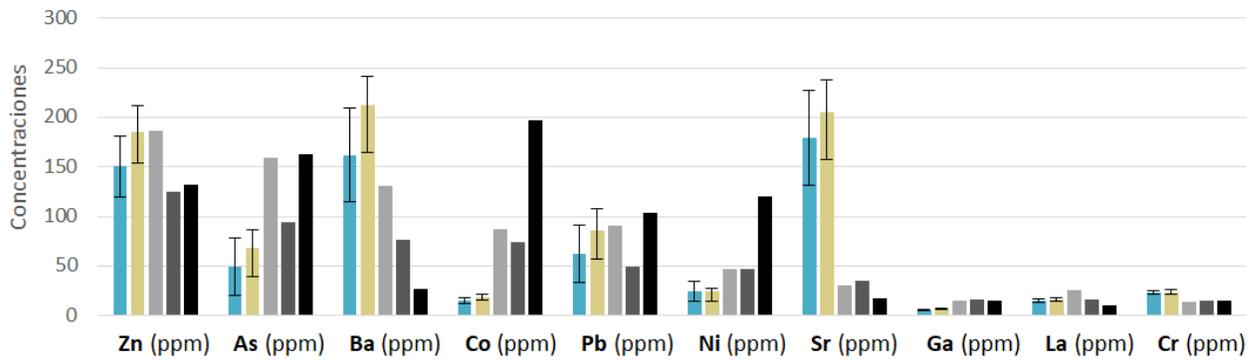
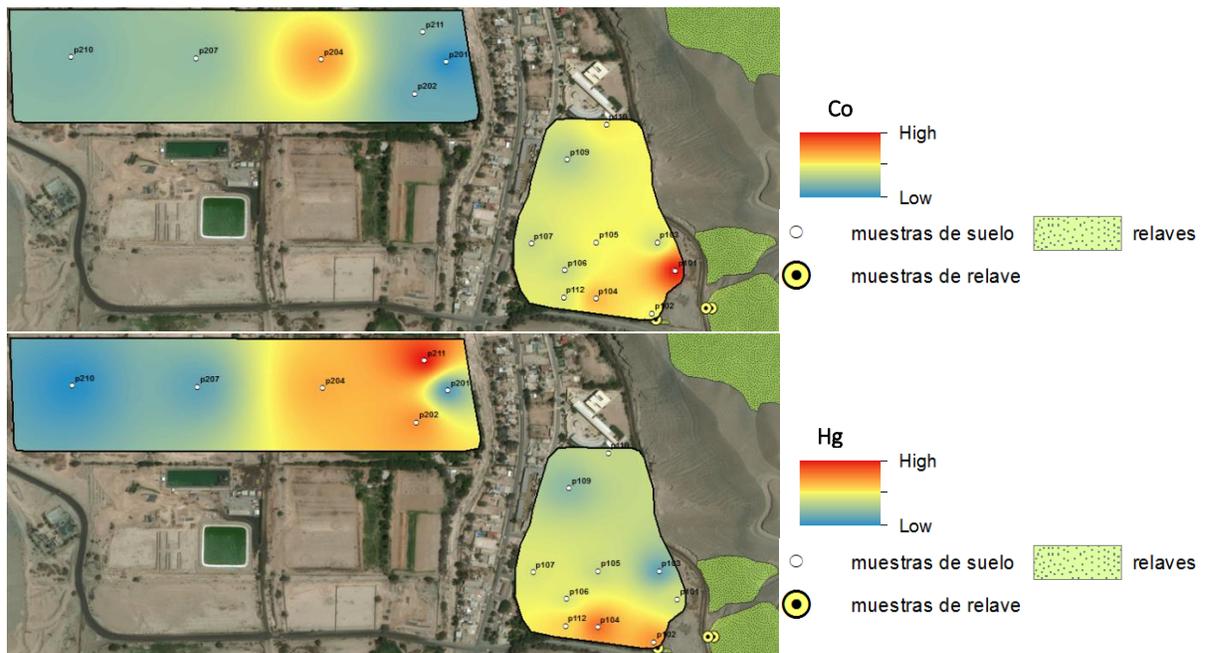


Figura 16. Abundancias comparadas entre Predio 1 (color mostaza), Predio 2 (color turquesa) y muestras de relaves estudiadas (tonos de grises). Sobre las barras de muestras de suelo se superpuso una barra de error correspondiente a la desviación muestral de los datos considerados.

Se tiene que los elementos Th, U, Ba, Sr, Cr, Hg, K, Na y Ti presentan concentraciones más altas en muestras de suelos que en cualquiera de las muestras de relaves en estudio. Esto permite inferir que su presencia en los suelos no es aportada por ellos. Por otro lado, no se observan diferencias significativas entre ambos predios.

4.2.2 Distribución espacial

En esta sección solo se muestran algunos mapas de distribución espacial (Figura 17), la totalidad de ellos se encuentra en Anexo A3. La interpolación se hizo de manera separada para el Predio 1 y Predio 2, dado que sería incorrecto interpolar información espacial en el sector de suelo que está entre ellos (puesto que por allí pasa el río Copiapó). Sin embargo, se escogió una paleta de colores que considera los valores máximos y mínimos entre ambos predios, para así poder observar la distribución de elementos en toda la extensión de la zona de estudio.



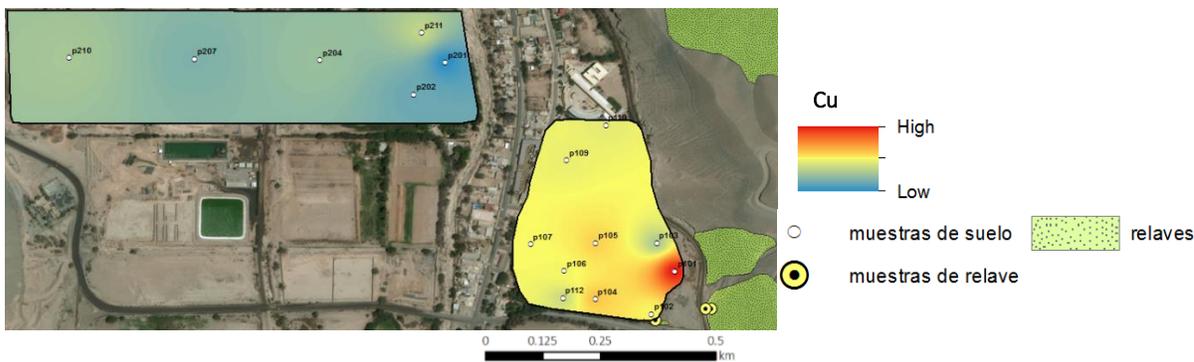


Figura 17. Mapas de interpolación para los elementos: Cu, Co y Hg (la totalidad de las interpolaciones se encuentra en Anexos)

Como se puede observar de manera consistente en los mapas de Cd, As, Cu, Au, Mn, Ga, Co, Bi, Mo, Fe, Tl, Te, W, Zn y Ca, existe una distribución marcada hacia el margen Este del valle, en ambos predios. Justamente dicha ladera es en donde se encuentran los relaves (achurados en verde en los mapas); mientras que, hacia el extremo Oeste, aumenta la concentración de Fe, V, Ni y Cr.

Por otro lado, no se evidencia ninguna tendencia clara de distribución para los elementos Cr, Al, K, Sr, P, Na, Hg, Zn, Ti y S. Cabe destacar que en el punto de muestreo P201 existe un valor bajo de concentración –en muchos casos el más bajo– para casi la totalidad de los elementos medidos (tendencia no aplica para V, Th y Ti).

4.2.3 Análisis mineralógico

4.2.2.1 Aproximación con lupa binocular

Mediante la lupa se pudo identificar en todas las muestras la presencia de cuarzo, carbonato de calcio, feldspatos alcalinos (presumiblemente potásicos) y magnetita (Figura 18); en menor medida también se vislumbraron cristales de piroxeno. También se vislumbraron otros minerales metálicos, pero dado el tamaño de dichos cristales fue complejo distinguir entre distintas fases minerales a la escala de observación que admite la lupa binocular. De todos modos, se infiere la presencia de piritita y calcopiritita en las muestras de relaves, no así en las muestras de suelo (a excepción de granos aislados de brillo metálico, pero tan finos que su identificación es incierta).

La magnetita fue distinguida gracias al uso de un imán para apartar los cristales (aunque también podría tratarse de otra fase magnética, como la martita); del mismo modo, cristales carbonatados fueron distinguidos con la aplicación de ácido clorhídrico diluido, observando cristales en reacción bajo la lupa.

Se utilizó un criterio cualitativo, categorizando la presencia de cada mineral en cantidades significativas, medianamente significativas, poco significativas y muy poco significativas o nulas. Se consideró una cantidad significativa en aquellos casos en que el mineral está presente de manera indiscutible y no aislada; mientras que, en el otro extremo, se consideró una cantidad muy poco significativa o nula, en el caso de aquellos minerales ausentes o presentes de manera muy escasa y difícil de distinguir.

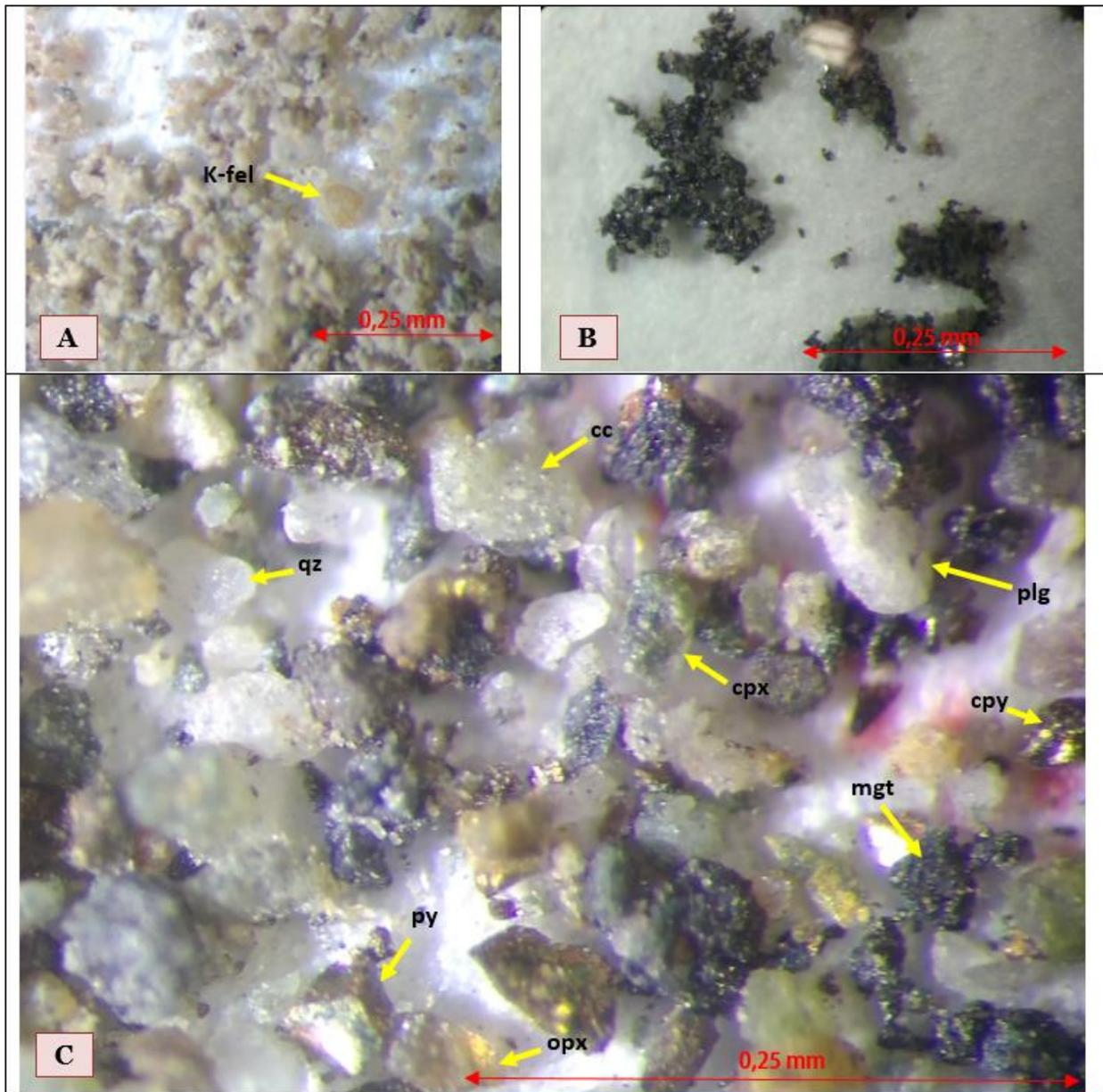


Figura 18. Fotografías de muestras vistas a través de lupa binocular con aumento 40x. (A) Muestra de suelo P103; presenta un aspecto característico de todas las muestras de suelo (grano muy fino, abundancia relativa mayor de granos minerales félsicos); (B) muestra de relave R03, cristales de magnetita apartados del resto con la ayuda de un imán; (C) muestra de relave R01, se señalan algunos de los minerales identificados.

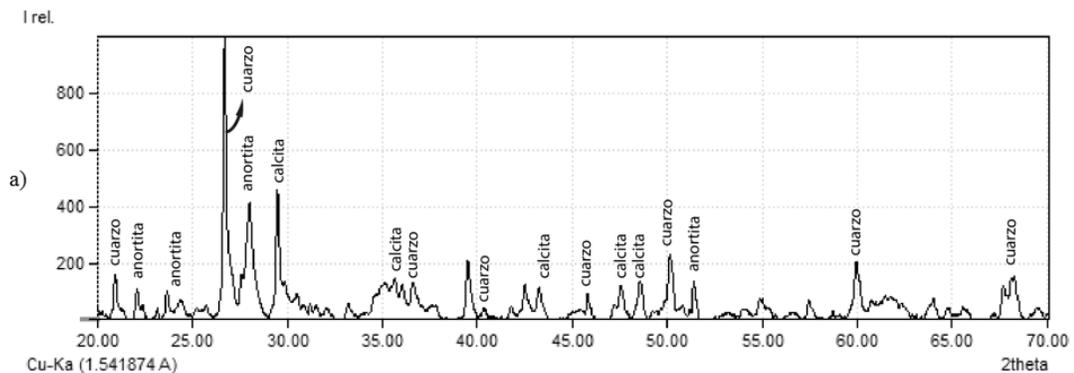
Tabla 7. Resumen de minerales identificados mediante lupa binocular, imán y HCl. Se expresa (?) aquellos minerales ante los cuales no se tiene certeza de su identificación. A saber: Qz=cuarzo, Cc=calcita, Plg=plagioclasa, K-Fel= feldespato potásico, Py=pirita, Px=piroxeno, Cpy=calcopirita

Muestra	Qz	Mineral carb. (Cc?)	Plg	K-Fel (?)	Mineral magn. (Mgt?)	Py (?)	Px (?)	Cpy (?)
R01	■	■	■	■	■	□	□	□
R02	■	■	■	■	■	□	□	□
R03	■	■	■	■	■	□	□	□
P101	■	■	■	■	■	□	□	□
P102	■	■	■	■	■	□	□	□
P103	■	■	■	■	■	□	□	□
P104	■	■	■	■	■	□	□	□
P105	■	■	■	■	■	□	□	□
P106	■	■	■	■	■	□	□	□
P107	■	■	■	■	■	□	□	□
P109	■	■	■	■	■	□	□	□
P110	■	■	■	■	■	□	□	□
P112	■	■	■	■	■	□	□	□
P201	■	■	■	■	■	□	□	□
P202	■	■	■	■	■	□	□	□
P211	■	■	■	■	■	□	□	□
P204	■	■	■	■	■	□	□	□
P207	■	■	■	■	■	□	□	□
P210	■	■	■	■	■	□	□	□

■ cantidad significativa ■ cantidad medianamente significativa ■ cantidad poco significativa □ cantidad muy poco significativa o nula

4.2.2.2 Resultados de XRD

Los resultados encontrados en el análisis de difractogramas son consistentes con lo encontrado previamente (Figura 19). Se corrobora que minerales magnéticos corresponden a magnetita y que minerales carbonatados corresponden a calcita. Por otro lado, se identifican los tipos de feldespatos observados bajo la lupa, siendo correspondientes a: ortoclasa, micropertita, albita, andesina y anortita.



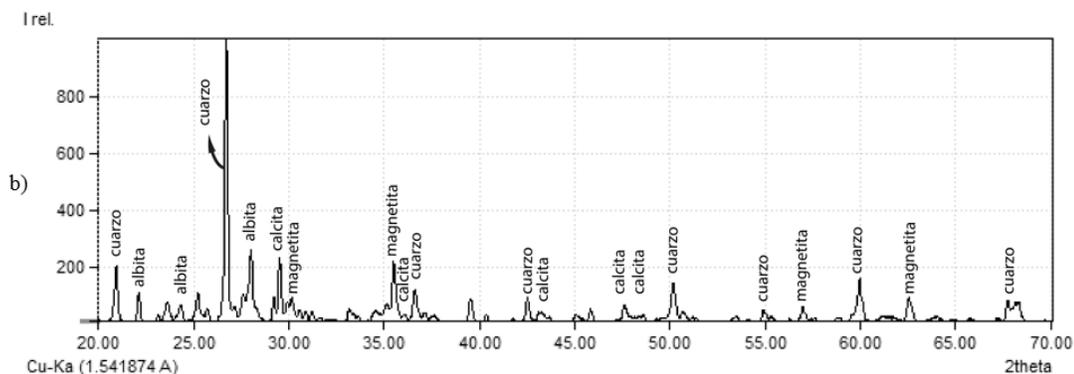


Figura 19. Ejemplos de difractogramas. a) P101 y b) R02

Tabla 8. Resumen de minerales identificados mediante XRD.

Muestra	Qz	Cc	Plg	K-Fel	Mgt
R01			albita	ortoclasa	
R02			albita	ortoclasa	
R03			albita	ortoclasa	
P101			anortita		
P102			albita	ortoclasa	
P103			andesina	ortoclasa	
P104			andesina	micropertita	
P105			albita	micropertita	
P106			andesina	micropertita	
P107			albita	ortoclasa	
P109			albita		
P110			albita	ortoclasa	
P112			albita		
P201			albita	ortoclasa	
P202			albita		
P211			alb. y an.		
P204			andesina	ortoclasa	
P207			albita		
P210			albita		

cantidad significativa
 cantidad medianamente significativa
 cantidad poco significativa
 cantidad muy poco significativa o nula

Se utilizaron los mismos criterios que en el estudio con lupa binocular para resumir los minerales presentes en las muestras según qué tan significativa es la presencia de cada fase (Tabla 8).

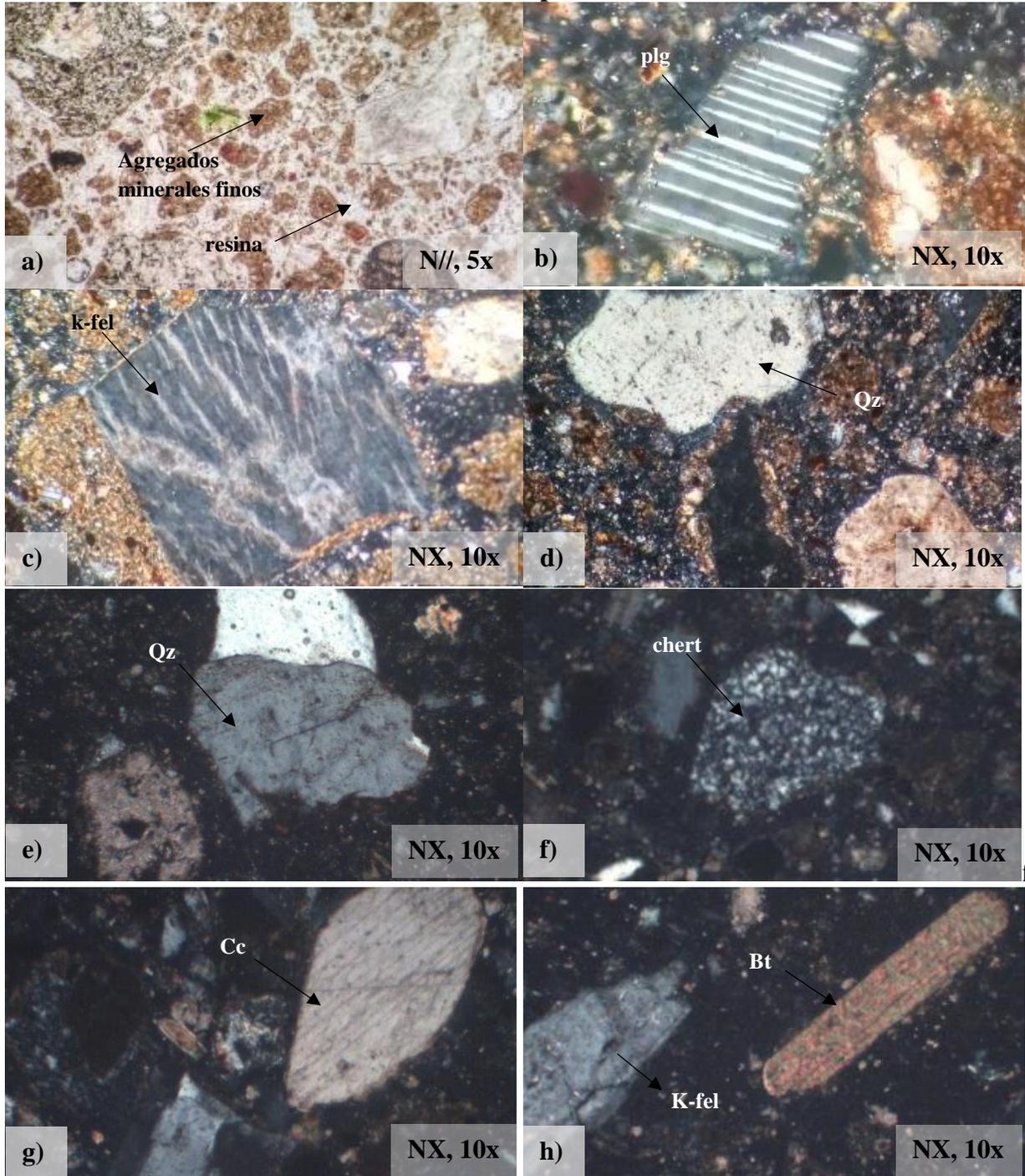
4.2.2.3 Observaciones en microscopio óptico

Tras observar cortes transparentes y cortes pulidos de las muestras en microscopio óptico (Figura 20), se llegó a las siguientes conclusiones:

- Se corrobora presencia de minerales identificados previamente, tales como cuarzo, feldespato potásico, calcita, magnetita y plagioclasa, con una presencia significativamente menor de clinopiroxeno y biotita.
- La calcita se encuentra principalmente como mineral de alteración y en la menor cantidad de casos en estado cristalino.

- Existe una abundante presencia de líticos y minerales alterados.
- Los relaves poseen una importante presencia de metales. En cortes pulidos se confirma la presencia de pirita, magnetita y calcopirita, siendo la pirita el mineral predominante dentro de las fases metálicas.

Cortes transparentes



Cortes pulidos

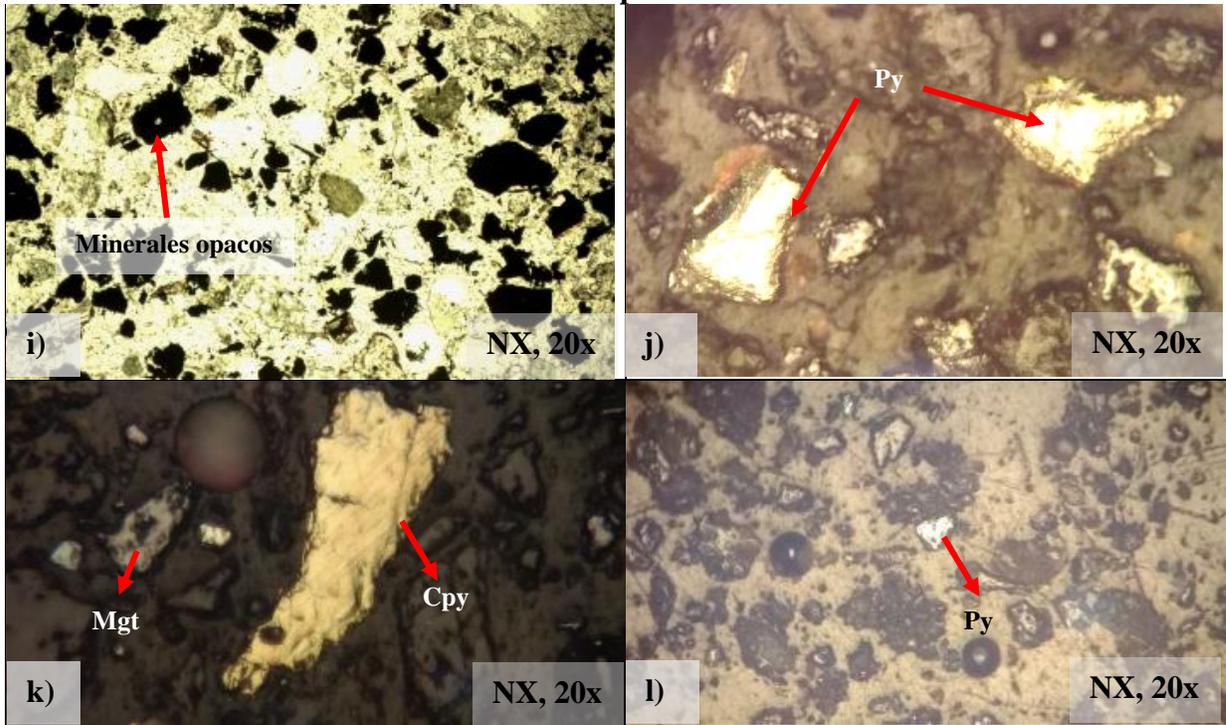


Figura 20. Fotografías tomadas a las muestras en microscopio óptico. a) P105: vista general, b) P102: cristal de plagiocasa, c) P104: cristal de feldespato potásico, d) P104: cristales de cuarzo y calcita, e) P207: cristales cuarzo y calcita, f) P201: chert, g) P201: cristales de calcita y feldespato potásico, h) cristales de biotita y feldespato potásico, i) R02: vista general (abundancia de opacos), j) R03: cristal de pirita, k) R03: cristales de calcopirita y magnetita, m) P201: cristales de pirita, l) P201: cristal de pirita

Tabla 9. Resumen de minerales encontrados en microscopio óptico.

Muestra	Lit	Qz	Cc	Plg	K-Fel	Mgt	Py	Px	Cpy	verdes
R01										
R02										
R03										
P101										
P102										
P103										
P104										
P105										
P106										
P107										
P109										
P110										
P112										
P201										
P202										
P211										
P204										
P207										
P210										

cantidad significativa
 cantidad medianamente significativa
 cantidad poco significativa
 cantidad muy poco significativa o nula

A luz transmitida no se observan diferencias significativas entre las muestras de suelo, pero en luz reflejada fue posible distinguir cristales de pirita solo en los cortes P101, P102, P103, P104, P105, P106, P202 y P211; y así también magnetita, solo en los cortes P101 y P102, P201, P202 y P211. Estos cortes corresponden a muestras que están cerca de los relaves, los cuales cuentan con una presencia clara de pirita y magnetita.

4.2.2.4 Síntesis de información mineralógica

En la siguiente tabla, se resumen los minerales encontrados en cada una de las muestras tras haber cruzado la información de cada uno de los análisis.

Tabla 10. Síntesis de minerales encontrados en muestras de relaves y suelos. Lit: líticas, Qz: cuarzo, Cc: calcita, Plg: plagioclasa, K–Fel: feldespato potásico, Mgt: magnetita, Py: pirita, Px: piroxeno, Cpy: calcopirita, Bt: biotita, verdes: minerales verdes de alteración.

Muestra	Lit	Qz	Cc	Plg	K–Fel	Mgt	Py	Px	Cpy	Bt	verdes
R01				albita	ortoclasa						
R02				albita	ortoclasa						
R03				albita	ortoclasa						
P101				anortita							
P102				albita	ortoclasa						
P103				andesina	ortoclasa						
P104				andesina	microperita						
P105				albita	microperita						
P106				andesina	microperita						
P107				albita	ortoclasa						
P109				albita							
P110				albita	ortoclasa						
P112				albita							
P201				albita	ortoclasa						
P202				albita							
P211				alb. y an.							
P204				andesina	ortoclasa						
P207				albita							
P210				albita							

cantidad significativa
 cantidad medianamente significativa
 cantidad poco significativa
 cantidad muy poco significativa o nula

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Procedencia antropogénica

5.1.1 Inferencias sobre factor de enriquecimiento

Los cálculos de factor de enriquecimiento muestran valores elevados para Ag, As, Au, Bi, Cd, Cu y Hg. El enriquecimiento que supone este resultado se puede atribuir a la mineralización metálica presente en la zona, que corresponde predominantemente a sulfuros de cobre, con extracción de menas secundarias, usualmente, de Au y Mo. El Cu se encuentra comúnmente en cristales de calcopirita (CuFeS_2), covelina (CuS), calcosina (Cu_2S), bornita (CuFe_5S_4), tetraedrita $(\text{Cu,Fe})_{12}\text{SbS}_{13}$, tennantita ($\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$) o enargita (Cu_3AsS_4). Mientras que se puede encontrar Ag en cristales de argentita (Ag_2S) o asociada a impurezas de otros minerales, como pirita, calcopirita, bornita, esfalerita, covelina o tetraedrita. Del mismo modo, los elementos Au, As y Bi se pueden encontrar como impurezas en cristales de pirita; y el Cd y el Hg se puede presentar como impureza en cristales de esfalerita; esto sin restar posibilidad a la presencia de minerales ricos en algunos de estos elementos, como el cinabrio (HgS).

En cuanto a los factores de enriquecimiento atribuibles a un origen que puede ser tanto antropogénico como geogénico, se pueden plantear distintas conjeturas. Por ejemplo, el Ca puede ser atribuible a la abundancia de rocas calcáreas presentes en las rocas del sector (calizas y calcilutitas de las Formaciones Abundancia, Nantoco, Totoralillo y Pabellón), pero también a las soluciones que se utilizan en el proceso de flotación de minerales cuando se utilizan circuitos de flotación alcalina; en dicho caso, usualmente se utiliza cal, ya sea cal viva (CaO) o cal apagada (Ca(OH)_2). En esta categoría también se encuentra el Fe y S, que pueden estar presentes en muchos tipos de sustancias, tanto orgánicas como inorgánicas, pero que también forman parte de minerales ferrosos, como la magnetita (Fe_3O_4) o la hematita (Fe_2O_3); o bien de sulfuros varios, como por ejemplo la pirita (FeS_2) o la arsenopirita (FeAsS).

Cabe recalcar que las muestras están tomadas dentro de predios agrícolas y, por tanto, la composición de las plantas también debe ser tomada en cuenta. En general, las plantas están compuestas por C, H y O, como cualquier compuesto orgánico, pero también pueden presentar trazas de Ni, P, K, Ca, Mg, Zn, S, Cl, B, Fe, Cu, Mn y Mo; y los elementos Hg y Pb suelen formar complejos con la materia orgánica (Oroz, 2011). Junto con este aspecto, la utilización de fertilizantes fosforados puede dejar presencia de Cd, As y Hg (Rodríguez *et al.*, 2014).

Ahora bien, no se puede utilizar el factor de enriquecimiento como un diagnóstico determinante del origen de los elementos. Existen múltiples aspectos que pueden inducir a error, tal como indican Reimann & De Caritat (2005) y por tanto debe ser tomado en cuenta solo integrándolo en un conjunto mayor de análisis. El primer aspecto a considerar que puede variar cuantiosamente los resultados es el *background* utilizado. En este estudio se utilizó como *background* la corteza continental superior, sin embargo, sería de mayor utilidad utilizar la geoquímica del material parental que da lugar al suelo. También constituye un factor de posible inducción a error el elemento de referencia considerado, puesto que este podría estar sutilmente relacionado a algún proceso ambiental; en efecto, aunque no es algo común, el V puede estar como impureza en cristales de pirita.

5.1.2 Correlaciones y análisis factorial

Al analizar correlaciones entre elementos químicos, resalta la asociación Cu, As, Bi, Co, Fe, Mo, Ga, Au, Te, Tl, Se, S, Ni y W, en que poseen un coeficiente de correlación $>0,8$ cada uno de ellos entre sí y que además aparecen con alto factor de carga en el primer componente del análisis factorial. La mayoría de los elementos mencionados en esta asociación se explican mediante fases minerales que los contienen como elementos principales o como trazas. Por ejemplo, Fe y S (0,91) podrían corresponder a pirita con impurezas de Se (0,97 con S y 0,89 con Fe). En efecto, tanto Te como Tl pueden presentarse como impurezas en calcopirita; mientras que Co, Tl y Ni como impurezas en pirita, al igual que Se. El W puede presentarse como wolframita ((Fe, Mn)WO₄), pero también como traza en cristales de molibdenita (MoS₂). Por su parte, el Ga podría estar como traza en cristales de pirita y magnetita.

Se podría plantear, entonces, que existe una hipotética asociación mineral de pirita (con posibles trazas de Co, Ni, Se, Tl, Au, Bi, As, Ga); calcopirita (con posibles trazas de Au, Se, Te, Tl); molibdenita (con posibles trazas de W); magnetita (con posibles trazas de Ga) y diversos minerales ricos en cobre además de la calcopirita: bornita, covelina, enargita, tennantita, tetraedrita, entre otros.

El segundo componente del análisis factorial incluye los elementos Ag, As, Bi, Cd, Hg, Pb, Sb y Zn. A partir de estos elementos se podría plantear la presencia de tetraedrita (con trazas de Hg, Ag, Bi, As) y de arsenopirita (con trazas de Ag, Sb, Bi, Pb). Podría ser plausible la presencia de galena y esfalerita, pero la correlación entre Pb-S y Zn-S es prácticamente nula (0,18 y -0,3 respectivamente).

Estos resultados que entregan las correlaciones y el análisis factorial permiten inferir que existe un aporte metálico en los suelos estudiados proveniente de la mineralización cuprífera de la zona, lo cual puede tener tanto una componente geogénica como antropogénica. Según los valores obtenidos al calcular factor de enriquecimiento, estos minerales podrían estar siendo aportados como consecuencia de las operaciones mineras y no tan solo como producto del material parental. Es de esperar, sin embargo, que los valores de referencia utilizados varíen de manera tal que disminuyan los factores de enriquecimiento de algunos metales. Es probable, por ejemplo, que naturalmente haya valores mayores de Cu o As en las rocas de esta zona, por tanto, se recalca que no se puede tomar dicho análisis como un diagnóstico certero. Ahora bien, el conjunto de elementos entregado por el primer componente del análisis factorial podría atribuirse al aporte directo de los relaves aledaños, pues poseen altas concentraciones de cada uno de estos elementos; no así en el caso del segundo componente. Destaca la presencia de Hg, la cual no es alta en los relaves aledaños, por tanto, podría atribuirse a otra fuente, pero asociada a la mineralización natural de la zona o bien, a un producto de las operaciones mineras.

El tercer componente del análisis factorial incluye los elementos Al, Ca, Mg, Sc, los cuales podrían atribuirse a distintos tipos de silicatos formadores de roca, tales como plagioclasas, piroxenos, filosilicatos, etc.

5.2 Rol de relaves aledaños

5.2.1 Relaciones geoquímicas y mineralógicas

Nuevamente los elementos Cu, As, Bi, Co, Fe, Mo, Ga, Au, Te, Tl, Se y W aparecen relacionados, pero esta vez espacialmente, pues se distribuyen preferentemente hacia el Este.

Se han mencionado diversos minerales sulfurados para justificar la presencia de algunos elementos metálicos, sin embargo, el S no presenta una distribución espacial cercana a dichos elementos, pero sí estadística. Existe un punto de alta concentración en la muestra P202, que podría explicarse por la presencia de mayor materia orgánica. En efecto, dicho punto de muestreo fue el más húmedo y con mayor presencia de raíces (Anexo A1), similar a casi todos los puntos de muestreo del Predio 2, con mucha más vegetación que el Predio 1.

La distribución de Ca hacia el Este puede tener que ver tanto con la cal de los relaves como con algo litológico. De hecho, Dold & Fontbote (2002) mencionan que los contenidos de calcita en las rocas aumentan distalmente hacia el Este del Batolito de la Costa, ubicado precisamente hacia el sector Oeste de la zona de estudio (intrusivos *Kimdsg*, *Kidlb* y *Kigrpc*; Figura 5).

A pesar de las altas concentraciones de Hg en la zona, se descarta que su origen provenga de los relaves contiguos a los predios (Figura 16), lo cual se corrobora al analizar su distribución espacial, la cual no aumenta hacia el sector de los relaves aledaños.

La revisión mineralógica confirma la presencia de pirita, magnetita y calcopirita en los relaves y de pirita y magnetita en algunas muestras de suelo. Se encuentran presentes de manera clara hacia el borde oriental del Predio 1 (muestras P101, P102, P103) y de manera un poco más escasa hacia el borde oriental del Predio 2 (muestras P201, P202, P211) (Tabla 8; Figura 17).

5.2.2 Mecanismos de aporte de material

El principal foco de removilización de material de los relaves al medioambiente ocurre a partir de la dispersión de partículas finas por acción del viento, en especial en ambientes áridos. Usualmente, en la superficie de los relaves se forman sales eflorescentes, es decir, sulfatos y cloruros solubles en agua como, por ejemplo, calcantita ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), eriocalcita ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), entre muchos otros, que varían bastante dependiendo del tipo de yacimiento explotado. Estos minerales suelen poseer altas concentraciones de Cu y otros metales pesados (Dold, 2010). Al ser altamente solubles en agua, podrían ser fácilmente removidos por lluvias. Los relaves de la zona, sin embargo, están cubiertos por grava, probablemente para evitar esta posible dispersión y removilización por agua; pero no siempre han estado cubiertos.

Con la ayuda de imágenes satelitales históricas de la zona, se pudo identificar que el relave ubicado hacia el noreste del área de estudio fue cubierto por grava alrededor del año 2009, pues se podía ver descubierto hasta abril del año 2007. Por su parte, los relaves ubicados al sureste de la zona de estudio fueron cubiertos por grava alrededor del año 2013, estando descubiertos al menos hasta el año 2011 (Figura 21). Esto quiere decir que los relaves permanecieron al descubierto al menos por una década según estas fechas, y podrían haber estado expuestos por más de 70 años, pues las operaciones mineras asociadas a la planta de origen tienen registro desde 1929 (Dold & Fontobé, 2002); sin embargo, se desconoce desde cuando quedaron

inactivos. De todos modos, en función de las imágenes se puede deducir que estuvieron sin agua superficial desde el año 2004 y con visibles marcas de sales eflorescentes.

Es posible que existiese un aporte de partículas a través del viento hacia los predios, pero para ello sería útil conocer la dirección de los vientos a nivel de valle; solo se conocen datos de dirección de vientos a partir de información meteorológica global (<https://www.windy.com>), lo cual indica una predominancia en dirección sureste.

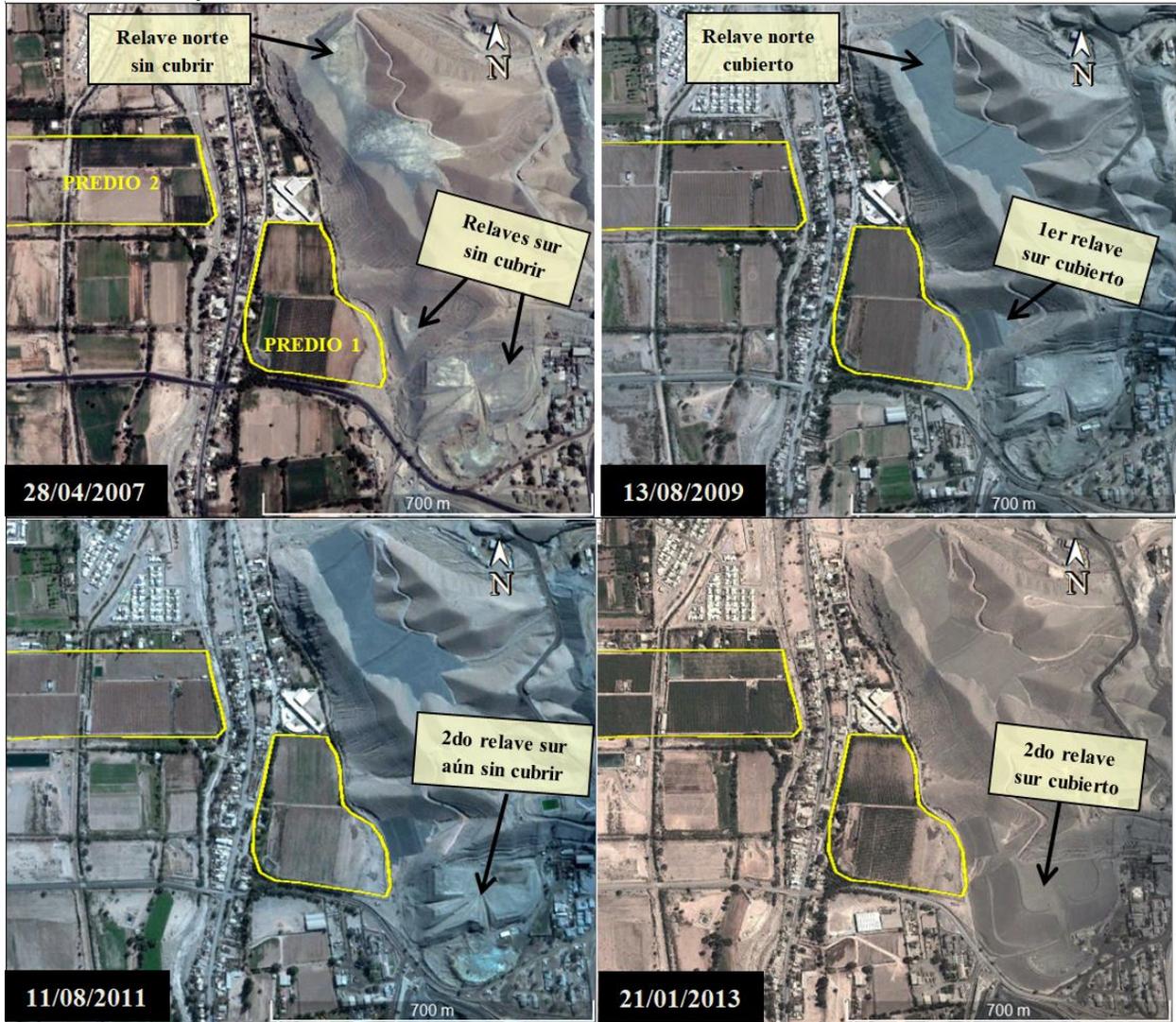


Figura 21. Imágenes satelitales históricas que revelan aproximadamente cuando los relaves fueron cubierto por grava.

El relave ubicado al norte de la zona está sobre una terraza fluvial (conglomerados de la Formación *Mga*; o *Gravas de Atacama*) y además está separado del Predio 2 por el río Copiapó. Esto hace suponer que no es tan factible un aporte directo mediante flujos esporádicos de agua o de detritos hacia el Predio 2, pero posiblemente sí hacia el borde norte del Predio 1. En efecto, varios metales presentan un alto de concentración en el punto de muestreo más septentrional del Predio 1 (por ejemplo: Pb, Cd, Mn, Zn), mientras que otros tienen una distribución casi homogénea dentro de todo el Predio 1 (e.g., As, Cu, Bi) que no se explica solo por un posible aporte de los relaves ubicados en el sureste de la zona. Estos últimos están en contacto directo

con el Predio 1, separados por un camino automovilístico angosto. Es posible pensar que estos relaves efectivamente han aportado material al predio mediante flujos aluviales esporádicos.

Dado que la muestra R03 fue tomada de un lóbulo aluvial en el borde sur del Predio 1, se contrastaron imágenes satelitales de noviembre del año 2004 y de noviembre del año 2017 (la más antigua y actual disponibles, respectivamente) (Figura 22; Figura 23). No es evidente un proceso de transporte directo desde el relave al predio, por lo que posiblemente ocurrió antes del año 2004.



Figura 22. Imagen extraída de Google Earth; vista hacia el Este desde el borde suroriente del Predio 1. Muestra R03 señalada por flechas.



Figura 23. Imagen extraída de Google Earth; vista en planta al borde suroriente del Predio 1. Muestra R03 señalada por flechas negras. Flecha amarilla de imagen a la izquierda indica posible parte descubierta del lóbulo aluvial en 2004.

La resolución de las imágenes satelitales impide reconocer extensión u origen del flujo. Aunque podría conjeturarse que en la imagen del año 2004 se visibiliza una parte más proximal del flujo (Figura 23; zona de color más gris, indicada por flecha amarilla).

Lo que sí se conoce como dato obtenido por registro oral (entrevistando a los dueños de los predios en estudio), es que un par de metros hacia el sur del lóbulo, se encuentra una tubería proveniente de las faenas mineras que dieron origen a los relaves. En terreno se pudo divisar una parte, pero hacia el Oeste desaparece bajo tierra. Según el registro oral, durante la década de 1980 la tubería se habría roto y habría derramado en el predio el material que transportaba. En las instalaciones de relaves, las tuberías se utilizan para transportar solución de relaves, aguas residuales, concentrados de cobre (producto del proceso de flotación) u otras sustancias. En este caso, se transporta “agua de procesos” (Figura 24), la cual contiene una elevada carga metálica. Ahora bien, dentro del Predio 1 se puede ver la tubería hasta cierto punto y al escarbar la tierra que cubre la tubería se encuentra una tierra oscura con terrones amarillos, similar a la recogida en el punto de la muestra R03 (Figura 25); el color gris oscuro en relaves usualmente refleja la presencia de pirita no oxidada, mientras que el color amarillo refleja presencia de pirita oxidada y, por ende, presencia de oxihidróxidos de Fe (como goethita, lepidocrocita o feroxihita) (Grover *et al.*, 2016). De esto se desprende que un parte importante del enriquecimiento relativo de minerales pesados en los suelos podría provenir de la rotura de la tubería.



Figura 24. Tubería que pasa por el borde sur del Predio 1 (fotografía tomada sobre relaves)

En efecto, es posible que se pudiera dispersar hacia el Predio 1 mediante el agua de riego, pues, precisamente, la manguera del agua de riego se ubica en el borde sur del predio agrícola, paralela a la tubería (Figura 26) y entrega el agua en dirección norte mediante surcos en la tierra, donde se encuentran las parras de uva.



Figura 25. Depósito de tierra oscura aledaña a la tubería que pasa por detrás (fotografía tomada dentro del Predio 1, borde sur)



Figura 26. Manguera de regadío en el borde sur de Predio 1.

5.3 Fuente de enriquecimiento de Hg

Muestras de 5 residuos mineros aguas arriba; ubicados a aproximadamente 5, 8, 10, 12 y 16 km de distancia, respectivamente, se compararon con las muestras obtenidas en este estudio. No son baterías de datos tan completas y, en efecto, solo algunos elementos se pueden contrastar. De la comparación establecida resaltan las altas concentraciones de Hg que los relaves ubicados a 12 km y 10 km de distancia poseen (para los demás no hay datos de Hg). Esto es llamativo porque, como se observa en la Figura 16, el Hg no es aportado por los relaves aledaños, en los cuales se identificaron concentraciones que van de los 0,4 a 0,6 ppm de Hg; mientras que los suelos poseen concentraciones de hasta 8,6 ppm.

El relave más lejano comparado (a 12 km de distancia aguas arriba) presenta concentraciones de entre 12,7 y 16 ppm de Hg; y el relave más cercano (a 10 km de distancia aguas arriba) posee concentraciones cercanas a los 9,4 ppm. A partir de esto, se podría suponer un aporte de metales por parte de relaves lejanos.

También se investigaron los pesticidas utilizados en los predios. En ambos se ha utilizado Randall y Rango Full, los cuales consisten en el compuesto glifosato (N-fosfonometil glicina) o $C_3H_8NO_5P$, para el cual no existe ningún antecedente que asocie presencia de metales pesados. Por otra parte, se revisaron los fertilizantes como posible fuente de metales. En estos predios se ha utilizado urea, superfosfato triple (SPT) y nitrato de Na. Sin embargo, las concentraciones de Hg asociadas son inferiores a 0,01 ppm (Figura 27) y la única fuente potencial de Hg podría corresponder a compost, en valores del orden de 231 a 310 ppm, pero por concepto de cada 100 kg/ha^2 del nutriente por fertilizar (Figura 28). Por ejemplo, para fertilizar con urea se necesita mucho menos cantidad de material para nutrir el suelo con N, que con compost. Y, en efecto, dado el alto valor del compost y las cantidades necesarias, los dueños de los predios relatan no haberlo utilizado (Rodríguez *et al.*, 2014).

Fertilizante/abono	As	Cd	Hg	Pb
	(mg kg ⁻¹)			
Uso orgánico				
Lombricomposta	3.6 ± 0.90	0.46 ± 0.10	<0.01	16.00 ± 2.60
Composta	2.0 ± 0.30	0.21 ± 0.06	<0.01	5.90 ± 1.10
Nitrato chileno	0.28 ± 0.07	<0.01	<0.01	0.53 ± 0.08
Roca fosfórica	2.49 ± 0.53	4.48 ± 0.37	<0.08	6.26 ± 0.29
Uso convencional				
Urea	<0.01	<0.01	<0.01	0.4 ± 0.10
Nitrato de calcio	<0.01	<0.01	<0.01	0.6 ± 0.14
DAP	11.5 ± 1.80	3.7 ± 0.85	<0.01	0.86 ± 0.23
SPT	25.7 ± 2.35	8.7 ± 1.93	0.06 ± 0.01	3.90 ± 0.85
Doble uso				
Sulfato de potasio	<0.01	<0.01	<0.01	0.98 ± 0.33

Figura 27. Concentración de algunos elementos traza en fertilizantes (Rodríguez *et al.*, 2014).

Fertilizante/abono	N (100 kg ha ⁻¹)				P ₂ O ₅ (100 kg ha ⁻¹)				K ₂ O (100 kg ha ⁻¹)			
	As	Cd	Hg	Pb	As	Cd	Hg	Pb	As	Cd	Hg	Pb
mg kg ⁻¹												
Uso orgánico												
Lombricomposta	17139	2190	*	76176	24000	3066	*	106666	22500	1312	*	100000
Composta	5218	538	231	15127	5403	566	243	15940	6896	724	310	20343
Nitrato chileno	175	*	*	331	na	na	na	na	na	na	na	na
Roca fosfórica	na	na	na	na	996	1792	*	2504	na	na	na	na
Uso convencional												
Urea	*	*	*	87	na	na	na	na	na	na	na	na
Nitrato de calcio	*	*	*	387	na	na	na	na	na	na	na	na
DAP	6394	2057	*	478	4160	1338	*	311	na	na	na	na
SPT	na	na	na	na	5568	1885	13	845	na	na	na	na
Doble uso												
Sulfato de potasio	na	na	na	na	na	na	na	na	*	*	*	156

*no calculado por encontrar concentraciones inferiores del límite de detección del ICP-M. na= no aplica por no ser fuente del nutriente que se indica.

Figura 28. Ingreso total de elementos traza al suelo (mg/ha⁻¹) por cada 100 unidades de fertilizante aplicados en suelos agrícolas, según el nutriente a utilizar; ya sea N, P o K (Rodríguez *et al.*, 2014).

Habiendo descartado pesticidas y fertilizantes como fuente de Hg a los suelos, se contrastaron valores con unos datos geoquímicos de CENMA (2012) tomados en unas rocas de la Formación Nantoco. Estos arrojan valores de Hg que van desde los 0,05 a los 0,26 ppm de Hg; entonces, si se extrapola esta información asumiendo que indica un nivel *background*, claramente los suelos presentan cantidades muy por sobre los niveles base de la zona.

Todo lo anterior permite conjeturar que podría existir un aporte de fuentes lejanas a los suelos en estudio, proveniente de residuos mineros, que se podrían haber dispersado difusamente a través de flujos de agua; posiblemente a causa de un aluvión como el que ocurrió el año 2015 o a principios de 2017, capaz de transportar sedimentos en tales distancias.

Del mismo modo, no se descarta que el enriquecimiento de Hg provenga del material que dio origen a los suelos. Se ha asumido hasta el momento que lo que da origen a los suelos es meteorización de roca, que es usualmente el material parental de los suelos. Sin embargo, lo que está bajo estos suelos es probablemente de carácter polimíctico, pues el tipo de suelo más abundante en un valle como el del río Copiapó es fluvisol.

5.4 Consideraciones para políticas públicas

En Chile falta una norma nacional de calidad de suelos porque no existen niveles *background* con los cuales contrastar. Desde el año 2011 SERNAGEOMIN trabaja en mapas

geoquímicos en busca de este objetivo. Actualmente se cuenta con mapas geoquímicos de suelos y sedimentos de Arica, Pisagua e Iquique; y se están desarrollando mapas para Taltal, El Salvador, Copiapó, Vallenar y La Serena (SERNAGEOMIN, 2017). Una vez que existan dichas líneas base, se vuelve absolutamente necesario generar normas que regulen la calidad de los suelos, sectorizando líneas base según región climática, ambiente geológico, mineralización metálica natural de la zona y actividad antrópica. En Chile eso supone una marcada sectorización, dada la amplia diversidad geológica que existe en el país. Esto es importante, porque cada región del país debiese tener una metodología de gestión enfocada en sus características naturales, pero también en los usos del suelo, en las actividades económicas que sustentan la región, en la idiosincrasia de la gente que la habita y otros factores varios relacionados a elementos técnicos y sociales.

Una de las principales falencias de las normas sobre recursos naturales que existen en Chile, es la falta de coordinación entre ellas, debido a la multiplicidad de organismos públicos con facultad para ejercer regulaciones sobre los recursos. Dentro de los próximos años, para cuando un mapa geoquímico nacional esté disponible, ha de ser necesario poseer una ley que integre de manera coherente los pasos entre la identificación de un problema (que no necesariamente ha de ser contaminación sino también otros tipos de degradación del suelo), alcance del problema (en tiempo y extensión espacial), rutas de exposición (medios por los cuales las personas, animales o ecosistemas pueden ser afectados, de diversas maneras) y propuestas de gestión del problema.

Actualmente, solo existe una metodología que aborda la gestión del suelo posiblemente contaminado, pero es bastante criticable, pues es el último eslabón de una cadena de entendimiento que parte con una base de datos de información geoquímica base. Como se mencionó en el capítulo de Antecedentes, dicha metodología aprobada para ser mandatoria sobre gestión de suelos es la Guía metodológica para la gestión de suelos con potencial presencia de contaminantes (SPPC). A pesar de contar con una metodología exhaustiva y que considera múltiples aristas, se reconocen las siguientes falencias:

- Así como CENMA adquiere licitaciones para estudiar sitios identificados con la metodología de la guía, también lo hacen otras instituciones externas; por ejemplo, PGS Chile se adjudicó la licitación correspondiente al estudio de los suelos de Puchuncaví y Quintero. Si bien esta es una manera legítima, práctica y útil de hacer las cosas, el resultado de que distintos grupos de investigación se adjudiquen sitios es que la información no aparece alineada (con los mismos estándares, enfoque o nivel de detalle) para cada caso. El problema puede que en sí no sea derivar los trabajos a consultorías externas, sino que la metodología es mandatoria solo para miembros del Ministerio del Medio Ambiente (por la resolución exenta 406).
- En la guía que no se considera en ninguna etapa de la metodología propuesta posibles agentes de transporte de material (se limitan a entornos de 2 y máximo 3 km de distancia del posible foco contaminante), siendo que corrientes de agua esporádicas y flujos de detritos gatillados por eventos meteorológicos como precipitaciones intensas, pueden removilizar sedimentos a distancias variables, incluso hacia otras quebradas y valles. Esto último es relevante, pues en la guía se sugiere considerar límite de cuencas para delimitar SPPC. También un flujo aluvial puede “lavar” el suelo y generar contaminación difusa hacia otros sectores, en cuyo caso se podría identificar un SPPC

como realmente no contaminado durante fases exploratorias. Posiblemente es lo que ocurre en la zona de estudio con el Hg, ya que probablemente proviene de residuos mineros alejados.

- Sería útil entender el suelo como un medio dinámico sujeto a intervenciones antrópicas y geológicas, dado que ambos agentes configuran su formación a través del tiempo. En los últimos años se ha puesto mucho énfasis en la remediación de suelos, pero parece necesario entender que el suelo evoluciona a escalas que no son manejables para el ser humano. Por lo tanto, es muy importante primero entender la dimensión en que los diversos factores juegan un rol en su desarrollo y dinámica temporal y espacial.
- Finalmente, es sugerible abordar el estudio de suelos de manera multidisciplinaria. La metodología propuesta por el MMA plantea el concepto de suelo como una entidad química, subestimando su dinámica temporal y espacial, posiblemente producto de la escala de tiempo a la cual ocurren dichas dinámicas. Por tanto, debe ser entendido como un sistema complejo y abordado desde la edafología, desde lo social, desde lo geológico y desde el punto de vista de la planificación territorial y usos económicos.

5.5 Limitaciones de métodos utilizados

El análisis geoquímico constituye una herramienta bastante útil ya que se pueden utilizar muchas herramientas matemáticas y computacionales para extraer información de las muestras. En este estudio, la escasa cantidad de muestras por límite de presupuesto y tiempo ha dejado fuera análisis estadísticos de tipo multivariable. La estadística multivariable posee herramientas extensamente utilizadas para evaluar relaciones de muchas variables en juego (por ejemplo: PCA, clústeres jerárquicos, redes neuronales). Sin embargo, se recomienda que sea utilizado cuando se tiene un gran número de muestras versus datos a evaluar (Reimann *et al.*, 2008), en una relación de al menos 3:1. De hecho, ha sido una limitante en estudios que trabajan con genes (considerando que son miles de genes, versus una cantidad limitada de muestras posibles de tomar) y en los cuales se ha tenido que acudir a mecanismos matemáticos y computacionales sofisticados para trabajar los datos (Pamukçu *et al.*, 2015).

Los análisis multivariantes son herramientas estadísticas muy útiles, pero que se deben utilizar con cautela con un bajo número de muestras. En efecto, es recomendable siempre utilizar bases de datos en que se posea más datos que variables (Wothke, 1993), al menos en una relación de 3:1. En este estudio se posee una relación de datos y variables de aproximadamente 1:2.

Por otro lado, el análisis de factor de enriquecimiento es una herramienta que sería de mucha mayor utilidad en cuanto a su confiabilidad si se tuvieran valores de referencia locales bien definidos y una caracterización adecuada del material parental.

En cuanto a la interpolación geoestadística utilizada para los mapas de distribución geoquímica, el método utilizado de interpolación geométrico IDW es el más apto cuando se tienen pocos datos que además no están uniformemente agrupados; pues sin una distribución uniforme no se pueden establecer variogramas (herramientas que permiten analizar el comportamiento espacial de una variable regionalizada); también es útil cuando la distancia de muestreo es muy grande e incluso para cuando la distancia de muestreo es mayor al rango de la correlación espacial (Kravchenko, 2003). A modo de ventaja, el método IDW es más rápido en

los cálculos en comparación con otros métodos; sin embargo, tiende a producir patrones poco reales conocidos como tipo “ojo de buey” alrededor de los puntos muestreados. Lo anterior expresa el peso que se le puede dar a la variación particular del valor de un punto de muestreo sobre los que están alrededor (Gotway *et al.*, 1996). Ante estas desventajas, se suele utilizar el método de kriging ordinario, pues este método funciona cuando existe una buena continuidad espacial de los datos; este método toma el área a interpolar como una superficie, identificando anisotropías y generando, por tanto, una estimación más cercana a la realidad.

Ahora bien, dadas las desventajas del método y la baja continuidad de los datos, un mapa de distribución con simbología gradual según rangos de concentraciones basta para estudios como este (Figura 29). De hecho, los predios han sido arados y cultivados de manera diferente según subsecciones, como se observa al estudiar imágenes satelitales históricas.

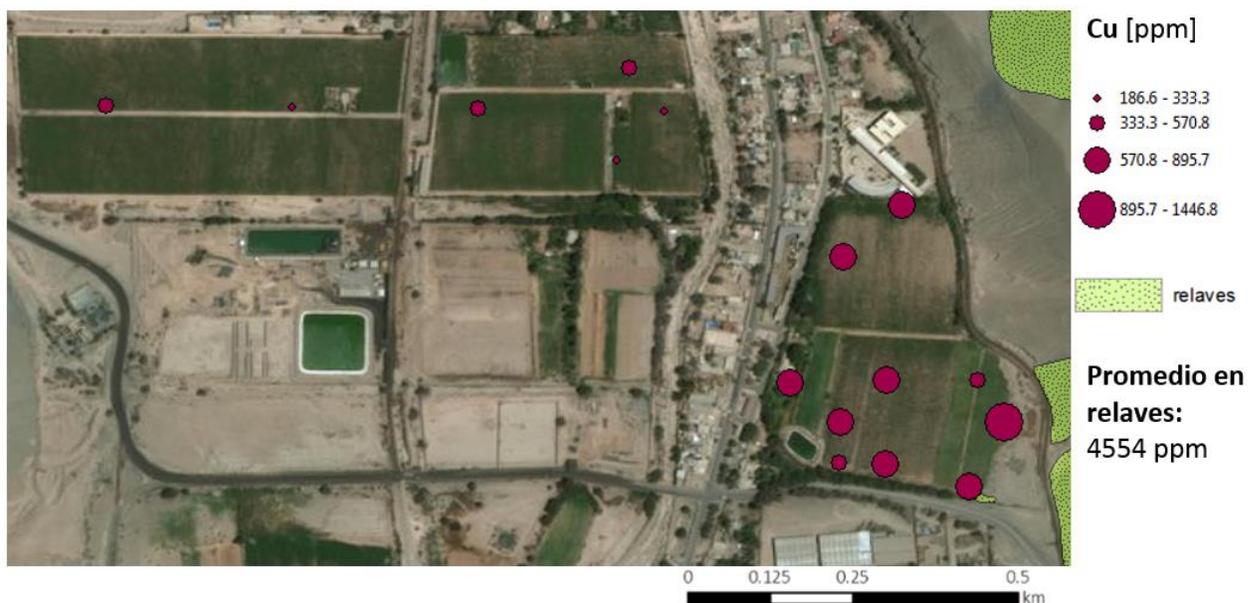


Figura 29. Distribución de concentración de Cu.

Dentro de las herramientas de análisis mineralógico utilizadas, la difracción de rayos X ofrece escasa información cuando lo que se quiere identificar son trazas minerales, dado que esta herramienta identifica por excelencia las fases principales (más abundantes, mejor conservadas) de las muestras sometidas a análisis, que no suelen ser más de 4 o 5 y que usualmente corresponden a minerales aportados por el material parental. Además, al ser suelos con importante presencia de materia orgánica el nivel de ruido de los difractogramas es bastante alto (al no tratarse de fases cristalinas) y la interpretación de los *peaks* de intensidad se respalda en bases de datos experimentales (*PDF-2*) y teóricas (*COD*), pero también conlleva subjetividad de quien interpreta, en cuanto a lo que se espera encontrar. En este sentido, para buscar trazas minerales —especialmente metálicos— lo que resulta mayormente útil es la realización de cortes pulidos. El principal impedimento para distinguir fases minerales en las muestras de suelo con lupa binocular es el tamaño de grano, pues existen muchas partículas de tamaño arcilloso adheridas a los granos de mayor tamaño

Bajo el tipo de muestreo escogido, se tomaron muestras en una profundidad de 20 cm. La profundidad escogida puede tener varias implicaciones. Por ejemplo, se debe tener en cuenta que la movilidad de los metales pesados es muy baja, pues suelen quedar acumulados en los primeros

centímetros del suelo, siendo lixiviados a los horizontes inferiores en muy pequeñas cantidades. Por eso, la presencia de altas concentraciones en el horizonte superior decrece drásticamente en profundidad cuando el aporte es antrópico (Huertos & Romero-Baena, 2008). Esto hace que sea interesante estudiar perfiles de suelo y no limitarse a un nivel de profundidad específico. Sin embargo, se puede considerar que la profundidad de muestreo es representativa, dado que el constante arado de los suelos agrícolas hace que la capa superficial del suelo sea relativamente homogénea.

5.6 Recomendaciones técnicas finales

Para una adecuada caracterización de la conformación de los suelos y el aporte material que realizan los residuos mineros, se recomienda:

- Tomar en cuenta la dirección predominante de los vientos cuando se estudia un sitio. Para ello se puede realizar una modelación de vientos a nivel de cuencas. El viento puede jugar un rol determinante en la migración de material y su dispersión y acumulación hacia otros sitios, sobre todo en cuanto al transporte de sales eflorescentes acumuladas en la superficie de tranques de relave.
- Una vez que exista un mapa geoquímico de la zona de estudio, se podría utilizar una técnica de teledetección consistente en identificar en imágenes satelitales distintos tipos de materiales según el mapa geoquímico de la zona. Se hacen corresponder zonas con determinados rangos de concentración geoquímica con colores de la imagen satelital y se elaboran polígonos; y con ello un mapa. Una vez establecidos los polígonos, estos se pueden comparar retroactivamente con imágenes satelitales pasadas y así entender cómo ha ido cambiando la distribución espacial de elementos químicos en una región.
- Para aumentar la fiabilidad del factor de enriquecimiento, sería útil utilizar al menos dos niveles *background*. Por ejemplo: el de rocas de litología predominante en el sector; un valor promedio de la corteza continental superior; y el del posible material parental, haciendo un muestreo secuencial en distintos horizontes del suelo.

Realizar muestreo por horizontes con suficiente cantidad de datos –idealmente más de 100 por nivel– para determinar distribución geoquímica de los suelos y usar un estimador geoestadístico como *kriging* en tres dimensiones; y además poder utilizar más herramientas de estadística multivariable.

6. CONCLUSIONES

En este estudio se analizaron suelos agrícolas ubicados en una zona rodeada de numerosos residuos mineros. La constitución de estos suelos reveló, en efecto, un origen antropogénico y un aporte claro proveniente de los relaves ubicados al costado oriental de los suelos. Se identificó que la fuente de aporte puede corresponder a transporte eólico, un flujo aluvial y la rotura de una tubería de agua de procesos. Se conjetura también que es incierto dimensionar el grado de enriquecimiento -o contaminación- sin un mapa geoquímico que señale niveles base de la zona. Más allá de eso, también es necesario integrar la mirada geoquímica con la mirada geomorfológica, estratigráfica y edafológica al momento de generar líneas base.

Además del aporte identificado por los relaves contiguos, existe un posible aporte metálico de fuentes lejanas. Independientemente de si esto ocurre realmente, la guía metodológica de gestión de suelos potencialmente contaminados con la cual trabaja el Ministerio del Medio Ambiente subestima el área de influencia de los focos potencialmente contaminantes al establecer prioridad solo hasta los 2 km de distancia del foco en cuestión. El agua de un aluvión tiene una acción erosiva que puede lavar los suelos; pero dicho lavado traslada y dispersa los sólidos que transporta en el flujo hacia otros sitios. Dada la imprevisibilidad de algunos eventos meteorológicos, es importante poner énfasis en realizar una caracterización realista de los suelos de Chile y sentar bases sólidas que permitan actualizar las bases de datos regularmente. Más aún, se recomienda no asumir niveles base correspondientes a rocas del sector, dado que el material parental de los suelos no necesariamente es una fuente rocosa uniforme en el horizonte más profundo del suelo, también puede corresponder a depósitos aluviales y fluviales, que por defecto poseen rocas de variadas fuentes.

Teniendo esto como base, se debe continuar la cadena de implementaciones para llegar a una gestión integral de calidad de suelos. En este sentido, la guía metodológica del Ministerio del Medio Ambiente resulta una herramienta transitoria para poder tomar acciones en el presente en cuanto a problemas ambientales, pero debe ser actualizada considerando la real dimensión de los elementos que tienen un rol en su conformación. Es importante entender que no se puede hablar de contaminación si no existe una norma con la cual medir y determinar si una sustancia química se encuentra efectivamente en concentraciones contaminantes.

-

7. BIBLIOGRAFÍA

- Abraham, G. M. S., & Parker, R. J. (2008). Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand. *Environmental monitoring and assessment*, 136(1-3), 227-238.
- Anderson, R., Hallet, B. (1985). Sediment transport by wind: toward a general model. *Geological Society of America Bulletin* 1986; 97, no. 5; 523–535
- Arévalo, C. (1995). Mapa Geológico de la Hoja Copiapó, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Documentos de Trabajo, No. 8, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Arévalo, C. (2005). Carta Los Loros, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- BCN (2011). Historia de la Ley N° 20.551 que regula el cierre de faenas e instalaciones mineras. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.
- Bhuiyan, M. A., Parvez, L., Islam, M. A., Dampare, S. B., & Suzuki, S. (2010). Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh. *Journal of hazardous materials*, 173(1-3), 384-392.
- Biese–Nickel, W.A. (1942). La distribución del Cretáceo inferior al sur de Copiapó. In *Anales del Primer Congreso Panamericano de Ingeniería de Minas y Geología*. Actas, 2: 429–466. Santiago de Chile.
- Buat-Menard, P., & Chesselet, R. (1979). Variable influence of the atmospheric flux on the trace metal chemistry of oceanic suspended matter. *Earth and Planetary Science Letters*, 42(3), 399-411.
- CENMA (2012). Investigación preliminar y confirmatoria de suelos con potencial presencia de contaminantes (SPPC); Comunas de Copiapó y Tierra Amarilla. Informe técnico preparado por el Centro Nacional del Medioambiente para el Ministerio del Medio Ambiente.
- CGR (1990). Recopilación de leyes y reglamentos. Contraloría General de la República. División de Coordinación e Información Jurídica: Tomo 97.
- Clark, A. H., Mayer, A. E. S., Mortimer, C., Sillitoe, R. H., Cooke, R. U., & Snelling, N. J. (1967). Implications of the isotopic ages of ignimbrite flows, southern Atacama Desert, Chile. *Nature*, 215(5102), 723.
- Demetriades, A., Birke, M. (2015). Urban Topsoil Geochemical Mapping Manual (URGE II). EuroGeoSurveys, Brussels, 52.

- Dold, B., Fontboté, L. (2002). A mineralogical and geochemical study of element mobility in sulfide mine tailings of Fe oxide Cu–Au deposits from the Punta del Cobre belt, northern Chile. *Chemical Geology*, 189(3-4), 135-163.
- Dold, B. (2010). Basic concepts in environmental geochemistry of sulfidic mine-waste management. In *Waste management. InTech*.
- Doménech, X. (1995). *Soil chemistry and its applications*. Miraguano Ediciones, Madrid.
- Emery, Xavier (2015a) Análisis Estadístico. Material del curso "Análisis Estadístico y Geoestadístico de Datos", impartido en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile
- Emery, Xavier (2015b) Geoestadística. Material del curso "Análisis Estadístico y Geoestadístico de Datos", impartido en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile
- EPA (2015). Project Quality Assurance and Quality Control. En *Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods, EPA publication SW-846* (tercera edición), Actualización V (2015).
- FAO–UNESCO (2007). Digital soil map of the world. Disponible en: <https://worldmap.harvard.edu/maps/462>
- Fernández, G. (1936). *Minería y metalurgia colonial en el Reyno de Chile: una visión a través del informe de don Juan Egaña al Real Tribunal de Minería en 1803*. Santiago de Chile: [s. n.], 2000 (Santiago de Chile: AGD Impresores), 261 p.
- Filzmoser, P., Croux, C. (2003). Dimension reduction of the explanatory variables in multiple linear regression. *Pliska Studia Mathematica Bulgarica*, 14(1), 59p-70p.
- Fundación Chile (2017). Programa Tranque: Monitoreo de avanzada para una minería responsable. Disponible en: <https://fch.cl/proyecto/sustentabilidad/tranque>.
- Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., Jones, A., Krasilnikov, P., Mendonça Santos Brefin, M.L., Montanarella, L., Muñiz Ugarte, O., Schad, P., Vara Rodríguez, M.I., Vargas, R. (eds), (2014). *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe*, Comisión Europea. Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, L–2995 Luxembourg, 176 p.
- Godoy, E.; Marquardt, C.; Blanco, N. (2003). Carta Caldera, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 76, 39 p., 1 mapa escala 1:100.000.
- Gotway, C. A., Ferguson, R. B., Hergert, G. W., & Peterson, T. A. (1996). Comparison of kriging and inverse-distance methods for mapping soil parameters. *Soil Science Society of America Journal*, 60(4), 1237-1247.

- Graffam, G., Carevic, A., Rivera, M. (1995). Evidencias metalúrgicas de fundición de cobre en el sitio Formativo Tardío de Ramaditas, Quebrada de Guatacondo, Provincia de Iquique, Chile. *Estudios Atacameños*, (12), 53–67. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/25674649>
- Grover, B. P. C., Johnson, R. H., Billing, D. G., Weiersbye, I. M. G., & Tutu, H. (2016). Mineralogy and geochemistry of efflorescent minerals on mine tailings and their potential impact on water chemistry. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(8), 7338-7348.
- Huertos, E. G., Romero-Baena, A. J. (2008). Contaminación de suelos por metales pesados. *Macla: revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, (10), 48-60.
- ICOLD, U. (2001). Tailings Dams–Risk of Dangerous Occurrences, Lessons Learnt From Practical Experiences (Bulletin 121). Commission Internationale des Grands Barrages, Paris.
- Kaiser, H. (1958). The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika*, 23(3), 187-200.
- Kravchenko, A. N. (2003). Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. *Soil Science Society of America Journal*, 67(5), 1564-1571.
- Leighton, W.L. (2010). Suelos de Chile. Universidad de Chile. 364 p.
- Loska, K., Cebula, J., Pelczar, J., Wiechuła, D., & Kwapuliński, 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*, 93(1-4), 347-365.
- Maksaev, V., Townley, B., Palacios, C. and Camus, F. Metallic ore deposits. In: Moreno T. and Gibbons, W. (2007). *The Geology of Chile*. The Geological Society, London, p. 179-199.
- Manta, D. S., Angelone, M., Bellanca, A., Neri, R., & Sprovieri, M. (2002). Heavy metals in urban soils: a case study from the city of Palermo (Sicily), Italy. *Science of the total environment*, 300(1-3), 229-243.
- Méndez, L.M. (2004). *La exportación minera en Chile, 1800–1840: Un estudio de historia económica y social en la transición de la Colonia a la República* (Santiago de Chile: Editorial Universitaria).
- Mikesell, R. F. (2013). *The world copper industry: structure and economic analysis*. Routledge.
- MMA (2012). *Guía metodológica para la gestión de suelos con potencial presencia de contaminantes*. Ministerio del Medio Ambiente y Fundación Chile, 147 p.

- MMA (2016). Informe del estado del medioambiente. Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile, 557 p.
- Mortimer, C. (1973). The Cenozoic history of the Southern Atacama Desert, Chile. *Journal of Geological Society of London*, mVol. 129, p. 505–526
- Nolting, R. F., Ramkema, A., & Everaarts, J. M. (1999). The geochemistry of Cu, Cd, Zn, Ni and Pb in sediment cores from the continental slope of the Banc d'Arguin (Mauritania). *Continental Shelf Research*, 19(5), 665–691.
- Oroz, M. D. R. (2011). Caracterización de los suelos de una cuenca forestal: Estudio de los contaminantes metálicos y su dinámica en el sistema edáfico (Tesis Dcotoral, Universidad de Navarra).
- Oyarzun, R., Higuera, P., & Lillo, J. (2011). Minería ambiental: Una introducción a los impactos y su remediación. Ediciones GEMM-Aula2punto.net.
- Pamukçu, E., Bozdoğan, H., & Çalık, S. (2015). A novel hybrid dimension reduction technique for undersized high dimensional gene expression data sets using information complexity criterion for cancer classification. *Computational and mathematical methods in medicine*, 2015.
- Pastor, M.; Quecedo, M.; Merodo, J.A.F.; Herreros, M.I.; Gonzalez, E.; Mira, P., (2002). Modelling tailings dams and mine waste dumps failures. *Géotechnique* 2002, 52, 579–591.
- Puga, F. (1908). *Reseña Histórica de la Higiene Pública en Chile*. Santiago: Editorial Nacimiento, 425 p.
- Reimann C., de Caritat P. (1998). Chemical elements in the environment. Factsheets for the geochemist and environmental scientist. Springer–Verlag, Berlin Heidelberg New York. ISBN 3–540–63670–6.
- 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.
- Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R. G., Dutter, R. (2008). *Statistical data analysis explained. Applied Environmental Statistics*. R. Wiley, Chichester.
- Rodríguez Ortiz, J. C., Alcalá Jáuregui, J. A., Hernández Montoya, A., Rodríguez Fuentes, H., Ruiz Espinoza, F. H., García Hernández, J. L., & Díaz Flores, P. E. (2014). Elementos traza en fertilizantes y abonos utilizados en agricultura orgánica y convencional. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(4), 695-701.
- Rollinson, H. R. (2014). *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Routledge.

- Segerstrom, K.; Parker, R.L. (1959). Cuadrángulo Cerrillos. Provincia de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, Vol. 1, No. 2, 33 p., 1 mapa escala 1: 50.000.
- Segerstrom, K.; Ruiz, C. (1962). Cuadrángulo Copiapó. Provincia de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, Vol. 3, No. 1, 115 p. 1 mapa escala 1: 50.000
- SERNAGEOMIN (2011). Atlas de faenas mineras: Regiones de Antofagasta y Atacama (Versión Actualizada). Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas y Estadísticas de Faenas Mineras de Chile No 7: 153 p. Santiago.
- SERNAGEOMIN (2015a). Anuario de la minería de Chile. 256 p., Santiago, Chile.
- SERNAGEOMIN (2015b). Guía metodológica para la estabilidad química de faenas e instalaciones mineras. Servicio Nacional de Geología y Minería, Fundación Chile, y colaboradores.
- SERNAGEOMIN (2017). Programa de cartografía geoquímica: avances y proyecciones. Seminario en Antofagasta. Unidad de Geoquímica del Servicio Nacional de Geología y Minería.
- SERNAGEOMIN (2018a). Catastro de Depósitos de Relaves en Chile (actualización 27-03-2018). Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Depósitos de Relaves, Santiago, Chile.
- SERNAGEOMIN (2018b). Preguntas frecuentes sobre relaves. Disponible en: <http://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/01/Preguntas-frecuentes-sobre-relaves.pdf>.
- Sillitoe, R. H. (1976). Andean mineralization: a model for the metallogeny of convergent plate margins. Geological Association of Canada, Special Paper, 14, 59-100.
- Sutherland, R. (2000). Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. Environmental Geology 39, 611-27.
- Wothke, W. (1993) Nonpositive definite matrices in structural modeling. In K.A. Bollen & J.S. Long (Eds.), Testing Structural Equation Models. Newbury Park NJ: Sage. (Chap. 11, pp. 256-293).
- Zazueta, S. M., Figueroa, D. M., & Anaya, R. (2011). Contaminación de metales en zonas residenciales debido a jales de actividades mineras en ambientes semiáridos: Caso: Nacozari, Sonora México. En: Técnicas aplicadas a la Caracterización y Aprovechamiento de Recursos Geológico-Mineros. Vol II: Procesos Experimentales.

ANEXOS

A1. Fichas de descripción de terreno

A1.1 Muestreo de suelos

Tabla 11. Muestra P101

OBSERVACIONES DE CAMPO PARA MUESTRAS TOPSOIL							
ID MUESTRA:	P101	FECHA:	19/12/2017				
UBICACIÓN							
LOCALIDAD:	Punta del Cobre	COMUNA:	Tierra Amarilla				
COORDENADAS (En proyección UTM; Datum WGS 1984)							
Zona:	19 J	X:	375302	Y:	6958108		
DESCRIPCIÓN DEL SITIO							
Paisaje:	agrícola/desértico	Altura:	507 m s.n.m.				
USO DEL SUELO							
<input checked="" type="checkbox"/>	Agrícola	<input type="checkbox"/>	Ninguno	<input type="checkbox"/>	Residencial	<input type="checkbox"/>	Otro:
Litología roca base:				No se observan afloramientos			
Formación:				Sobre depósitos aluviales (Qf), colindante con Fm Punta del Cobre (JKpc) y Gravas de Atacama (Mga)			
Número de horizontes visibles:				1			
Intervalo de topsoil (cm):				0–25 cm			
Abundancia de clastos % (> 2 mm):				30%			
TEXTURA:				areno–limosa			
HUMEDAD:				seco			
CONTENIDO ORGÁNICO:				bajo			
OBSERVACIONES:		Predio 1					

Fotografía muestra (con código)	Fotografía sitio muestreado
	
Fotografía hacia el norte	Fotografía hacia el este
	
Fotografía hacia el sur	Fotografía hacia el oeste
	
Fotografía de horizonte de suelo	Fotografía adicional:
	

Tabla 12. Muestra P102

OBSERVACIONES DE CAMPO PARA MUESTRAS TOPSOIL	
ID MUESTRA:	P102
FECHA:	19/12/2017
UBICACIÓN	
LOCALIDAD:	Punta del Cobre
COMUNA:	Tierra Amarilla
COORDENADAS (En proyección UTM; Datum WGS 1984)	
Zona:	19 J
X:	375265
Y:	6958031
DESCRIPCIÓN DEL SITIO	
Paisaje:	agrícola/desértico
Altura:	504 m s.n.m.
USO DEL SUELO	
<input checked="" type="checkbox"/>	Agrícola
<input type="checkbox"/>	Ninguno
<input type="checkbox"/>	Residencial
<input type="checkbox"/>	Otro:
Litología roca base:	No se observan afloramientos
Formación:	Sobre depósitos aluviales (Qf), colindante con Fm Punta del Cobre (JKpc) y Gravas de Atacama (Mga)
Número de horizontes visibles:	1
Intervalo de topsoil (cm):	0–25 cm
Abundancia de clastos % (> 2 mm):	30%
TEXTURA:	areno-limosa
HUMEDAD:	seco
CONTENIDO ORGÁNICO:	bajo
OBSERVACIONES:	Predio 1

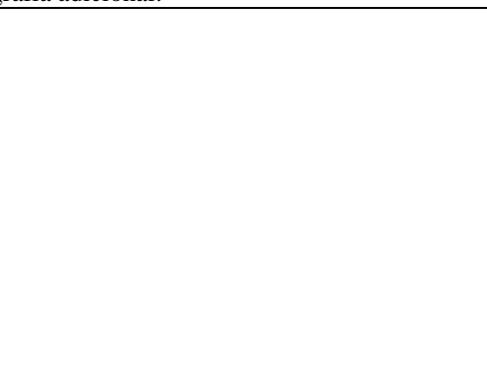
Fotografía muestra (con código)	Fotografía sitio muestreado
	
Fotografía hacia el norte	Fotografía hacia el este
	
Fotografía hacia el sur	Fotografía hacia el oeste
	
Fotografía de horizonte de suelo	Fotografía adicional:
	

Tabla 13. Muestra P103

OBSERVACIONES DE CAMPO PARA MUESTRAS TOPSOIL	
ID MUESTRA: P103	FECHA: 19/12/2017
UBICACIÓN	
LOCALIDAD: Punta del Cobre	COMUNA: Tierra Amarilla
COORDENADAS (En proyección UTM; Datum WGS 1984)	
Zona: 19 J	X: 375272 Y: 6958158
DESCRIPCIÓN DEL SITIO	
Paisaje: agrícola/desértico	Altura: 499 m s.n.m.
USO DEL SUELO	
<input checked="" type="checkbox"/>	Agrícola
<input type="checkbox"/>	Ninguno
<input type="checkbox"/>	Residencial
<input type="checkbox"/>	Otro:
Litología roca base:	No se observan afloramientos
Formación:	Sobre depósitos aluviales (Qf), colindante con Fm Punta del Cobre (JKpc) y Gravas de Atacama (Mga)
Número de horizontes visibles:	1
Intervalo de topsoil (cm):	0–25 cm
Abundancia de clastos % (> 2 mm):	30%
TEXTURA:	areno-limosa
HUMEDAD:	seco
CONTENIDO ORGÁNICO:	bajo
OBSERVACIONES:	Predio 1

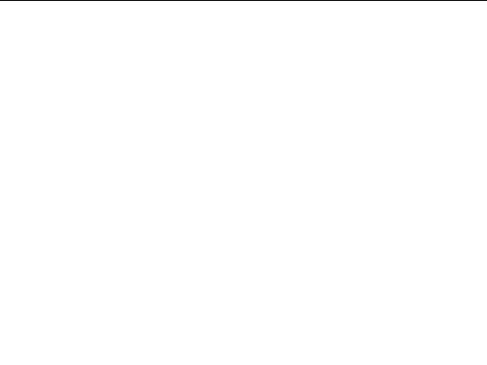
Fotografía muestra (con código)	Fotografía sitio muestreado
	
Fotografía hacia el norte	Fotografía hacia el este
	
Fotografía hacia el sur	Fotografía hacia el oeste
	
Fotografía de horizonte de suelo	Fotografía adicional:
	

Tabla 14. Muestra P104

OBSERVACIONES DE CAMPO PARA MUESTRAS TOPSOIL	
ID MUESTRA: P104	FECHA: 19/12/2017
UBICACIÓN	
LOCALIDAD: Punta del Cobre	COMUNA: Tierra Amarilla
COORDENADAS (En proyección UTM; Datum WGS 1984)	
Zona: 19 J	X: 375175 Y: 6958057
DESCRIPCIÓN DEL SITIO	
Paisaje: agrícola	Altura: 507 m s.n.m.
USO DEL SUELO	
<input checked="" type="checkbox"/>	Agrícola
<input type="checkbox"/>	Ninguno
<input type="checkbox"/>	Residencial
<input type="checkbox"/>	Otro:
Litología roca base:	No se observan afloramientos
Formación:	Sobre depósitos aluviales (Qf), colindante con Fm Punta del Cobre (JKpc) y Gravas de Atacama (Mga)
Número de horizontes visibles:	1
Intervalo de topsoil (cm):	0–25 cm
Abundancia de clastos % (> 2 mm):	30%
TEXTURA:	areno-limosa
HUMEDAD:	seco
CONTENIDO ORGÁNICO:	bajo
OBSERVACIONES:	Predio 1 presencia de algunas raíces

Fotografía muestra (con código)	Fotografía sitio muestreado
	
Fotografía hacia el norte	Fotografía hacia el este
	
Fotografía hacia el sur	Fotografía hacia el oeste
	
Fotografía de horizonte de suelo	Fotografía adicional:
	

Tabla 15. Muestra P105

OBSERVACIONES DE CAMPO PARA MUESTRAS TOPSOIL	
ID MUESTRA: P105	FECHA: 20/12/2017
UBICACIÓN	
LOCALIDAD: Punta del Cobre	COMUNA: Tierra Amarilla
COORDENADAS (En proyección UTM; Datum WGS 1984)	
Zona: 19 J	X: 375175 Y: 6958157
DESCRIPCIÓN DEL SITIO	
Paisaje: agrícola	Altura: 505 m s.n.m.
USO DEL SUELO	
<input checked="" type="checkbox"/>	Agrícola
<input type="checkbox"/>	Ninguno
<input type="checkbox"/>	Residencial
<input type="checkbox"/>	Otro:
Litología roca base:	No se observan afloramientos
Formación:	Sobre depósitos aluviales (Qf), colindante con Fm Punta del Cobre (JKpc) y Gravas de Atacama (Mga)
Número de horizontes visibles:	1
Intervalo de topsoil (cm):	0–25 cm
Abundancia de clastos % (> 2 mm):	30%
TEXTURA:	areno-limosa
HUMEDAD:	seco
CONTENIDO ORGÁNICO:	bajo
OBSERVACIONES:	Predio 1 presencia de algunas raíces

<p>Fotografía muestra (con código)</p> 	<p>Fotografía sitio muestreado</p> 
<p>Fotografía hacia el norte</p> 	<p>Fotografía hacia el este</p> 
<p>Fotografía hacia el sur</p> 	<p>Fotografía hacia el oeste</p> 
<p>Fotografía de horizonte de suelo</p> 	<p>Fotografía adicional:</p>

Tabla 16. Muestra P106

OBSERVACIONES DE CAMPO PARA MUESTRAS TOPSOIL	
ID MUESTRA: P106	FECHA: 19/12/2017
UBICACIÓN	
LOCALIDAD: Punta del Cobre	COMUNA: Tierra Amarilla
COORDENADAS (En proyección UTM; Datum WGS 1984)	
Zona: 19 J	X: 375125 Y: 6958107
DESCRIPCIÓN DEL SITIO	
Paisaje: agrícola	Altura: 504 m s.n.m.
USO DEL SUELO	
<input checked="" type="checkbox"/>	Agrícola
<input type="checkbox"/>	Ninguno
<input type="checkbox"/>	Residencial
<input type="checkbox"/>	Otro:
Litología roca base:	No se observan afloramientos
Formación:	Sobre depósitos aluviales (Qf), colindante con Fm Punta del Cobre (JKpc) y Gravas de Atacama (Mga)
Número de horizontes visibles:	1
Intervalo de topsoil (cm):	0–25 cm
Abundancia de clastos % (> 2 mm):	30%
TEXTURA:	areno-limosa
HUMEDAD:	seco
CONTENIDO ORGÁNICO:	bajo
OBSERVACIONES:	Predio 1 presencia de algunas raíces

<p>Fotografía muestra (con código)</p> 	<p>Fotografía sitio muestreado</p> 
<p>Fotografía hacia el norte</p> 	<p>Fotografía hacia el este</p> 
<p>Fotografía hacia el sur</p> 	<p>Fotografía hacia el oeste</p> 
<p>Fotografía de horizonte de suelo</p> 	<p>Fotografía adicional:</p>

Tabla 17. Muestra P107

OBSERVACIONES DE CAMPO PARA MUESTRAS TOPSOIL	
ID MUESTRA:	P107
FECHA:	19/12/2017
UBICACIÓN	
LOCALIDAD:	Punta del Cobre
COMUNA:	Tierra Amarilla
COORDENADAS (En proyección UTM; Datum WGS 1984)	
Zona:	19 J
X:	375071
Y:	6958154
DESCRIPCIÓN DEL SITIO	
Paisaje:	Rural/residencial
Altura:	513 m s.n.m.
USO DEL SUELO	
<input type="checkbox"/>	Agrícola
<input type="checkbox"/>	Ninguno
<input checked="" type="checkbox"/>	Residencial
<input type="checkbox"/>	Otro:
Litología roca base:	No se observan afloramientos
Formación:	Sobre depósitos aluviales (Qf), colindante con Fm Punta del Cobre (JKpc) y Gravas de Atacama (Mga)
Número de horizontes visibles:	3
Intervalo de topsoil (cm):	0–20 cm
Abundancia de clastos % (> 2 mm):	25%
TEXTURA:	areno-limosa
HUMEDAD	seco
CONTENIDO ORGÁNICO:	bajo
OBSERVACIONES:	Predio 1 presencia de un horizonte rico en orgánicos (restos de cortezas/raíces). Muestra tomada en la interfase de este horizonte con horizonte inferior

<p>Fotografía muestra (con código)</p> 	<p>Fotografía sitio muestreado</p> 
<p>Fotografía hacia el norte</p> 	<p>Fotografía hacia el este</p> 
<p>Fotografía hacia el sur</p> 	<p>Fotografía hacia el oeste</p> 
<p>Fotografía de horizonte de suelo</p> 	<p>Fotografía adicional:</p>

Tabla 18. Muestra P109

OBSERVACIONES DE CAMPO PARA MUESTRAS TOPSOIL	
ID MUESTRA:	P109
FECHA:	20/12/2017
UBICACIÓN	
LOCALIDAD:	Punta del Cobre
COMUNA:	Tierra Amarilla
COORDENADAS (En proyección UTM; Datum WGS 1984)	
Zona:	19 J
X:	375127
Y:	6958305
DESCRIPCIÓN DEL SITIO	
Paisaje:	agrícola
Altura:	502 m s.n.m.
USO DEL SUELO	
<input checked="" type="checkbox"/>	Agrícola
<input type="checkbox"/>	Ninguno
<input type="checkbox"/>	Residencial
<input type="checkbox"/>	Otro:
Litología roca base:	No se observan afloramientos
Formación:	Sobre depósitos aluviales (Qf), colindante con Fm Punta del Cobre (JKpc) y Gravas de Atacama (Mga)
Número de horizontes visibles:	1
Intervalo de topsoil (cm):	0–25 cm
Abundancia de clastos % (> 2 mm):	30%
TEXTURA:	areno-limosa
HUMEDAD	seco
CONTENIDO ORGÁNICO:	bajo
OBSERVACIONES:	Predio 1 presencia de algunas raíces

<p>Fotografía muestra (con código)</p> 	<p>Fotografía sitio muestreado</p> 
<p>Fotografía hacia el norte</p> 	<p>Fotografía hacia el este</p> 
<p>Fotografía hacia el sur</p> 	<p>Fotografía hacia el oeste</p> 
<p>Fotografía de horizonte de suelo</p> 	<p>Fotografía adicional:</p>

Tabla 19. Muestra P110

OBSERVACIONES DE CAMPO PARA MUESTRAS TOPSOIL			
ID MUESTRA:	P110	FECHA:	20/12/2017
UBICACIÓN			
LOCALIDAD:	Punta del Cobre	COMUNA:	Tierra Amarilla
COORDENADAS (En proyección UTM; Datum WGS 1984)			
Zona:	19 J	X:	375189
		Y:	6958368
DESCRIPCIÓN DEL SITIO			
Paisaje:	agrícola/residencial	Altura:	504 m s.n.m.
USO DEL SUELO			
<input checked="" type="checkbox"/>	Agrícola		
<input type="checkbox"/>	Ninguno		
<input type="checkbox"/>	Residencial		
<input type="checkbox"/>	Otro:		
Litología roca base:	No se observan afloramientos		
Formación:	Sobre depósitos aluviales (Qf), colindante con Fm Punta del Cobre (JKpc) y Gravas de Atacama (Mga)		
Número de horizontes visibles:	1		
Intervalo de topsoil (cm):	0–25 cm		
Abundancia de clastos % (> 2 mm):	30%		
TEXTURA:	areno–limosa		
HUMEDAD:	seco		
CONTENIDO ORGÁNICO:	bajo		
OBSERVACIONES:	Predio 1 presencia de algunas raíces		

<p>Fotografía muestra (con código)</p> 	<p>Fotografía sitio muestreado</p> 
<p>Fotografía hacia el norte</p> 	<p>Fotografía hacia el este</p> 
<p>Fotografía hacia el sur</p> 	<p>Fotografía hacia el oeste</p> 
<p>Fotografía de horizonte de suelo</p> 	<p>Fotografía adicional:</p>

Tabla 20. Muestra P112

OBSERVACIONES DE CAMPO PARA MUESTRAS TOPSOIL	
ID MUESTRA:	P112
FECHA:	20/12/2017
UBICACIÓN	
LOCALIDAD:	Punta del Cobre
COMUNA:	Tierra Amarilla
COORDENADAS (En proyección UTM; Datum WGS 1984)	
Zona:	19 J
X:	375124
Y:	6958058
DESCRIPCIÓN DEL SITIO	
Paisaje:	agrícola
Altura:	504 m s.n.m.
USO DEL SUELO	
<input checked="" type="checkbox"/>	Agrícola
<input type="checkbox"/>	Ninguno
<input type="checkbox"/>	Residencial
<input type="checkbox"/>	Otro:
Litología roca base:	No se observan afloramientos
Formación:	Sobre depósitos aluviales (Qf), colindante con Fm Punta del Cobre (JKpc) y Gravas de Atacama (Mga)
Número de horizontes visibles:	1
Intervalo de topsoil (cm):	0–25 cm
Abundancia de clastos % (> 2 mm):	30%
TEXTURA:	areno–limosa
HUMEDAD:	Humedad baja
CONTENIDO ORGÁNICO:	bajo
OBSERVACIONES:	Predio 1. Presencia de algunas raíces. Punto se encuentra al lado de la fuente del sistema de riego. Se observan costras amarillentas encima (tras la marca del regadío), lo cual se registró en la última imagen.

<p>Fotografía muestra (con código)</p> 	<p>Fotografía sitio muestreado</p> 
<p>Fotografía hacia el norte</p> 	<p>Fotografía hacia el este</p> 
<p>Fotografía hacia el sur</p> 	<p>Fotografía hacia el oeste</p> 
<p>Fotografía de horizonte de suelo</p> 	<p>Fotografía adicional: coloración superficial</p> 

Tabla 21. Muestra P201

OBSERVACIONES DE CAMPO PARA MUESTRAS TOPSOIL	
ID MUESTRA: P201	FECHA: 21/12/2017
UBICACIÓN	
LOCALIDAD: Punta del Cobre	COMUNA: Tierra Amarilla
COORDENADAS (En proyección UTM; Datum WGS 1984)	
Zona: 19 J	X: 374932
	Y: 6958478
DESCRIPCIÓN DEL SITIO	
Paisaje: agrícola	Altura: 504 m s.n.m.
USO DEL SUELO	
<input checked="" type="checkbox"/> Agrícola	
<input type="checkbox"/> Ninguno	
<input type="checkbox"/> Residencial	
<input type="checkbox"/> Otro:	
Litología roca base: No se observan afloramientos	
Formación: Sobre depósitos aluviales (Qf), colindante con Fm Punta del Cobre (JKpc) y Gravas de Atacama (Mga)	
Número de horizontes visibles: 1	
Intervalo de topsoil (cm): 0–30 cm	
Abundancia de clastos % (> 2 mm): 10%	
TEXTURA: areno–limosa	
HUMEDAD húmedo	
CONTENIDO ORGÁNICO: bajo–medio	
OBSERVACIONES:	Predio 2

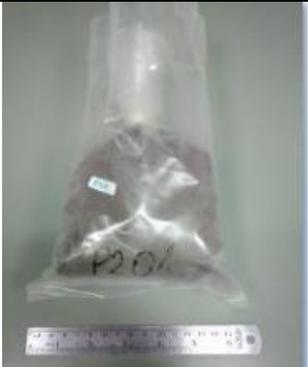
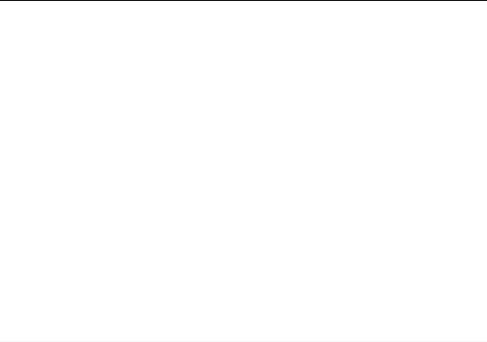
Fotografía muestra (con código)	Fotografía sitio muestreado
	
Fotografía hacia el norte	Fotografía hacia el este
	
Fotografía hacia el sur	Fotografía hacia el oeste
	
Fotografía de horizonte de suelo	Fotografía adicional:
	

Tabla 22. Muestra P202

OBSERVACIONES DE CAMPO PARA MUESTRAS TOPSOIL	
ID MUESTRA: P202	FECHA: 22/12/2017
UBICACIÓN	
LOCALIDAD: Punta del Cobre	COMUNA: Tierra Amarilla
COORDENADAS (En proyección UTM; Datum WGS 1984)	
Zona: 19 J	X: 374882
	Y: 6958420
DESCRIPCIÓN DEL SITIO	
Paisaje: agrícola	Altura: 499 m s.n.m.
USO DEL SUELO	
<input checked="" type="checkbox"/> Agrícola	
<input type="checkbox"/> Ninguno	
<input type="checkbox"/> Residencial	
<input type="checkbox"/> Otro:	
Litología roca base: No se observan afloramientos	
Formación: Sobre depósitos aluviales (Qf), colindante con Fm Punta del Cobre (JKpc) y Gravas de Atacama (Mga)	
Número de horizontes visibles: 1	
Intervalo de topsoil (cm): 0–30 cm	
Abundancia de clastos % (> 2 mm): 10%	
TEXTURA: areno–limosa	
HUMEDAD: húmedo	
CONTENIDO ORGÁNICO: medio	
OBSERVACIONES:	Predio 2

Fotografía muestra (con código)	Fotografía sitio muestreado
	
Fotografía hacia el norte	Fotografía hacia el este
	
Fotografía hacia el sur	Fotografía hacia el oeste
	
Fotografía de horizonte de suelo	Fotografía adicional:
	

Tabla 23. Muestra P211

OBSERVACIONES DE CAMPO PARA MUESTRAS TOPSOIL	
ID MUESTRA: P211	FECHA: 22/12/2017
UBICACIÓN	
LOCALIDAD: Punta del Cobre	COMUNA: Tierra Amarilla
COORDENADAS (En proyección UTM; Datum WGS 1984)	
Zona: 19 J	X: 374894 Y: 6958531
DESCRIPCIÓN DEL SITIO	
Paisaje: agrícola	Altura: 507 m s.n.m.
USO DEL SUELO	
<input checked="" type="checkbox"/>	Agrícola
<input type="checkbox"/>	Ninguno
<input type="checkbox"/>	Residencial
<input type="checkbox"/>	Otro:
Litología roca base:	No se observan afloramientos
Formación:	Sobre depósitos aluviales (Qf), colindante con Fm Punta del Cobre (JKpc) y Gravas de Atacama (Mga)
Número de horizontes visibles:	1
Intervalo de topsoil (cm):	0–30 cm
Abundancia de clastos % (> 2 mm):	10%
TEXTURA:	areno–limosa
HUMEDAD:	húmedo
CONTENIDO ORGÁNICO:	medio
OBSERVACIONES:	Predio 2

Fotografía muestra (originalmente etiquetada 202b)	Fotografía sitio muestreado
	
Fotografía hacia el norte	Fotografía hacia el este
	
Fotografía hacia el sur	Fotografía hacia el oeste
	
Fotografía de horizonte de suelo	Fotografía adicional:
	

Tabla 24. Muestra P204

OBSERVACIONES DE CAMPO PARA MUESTRAS TOPSOIL	
ID MUESTRA: P204	FECHA: 22/12/2017
UBICACIÓN	
LOCALIDAD: Punta del Cobre	COMUNA: Tierra Amarilla
COORDENADAS (En proyección UTM; Datum WGS 1984)	
Zona: 19 J	X: 374732
	Y: 6958531
DESCRIPCIÓN DEL SITIO	
Paisaje: agrícola	Altura: 507 m s.n.m.
USO DEL SUELO	
<input checked="" type="checkbox"/> Agrícola	
<input type="checkbox"/> Ninguno	
<input type="checkbox"/> Residencial	
<input type="checkbox"/> Otro:	
Litología roca base: No se observan afloramientos	
Formación: Sobre depósitos aluviales (Qf), colindante con Fm Punta del Cobre (JKpc) y Gravas de Atacama (Mga)	
Número de horizontes visibles: 1	
Intervalo de topsoil (cm): 0–25 cm	
Abundancia de clastos % (> 2 mm): 10%	
TEXTURA: areno–limosa	
HUMEDAD: húmedo	
CONTENIDO ORGÁNICO: medio	
OBSERVACIONES:	Predio 2

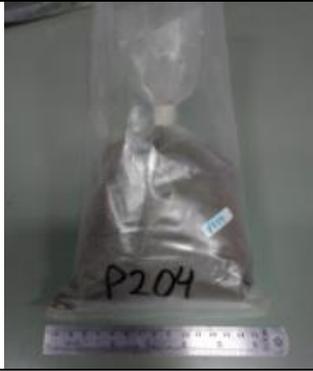
<p>Fotografía muestra</p> 	<p>Fotografía sitio muestreado</p> 
<p>Fotografía hacia el norte</p> 	<p>Fotografía hacia el este</p> 
<p>Fotografía hacia el sur</p> 	<p>Fotografía hacia el oeste</p> 
<p>Fotografía de horizonte de suelo</p> 	<p>Fotografía adicional:</p>

Tabla 25. Muestra P207

OBSERVACIONES DE CAMPO PARA MUESTRAS TOPSOIL	
ID MUESTRA: P207	FECHA: 22/12/2017
UBICACIÓN	
LOCALIDAD: Punta del Cobre	COMUNA: Tierra Amarilla
COORDENADAS (En proyección UTM; Datum WGS 1984)	
Zona: 19 J	X: 374532 Y: 6958480
DESCRIPCIÓN DEL SITIO	
Paisaje: agrícola	Altura: 502 m s.n.m.
USO DEL SUELO	
<input checked="" type="checkbox"/>	Agrícola
<input type="checkbox"/>	Ninguno
<input type="checkbox"/>	Residencial
<input type="checkbox"/>	Otro:
Litología roca base:	No se observan afloramientos
Formación:	Sobre depósitos aluviales (Qf), colindante con Fm Punta del Cobre (JKpc) y Gravas de Atacama (Mga)
Número de horizontes visibles:	1
Intervalo de topsoil (cm):	0–25 cm
Abundancia de clastos % (> 2 mm):	35%
TEXTURA:	arenosa
HUMEDAD:	seco
CONTENIDO ORGÁNICO:	bajo
OBSERVACIONES:	Predio 2

<p>Fotografía muestra</p> 	<p>Fotografía sitio muestreado</p> 
<p>Fotografía hacia el norte</p> 	<p>Fotografía hacia el este</p> 
<p>Fotografía hacia el sur</p> 	<p>Fotografía hacia el oeste</p> 
<p>Fotografía de horizonte de suelo</p> 	<p>Fotografía adicional:</p>

Tabla 26. Muestra P210

OBSERVACIONES DE CAMPO PARA MUESTRAS TOPSOIL	
ID MUESTRA: P210	FECHA: 22/12/2017
UBICACIÓN	
LOCALIDAD: Punta del Cobre	COMUNA: Tierra Amarilla
COORDENADAS (En proyección UTM; Datum WGS 1984)	
Zona: 19 J	X: 374330 Y: 6958484
DESCRIPCIÓN DEL SITIO	
Paisaje: agrícola	Altura: 501 m s.n.m.
USO DEL SUELO	
<input checked="" type="checkbox"/>	Agrícola
<input type="checkbox"/>	Ninguno
<input type="checkbox"/>	Residencial
<input type="checkbox"/>	Otro:
Litología roca base:	No se observan afloramientos
Formación:	Sobre depósitos aluviales (Qf), colindante con Fm Punta del Cobre (JKpc) y Gravas de Atacama (Mga)
Número de horizontes visibles:	1
Intervalo de topsoil (cm):	0–25 cm
Abundancia de clastos % (> 2 mm):	35%
TEXTURA:	arenosa
HUMEDAD:	húmedo
CONTENIDO ORGÁNICO:	bajo
OBSERVACIONES:	Predio 2

<p>Fotografía muestra</p> 	<p>Fotografía sitio muestreado</p> 
<p>Fotografía hacia el norte</p> 	<p>Fotografía hacia el este</p> 
<p>Fotografía hacia el sur</p> 	<p>Fotografía hacia el oeste</p> 
<p>Fotografía de horizonte de suelo</p> 	<p>Fotografía adicional:</p>

A1.2 Muestreo relaves

Tabla 27. Muestra R01

Muestra: R01	Tomada en:	Zona 19 J	X: 375362	Y: 6958041	altura: 511 m s.n.m.
Propiedad de:	Sin registro	Tomada el: 20/12/2017			
Fotografía muestra			Fotografía general de sitio		
					
Fotografía hacia el norte			Fotografía hacia el este		
					
Fotografía hacia el sur			Fotografía hacia el oeste		
					
Fotografía de sitio muestreado			Fotografía general relave (cubierto por gravas)		
					

Tabla 28. Muestra R02

Muestra: R02	Tomada en:	Zona 19 J	X: 375352	Y: 6958042	altura: 512 m s.n.m.
Propiedad de:	Sin registro	Tomada el: 20/12/2017			
Fotografía muestra			Fotografía general de sitio		
					
Fotografía hacia el norte			Fotografía hacia el este		
					
Fotografía hacia el sur			Fotografía hacia el oeste		
					
Fotografía de sitio muestreado			Fotografía general relave (cubierto por gravas)		
					

Tabla 29. Muestra R03

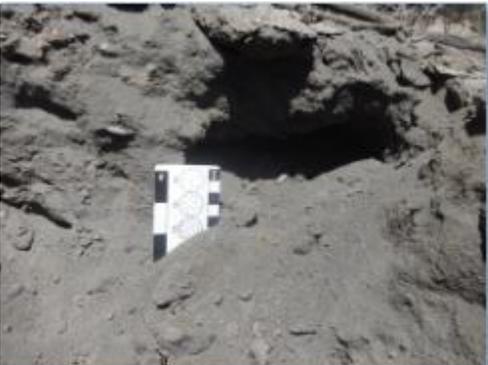
Muestra: R03	Tomada en:	Zona 19 J	X: 375273	Y: 6958020	altura: 505 m s.n.m.
Propiedad de:	Material contenido en lóbulo aluvial			Tomada el: 20/12/2017	
Fotografía muestra			Fotografía general de sitio		
					
Fotografía hacia el norte			Fotografía hacia el este		
					
Fotografía hacia el sur			Fotografía hacia el oeste		
					
Fotografía de sitio muestreado			Fotografía depósito aluvial (costado derecho)		
					

Tabla 30. Muestra R04

Muestra: R04	Tomada en:	Zona 19 J	X: 375273	Y: 6958020	altura: 505 m s.n.m.
Propiedad de:	Candelaria		Tomada el: 22/12/2017		
Fotografía muestra			Fotografía general de sitio		
					
Fotografía hacia el norte			Fotografía hacia el este		
					
Fotografía hacia el sur			Fotografía hacia el oeste		
					
Fotografía de sitio muestreado			Fotografía general de afloramiento		
					

A2. Datos geoquímicos obtenidos con ICP-MS

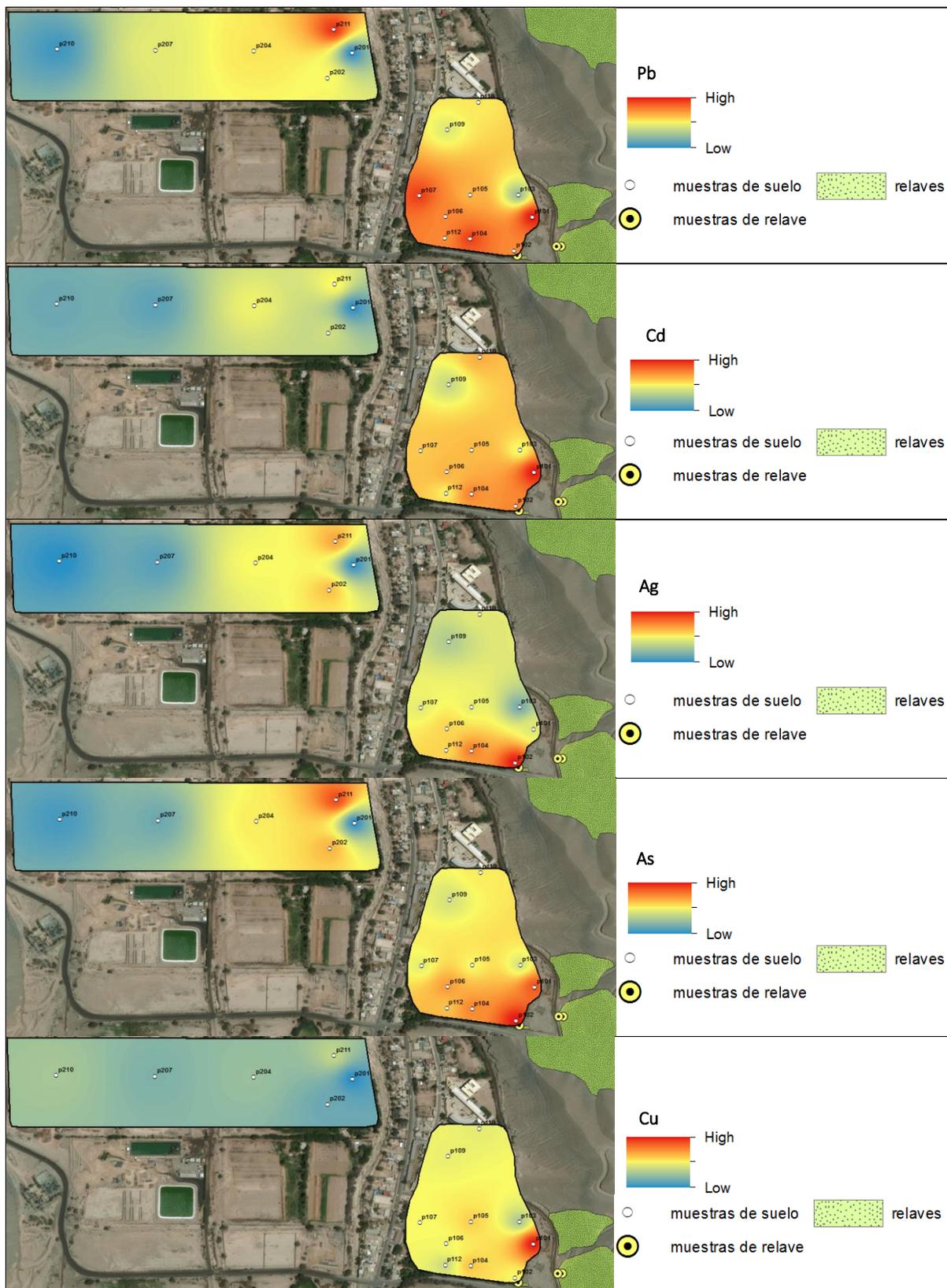
Tabla 31. Concentraciones químicas de 38 elementos de la tabla periódica en los suelos.

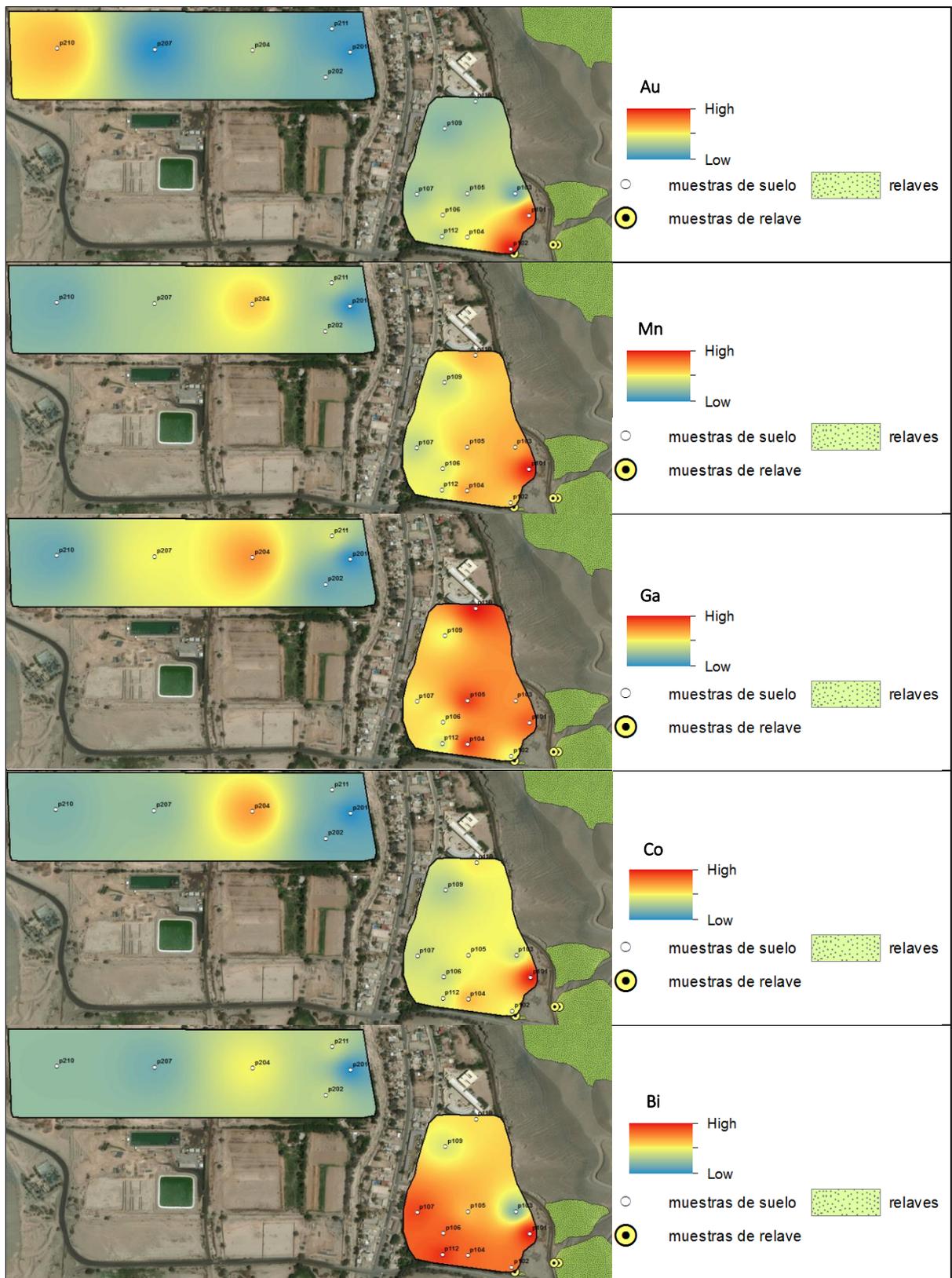
Muestra	Ag	Al	As	Au	B	Ba	Bi	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Ga	Hg	K	La	Mg
	<i>ppb</i>	%	<i>ppm</i>	<i>ppb</i>	<i>ppm</i>	<i>ppm</i>	<i>ppm</i>	%	<i>ppm</i>	<i>ppm</i>	<i>ppm</i>	<i>ppm</i>	%	<i>ppm</i>	<i>ppb</i>	%	<i>ppm</i>	%
P101	2532	1.75	90	105.5	10	242.5	2.86	4.25	1.14	25	20.9	1446.87	4.14	7.1	3007	0.24	16.1	1.17
P102	6380	1.66	101.4	116	10	229.3	2.37	4.02	0.94	18.2	24.6	739.21	3.22	6	6017	0.17	14.6	1.09
P103	993	1.92	48.8	16.6	10	155.4	0.8	4.49	0.71	17	26.6	472.8	3.39	6.7	889	0.23	15.1	1.28
P104	4845	2.34	79.6	55.3	10	252.5	2.44	5.15	0.94	20.2	26.6	895.75	3.6	7.3	6848	0.24	19.2	1.47
P105	2743	2.3	56.4	30	24	193	1.91	4.86	0.84	18.3	24.2	857.97	3.47	7.3	2749	0.3	17.2	1.46
P106	3530	1.85	75.5	48.2	10	215.3	2.5	4.73	0.85	16.7	21.8	720.35	3.16	6	3220	0.21	16.2	1.21
P107	2640	1.94	52	26.3	22	230.1	2.64	4.84	0.81	16.7	21.7	730.51	3.16	6.1	3172	0.27	16.3	1.22
P109	1760	1.95	47.9	21.9	24	184.4	1.34	4.64	0.62	15.9	23.4	676.04	3.06	6	1545	0.24	16.2	1.24
P110	2562	2.31	59.1	25.5	10	215.1	1.69	4.8	0.86	18.7	25.5	658.15	3.49	7.5	2668	0.35	18.9	1.43
P112	3519	1.82	67.5	36.5	10	200.5	2.75	4.39	0.74	17.3	21.2	570.84	3.29	5.8	4681	0.2	15.9	1.17
P201	398	1.47	21.7	8.9	10	113.8	0.53	2.88	0.4	13.2	20.1	186.64	3.02	4.9	660	0.21	14.1	0.93
P202	3806	1.62	69.9	21.2	47	188.5	1.17	4.06	0.63	14.1	22.8	286.93	2.98	5.1	6077	0.32	14.9	1.09
P204	3023	2.14	58.9	33.5	10	200.8	1.52	4.18	0.7	21.1	24.2	407.83	3.34	6.7	5480	0.32	17.9	1.31
P207	670	1.73	28.5	8.1	10	191	0.77	3.31	0.44	15.1	23.6	333.31	3.71	6	861	0.22	14.3	1.06
P210	391	1.4	23.7	74.4	10	89.8	0.89	2.92	0.46	14.6	25.1	447.34	3.33	5.1	337	0.16	13.2	0.95
P211	4262	1.83	92.2	12.5	10	187.5	1.22	4.37	0.73	14.7	23.9	534.8	3.03	5.8	8570	0.23	15.7	1.16
P212	3466	1.54	64.6	25.7	40	169.8	1.1	3.81	0.55	13.5	21.2	292.43	2.81	5	5220	0.31	16.5	1.06
R01	4280	1.72	159.8	1881.7	10	130.5	5.77	3.45	0.98	87.2	14.2	5658.25	12.55	14.8	576	0.08	26.2	1.3
R02	2772	1.6	93.7	99.3	10	76.4	1.98	2.99	0.61	74.1	15.4	3279.23	11.53	15.9	746	0.09	15.8	1.3
R03	5204	1.39	163.2	318.4	10	26.8	3.98	2.09	0.83	197.5	14.8	4724.54	15.7	15.1	618	0.11	10.7	1.2

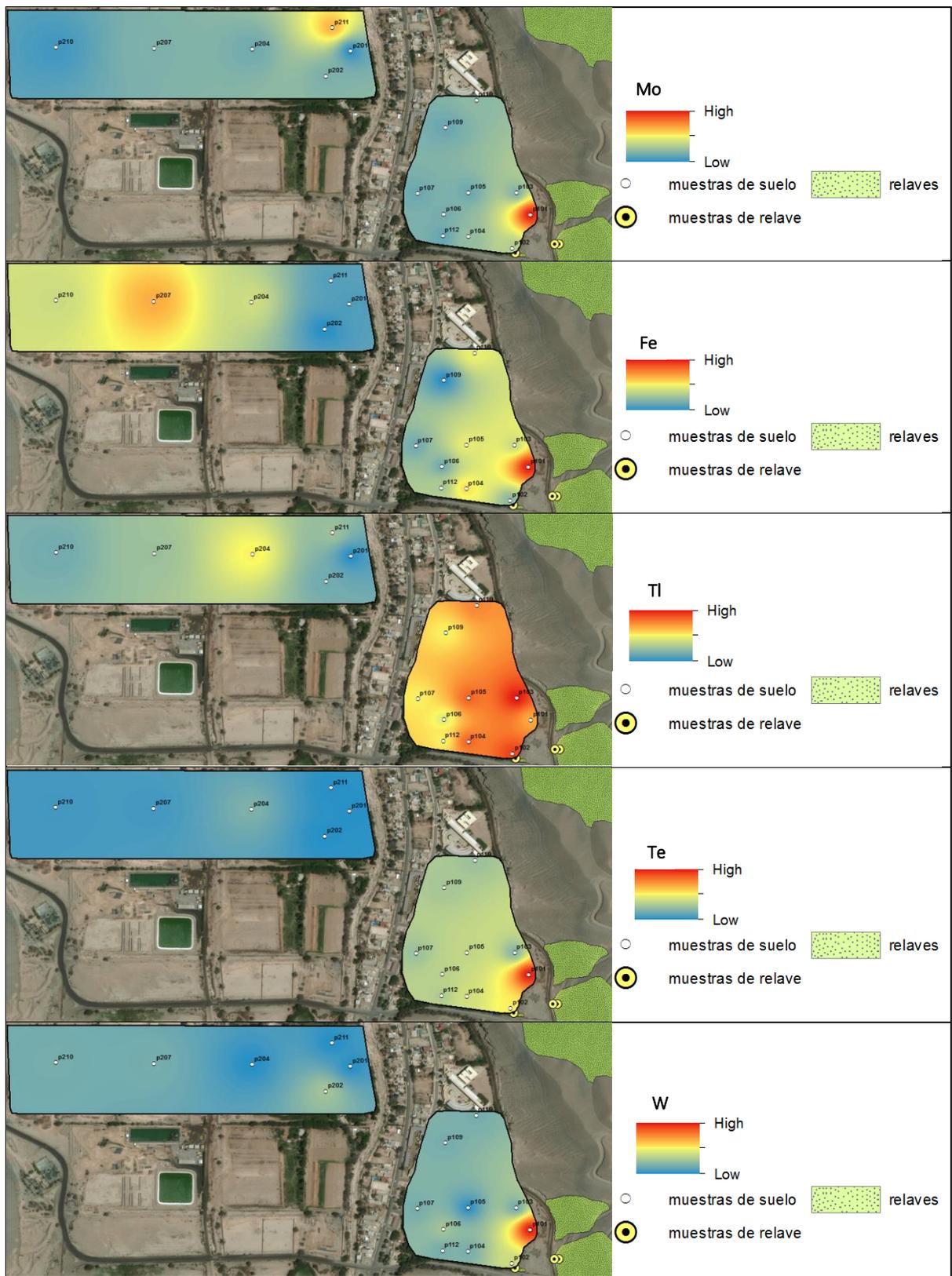
Continuación Tabla 28

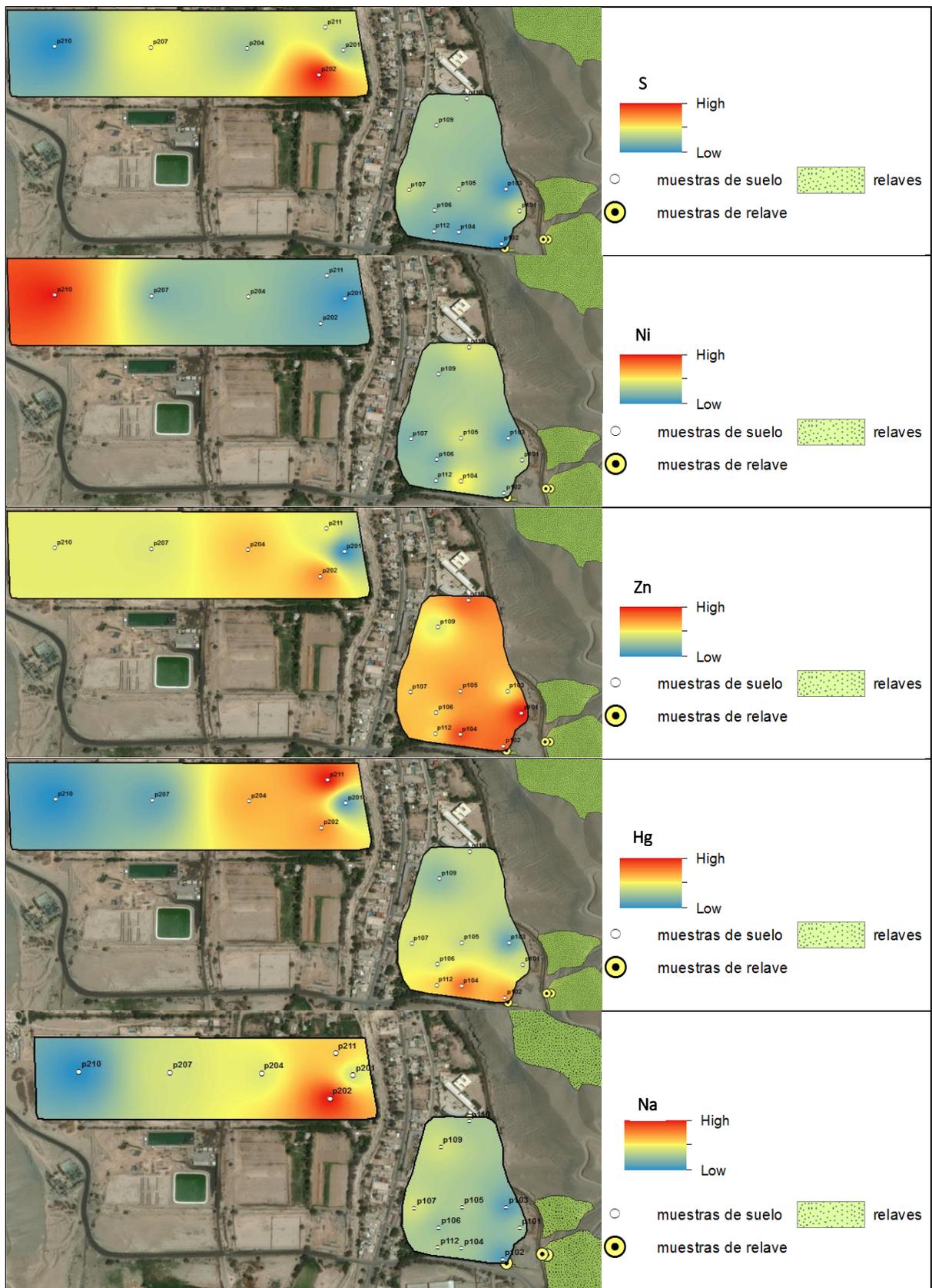
Muestra	Mn	Mo	Na	Ni	P	Pb	S	Sb	Sc	Se	Sr	Te	Th	Ti	Tl	U	V	W	Zn
	<i>ppm</i>	<i>ppm</i>	<i>%</i>	<i>ppm</i>	<i>%</i>	<i>ppm</i>	<i>%</i>	<i>ppm</i>	<i>ppm</i>	<i>ppm</i>	<i>ppm</i>	<i>ppm</i>	<i>ppm</i>	<i>%</i>	<i>ppm</i>	<i>ppm</i>	<i>ppm</i>	<i>ppm</i>	<i>ppm</i>
P101	1205	5.29	0.111	25.2	0.115	114.47	0.27	4.1	6.1	0.7	160.4	0.51	3.8	0.072	0.16	2	62	1.1	226.8
P102	941	2.33	0.082	23.3	0.102	91.26	0.11	5.65	5.7	0.7	157.6	0.27	3.9	0.084	0.19	1.4	64	0.4	205.5
P103	990	1.89	0.083	21.2	0.098	46.49	0.11	0.87	6.1	0.4	161.4	0.13	8.9	0.104	0.2	1.7	81	0.2	159.2
P104	1005	2.04	0.115	29.5	0.131	107.29	0.13	1.69	7	0.8	232	0.21	4.3	0.096	0.18	2	73	0.2	213.8
P105	972	1.74	0.119	26.7	0.133	81.98	0.22	1.06	6.8	0.7	223.4	0.19	3.6	0.084	0.18	2	70	0.1	188.6
P106	839	1.8	0.108	22.3	0.118	92.15	0.18	2.02	5.4	0.5	220.4	0.18	5.1	0.098	0.13	2.2	69	0.3	166.9
P107	781	1.74	0.139	22.3	0.123	107.4	0.26	1.7	5.7	0.6	228.6	0.15	3.4	0.097	0.14	2	66	0.2	169.6
P109	799	1.72	0.138	23.7	0.127	61.44	0.22	1.12	5.9	0.5	238.6	0.16	3.8	0.107	0.14	2	66	0.2	146.2
P110	990	1.98	0.115	27.1	0.187	70.3	0.21	1.12	6.6	0.7	227.7	0.15	3.6	0.09	0.17	2.2	72	0.2	205.7
P112	846	1.69	0.118	22.6	0.102	91.13	0.15	1.88	5.4	0.6	198.7	0.17	3.7	0.099	0.14	1.7	72	0.2	164.9
P201	633	1.42	0.138	17.4	0.101	30.86	0.21	0.66	4.7	0.3	133.5	0.07	3.9	0.111	0.09	1.7	75	0.1	99.2
P202	761	1.85	0.273	21.7	0.147	67.83	0.66	2.37	5	0.4	228.4	0.07	3.4	0.1	0.1	2	69	0.3	189.4
P204	946	1.76	0.146	25.8	0.117	71.52	0.21	1.22	6.4	0.5	216.9	0.12	4.5	0.083	0.14	1.9	70	0.1	173
P207	760	1.87	0.139	18	0.122	61.71	0.34	0.69	5.4	0.5	169.2	0.08	4.2	0.113	0.11	1.3	90	0.2	144.3
P210	688	1.5	0.073	44.4	0.108	32.49	0.1	0.73	4.6	0.2	113.8	0.08	3.3	0.104	0.1	1.1	84	0.2	147.4
P211	768	3.77	0.184	22.5	0.128	109.31	0.28	6.94	5.6	0.5	212.9	0.07	3.2	0.1	0.11	2.4	67	0.1	151.3
P212	704	1.97	0.346	19.8	0.135	63.3	0.7	2.11	4.6	0.6	216	0.08	4.2	0.095	0.1	2	66	0.2	149.5
R01	1804	13.6	0.009	46.7	0.11	90.09	1.65	5.98	5.6	1.5	29.9	0.51	1.8	0.038	0.34	1.1	83	16.3	186.7
R02	1214	9.34	0.069	47.1	0.098	49.53	1.6	4.63	5.4	1.4	34.9	0.5	1.4	0.037	0.24	0.8	82	4.4	125
R03	1016	9.36	0.023	120.2	0.098	103.4	4.5	8.44	4.5	4	17.4	1.02	0.9	0.029	0.86	0.5	89	7.9	131.6

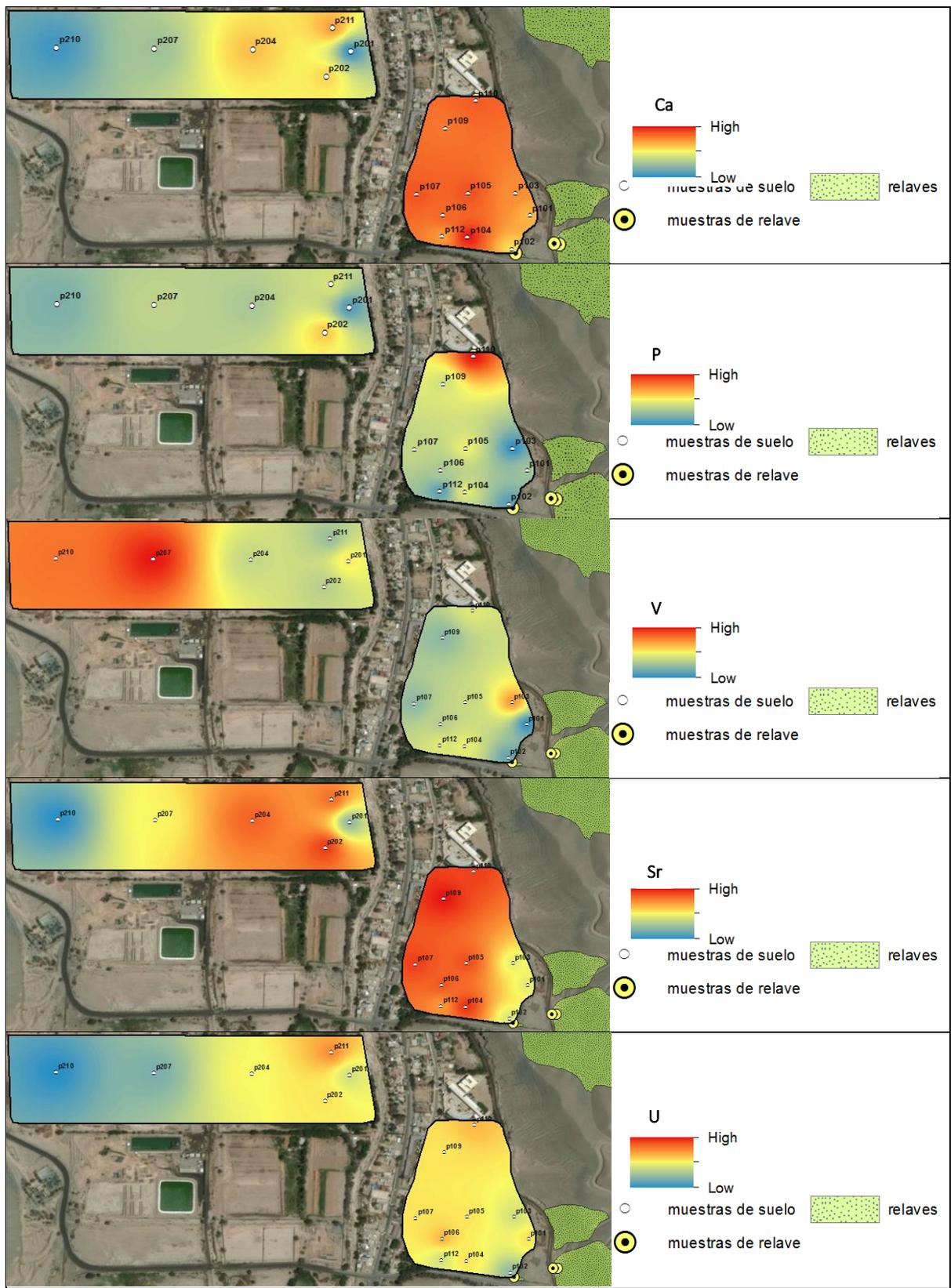
A3. Mapas de interpolación

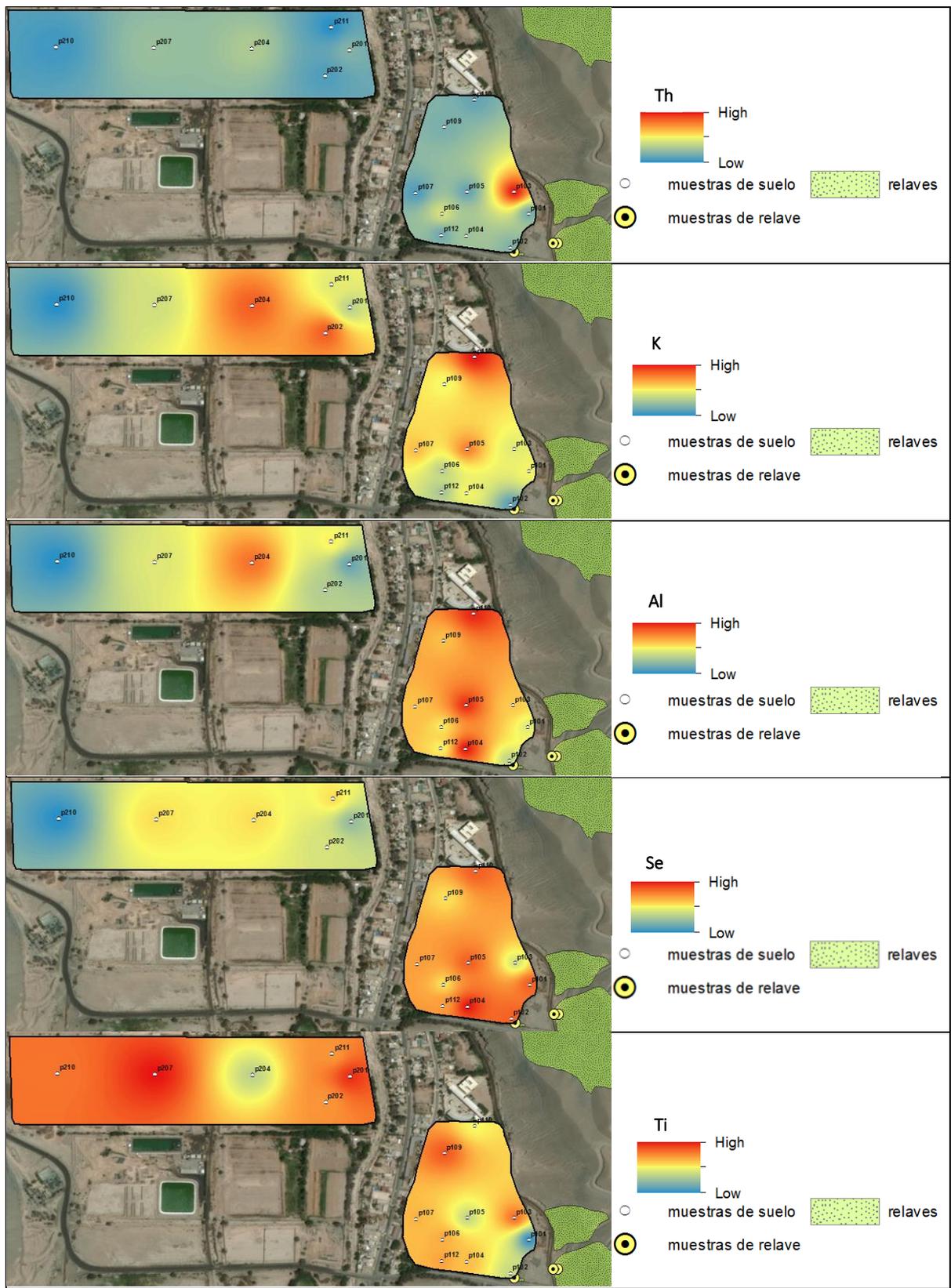












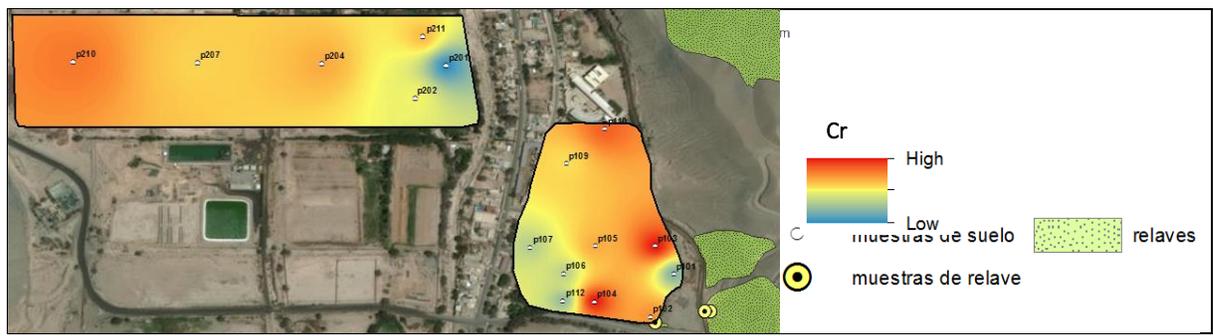
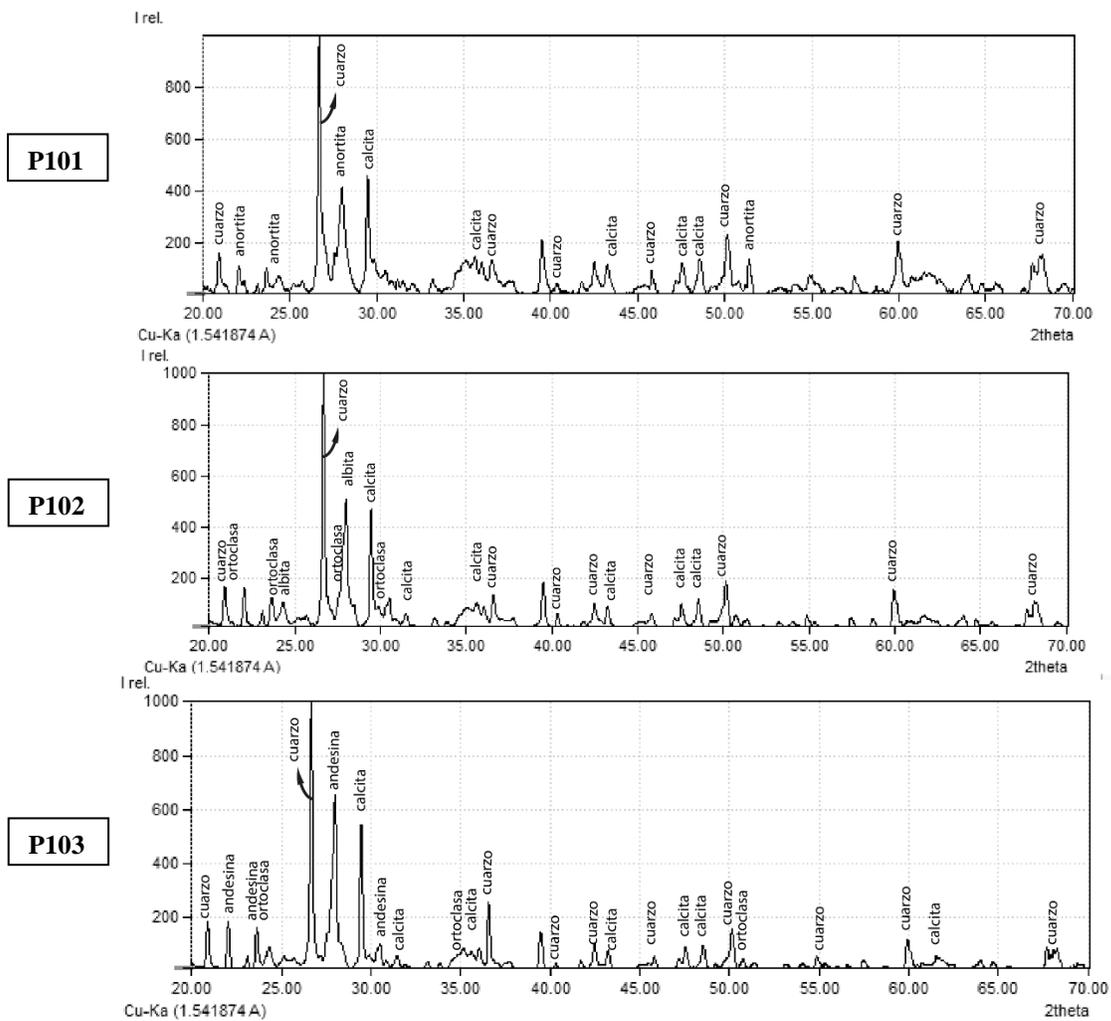
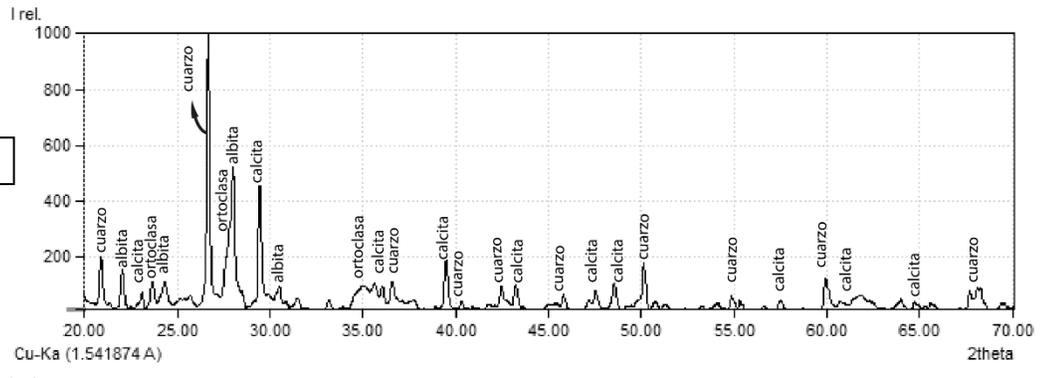


Figura 30. Mapas de interpolación

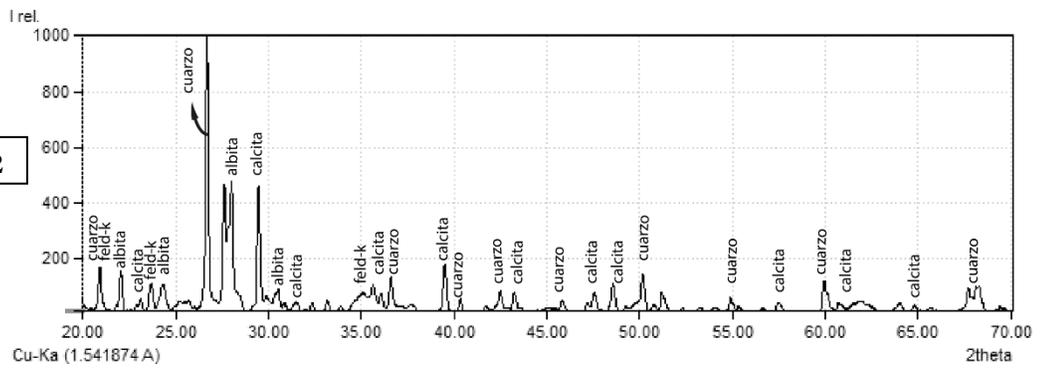
A4. Difractogramas



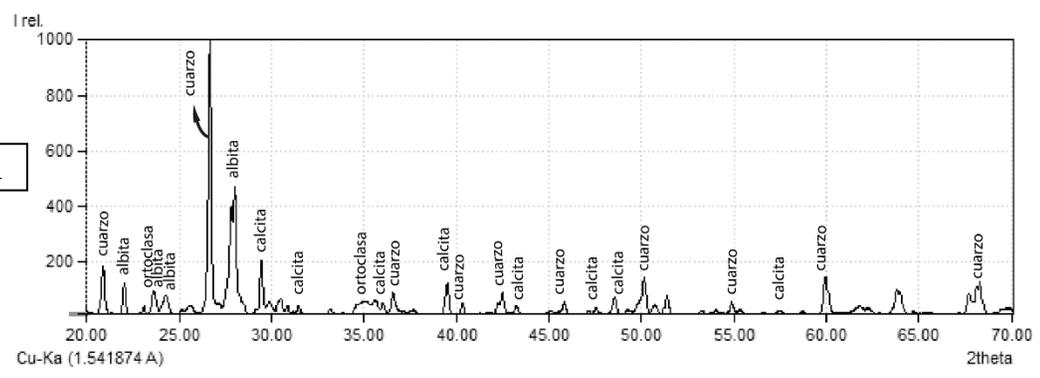
P110



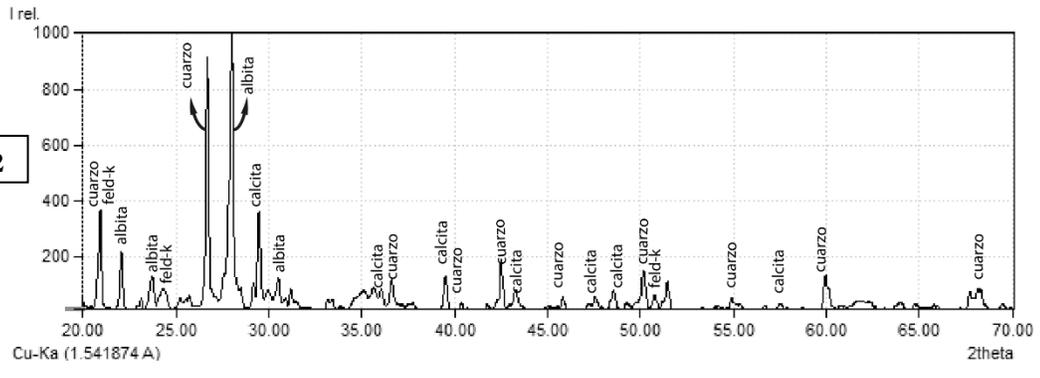
P112



P201



P202



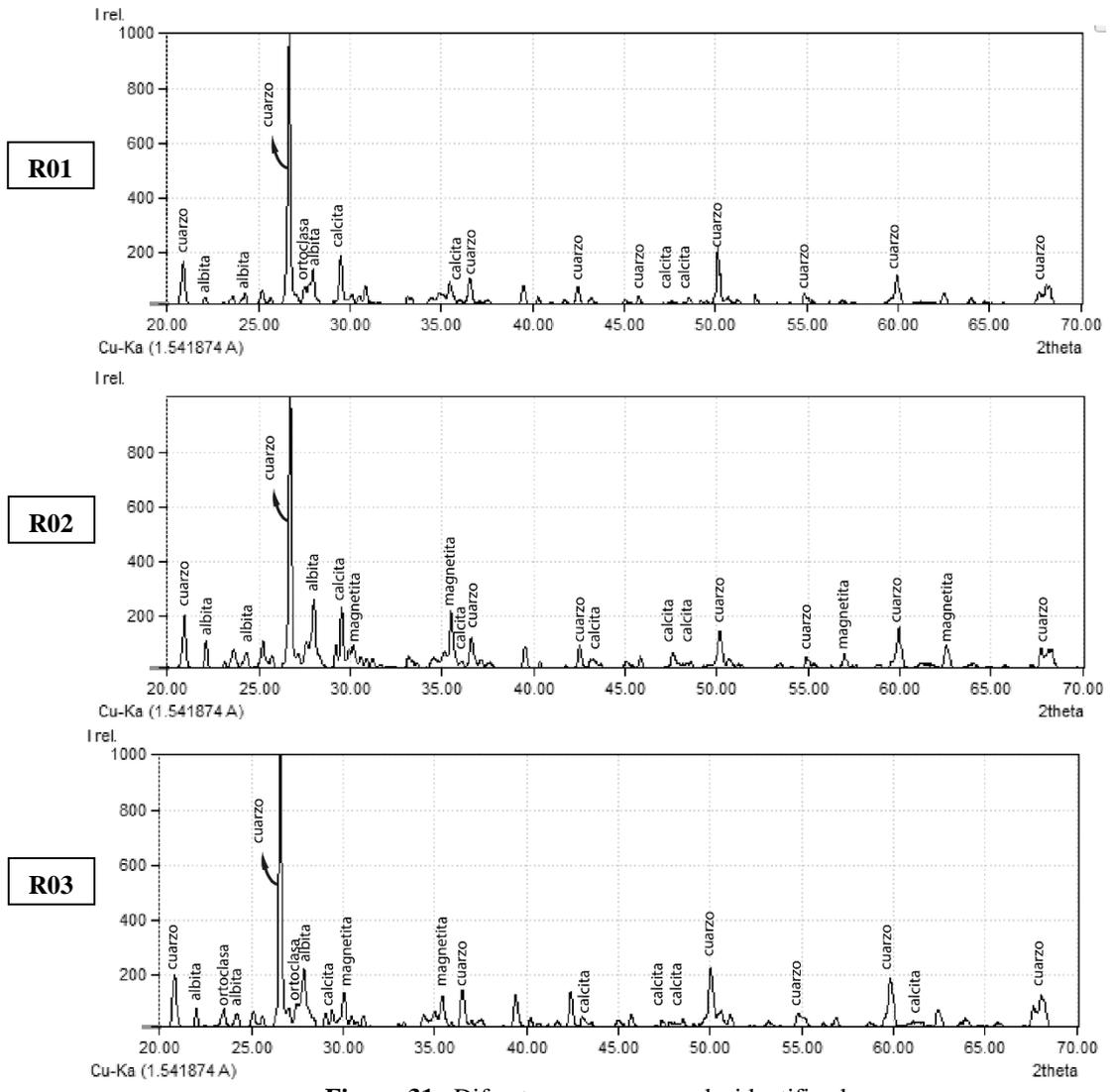


Figura 31. Difractogramas con peaks identificados.