

UNIVERSIDAD DE ATACAMA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA



**Identificación de elementos químicos contaminantes
derivados de la minería, en sedimentos del río Copiapó y
sus alrededores, a la altura de las comunas de Copiapó y
Tierra Amarilla.**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de
GEÓLOGO.

Profesor Guía: Nicoll Castillo Jorquera.

Catalina Amalia Ruiz Barra.

Copiapó, Chile 2024.

Resumen

Los residuos mineros son una fuente importante de arsénico y metales pesados, que al estar sujetos a la dispersión eólica pueden ser causa de la contaminación de suelos en grandes superficies de terreno. En esta investigación se analizó la granulometría y composición química de los sedimentos presentes en distintos puntos a los alrededores del río Copiapó, incluyendo zonas de intervención minera, agrícola y urbana. Se estudiaron concentraciones de elementos potencialmente tóxicos, como As, Co, Cu, Pb, Zn, Fe y Hg, que fueron determinados en 37 muestras de sedimentos mediante tamizado, considerando que aquella granulometría inferior o igual a 0,595 mm (tamiz #30), es propenso a erosión mediante un medio eólico. Se estudiaron las fracciones finas de cada muestra tamizada, mediante pistola de análisis XRF, para comparar los resultados con las normas de calidad de suelos de Canadá (CCME, 2003), Brasil (CTSA, 2005) y USA (EPA, 2015). Se realizaron mapas de concentración para los elementos de Cu, As, Pb y Zn, y se estudiaron las concentraciones de estos elementos en estratos más antiguos y actuales. Los resultados indican que, en promedio, al menos un 55,33% es erosionable mediante un medio eólico y 32 de las 37 muestras, sobrepasan, en al menos 1 elemento, el máximo de concentración estipulado. Para Cu, el 27% de las muestras sobrepasan más del doble del máximo de concentración estipulado por las normas de calidad de suelos de Brasil. Para As, el 100% de las muestras sobrepasan el máximo de concentración estipulado por las normas de calidad de suelos de USA (EPA, 2015). Para Pb, el 5% de las muestras sobrepasan la concentración máxima establecida por las normas de calidad de suelos de Canadá (CCME, 2003) y para Zn, el 8% de las muestras sobrepasan la concentración máxima establecida por las normas de calidad de suelos de Canadá (CCME, 2003). El promedio de las concentraciones de Fe es de 48.930 ppm y el Hg, tiene un valor de 0,001 ppm en todas las muestras. Los mapas muestran altas concentraciones de Cu en los sectores de Tierra Amarilla, Cancha Alianza, F.H.V.L de Paipote, panamericana 5 Norte y el cerro a un costado de la Universidad de Atacama, altas concentraciones de As en todos los sectores de Copiapó y Tierra Amarilla, altas concentraciones de Pb en un punto de la panamericana 5 Norte y en F.H.V.L, y altas concentraciones de Zn en un punto de la panamericana 5 Norte, en F.H.V.L y en un punto de Tierra Amarilla. Finalmente, los estudios realizados en los distintos estratos evidencian que las concentraciones de elementos contaminantes han aumentado significativamente hacia la actualidad, lo cual indica que es necesario, con extrema urgencia, un control de estos parámetros y la implementación de una normativa ambiental en Chile para la máxima concentración de elementos contaminantes permitidos, ya sea en suelos agrícolas o urbanos, a partir de la cual se pudiera establecer el nivel de contaminación de un área determinada, sobre todo para los sectores del área de estudio, donde predomina la minería y existe una gran cantidad de población.

Dedicatoria

Quiero expresar el más profundo agradecimiento principalmente a mi profesora guía, Sra. Nicoll Castillo Jorquera. Su orientación experta, apoyo, dedicación y comprensión han sido fundamentales a lo largo de este proceso. Su compromiso con mi crecimiento académico ha enriquecido enormemente esta etapa de mi vida, de la cual estoy sinceramente agradecida.

Dedico este trabajo a mi hija, mi fuente inagotable de inspiración y motivo para cada paso que doy, recordándome cada día el verdadero significado del esfuerzo y la dedicación. Esta tesis es el fruto de mis sacrificios y también de tus sonrisas que han sido mi motor en los momentos más difíciles.

Gracias a mi amado esposo, Marcelo, compañero de vida y sostén inquebrantable. Tu apoyo incondicional y amor constante han hecho posible este logro, cada obstáculo superado ha fortalecido nuestro vínculo y ha hecho crecer nuestra familia en sabiduría y unidad, te debo un profundo agradecimiento por tu influencia positiva en mi vida.

A mi amada madre, Amalia, tu apoyo constante, tu fe en mí y tu sacrificio incansable han sido mi roca en los momentos difíciles, mi motivación en los momentos de triunfo, has sido la fuerza impulsora detrás de cada logro que he alcanzado. Tu ejemplo de determinación y dedicación ha sido mi guía a lo largo de los años y no puedo expresar con palabras lo agradecida que estoy por todo lo que has hecho por mí.

A mi amada hermana, Daniela, gracias por ser mi confidente, mi mano derecha en los momentos difíciles y por celebrar conmigo los triunfos, tu cariño y tu apoyo han sido un regalo inestimable.

Agradezco sinceramente a mi familia, por su amor, paciencia y apoyo incondicional.

Hebreos 11:1.

“Es, pues, la fe, la certeza de lo que se espera, la convicción de lo que no se ve”.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. CAPÍTULO I. MARCO INTRODUCTORIO.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.3 HIPÓTESIS	3
1.4 OBJETIVOS.	4
1.4.1 Objetivo general.	4
1.4.2 Objetivos específicos.....	4
1.5 ÁREA DE ESTUDIO.	5
1.5.1 Ubicación y accesos.	5
2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.	8
2.1 CONTEXTO REGIONAL.	12
2.2 CONTEXTO HISTÓRICO REGIONAL.	17
2.3 ANTECEDENTES.....	20
3. CAPÍTULO III. MARCO GEOLÓGICO.	23
3.1 CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO.....	23
3.2 ALTOS TOPOGRÁFICOS.	26
3.3 VALLE.....	28
3.4 RÍO COPIAPÓ.....	28
3.5 CONTEXTO CLIMÁTICO.	29
3.6 REDES DE DRENAJE.	31
3.7 CONTEXTO GEOLÓGICO.	35
3.7.1. Geología histórica de la región de Atacama:	35
3.7.2 Geología estructural:	36
3.7.3. Síntesis de recursos minerales:.....	38
3.7.4. Litología:	38
4. CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA.....	40
4.1 ETAPA DE PRE-CAMPO.....	40
4.2 ETAPA DE CAMPO.	40

Tabla N°1: Tabla Excel con puntos de estudio en terreno, junto a sus respectivas coordenadas Norte y Este en UTM, WGS84 19S.	42
4.3 ETAPA DE LABORATORIO.....	43
Tabla N°2: Normas Canadienses y Brasileñas de calidad de suelo, y niveles de detección de la EPA de los Estados Unidos para diferentes usos del suelo, concentración de metales en mg/Kg (peso seco). Tomado y modificado de Carkovic et al. (2016).....	45
5. CAPÍTULO V. RESULTADOS.....	50
5.1 RESULTADOS EN ETAPA DE PRE-CAMPO:	50
5.1.1 Fotointerpretación del área de estudio.	50
Área 1.1.	52
Área 1.2.	53
Área 1.3.	54
Área 1.4.	55
5.2 RESULTADOS EN ETAPA DE CAMPO:	56
Columna estratigráfica N°01, Punto N°03.	56
Columna estratigráfica N°02, Punto N°05.	59
Columna estratigráfica N°03, Punto N°09.	62
Columna estratigráfica N°04, Punto N°10.	64
Columna estratigráfica N°05, Punto N°18.	67
Columna estratigráfica N°06, Punto N°19.	70
Columna estratigráfica N°07, Punto N°30.	72
5.3 RESULTADOS EN ETAPA DE LABORATORIO:	74
Tabla N°3: La tabla muestra un resumen de los resultados primordiales obtenidos luego de realizar el tamizado de muestras.	75
Tabla N°4: La tabla muestra los resultados obtenidos, mediante pistola de análisis XRF, de los elementos y sus promedios en ppm. Se puede observar en color naranja intenso aquellos elementos en que la ppm sobrepasa el máximo rango estipulado en las normas de calidad de suelos de Canadá (CCME, 2003), Brasil (CTSA, 2005) y USA (EPA, 2015) para sectores residenciales (Tabla N°2), mientras que en color	

naranja suave se observan aquellos elementos en que la ppm sobrepasa el mínimo rango estipulado.....	76
6. CAPÍTULO VI. DISCUSIONES.	85
7. CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	94
Tabla N°5: La tabla muestra ventajas y desventajas al emplear fitoremediación.	96
8. REFERENCIAS.	99
ANEXOS.....	106
ANEXO N°01, MAPA BASE DEL ÁREA DE ESTUDIO.	106
ANEXO N°02, TABLAS CON RESULTADOS DE MUESTRAS TAMIZADAS.....	107
ANEXO N°03: NOTICIA PUBLICADA EN DIARIO DE ATACAMA CON FECHA 27 DE JULIO DEL AÑO 2023.....	117
ANEXO N°04, IMÁGENES EXTRAÍDAS EN TERRENO.....	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°1: Se muestra la ubicación de la región de Atacama en Chile y las rutas de acceso a las comunas de Copiapó y Tierra Amarilla (Arévalo V., C.1 2009 & Griem W., 2016).....	5
Figura N°2: Cuencas, subcuencas y subsubcuencas de la región de Atacama, Chile. (Tapia G., 2014.).....	6
Figura N°3: La figura muestra el área de estudio (Elaboración propia con programa ARCGIS).	7
Figura N°4: Se muestran algunas imágenes de la flora en la región de Atacama. 1) <i>Rhodophiala bagnoldii</i> . 2) <i>Rhodophiala phycelloides</i> . 3) <i>Rhodophiala advena</i> . 4) <i>Leuchocoryne ixioides</i> . 5) <i>Copiapoa dealbata</i> . 6) <i>Lycium chilense</i> . 7) <i>Oxalis gigantea</i> . 8) <i>Encelia tomentosa</i> . y 9) <i>Frankenia chilensis</i> . (elaboración propia, imágenes extraídas de Google) (Orellana F., 2017) (Alonso C., 2021).....	16
Figura N°5: Se observa el desierto Florido de Atacama, la fotografía fue tomada 77 km al Sur de Copiapó, en Punta de Díaz (Medina D, 2018).	16
Figura N°6: Se muestran algunas imágenes de la fauna en la región de Atacama. 1) <i>Liolaemus alticolor</i> . 2) <i>Philodryas chamissonis</i> . 3) <i>Pseudalopex culpaeus</i> . 4) <i>Pseudalopex griseus</i> . 5) <i>Otaria foveosens</i> . 6) <i>Lama guanicoe</i> . 7) <i>Lontra felina</i> . 8) <i>Larus dominicanus</i> . 9) <i>Columbina picui</i> . (elaboración propia, imágenes extraídas de Google) (IUCN, 2012) (SIB, 2017) (ROC, 2018).....	17
Figura N°7: La figura muestra la geomorfología a gran escala de la región de Atacama. (Griem W., 2016).....	25
Figura N°8: Perfil esquemático morfológico del Norte de Atacama, Chile. La línea del perfil se ubica aproximadamente entre Chañaral y Salar de Pedernales (Griem W., 2020).	25
Figura N°9: Geomorfología en la ciudad de Copiapó, (Börgel, 1983).....	26
Figura N°10: La figura muestra los altos topográficos en las comunas de Copiapó y Tierra Amarilla (extraído de topographic-map.com).	27
Figura N°11: Perfil topográfico W-E a la latitud de 27°20', cuenca del río Copiapó, (MOP, 2004).	29
Figura N°12: El gráfico muestra 30 años de datos meteorológicos históricos. La "máxima diaria media" (línea roja continua) muestra la media de la temperatura máxima de un día por cada mes de Copiapó. Del mismo modo, la "mínima diaria media" (línea azul continua) muestra la media de la temperatura mínima. Los días calurosos y noches frías (líneas azules y rojas discontinuas) muestran la media del día más caliente y noche más fría de cada mes en los últimos 30 años (Weather Spark, 2022).....	30

Figura N°13: La figura muestra la velocidad del viento promedio de Copiapó en el año, el promedio de la velocidad media del viento por hora se muestra en la línea gris oscuro (Weather Spark, 2024).....	31
Figura N°14: La figura muestra la dirección el viento promedio de Copiapó en el año, las áreas de colores claros en los límites son el porcentaje de horas que pasa en las direcciones intermedias implícitas (noreste, sureste, suroeste y noroeste) (Weather Spark, 2024).	31
Figura N°15: La figura muestra información hídrica de la Cuenca del río Copiapó (DGA, 2015).....	33
Figura N°16: La figura muestra redes hídricas del área de estudio (Elaboración propia, con programa SAS.Planet, GlobalMapper y ArcMap).....	34
Figura N°17: La figura muestra los puntos estudiados en terreno (Elaboración propia con programa ARCGIS).....	41
Figura N°18: Ubicación de relaves y su estado al año 2023, extraídos de la página de SERNAGEOMIN, 2023.	48
Figura N°19: Ubicación de relaves y nombre de la empresa a la cual pertenecen, extraídos de la página de SERNAGEOMIN, 2023.	49
Figura N°20:La figura muestra el área de estudio fraccionada en 4 áreas más pequeñas (1.1, 1.2, 1.3, y 1.4) con la finalidad de lograr una mejor fotointerpretación (Elaboración propia).	51
Figura N°21: La figura muestra el área 1.1, con ubicación de relaves en color naranja (elaboración propia con programa ARCGIS).....	52
Figura N°22: La figura muestra el área 1.2 (polígono color azul), la fundición Hernán Videla Lira (circunferencia verde), Planta Manuel Antonio Matta Ruiz de Paipote (circunferencias amarillo) (elaboración propia con programa ARCGIS).	53
Figura N°23: La figura muestra el área 1.3, con ubicación de relaves en color naranja (elaboración propia con programa ARCGIS).....	54
Figura N°24: La figura muestra el área 1.4, con ubicación de relaves en color naranja (elaboración propia con programa ARCGIS).....	55
Figura N°25: La figura muestra concentraciones de Cu en los distintos puntos de estudio (elaboración propia con programa ARCGIS).....	80
Figura N°26: La figura muestra concentraciones de As en los distintos puntos de estudio (elaboración propia con programa ARCGIS).....	81
Figura N°27: La figura muestra concentraciones de Pb en los distintos puntos de estudio (elaboración propia con programa ARCGIS).....	82

Figura N°28: La figura muestra concentraciones de Zn en los distintos puntos de estudio (elaboración propia con programa ARCGIS).....	83
Figura N°29: Esta figura muestra la correlación de columnas N°04 y N°05, encerrado en cuadro azul se correlacionan los estratos de gravas matriz-soportadas y en cuadro rojo se correlacionan las alternancias de gravas clasto-soportadas y arenas.....	86
Figura N°30: La figura muestra las columnas N°01, N°04, N°05 y N°07, junto a las muestras y concentraciones extraídas de los distintos estratos.....	87
Figura N°31: La imagen muestra el proceso por el cual una planta realiza fitoextracción (Volke T., et al. 2005).....	96
Figura N°32: La figura muestra un listado de plantas útiles para fitoextracción según el tipo de elemento que se requiera (Volke T., et al. 2005).....	98

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico N°1: El gráfico muestra concentraciones de cobre de cada muestra extraída en terreno, se puede observar que, en la mayoría de las muestras, este sobrepasa el máximo estipulado por las normas de calidad de suelos de Brasil, que es quien tiene la concentración máxima más alta.	89
Gráfico N°2: El gráfico muestra concentraciones de arsénico de cada muestra extraída en terreno, se puede observar que, en todas las muestras, este sobrepasa el máximo estipulado por las normas de calidad de suelos de U.S.A, que es quien tiene la concentración máxima más baja.	89
Gráfico N°3: El gráfico muestra concentraciones de plomo de cada muestra extraída en terreno, se puede observar que, en la mayoría de las muestras, este no sobrepasa el máximo estipulado por las normas de calidad de suelos e inclusive tiene valores de 0 ppm.....	90
Gráfico N°4: El gráfico muestra concentraciones de zinc de cada muestra extraída en terreno, se puede observar que, en la mayoría de las muestras, este no sobrepasa el máximo estipulado por las normas de calidad de suelos canadienses, que es quien tiene la concentración máxima más baja (Elaboración propia con programa Excell).....	90
Gráfico N°5: El gráfico muestra concentraciones de hierro de cada muestra extraída en terreno.....	92

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía N°1 y N°2: Las fotografías muestran el agitador de tamices mecánico, marca ROTAP, con tamices de mallas de acero inoxidable N°#0.5 N°#16 N° #30, N° #60 y N° #200 desde arriba hacia abajo respectivamente (Elaboración propia).....	43
Fotografía N°3 y N°4: La fotografía muestra la pistola de análisis XRF marca BRUKER ELEMENTAL modelo S1 TITAN vista de frente y de perfil (Elaboración propia).....	44
Fotografía N°5: La fotografía muestra el Microscopio Binocular del laboratorio marca Motic visto de frente.....	46
Fotografía N°6 y N°7: Las fotografías muestran gran porcentaje de cristales de magnetita encontrados en las diferentes muestras. Las fotografías fueron tomadas con un aumento de 5X (elaboración propia).....	78
Fotografía N°8, N°9, N°10 y N°11: Las fotografías muestran cristales de óxidos de cobre apreciados en varias de las muestras. Las fotografías fueron tomadas con un aumento de 5X (elaboración propia).....	79

1. CAPÍTULO I. MARCO INTRODUCTORIO.

1.1 Introducción

El progreso de la ciencia, el crecimiento económico y la globalización han originado evidentes beneficios, pero al mismo tiempo han provocado la aparición de nuevos riesgos. Actualmente el 92% de la población mundial vive en lugares donde se excede el nivel máximo de contaminación atmosférica permitido por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2016). Una de estas fuentes de contaminación son los distintos procesos mineros, que producen desechos de material particulado, también conocidos como relave minero, el cual proviene de la concentración de minerales que contienen diversos elementos perjudiciales para la salud, lo cual trae como consecuencia la pérdida de áreas verdes, flora, fauna, contaminación de suelos y contaminación de aguas (EPA, 2020).

Chile es el principal productor a nivel mundial de cobre, renio, nitratos naturales, litio y yodo, destacando su participación en la producción de molibdeno, plata y oro, lo cual es de gran importancia para la economía, sin embargo, esto es perjudicial cuando se trata del medio ambiente (Pérez, V. 2013). La región de Atacama es característica por poseer alta concentración de actividad minera, 125 mineras en operación en total (SONAMI, Chile, 2023). En la cuenca del río Copiapó, resalta la presencia de pasivos ambientales mineros, ya que éstos se encuentran cerca de cursos de agua y zonas pobladas (Castro C. *et al.*, 2009).

La educación de la población es una herramienta básica y fundamental en cuanto a medio ambiente. Una población que conoce los problemas ambientales y toma conciencia de ellos, tendrá un alto potencial de solución a tales conflictos y podrá lograr una administración eficiente de los recursos naturales disponibles (CNUMAD, 1992). Por esto, es necesario prevenir a la población sobre la ubicación y cuantificación de los diversos agentes contaminantes. Este estudio comprende un análisis estratigráfico, granulométrico y composicional de los sedimentos del río Copiapó y sus alrededores, en las ciudades de Copiapó y Tierra Amarilla, con la finalidad de caracterizar la distribución y concentración de elementos potencialmente contaminantes, evidenciándolo mediante mapas de concentración a escala 1:16.000.

1.2 Planteamiento del problema.

La actividad minera en Chile sigue siendo una de las mayores y más importantes fuentes de producción. Al extraer mineral, se generan residuos tales como escorias, rípios de lixiviación y relaves. El relave es un sólido finamente molido, que se descarta en operaciones mineras, este puede ser un residuo contaminante si contiene elementos que, sobre ciertas concentraciones pudieran ser considerados tóxicos para el ser humano, como arsénico, cianuro, cobre, cinc, cromo, plomo; o si por cualquier causa el relave reacciona con agua y oxígeno, y éste solubiliza, generando una posibilidad de movilizarlos, lo que genera una potencial afectación a las personas y al medio ambiente (SERNAGEOMIN, 2024).

La región de Atacama registra un total de 155 depósitos. Las comunas de Copiapó y Tierra Amarilla poseen abundantes zonas mineras, que vienen siendo explotadas desde hace décadas, aquí, los relaves se ubican específicamente en las cercanías del río Copiapó, cercanos al área urbana (SERNAGEOMIN, 2023).

Al contrastar los datos entregados por el SERNAGEOMIN del año 2020 con los datos del año 2023, se evidencia que el año 2020 existían 85 relaves emplazados en la comuna de Copiapó y 36 en la comuna de Tierra Amarilla, mientras que en el año 2023 se registran 92 relaves en la comuna de Copiapó y 37 en la comuna de Tierra Amarilla. Inclusive, en una noticia publicada en el diario de Atacama con fecha 25 de julio del año 2023, se indica que Copiapó es la comuna con más cantidad de relaves en Chile y Atacama es considerada región con muy alta concentración.

Diversos estudios científicos de geoquímica en los suelos de las ciudades de Copiapó y Tierra Amarilla han evidenciado la existencia de elementos químicos de Cu, As, Pb, Zn, Fe, entre otros, tales como estudios de variación de concentraciones en metales pesados (Rojos S., *et al.*, 2020), erosión eólica en superficies de relave (Pizarro J. & Devi A., 2018), metales pesados en el río Copiapó, posteriores al aluvión 2015 (Ríos, J., *et al.*, 2015), metodología para la evaluación de la susceptibilidad de erosión y potenciales inestabilidades físicas de un depósito de relave (Ramírez, F., 2020), entre otros. Así también hay estudios científicos enfocados en la salud de las personas que habitan estos sectores, los cuales demuestran la presencia y movilidad de elementos contaminantes. Cabe mencionar que la dispersión es rotativa, estos elementos no siempre se dispersan

hacia un mismo sector, dado que se encuentra relacionado con la evolución geomorfológica del mismo, lo cual variará según las condiciones ambientales (Martínez V. & Briceño T., 2018). Sin embargo, la información disponible sigue siendo escasa y no logra alertar a la población sobre la significancia de estos resultados, en la población existe una ineducación respecto a la contaminación actual, evidenciado por distintos asentamientos habitacionales cercanos a la contaminación por erosión eólica e hídrica de relaves mineros, que son potencialmente tóxicos para la salud. Estos se encuentran situados en los alrededores de la cuenca del río Copiapó y en su mayoría no están controlados adecuadamente. La lluvia, los aluviones y el viento propagan los contaminantes de relaves en sus sectores aledaños y esto la población en la actualidad lo tiene “normalizado”. Es por esto, que surge la necesidad de prevenir a la población sobre la contaminación existente, mediante la identificación de distintos elementos contaminantes en el registro estratigráfico de sedimentos, con análisis XRF, para así caracterizar la distribución y concentración del material particulado potencialmente contaminante, finalizando con un mapa de concentración de agentes contaminantes a escala 1:16.000, advirtiendo a la población mediante un material visual y explicativo.

1.3 Hipótesis

Mediante mapas de concentración de elementos potencialmente contaminantes, se pretende evidenciar el problema de contaminación en los alrededores del río Copiapó, entre las comunas de Copiapó y Tierra Amarilla, y entregar herramientas de conocimiento a la comunidad, para identificar claramente zonas de alta y baja concentración.

Para el futuro es importante que la planificación territorial no permita la instalación de zonas residenciales sobre ex zonas de relaves, a menos que exista una remediación ambiental adecuada, por lo que surge la necesidad de informar a la población y se sugiere que una posible solución a este problema es concientizar, con el objetivo de evidenciar la composición de estos suelos y exponer las distintas zonas con alto potencial de contaminación cercanas a la densidad poblacional de cada sector en los alrededores del río Copiapó, entre las comunas de Copiapó y Tierra Amarilla. A pesar de haber estudios similares, es importante masificar este tipo de estudios científicos.

1.4 Objetivos.

1.4.1 Objetivo general.

Identificar elementos contaminantes, junto con el impacto que generan a lo largo del tiempo en los distintos estratos (ya sea que aumenten o disminuyan sus concentraciones), en la cuenca del río Copiapó y sus alrededores, entre las comunas de Copiapó y Tierra Amarilla. Mediante análisis del registro geológico en secuencias estratigráficas, levantamiento de columnas en el río Copiapó, análisis granulométrico, análisis con pistola de rayos XRF y estudio de las distintas unidades presentes en el área de estudio.

1.4.2 Objetivos específicos.

- Identificar, registrar y analizar cuantitativamente los focos de elementos contaminantes, principalmente de Cu, As, Pb, Zn, Fe y Hg en la cuenca del río Copiapó y sus alrededores, entre las comunas de Copiapó y Tierra Amarilla, mediante pistola de análisis de rayos XRF.
- Evaluar el porcentaje propenso a erosión de las muestras con elementos contaminantes.
- Analizar la temporalidad de los diversos elementos contaminantes en el registro estratigráfico.
- Contrastar las concentraciones de Cu, As, Pb y Zn con las concentraciones máximas estipuladas en las normas de calidad de suelos de Canadá (CCME, 2003), Brasil (CTSA, 2005) y USA (EPA, 2015).
- Evaluar las concentraciones de Fe según su promedio en el área de estudio.
- Evaluar las concentraciones de Hg según lo estipulado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.
- Realizar mapas de concentración para los elementos de Cu, As, Pb y Zn, a escala 1:16.000, que refleje zonas con mayor y menor grado de contaminación en el área de estudio.

1.5 Área de estudio.

1.5.1 Ubicación y accesos.

El área de estudio se ubica en Chile, región de Atacama, en las comunas de Copiapó y Tierra Amarilla (Figura N°1). Comprende un área de 50,26 Km², se ubica en la cuenca 034, subcuencas 0345 (Río Copiapó Bajo) y 0343 (Río Copiapó Medio), específicamente en las subsubcuencas 03450 y 03434 (Tapia G., 2014), dentro de las coordenadas que muestra la Figura N°3.



Figura N°1: Se muestra la ubicación de la región de Atacama en Chile y las rutas de acceso a las comunas de Copiapó y Tierra Amarilla (Arévalo V., C.I 2009 & Griem W., 2016).

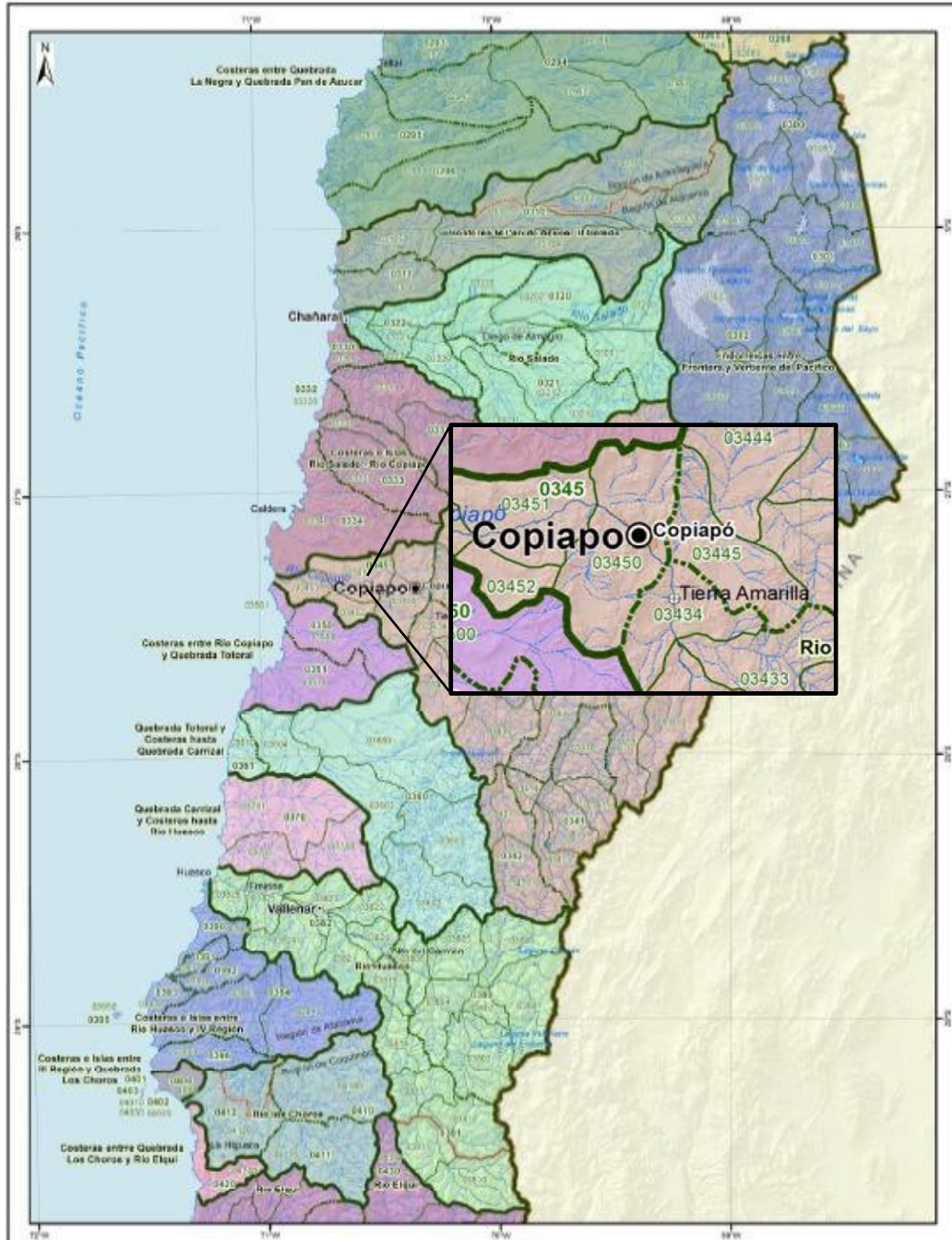


Figura N°2: Cuencas, subcuencas y subsubcuencas de la región de Atacama, Chile. (Tapia G., 2014.).

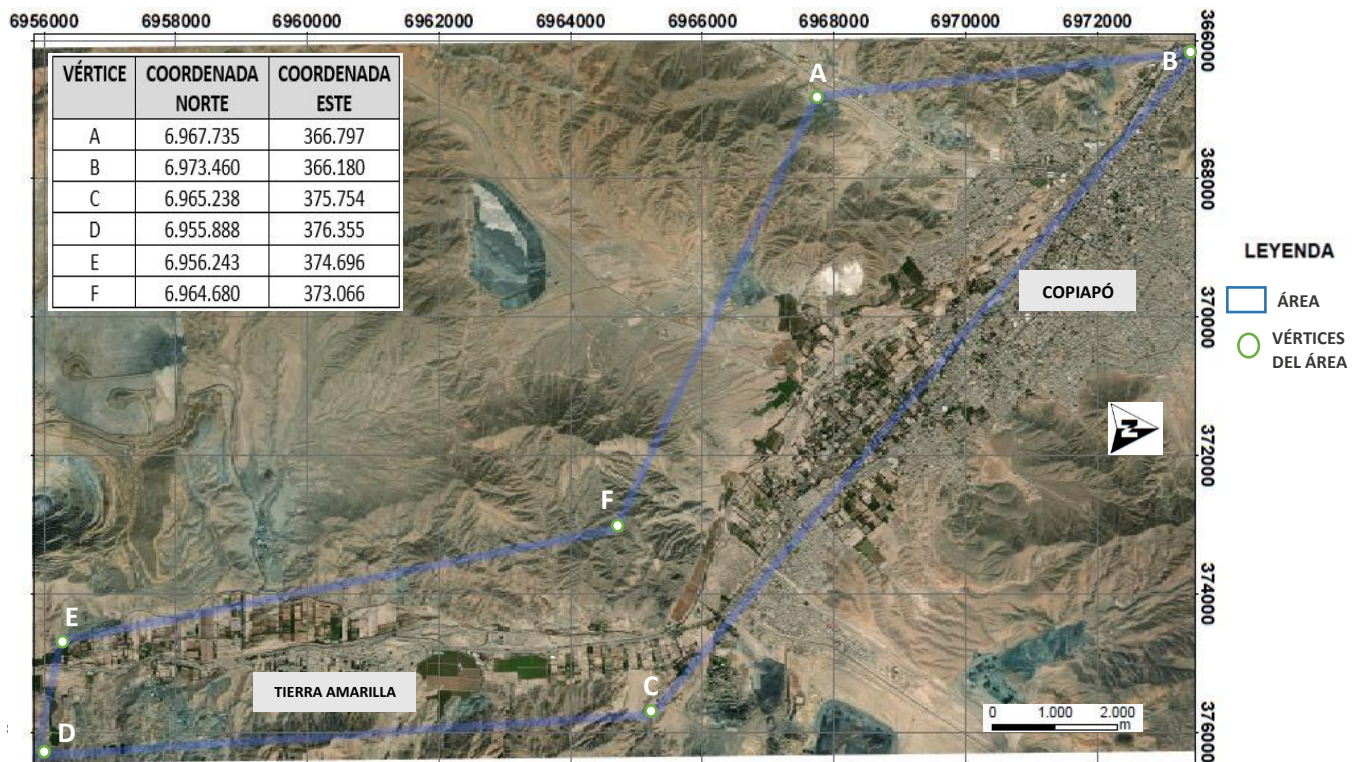


Figura N°3: La figura muestra el área de estudio (Elaboración propia con programa ARCGIS).

2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

Según la RAE, 2019, contaminar es alterar nocivamente la pureza o las condiciones normales de una cosa o un medio por agentes químicos o físicos (RAE, 2019). La fundación Aquae, 2020, define a la contaminación ambiental como la presencia o ausencia de elementos, que puedan resultar perjudiciales para el medio ambiente, estos elementos pueden ser naturales o artificiales. Se trata de agentes físicos, químicos o biológicos que pueden poner en peligro al ecosistema (Fundación Aquae, 2020).

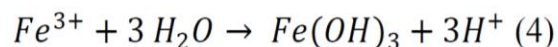
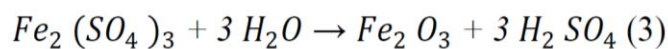
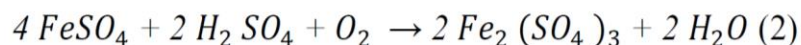
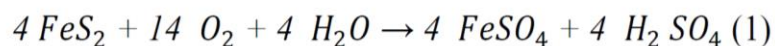
La fundación Ayuda en Acción, en su página web, el año 2023, define los tipos de contaminación de acuerdo con el elemento afectado. Contaminación atmosférica, se refiere a las emisiones de gases tóxicos que afectan la atmósfera. Contaminación hídrica, se encuentra relacionada con desechos, productos químicos y otros agentes extraños en el agua. La contaminación del suelo afecta a la tierra y es generalmente causada por la producción agrícola y ganadera. Contaminación acústica, se refiere a la existencia de decibeles, por sobre el nivel considerado como normal o permitido. Contaminación lumínica, hace referencia a la iluminación artificial excesiva, de igual manera que la acústica, este tipo de contaminación ambiental no compromete la supervivencia de los seres humanos, sin embargo, produce enfermedades como las relacionadas con la visión, alteraciones del sueño o migrañas, afectando también a los ecosistemas nocturnos ya que provoca a animales e insectos problemas de orientación y alteraciones en sus ciclos biológicos. Contaminación visual, es todo aquello que altera visualmente el paisaje natural, hace referencia a todos los elementos que no son naturales y que nos envían estímulos visuales. Contaminación térmica, es aquella que provoca el aumento de temperatura en la Tierra, este aumento de temperatura (o calentamiento global) afecta a los polos y glaciares, trayendo como consecuencia subida del nivel del mar, alteración del equilibrio de los ecosistemas o cambios en las corrientes marinas y el clima (Fundación Ayuda en Acción, 2023).

La OMS, el año 2015, en una publicación de Mercurio y Salud, define a la minería como una actividad productiva que extrae, procesa y transforma minerales o materiales del subsuelo o del suelo para usos industriales, energéticos y materiales de construcción (OMS, 2015). La extracción y procesamiento de minerales comprenden una serie de acciones que producen significativos impactos ambientales, los cuales perduran en el

tiempo, más allá de la duración de las operaciones de extracción de minerales (Romero E., 2006).

La contaminación con metales se produce fundamentalmente a través de los drenajes mineros ácidos (DMA) y la erosión de escombreras y depósitos de colas de explotaciones (López R. 2020). Un ejemplo clave para entender la formación del drenaje ácido de mina es la acción del agua y el oxígeno sobre pirita (FeS_2), que normalmente acompaña las mineralizaciones metalíferas y sin cuya presencia la oxidación y lixiviación de otros sulfuros se ve severamente limitada. Como los DMA pueden incorporarse a la red fluvial, la dispersión de sus contenidos aumenta y puede tener influencia muy lejos de su lugar de origen y extenderse mucho después que las actividades extractivas han cesado (Torrez D., 2021)

La oxidación de la pirita genera tres productos importantes, sulfato férrico (1), que contribuye de manera decisiva en la oxidación de otras especies sulfuradas, ácido sulfúrico (2), un potente agente lixivante y óxidos (3) e hidróxidos de hierro (4) genéricamente denominados como limonitas (Oyarzun R. *et al.*, 2010). En efecto, el proceso de oxidación de la pirita se puede esquematizar de la siguiente forma:



El drenaje ácido es un proceso natural; sin embargo, tiene el potencial para generar importantes problemas de contaminación de suelos y aguas subterráneas, modificando el pH y presentando altas concentraciones de metales pesados perjudiciales para el ser humano como el As, CN, Pb, Cu, etc. (USGS, 1999)

SERNAGEOMIN en el año 2005, define a un pasivo ambiental minero como aquella faena minera abandonada o paralizada, incluyendo sus residuos, que constituye un riesgo significativo para la vida, la salud de las personas o para el medio ambiente (SERNAGEOMIN, 2005). Igualmente, el SERNAGEOMIN, en el DS N°248, define a los

relaves mineros como una suspensión de sólidos en líquidos, formando una pulpa, que se generan y desechan en las plantas de concentración húmeda de especies minerales que han experimentado una o varias etapas en circuito de molienda fina. El vocablo, se aplica también a la fracción sólida de la pulpa que se ha descrito precedentemente (SERNAGEOMIN, 2007).

En la actualidad, se debate en distintos niveles y ámbitos sociales los impactos ambientales que genera la minería sobre el medio ambiente. A lo largo de los años se han producido distintos desastres ambientales asociados a este sector económico, normalmente causados por las malas prácticas llevadas a cabo durante esta actividad (Pérez M., 2016).

Según el Catastro de depósitos de relaves elaborado por el SERNAGEOMIN y actualizado el año 2023, la región de Atacama tiene una concentración de depósitos de relaves dentro de Chile del 23,3%, el cual corresponde a una cantidad de 185 depósitos de relaves, de estos, 37 se encuentran activos (de los cuales hay 19 en la comuna de Copiapó, 9 en la comuna de Tierra Amarilla, 4 en la comuna de Diego de Almagro, 4 en la comuna de Vallenar y 1 en la comuna de Huasco), 114 están paralizados (inactivos) (de los cuales hay 64 en la comuna de Copiapó, 27 en la comuna de Tierra Amarilla, 1 en la comuna de Caldera, 1 en la comuna de Freirina, 11 en la comuna de Vallenar, 4 en la comuna de Chañaral y 6 en la comuna de Diego de Almagro), 26 se encuentran en calidad de abandonados (de los cuales hay 6 en la comuna de Copiapó, 1 en la comuna de Tierra Amarilla, 7 en la comuna de Diego de Almagro, 3 en la comuna de Chañaral, 6 en la comuna de Vallenar y 3 en la comuna de Freirina) y 8 en construcción (de los cuales hay 3 en la comuna de Copiapó, 1 en la comuna de Vallenar, 3 en la comuna de Diego de Almagro y 1 en la comuna de Chañaral) (SERNAGEOMIN, 2023).

En Chile, desde marzo de 1994, la industrialización de la actividad minera mostró la necesidad de contar con una legislación que norme sus efectos en el medioambiente, es por esto que existe la Ley N°19.300 la cual trata bases generales del medio ambiente y plantea, entre otras cosas, un Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), el cual considera una serie de instrumentos de evaluación de carácter preventivo respecto a las obras que se desarrollan en el territorio y el impacto que generan sobre el mismo. En términos generales se establece un marco general de regulación del derecho a vivir en un

medio ambiente libre de contaminación, con una protección constante, una asegurada preservación de la naturaleza y la conservación del patrimonio ambiental. Así mismo, regula los instrumentos de gestión ambiental como la Evaluación Ambiental Estratégica, el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, el Acceso a la Información Ambiental, la Responsabilidad por Daño Ambiental, la Fiscalización, Fondo de Protección Ambiental, y la institucionalidad ambiental de Chile. De estos instrumentos posiblemente los más importantes son el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) y la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) (BCN, 1994.).

Según el Decreto N°95, que estipula el reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, un Estudio de Impacto Ambiental es aquel que permite determinar si el proyecto o actividad se hace cargo de los efectos ambientales que genera, mediante la aplicación de medidas de mitigación, reparación y/o compensación. Los Estudios de Impacto Ambiental están dirigidos a los titulares de aquellos proyectos de inversión que son susceptibles de causar impacto ambiental, estos proyectos se encuentran especificados en el Artículo 10 de la Ley de Bases del Medio Ambiente N°19.300/1994 o el artículo N°2 del D.S. 95/2001. (BCN, 2001)

Una declaración de impacto ambiental es el documento descriptivo de una actividad o proyecto que se pretende realizar, o de las modificaciones que se le introducirán, otorgado bajo juramento por el respectivo titular, cuyo contenido permite al organismo competente evaluar si su impacto ambiental se ajusta a las normas ambientales vigentes. Además, la DIA deberá acompañarse de la documentación y los antecedentes necesarios para acreditar el cumplimiento de la normativa de carácter ambiental, y de los requisitos y contenidos de los permisos ambientales sectoriales. Todo proyecto o actividad susceptible de causar impacto ambiental, incluidas sus modificaciones, sólo se puede ejecutar o modificar previa evaluación de su impacto ambiental, mediante la presentación de una DIA o un EIA (BCN, 2001).

La norma ISO 14.000 es un conjunto de normas que se refieren a la gestión ambiental aplicada a la empresa, tienen como objetivo producir y prestar servicios que protejan al medio ambiente, regula todo lo relativo a los Sistemas de Gestión Ambiental, permitiendo a las empresas demostrar el compromiso asumido con la protección del medio ambiente (IEQFB, 2021). Comprende una serie de normas que permiten a las

organizaciones de todo el mundo realizar esfuerzos ambientales y medir su actuación, siguiendo criterios comunes aceptados internacionalmente, al mismo tiempo expresa cómo establecer un sistema de gestión ambiental efectivo. La familia de normas ISO 14.000 cuenta con muchas normas, entre ellas la ISO 14.001, esta es la más utilizada ya que certifica el sistema de gestión ambiental que se requiere implementar en una empresa. La norma chilena ISO 14.001 está basada en la norma ISO 9.000, que es una norma chilena elaborada y difundida por el Instituto Nacional de Normalización (INN), establece los requisitos para poder implantar con éxito un sistema de gestión ambiental, el cual garantiza que la organización desarrolla sus actividades respetando el medio ambiente, lo cual conlleva a la minimización de los impactos negativos generados sobre el medio (Pavéz O. 2020).

El año 2004 fue implementada esta norma ISO 14.001, la cual estuvo vigente hasta septiembre del año 2015, debido a que se modificó y se implementó la norma ISO14.001:2015, esta última se encuentra vigente actualmente. La norma ISO 14.001:2015 considera que el liderazgo es una pieza fundamental para que el Sistema de Gestión Ambiental funcione correctamente, es usada en todo tipo de empresas y entidades, ya sean públicas o privadas, en todos los sectores independiente de su actividad y tamaño, siendo el medio aceptado para demostrar el compromiso con el medio ambiente de la empresa (ISOTools Excellence, 2016).

2.1 Contexto regional.

La región de Atacama es una de las dieciséis regiones en que se divide Chile, limita al Norte con la región de Antofagasta, al Este con las provincias de Catamarca, La Rioja y San Juan pertenecientes a Argentina, al Sur con la región de Coquimbo y al Oeste con el océano Pacífico, se localiza entre los 25°17' y los 29°30' de latitud Sur y desde los 68°17' longitud Oeste. Está conformada por tres provincias (Chañaral, Copiapó y Huasco) y nueve comunas, donde su capital es Copiapó. Posee una superficie de 75.176,20 Km², equivalentes al 9,94% del territorio nacional (BCN, 2020). Las comunas de Copiapó y Tierra Amarilla se encuentran ubicadas entre las coordenadas U.T.M. Norte 6.984.838(m) y 6.950.762(m), Este 361.640 (m) y 376.061 (m). Ambas comunas se encuentran ubicadas

a orillas del río Copiapó, el cual nace en la precordillera y se extiende por 162 km desembocando en el océano Pacífico (MOP & DGA, 2004).

En la economía regional, los principales sectores económicos son el minero, el agrícola, el pesquero-acuícola y el turístico. Esta región es rica en minerales metálicos y no metálicos. Entre los metálicos están el cobre, hierro, plata y molibdeno, mientras que en la minería no metálica destacan minerales, como la baritina, cuarzo y mármol. La gran minería de cobre, que representa la mayor parte de las exportaciones regionales (más de un 90%), está representada por la mina El Salvador (Dawblin, 2012).

Algunas de las grandes mineras en la región son: Atacama Kozan, San José, Candelaria, Cerrillos, Fundición Hernán Videla Lira, Planta Magnetita, Pedro Aguirre Cerda, Manuel A. Matta, Caserones, La Coipa, Pascua - Lama, Cerro Negro, Planta Magnetita, Jilguero, entre muchas otras (SONAMI, 2023). Sin embargo, a pesar de ser estas una fuente económica principal para el país, también se caracterizan como fuentes de contaminación. La actividad minera presente en la ciudad trae consigo desechos mineros, que son depositados en las cercanías de la población. Es por esto, que los niveles de contaminación no solo pueden ser atribuidos a factores naturales, sino que también tiene que ver con la actividad antrópica que se realiza en el sector (Rivera C, 2017).

La agricultura, se desarrolla principalmente en los valles de las cuencas de los ríos Copiapó y Huasco. Las plantaciones más significativas son los parrones y los olivos. De la primera se obtiene uva de mesa, para exportación y para elaborar pisco, y de la segunda plantación se extraen las famosas aceitunas de Huasco y se produce aceite de oliva (Dawblin, 2012).

La actividad pesquera está concentrada en los puertos de Caldera, Chañaral y Huasco, cuya producción se destina mayormente a la elaboración de aceite y harina de pescado. La región cuenta con varias bahías que permiten el cultivo marino, destacando el de los ostiones (Dawblin, 2012).

La estabilidad climática junto a la belleza de sus costas y desiertos han permitido un fuerte incremento turístico en esta región, entre Chañaral y Caldera se desarrolla una costa con maravillosos paisajes, existiendo numerosas y hermosas playas, como Portofino, Flamenco, Obispito, Blanca, Brava, Bahía Inglesa, entre otras. La ciudad de Copiapó destaca por sus antiguas iglesias (como Belén y la Iglesia Catedral) y otros monumentos

nacionales. La comuna de Tierra Amarilla posee importantes sitios arqueológicos incaicos, dos museos y otras construcciones que están consideradas como Monumentos Históricos. En los alrededores de Copiapó se pueden apreciar los extensos viñedos que cubren el valle del río Copiapó, además de vestigios de algunos pucarás y geoglifos. Entre Huasco y Vallenar se pueden apreciar bellos paisajes, que van desde las extensas playas (como Playa Chica y Playa Grande) hasta los ricos valles cordilleranos, en estos valles se encuentran algunos pueblitos, como Alto del Carmen, dedicados a la elaboración de pisco y de pajarete (vino dulce). También, se encuentran varios parques nacionales, entre ellos: Parque Nacional Pan de Azúcar, Parque Nacional Nevado de Tres Cruces y Parque Nacional Llanos de Challe, además de la Reserva Nacional Pingüino de Humboldt. (CONAF, 2022).

El Parque Nacional Pan de Azúcar abarca un área de 43.764 ha, está situado 30 km al norte de Chañaral y a 194 km al norte de Copiapó, fue creado en 1985, mediante DS 527 del Ministerio de Bienes Nacionales. El Parque Nacional Llanos de Challe es un área natural protegida en Chile, localizada en la costa de la III Región de Atacama, posee 45.708 ha, creado por el Decreto N.º 946 el 29 de julio de 1994. El Parque Nevado Tres Cruces se encuentra dividido en dos sectores inmersos entre las cordilleras de Domeyko y Claudio Gay, es posible apreciar la concentración de altas cumbres existentes en el lugar, siendo Ojos del Salado la más atractiva, es el volcán más alto del mundo con 6879 msnm (CONAF, 2022).

Por otra parte, la cercanía del río Copiapó con las comunas de Copiapó y Tierra Amarilla, ha significado que la población tenga que lidiar constantemente con distintas adversidades, como los desastres naturales de aluvión, e inclusive fuentes de contaminación, como la erosión de rocas circundantes en el lecho del río y sus alrededores, que en muchos casos poseen un alto porcentaje de minerales perjudiciales para la salud de las personas. Sin embargo, esto no conlleva a una baja en la cantidad de población. Según el Censo del año 2017, la población de Copiapó alcanza los 286.168 habitantes y una densidad de 3,81 habitantes por kilómetro cuadrado (BCN, 2020).

La flora y fauna de esta región, hasta la quebrada del Salado es muy similar a la de la región de Antofagasta, sin embargo, aquí se presenta una mayor vegetación en comparación con las dos regiones anteriores, debido a una mayor cantidad de lluvias en

los meses de invierno. Se encuentran especies adaptadas a condiciones semidesérticas, algunas cactáceas, arbustos y abundantes hierbas vegetales tales como Añañuca amarilla (*Rhodophiala bagnoldii*), A. roja (*Rhodophiala phycelloides*) y A. rosada (*Rhodophiala advena*), Huilli (*Leuchocoryne ixioides*), Copiapo (Copiapo (*Copiapo dealbata*), Palo negro (*Lycium chilense*), Pata de guanaco (*Calandrinia longiscapa*), Churco (*Oxalis gigantea*), Coronilla de fraile (*Encelia tomentosa*); Cacho de cabra (*Skytanthus acutus*) y el Salitre (*Frankenia chilensis*) (Figura N°4) (Orellana F., 2017).

El principal atractivo de vegetación en la Región de Atacama lo constituye el desierto florido al sur de Copiapó, el cual se transforma en un campo florido durante la primavera. Este es un distinguido fenómeno natural, que se produce por las precipitaciones entre los meses de agosto y octubre, ocasionando que las semillas y los bulbos comiencen a florecer. Este fenómeno no ocurre simultáneamente en todo el desierto, depende de los brotes y la ubicación (Figura N°5) (Medina D, 2018).

En tanto, la fauna que habita en este lugar está compuesta por reptiles como la Lagartija rayada nortina (*Liolaemus alticolor*) y la Culebra de cola larga (*Philodryas chamissonis*). Mamíferos como el Zorro culpeo (*Pseudalopex culpaeus*), Zorro chilla (*Pseudalopex griseus*), Lobo de mar (*Otaria flovesens*), Guanaco (*Lama guanicoe*), Chungungo (*Lontra felina*) y Delfín nariz de botella (*Tursiops truncatus*). Entre las aves más típicas están la Gaviota dominicana (*Larus dominicanus*), Pelícano (*Pelecanus thagus*), Pato Jergón (*Anas tlavirostris*), Pato rana (*Oxyura vittata*), Tortolita cuyana (*Columbina picui*) y la Tagua chica (*Fulica armillata*) (IUCN, 2012).



Figura N°4: Se muestran algunas imágenes de la flora en la región de Atacama. 1) *Rhodophiala bagnoldii*. 2) *Rhodophiala phycelloides*. 3) *Rhodophiala advena*. 4) *Leuchocoryne ixiooides*. 5) *Copiapoa dealbata*. 6) *Lycium chilense*. 7) *Oxalis gigantea*. 8) *Encelia tomentosa*. y 9) *Frankenis chilensis*. (elaboración propia) (Orellana F., 2017) (Alonso C., 2021).



Figura N°5: Se observa el desierto Florido de Atacama, la fotografía fue tomada 77 km al Sur de Copiapó, en Punta de Díaz (Medina D, 2018).



Figura N°6: Se muestran algunas imágenes de la fauna en la región de Atacama. 1) *Liolaemus alticolor*. 2) *Philodryas chamissonis*. 3) *Pseudalopex culpaeus*. 4) *Pseudalopex griseus*. 5) *Otaria flavesens*. 6) *Lama guanicoe*. 7) *Lontra felina*. 8) *Larus dominicanus*. 9) *Columbina picui*. (elaboración propia) (IUCN, 2012) (SIB, 2017) (ROC, 2018).

2.2 Contexto histórico regional.

La historia de Atacama inicia con los primeros hombres y pueblos provenientes del continente asiático, en el Cuaternario, con hombres nómadas, cazadores, que según la teoría más conocida habrían cruzado el estrecho de Bering. Los primeros pobladores conocidos fueron los Molles (130 a.C. a 1000 d. C.), se sabe de ellos, gracias a investigaciones, que tuvieron gran desarrollo del proceso alfarero en la región de Atacama, eran practicantes de la cerámica, agricultura, ganadería, uso de pipas, pinturas para el cuerpo y alfarería gris. Luego en el año 1000 d.C. Las Ánimas se sobrepusieron a los Molles, ganando en territorios y destrezas, estos no eran nómadas, manejaban muy bien

el terreno agrícola y ganadero, su cerámica era bicolor y trabajaron el metal. Este pueblo se divide en cuatro fases, en la cuarta fase se vincula con los incas y se crea el pueblo de los diaguitas (Lutz G, 2015) .

Período prehispánico: Durante muchos años la región de Atacama fue habitada por tribus diaguitas que trabajaron la cerámica polivalente. El descubridor Diego de Almagro llegó al valle de Copiapó el año 1536, dando inicio al descubrimiento de Chile por parte de los europeos, posteriormente llegó a Chile Pedro De Valdivia, primero a la finca Chañaral, en las cercanías de la actual ciudad Diego de Almagro y desde allí se trasladó a Copiapó, donde se realizó la toma de posesión de Chile el 26 de octubre de 1540, a partir de ese momento se inicia la historia chilena. El año 1548 el capitán Juan Bohon fundó al interior del valle el fuerte Copiapó, pero los Diaguitas lo destruyeron y dieron muerte a todos los españoles. Luego, Francisco de Aguirre fue enviado por Valdivia a pacificar la zona de Atacama, para posteriormente instalarse en el fuerte Montalván donde se comenzó a levantar la ciudad de Copiapó, el año 1600 se da en este territorio el verdadero proceso de Colonización y el año 1619 ocurrió un terremoto en la región (Lutz G, 2015).

Periodo colonial: El 8 de diciembre de 1744, es fundada la ciudad de San Francisco de Copiapó de la Selva, actualmente Copiapó, siendo su fundador José Manso de Velasco. El año 1780 se fundó un puerto en la zona, en 1789 por orden del gobernador Ambrosio O'Higgins y debido a las minas, la creciente población convirtió el lugar en una ciudad (Vallenar), la cual comienza a ser un polo de desarrollo minero (BCN, 2021).

Periodo republicano: El año 1832 Juan Godoy descubre el mineral de plata de Chañarcillo, este descubrimiento propicia una fiebre de la plata en Chile que convirtió al país en uno de los principales productores de este metal en el mundo y permite el surgimiento de la economía nacional. Para mejorar el transporte del mineral al exterior se construyó aquí la primera línea férrea del país por William Wheelwright, mercante marino norteamericano, uniendo a Copiapó con Caldera en 1851 (Riveros L. & Ferraro R., 1985).

Siglo XX: En 1916 comenzó la explotación del cobre en Potrerillos, forjando una ciudad que sobrevive básicamente por la fundición y refinería de los minerales ahora explotados en la mina de El Salvador (BNd, 2020).

El 04 de diciembre de 1918 la ciudad se vio agravada por un fuerte sismo que destruyó gran parte, dejando 6 muertos y 100 heridos, 4 años después, en el año 1922 un

nuevo sismo de 8.5° Richter sacudió a la región el 10 de noviembre, seguido de un tsunami, dejando el 40% de las construcciones en el suelo y el 45% inhabitable, en toda la zona se registraron 3.000 fallecidos.

Posteriormente el desarrollo minero muestra nuevos bríos, destacando entre otros el yacimiento y fundición de Potrerillos en 1927, la fundición Paipote en 1953 y el yacimiento de El Salvador en 1959. También se comienza a desarrollar a partir de la década de 1970, especialmente en su segunda mitad, el área agroindustrial, dado que se facilitó el desarrollo técnico de la agricultura, permitiendo la introducción del riego por goteo, esto ha logrado que una de las zonas más áridas del mundo sea hoy una de las principales productoras de uva de mesa del mundo (Gerstmann R., 2016).

En 1976, por el proceso de regionalización impulsado por la dictadura del general Augusto Pinochet, se crea la III Región de Atacama, quedando Copiapó como Capital Regional.

El año 1996 fue adoptada oficialmente la Bandera de la región de Atacama por el Gobierno Regional mediante la resolución 79, esta fue oficializada recién el año 2005, cuando se le permitió por ley ser izada en reparticiones, edificios y actos públicos, pero ya era empleada masivamente por los habitantes como recuerdo de la Revolución Liberal de 1859 (Diario Chañarcillo, 2022).

Siglo XXI: El jueves 5 de agosto del año 2010 ocurrió un accidente en el yacimiento San José (se derrumbó la mina), lo que dejó atrapados 33 mineros a 700 metros de profundidad en la mina de oro y cobre ubicada 45 km al norte de la ciudad de Copiapó, la mina era explotada por la compañía San Esteban, posteriormente el miércoles 13 de octubre del mismo año lograron ser rescatados (Diario La Tercera, 2010).

La cercanía del río Copiapó con las comunas de Copiapó y Tierra Amarilla ha significado que la población tenga que lidiar constantemente con distintas adversidades, entre estas, desastres naturales de aluvión, el año 2015 un frente de mal tiempo provocó precipitaciones en toda la región, esto llevó a la crecida de los ríos Salado y Copiapó, quedando personas aisladas por cortes de rutas y cortes de energía eléctrica. La presidenta Michelle Bachelet declaró zona de catástrofe y el 25 de marzo declaró estado de excepción constitucional en toda la región de Atacama, por lo que las Fuerzas Armadas tomaron el

control de la zona. Esto se repite en el año 2017 pero con menores daños. (Griem. W, 2018).

El 18 de octubre del año 2019 ocurrió el estallido social, en todo el país se realizaron durante meses fuertes protestas y disturbios en el centro de la ciudad, lo que llevó al uso de alambres de púas, planchones de madera y/o acero en las tiendas y bancos para cubrir los ventanales, lo cual entregó otro aspecto a Copiapó. Se declaró toque de queda, Universidades y colegios se paralizaron y se formaron cabildos (Griem. W, 2019). En diciembre del mismo año aparecieron los primeros casos de COVID-19 (enfermedad infecciosa causada por el virus SARS-CoV-2) en la ciudad china de Wuhan, esta enfermedad llegó a Chile y a otros países el año 2020, decretando así esta enfermedad como pandemia por el director general de la Organización Mundial de la Salud (OMS), el doctor Tedros Adhanom Ghebreyesus, la cual aún no termina (MINSAL, 2020).

El 1 de agosto del año 2022, un socavón de 25 metros de ancho y más de 200 metros de profundidad apareció en la comuna de Tierra Amarilla, cerca de la mina de cobre Alcaparrosa, para el 8 de agosto, el diámetro del socavón creció a 50 metros (SERNAGEOMIN, 2022).

2.3 Antecedentes.

A continuación, se dan a conocer antecedentes bibliográficos de diferentes estudios realizados en las comunas de Copiapó y Tierra Amarilla.

- Álvarez S. (2015). Estudió y evaluó el efecto que tendría el derrame de una solución ácida en un acuífero aluvial detrítico, mediante simulación de un derrame de soluciones ácidas con alto contenido de metales disueltos, proveniente de una planta metalúrgica de lixiviación, hasta antes de llegar al agua subterránea en el sector bajo de la quebrada Paipote, región de Atacama, Chile.
- Arévalo. C. (2005). Realizó la carta geológica de Copiapó, región de Atacama, Chile, describe la geología de la zona.
- Bravo D. (2013). Analizó la incorporación de agua desalada al sistema hídrico en la cuenca del río Copiapó.

- Bravo M. (2019). Analizó la calidad del aire en la región de Atacama, Chile, para el período de tiempo comprendido desde el año 1993 al 2018, mediante validación de datos del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA).
- Calderón M. & Miranda F. (2018). Realizaron una evaluación ambiental preliminar en los campamentos de Diego de Almagro, Copiapó y Tierra Amarilla, próximos a sitios de minería metálica.
- Cortés I., *et al.* (2015). Realizaron un estudio de metales pesados en muestras ambientales de la región de Atacama, posterior al aluvión de 2015.
- Galdames F. (2015). Estudió la geoquímica de sedimentos activos del río Copiapó, luego de las inundaciones aluvionales de marzo de 2015.
- Gómez J. & Bustamante A. Centro de Información de Recursos Naturales (Chile) (2007). Realizaron un proyecto que estudió la optimización de sistemas de riego en las cuencas de Copiapó y Huasco.
- Montero L. (2012). Realizó una indagación sistemática sobre el problema de la sobreexplotación de los recursos hídricos de la cuenca del río Copiapó, en la región de Atacama, Norte de Chile.
- Ortiz J. (2019). Publicó una noticia en la cual muestra que la contaminación de la región de Atacama no afecta a todas las personas por igual debido a las distintas ubicaciones de los focos contaminantes.
- Pizarro J. & Devi A. (2018). Realizaron una investigación sobre la erosión eólica en la superficie de relave San Esteban, en la ciudad de Copiapó, mediante captación de material particulado durante 6 días.
- Ramírez F. (2020). El documento describe un estudio de metodología para evaluación de la susceptibilidad de erosión y potenciales inestabilidades físicas en depósitos de relaves, en la comuna de Copiapó, Chile.
- Ramírez P. (2019). Publicó un informe que revela desastre ambiental en las Comunas de Copiapó y Tierra Amarilla, debido a la contaminación en el agua y presencia de relaves, tronaduras, derrames y material particulado.
- Rojas M., *et al.* (2018). Realizaron una Fito estabilización de un tranque de relave en Copiapó, con la especie *Schinus polygamus*.

- Solano C. (2019). Estudió riesgos naturales y modificación de la estructura del mercado de suelos; el caso de la inundación de Copiapó, Chile.
- Soto M., *et al.* (2010). Analizaron aspectos geodinámicos del sistema paleo estuario del río Copiapó durante los últimos 30 años.
- Valenzuela P. (2015). Su estudio analiza un sistema de medición, que permita evaluar la emisión de material particulado al ambiente, por efecto eólico desde depósitos de relave de cobre, con la finalidad de recuperar un espacio urbano sostenible.
- Villarroel L., *et al.* (2009). Determinaron presencia de plomo mediante captura, cuantificación y caracterización de material particulado en techumbres de la ciudad de Copiapó.
- Rojos S., *et al.* (2020). Realizaron un estudio de la relación entre la variación de concentraciones de cobre, plomo, mercurio y arsénico con la dinámica de transporte de sedimentos a lo largo de un año en Copiapó, Chile.
- Castro C., *et al.* (2012). Publicaron en la revista de Geografía Norte Grande, 53: 123-136, un estudio de la Geomorfología y el geo patrimonio del Mar de Dunas de Atacama, en Copiapó (27°S), Chile.
- Novoa J., *et al.* (2008). Desempeñaron un pequeño estudio de análisis en los paisajes Eco-geográficos de la región de Atacama, donde plantearon finalmente una síntesis de ambientes naturales para la región.

3. CAPÍTULO III. MARCO GEOLÓGICO.

3.1 Contexto geomorfológico.

La geomorfología es la ciencia que estudia las formas de la Tierra, cuya superficie es el resultado de transformaciones dinámicas y evoluciones temporales de procesos constructivos y destructivos. Estos procesos dependen principalmente de los factores climáticos, geológicos y tectónicos, donde los factores climáticos y tectónicos muestran en la región un comportamiento poco común. Dentro del factor climático, la región de Atacama se encuentra en una zona sumamente árida, con un clima desértico a semidesértico. En las alturas se encuentra un desierto frío con una tasa de precipitaciones elevadas, mientras que los sectores bajos pertenecen a un semi desierto de calor con pocas cantidades de precipitaciones. Para el factor tectónico, la tasa del alzamiento tectónico en el sector muestra cifras bien elevadas, la pertenencia de la región al sistema orogénico andino produce todavía un fuerte alzamiento de las montañas (Griem W., 2020).

La geología en general siempre tiene una influencia en la formación de paisajes. En la región de Atacama hay actividad volcánica, en la alta cordillera especialmente dominan los estratovolcanes activos y grandes llanuras hechas por material extrusivo depositado horizontalmente. Desde el punto de vista geomorfológico, existen una serie de elementos fisiográficos que se pueden identificar claramente; los grupos principales son: Cordillera de los Andes, Depresión de salares, Precordillera, Llanura intermedia y Cordillera de la Costa (Figuras N°7 y N°8) (Griem W., 2020).

La Cordillera de los Andes se constituye de volcanes y rocas volcánicas recientes, presenta grandes alturas, destacando Nevado San Francisco, Incahuasi, Tres Cruces, Nevado Ojos del Salado correspondiente a la cumbre más alta de Chile con 6.893 m s.n.m., cerro Piuquenes con 5.591 m s.n.m. en el sector alto de la subcuenca del río Manflas, cerro Cárdenas con 4.280 m s.n.m. en el sector alto de la subcuenca del río Jorquera y cerro Estancilla con 3.556 m s.n.m. perteneciente a la subcuenca del río Pulido (MOP, 2004).

La presencia de depresión de salares solo existe en el Norte de la región de Atacama, tiene a desaparecer hacia el Sur, se trata de un llano relleno de rocas clásticas y químicas (sales de evaporación) que en general no contienen salida directa de los ríos hacia el mar (cuenca endorreica), su altura promedio es de 3.200 m s.n.m y los límites de esta unidad morfológica pertenecen a rocas paleozoicas (Griem W., 2020).

El sector de la Precordillera tiene alturas entre 3.000 y 4.500 m s.n.m., se caracteriza por la continuación hacia el sur de la Cordillera de Domeyko que presenta un conjunto de serranías en sentido transversal. Geológicamente afloran estratos mesozoicos de ambiente continental (areniscas, conglomerados, andesitas) y de ambiente marino (calizas), hacia el Este de la precordillera dominan rocas extrusivas del mioceno (Griem W., 2020).

La llanura intermedia se presenta parcialmente cubierta, conformando pampas o llanuras de amplias extensiones. La cuenca del río Copiapó presenta un relieve irregular y accidentado, predominando la alternancia de valles en sentido transversal con interfluvios montañosos denominados serranías. El relieve interno al Norte del río Copiapó se hace muy estrecho, caracterizado por pampas o cuencas desarrolladas entre las serranías precordilleranas y los relieves costeros (BCN, 2020b).

Interrumpiendo la depresión intermedia es característico de la región encontrar en dirección Este a Oeste los denominados cordones o valles transversales que unen las cordilleras de la Costa y de los Andes, los que a su vez forman valles fluviales. Estos valles transversales están constituidos de rocas clásticas no consolidadas con alturas de 500 a 1.500 m s.n.m. En el sector central del territorio regional aparece el primer valle transversal enmarcado al norte por un conjunto de sierras, este valle transversal corresponde al río Copiapó que nace en los faldeos de la cordillera andina y posee un curso general en sentido Sureste-Noroeste. Al sur de la región aparece el segundo valle transversal que constituye el curso del río Huasco. En general el relieve de esta zona se caracteriza por la alternancia sucesiva de cordones montañosos y valles de sentido transversal (Quezada J. *et al.*, 2010).

Finalmente, la Cordillera de la Costa es discontinuada por la presencia de cordones transversales y la erosión marina, dando cabida a planicies costeras amplias en la zona de Chañaral. Su altura disminuye ostensiblemente hacia el Oeste, se compone de cerros con altura moderada (1.000 – 2.200 m s.n.m.), principalmente compuestos por rocas intrusivas Cretácicas, desde Copiapó hacia el océano Pacífico y Planicies Litorales, Al Sur de los 28° no se puede observar una distinción entre la Cordillera y de la costa y la Precordillera (GOREATACAMA, 2019).

A lo largo del litoral en el norte de Chile se encuentra el Farellón costero, este es una serie de acantilados que se extienden más de 1.000 km a lo largo del desierto de

Atacama, constituyendo una gran parte de la vertiente occidental de la Cordillera de la Costa Chilena (Figura N°9) (Quezada J. *et al.*, 2010).



Figura N°7: La figura muestra la geomorfología a gran escala de la región de Atacama. (Griem W., 2016).

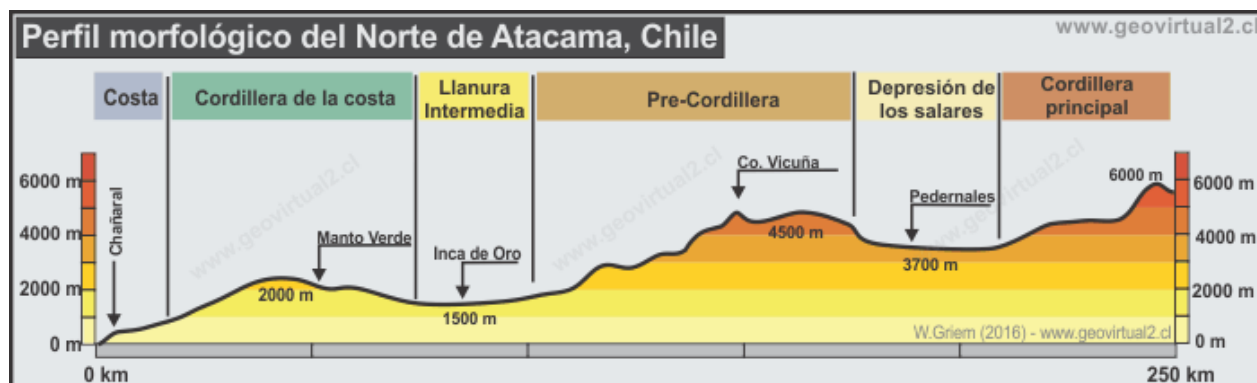


Figura N°8: Perfil esquemático morfológico del Norte de Atacama, Chile. La línea del perfil se ubica aproximadamente entre Chañaral y Salar de Pedernales (Griem W., 2020).

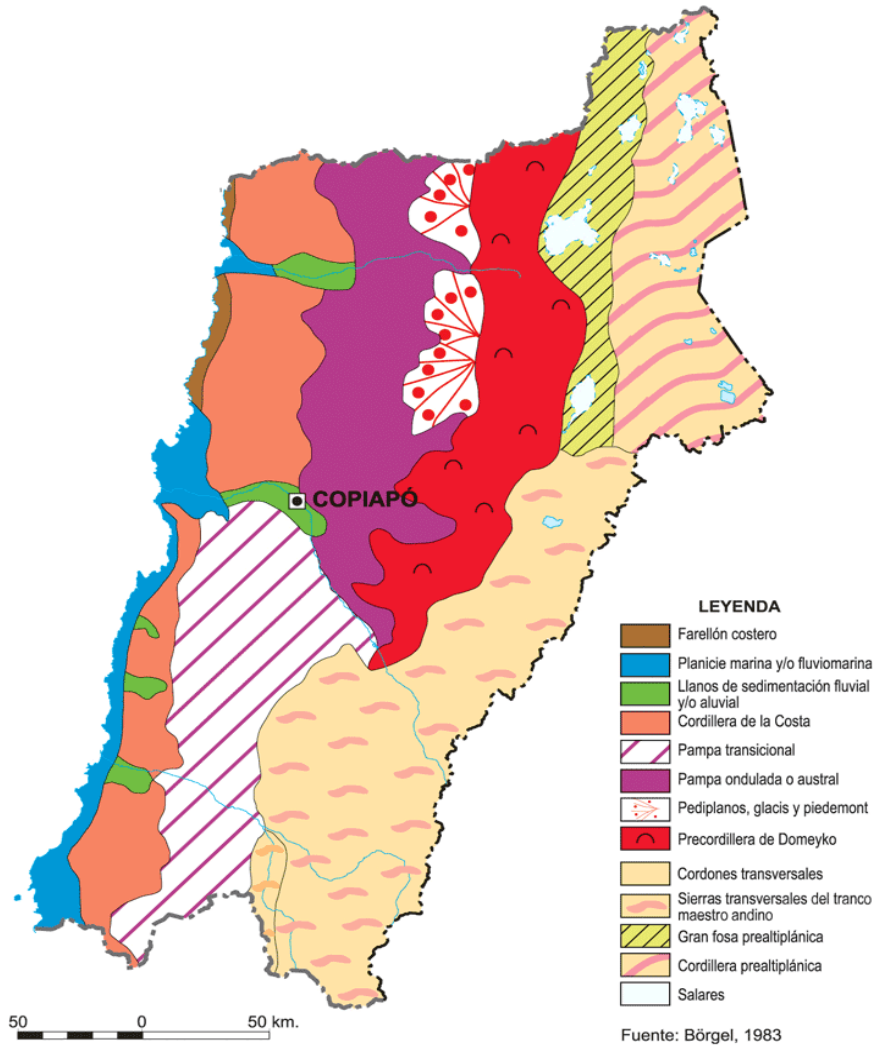


Figura N°9: Geomorfología en la ciudad de Copiapó, (Börgel, 1983).

3.2 Altos topográficos.

El relieve topográfico juega un papel significativo en el clima de la región, ya que constituye una barrera a las influencias oceánicas, impone una disminución a la temperatura a medida que aumenta la altitud y además proyecta sombras sobre los estrechos valles, las serranías transversales (culminan por sobre los 2.500 m s.n.m.) y los cordones longitudinales del interior (con cimas de más de 4.000 m s.n.m.), afectando al ritmo diario y anual de la temperatura (Antonioletti R., *et al.* 1972).

Al Norte de la región, la cordillera de los Andes presenta las últimas cuencas salinas que definen el altiplano, formando un conjunto de pequeños salares andinos, se caracteriza por la continuación hacia el sur de la cordillera de Domeyko, que presenta un conjunto de serranías en sentido transversal. El sector precordillerano tiene alturas comprendidas entre los 2.500 m s.n.m. en el Oeste y 2.700 m s.n.m. en el Este, destacando el cerro Vizcacha con una altura de 2.744 m s.n.m. (Quezada J. et al., 2010).

Las elevaciones (cerros y lomajes) que se presentan en el sector del valle central, están comprendidas entre los 1.200 y 2.700 m s.n.m. en el Este y entre los 900 y 2.300 m s.n.m. en el sector Oeste. Las alturas más significativas en el tramo final del río Copiapó (desde el sector de Paipote hasta la desembocadura), corresponden a los cerros Chancoquín con 1.020 m s.n.m. y Tía Ramos de 1.076 m s.n.m. en el sector Norte del río Copiapó y mientras que en el sector Sur de cause se aprecian los cerros Bramador con 1.172 m s.n.m., Pata de Gallina con 732 m s.n.m. y Totoralillo de 397 m s.n.m. (MOP, 2004).

El área de estudio alcanza un alto topográfico de 660 m s.n.m, muestra una zonificación de altos topográficos (Figura N°10), en la cual, los alrededores del río Copiapó muestran valores similares que no superan los 700m (Sitio Web: topographic-map.com, 2024).

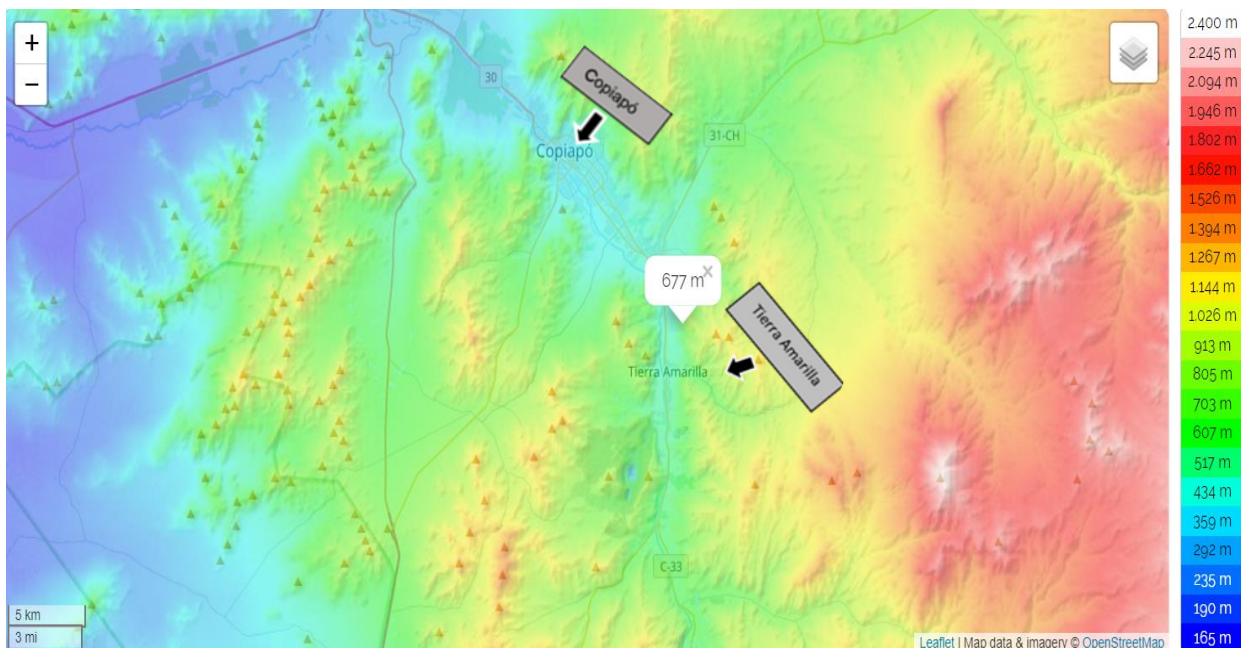


Figura N°10: La figura muestra los altos topográficos en las comunas de Copiapó y Tierra Amarilla (extraído de topographic-map.com).

3.3 Valle.

La región de Atacama se ubica entre la zona hiper-árida de la región de Antofagasta y la zona mediterránea semiárida de la región de Coquimbo. Desde los 27°S hacia el Sur comienza la zona de los valles transversales, que gracias a los recursos hídricos provenientes de la cordillera posibilitan el desarrollo de actividades agrícolas (Juliá C., et al., 2018).

En el sector central del territorio regional aparece el primer valle transversal, enmarcado por el Norte por un conjunto de sierras, este valle transversal corresponde al Valle del río Copiapó, que nace en la cordillera Andina y posee un curso general en sentido Noroeste. La cuenca presenta un relieve muy irregular y accidentado, predominando la alternancia de los valles transversales (BCN, 2020b).

Las terrazas laterales del valle, en el tramo de San Pedro hasta San Camilo y las planicies litorales en la desembocadura del río Copiapó, son significativamente extensas, comprenden una amplitud entre 5 y 11 km (IGM, 1986).

3.4 Río Copiapó.

El río Copiapó nace a los 28° de latitud Sur, en la unión de los tributarios Jorquera, Pulido y río Manflas, posee un largo aproximado de 162 km, con un curso general en sentido Noroeste hasta su desembocadura en el mar a los 27° 17' Sur. Desde su inicio hasta el sector de Lautaro, presenta alturas de 2.500 a 2.700 m s.n.m., desde el sector de Lautaro al sector de Paipote el río continúa con amplitud de 900 a 2.700 m s.n.m., mientras que en el tramo final del río Copiapó, desde el sector Paipote hasta la desembocadura el cauce del río se presenta con 397 a 1.172 m s.n.m. (Figura N°11). Las planicies litorales en la desembocadura del río Copiapó, son bastante extensas (MOP, 2004).

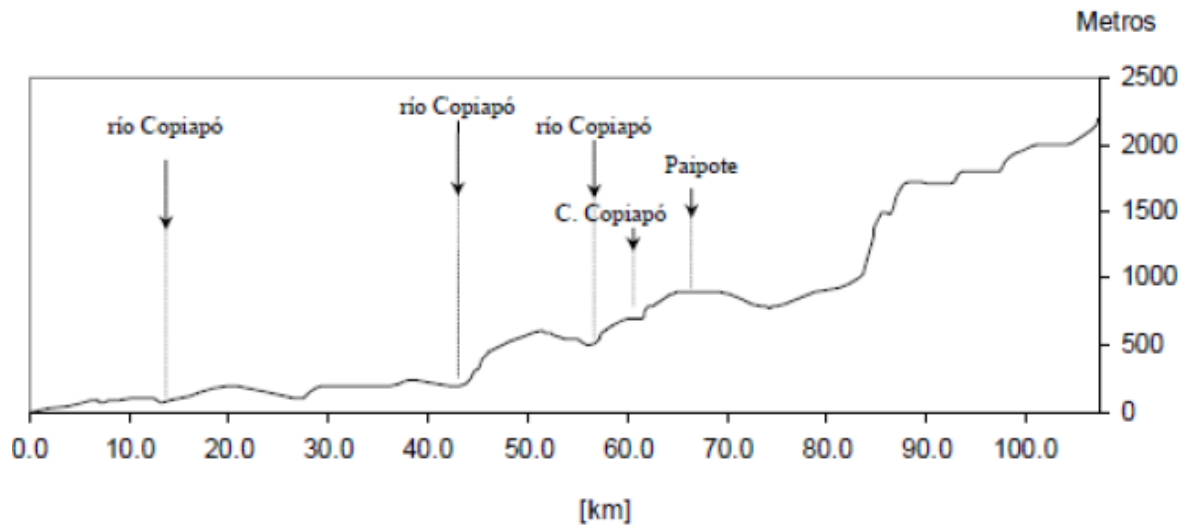


Figura N°11: Perfil topográfico W-E a la latitud de 27°20', cuenca del río Copiapó, (MOP, 2004).

3.5 Contexto Climático.

En la región de Atacama los cambios de relieve coinciden con cambios en el clima. En el límite Norte regional el clima es muy árido, mientras que, hacia el Sur, las precipitaciones invernales de Copiapó aumentan de manera paulatina. De esta forma, al Sur de la ciudad de Copiapó el clima se transforma en desierto marginal, para dar paso al clima de estepa cálido (BCN, 2015).

El clima predominante en la región de Atacama es el desértico, que se atenúa de Norte a Sur debido al aumento de las precipitaciones (Quezada J., *et al.*, 2010).

Se destacan cuatro sub-climas, desértico litoral, desértico de interior, desértico marginal y desértico marginal de altura (Errázuriz A., 1998).

La capital de Copiapó se encuentra emplazada en una zona de transición climática desde el desértico marginal a estepárico cálido. Las altas temperaturas se encuentran reguladas por la relativa influencia marítima que recibe la zona, por el contexto geográfico de valle transversal en el que se encuentra, lo cual la hace entrar en un contacto casi directo con las planicies litorales. Por esta misma razón, generalmente entra a la ciudad una nubosidad costera durante las mañanas, la cual se dispersa generalmente después del mediodía. Las temperaturas en verano son cálidas durante el día llegando a los 32°C a 42°C y superando en ocasiones los 45°C, mientras que durante la noche en esta época del año bajan hasta llegar regularmente a los 22°C. En la época invernal se producen durante

la noche temperaturas de 0°C a 5°C y en el día sube a los 20°C o 25°C (Figura N°12). La temperatura más baja registrada ha sido de -40°C, el 19 de julio de 2008 (ONEMI Chile, 2011).

La velocidad promedio del viento por hora en Copiapó tiene variaciones estacionales considerables en el transcurso del año. La parte más ventosa del año dura 5,8 meses, del 27 de septiembre al 22 de marzo, con velocidades promedio del viento de más de 9,5 kilómetros por hora. El mes más ventoso del año en Copiapó es enero, con vientos a una velocidad promedio de 11,8 kilómetros por hora; y el mes menos ventoso del año en Copiapó es junio, con vientos a una velocidad promedio de 7,1 kilómetros por hora (Figura N°13). Por otra parte, la dirección del viento promedio por hora predominante en Copiapó es al oeste durante el año (Figura N°14). (Weather Spark, 2024).

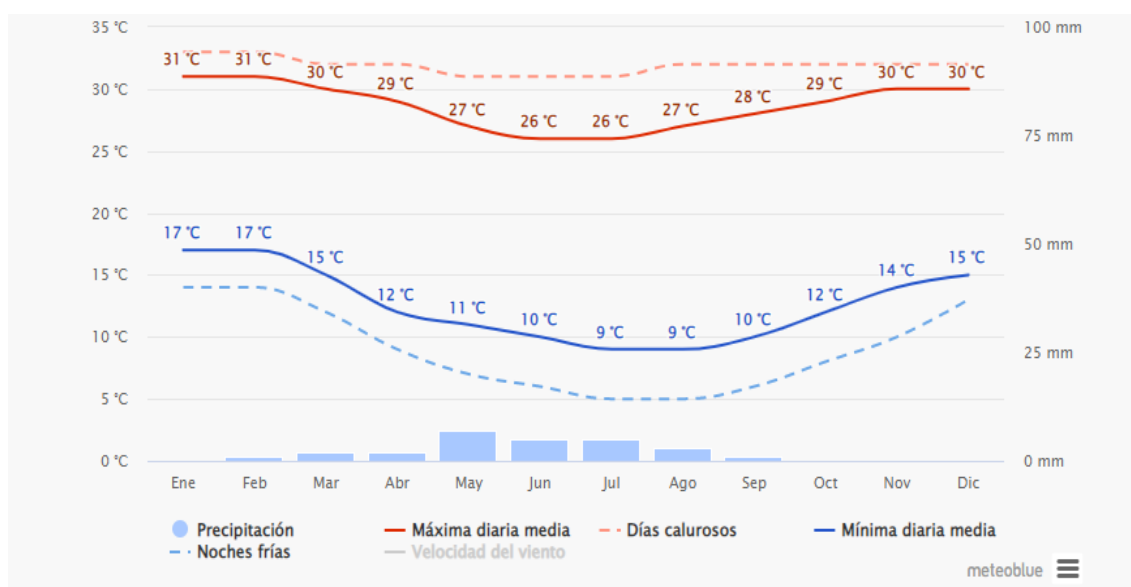


Figura N°12: El gráfico muestra 30 años de datos meteorológicos históricos. La "máxima diaria media" (línea roja continua) muestra la media de la temperatura máxima de un día por cada mes de Copiapó. Del mismo modo, la "mínima diaria media" (línea azul continua) muestra la media de la temperatura mínima. Los días calurosos y noches frías (líneas azules y rojas discontinuas) muestran la media del día más caliente y noche más fría de cada mes en los últimos 30 años (Weather Spark, 2022).

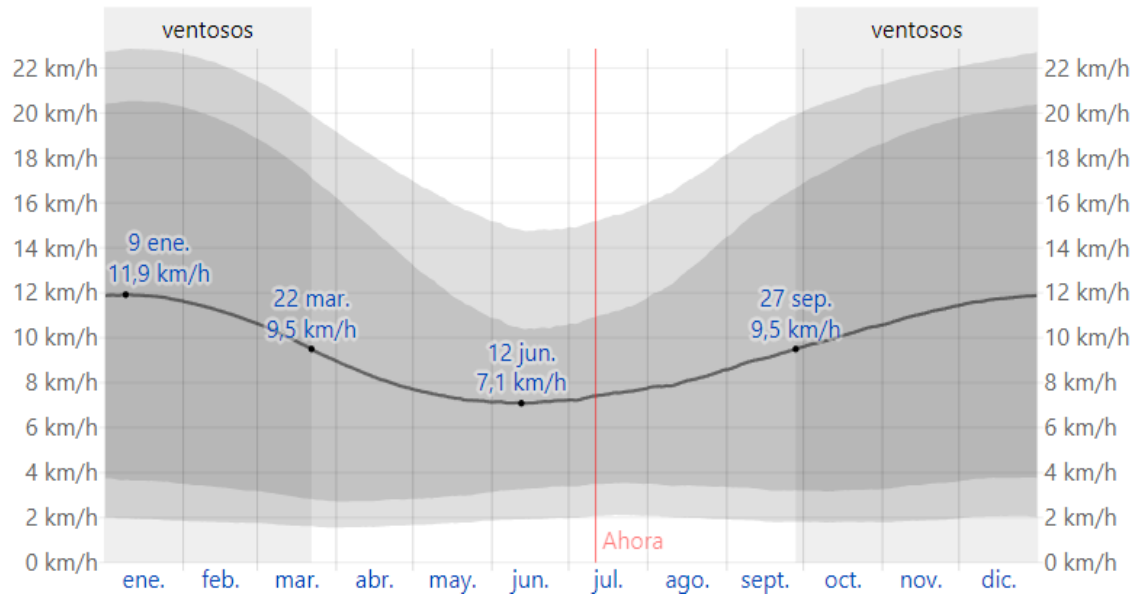


Figura N°13: La figura muestra la velocidad del viento promedio de Copiapó en el año, el promedio de la velocidad media del viento por hora se muestra en la línea gris oscuro (Weather Spark, 2024).

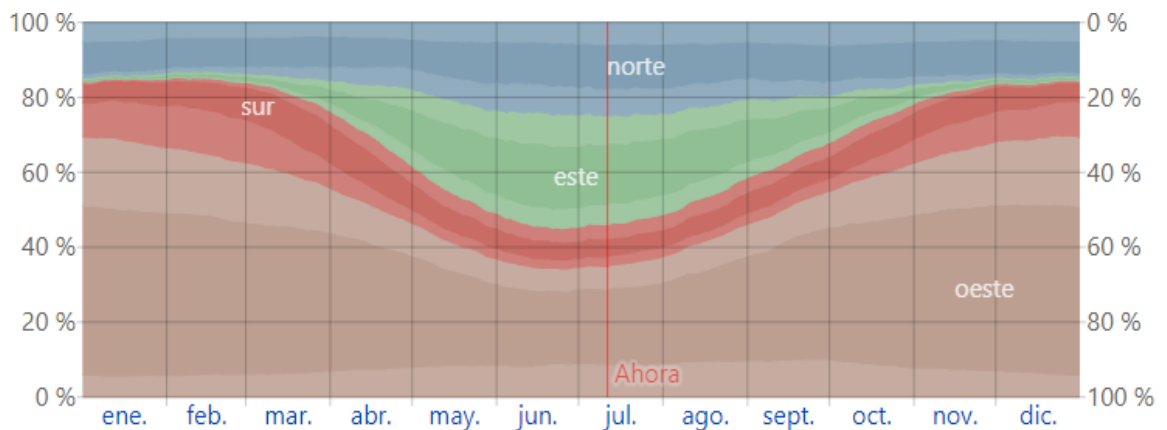


Figura N°14: La figura muestra la dirección el viento promedio de Copiapó en el año, las áreas de colores claros en los límites son el porcentaje de horas que pasa en las direcciones intermedias implícitas (noreste, sureste, suroeste y noroeste) (Weather Spark, 2024).

3.6 Redes de drenaje.

En el altiplano de esta región existen grandes salares, como Pedernales y Maricunga; y algunos cuerpos lacustres, como laguna Verde, laguna Santa Rosa y laguna del Negro Francisco. De los ríos en esta región, destacan tres sistemas hidrográficos: la quebrada del Salado, el río Copiapó y el río Huasco. El aumento de las precipitaciones y la presencia

de nieve en las altas cumbres permiten el desarrollo de cursos de agua, cuyo régimen de alimentación es pluvionival, lo cual condiciona el escurrimiento de agua durante todo el año (GOREATACAMA, 2019).

El río Copiapó (Figura N°15) nace de la unión de los tributarios Jorquera, Pulido y Manflas, atraviesa las ciudades de Tierra Amarilla y Copiapó, entre las cuales recibe la confluencia de la quebrada de Paipote, hasta su desembocadura en el océano Pacífico. Cursa en sentido Noroeste con profundidades de 16 a 0,7 m en la desembocadura, posee un área hidrográfica de 18.400 km^2 y una longitud de 162 km. En el sector alto, destaca la existencia de permeabilidad muy baja debido a la existencia de rocas volcánicas, sedimentarias – volcánicas y plutónicas e hipabisales (MOP, 2004). En la cuenca de Copiapó, destacan dos tipos de escurrimientos, uno superficial y uno subterráneo, el primero tiene dirección SSW, corre paralelo a la quebrada de Paipote por un lecho de muy baja permeabilidad hasta su confluencia con el río Copiapó. El segundo se origina de la confluencia de aguas subterráneas desde los ríos Manflas a Jorquera que se unen en el sector de Embalse Lautaro. A partir del sector Embalse Lautaro, escurre paralelo al río Copiapó en dirección NNW hasta la altura de Copiapó con profundidades freáticas que varían de los 53 a 11 m (Gob. Chile, MOP & DGA, 2004). Esta zona se destaca por tener un intenso uso para riego, la presencia de terrazas fluviales y sectores con abundante humedad permiten que el río Copiapó sea intensamente utilizado en faenas agrícolas (BCN, 2020). Las aguas subterráneas escurren por depósitos no consolidados, relleno del período cuaternario de alta permeabilidad y volcano-sedimentarias del período terciario. (Ramírez F., 2020)

En sus primeros kilómetros hasta el sector de la localidad de Lautaro, su cauce presenta un escurrimiento de tipo recto y valle escarpado, desde la localidad de Lautaro hasta el sector de Paipote, el río sigue con escurrimiento recto, recorriendo sectores del valle central, con terrazas fluviales de mayor amplitud. En el tramo final del río Copiapó (desde el sector de Paipote hasta la desembocadura), el cauce presenta en algunos sectores (Aguirre, Toledo, Valle Fértil y Angosturas), un escurrimiento recto – meándrico y de tipo anastomosado en el sector de Valle Fértil (Gob. Chile, MOP & DGA, 2004).

En la figura N°16 se muestra el Mapa Base del área de estudio con sus respectivas redes hídricas, se puede observar, una ramificación irregular de corrientes tributarias que

corresponden a un drenaje natural, por lo que se clasifica como drenaje de tipo dendrítico. Se logra distinguir un sistema de drenaje principal que cursa Noroeste-Sureste, el cual corresponde al río Copiapó.

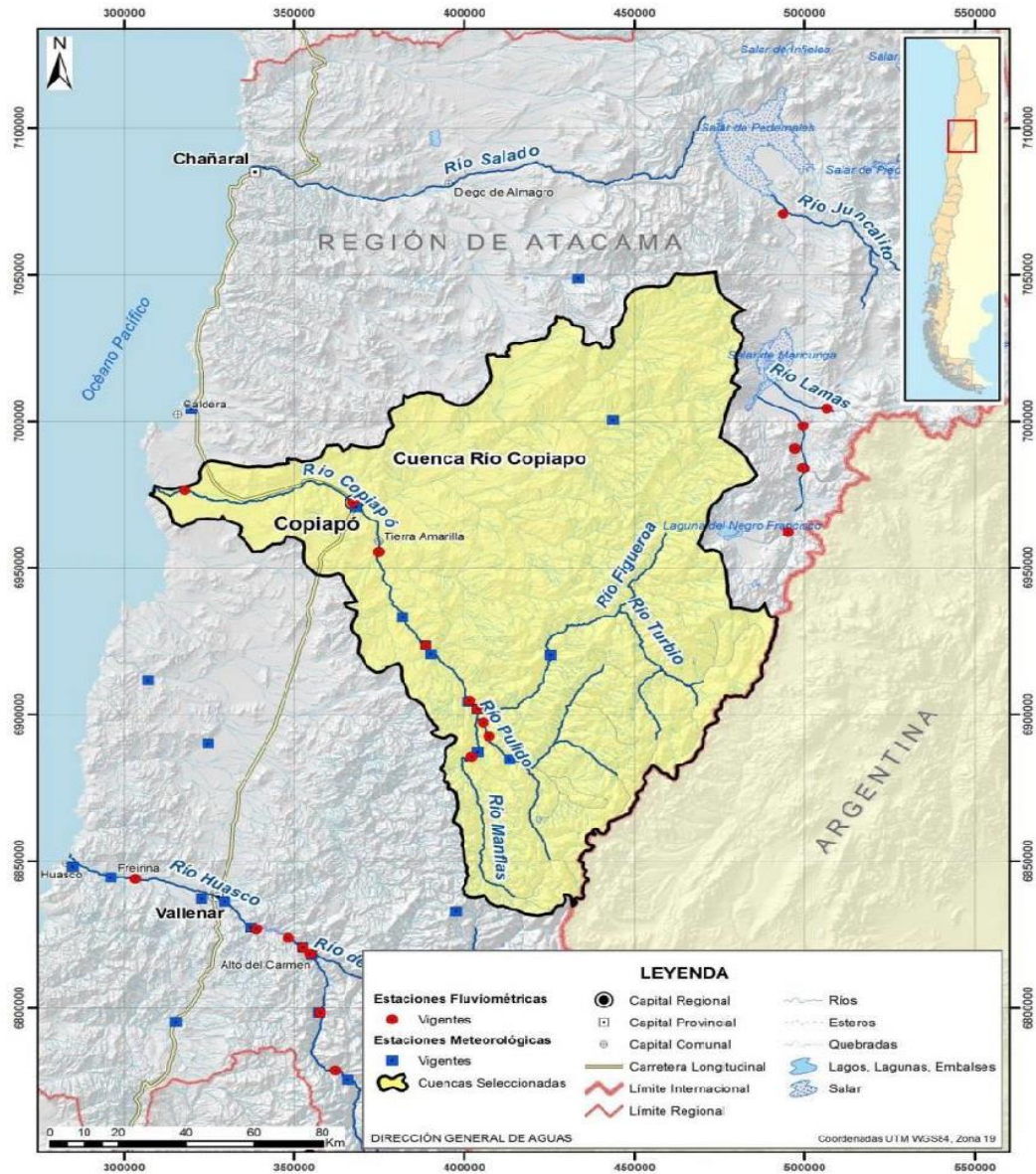


Figura N°15: La figura muestra información hídrica de la Cuenca del río Copiapó (DGA, 2015).

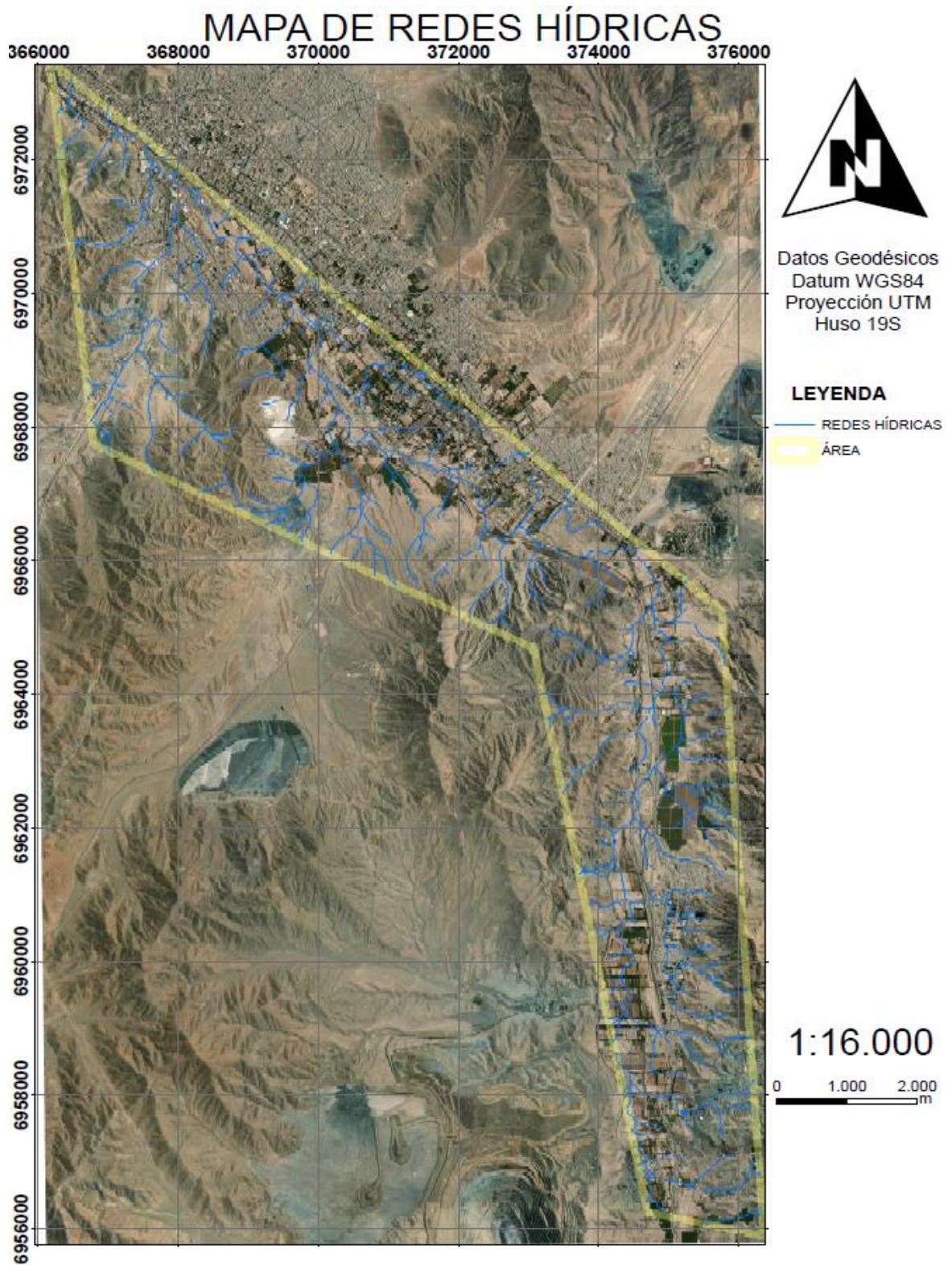


Figura N°16: La figura muestra redes hídricas del área de estudio (Elaboración propia, con programa SAS.Planet, GlobalMapper y ArcMap).

3.7 Contexto Geológico.

3.7.1. Geología histórica de la región de Atacama:

En el periodo Pérmico, todas las masas continentales estaban reunidas en un único supercontinente (Pangea), el cual se separó en el Jurásico en dos supercontinentes (Laurasia, al Norte y Gondwana, al Sur), separados entonces por el océano Tethys que se extendía desde el sur de Asia, por la actual cuenca del Mediterráneo, hasta la actual América. Posteriormente el continente de Gondwana se subdividió en occidental y oriental, lo cual tuvo una fuerte importancia en los procesos del margen pacífico de Sudamérica, iniciando la subducción de la placa oceánica de Phoenix o Aluk bajo el margen continental, permitiendo así el desarrollo de una extensión generalizada, manifestada a través del establecimiento de un arco magmático que se extiende desde el Sur de Perú hasta Chile central, y diversos sistemas de cuencas de intra y tras arco (Hinsbergen D., *et al.* 2019).

A inicios del Cretácico, Atlántica, Sudamérica y África finalmente se separaron de Gondwana (es decir, se separaron de la Antártida, India y Australia), causando la apertura de un "océano Índico del sur". En el Cretácico, Gondwana se fragmentó para abrir el Océano Atlántico del sur, mientras Sudamérica comenzó a moverse hacia el Oeste, alejándose de África, es durante este periodo que a lo largo del Norte de Chile fue desarrollada casi totalmente una tectónica extensional de tras arco, cuya subsidencia permitió la expansión de plataformas marinas carbonáticas, que fueron conectadas con el proto pacífico a través de espacios laterales entre el arco volcánico (Irastorza A., *et al.*, 2021). La subducción es la gran responsable de todo el continente sudamericano, esta es la acción en la cual la placa oceánica penetra a la continental, para el caso de nuestro país es la placa de Nazca penetrando a la Sudamericana, lo que desencadena el avance de la fosa hacia el continente debido a su erosión, u otras manifestaciones de la naturaleza como los volcanes, terremotos y margen continental. Luego, inicia una fase de acortamiento, se produce un cambio mayor desde un régimen de subducción tipo "mariana" a otro tipo "chilena", sin cuenca de tras arco y con arco volcánico único. Este cambio de ángulo inicia el margen andino, con una subducción de tipo "rollback", generando cuencas de intra y tras arco (Uyenda S., 1982).

En el Cretácico superior inicia la expansión activa del Océano Atlántico, lo que produce el empuje del continente hacia la fosa y con esto, el cierre de las cuencas extensionales Jurásicas a Cretácicas en el margen activo de Sudamérica (Mpodozis C. & Allmendinger R., 1993; Russo R. & Silver P, 1996). A partir de este momento, el orógeno se acorta progresivamente y se alternan etapas de extensión en que las cuencas ocupan depresiones tectónicas localizadas o bien corresponden a cuencas de antepaís producidas por flexión elástica de la litósfera en el frente de avance del orógeno (Arévalo C. & Grocott J., 1997).

La Región Atacama es parte del margen continental activo de América del Sur, entonces es parte del sistema tecto-genético de los Andes (Pindell J. & Dewey J., 1982; Mahlburg S., *et al.* 1989; Franzese J. & Spalletti L., 2001).

3.7.2 Geología estructural:

En la región de Atacama el inventario tectónico se extiende de la presencia de fallas macro regionales (Falla Atacama y *West Fissure System*), fallas de mediana magnitud y una multitud de fallas pequeñas. Los plegamientos no se encuentran con frecuencia, pero generalmente son suaves con un gran ángulo de apertura. Se presentan distintos estilos estructurales que caracterizan tanto el dominio de la Cordillera de la Costa como el de la Precordillera, por lo que se los trata por separado (Griem W., 2020).

En el dominio de la Cordillera de la Costa, el rasgo estructural más importante es una banda milonítica Nornoreste. Litológicamente, la banda milonítica está definida por proto a ultramilonitas muy foliadas, cuyas composiciones y texturas dependen de las rocas de protolito (Arévalo C., 2005).

En el dominio de la Precordillera, las estructuras más antiguas están representadas por fallas normales de bajo y alto ángulo en el valle del río Copiapó, al Sur de Paipote (Arévalo C., 2005).

Los elementos tectónicos más importantes son la Falla Atacama y la Falla La Ternera (o *West Fissure System*). Ambas se extienden en general Norte-Sur. Son fallas de rumbo (*strike slip*) con una fuerte componente vertical (falla oblique). Por un lado, las dos fallas muestran un fuerte desplazamiento dextral y sinistral, pero al otro lado tienen la

característica de un mega-graben. Los sectores costeros y cordilleranos muestran un alzamiento más avanzado que la zona interior - precordillerana. Las actividades de las dos fallas principales provocaron un ambiente tectónico dependiente de las dos grandes fallas principales (Griem W., 2020).

El Sistema de Fallas de Atacama (SFA) separa una franja occidental formada por plutones de edad jurásica superior a cretácica inferior temprana (155-125 Ma), de otra oriental compuesta por plutones de edad cretácica inferior tardía (123-103 Ma). La franja occidental está formada por tres plutones de rumbo Nornoreste y edades decrecientes hacia el Este: Plutón Cerro Moradito (JKdm, 155-140 Ma), Plutón Cerro Morado (Kigm, 140-137 Ma) y Diorita Cuarcífera Sierra Chicharra (Kidsc, 128-125 Ma). La franja oriental está formada por cinco plutones mayores los que, a diferencia de sus contrapartes occidentales, están orientados según rumbo Nornoroeste: Diorita La Brea (Kidlb, 123-117 Ma), Plutón San Juan (Kidsj, ca. 115 Ma), Plutón La Borracha (Kimdlb, 114-103 Ma), Monzodiorita San Gregorio (Kimdsg, ca. 111 Ma) y Diorita Sierra Atacama (Kidsa, 117-104 Ma); y por dos grupos de stocks e hipabisales menores: Microgranitos y Aplitas del Portezuelo Cucharas (Kigrpc, ca. 110 Ma) y Granodioritas de Sierra Pajas Blancas (Kigdpb, 108-103 Ma). Rocas volcánicas y volcanoclásticas del Jurásico (Formación La Negra), jurásico-cretácico inferior (Formación Punta del Cobre) y del Cretácico Inferior (Formación Bandurrias) aparecen como paredes y techos plutónicos de los intrusivos mayores, lo que indica para esta franja presenta un nivel de exhumación menor que el de su contraparte occidental (Arévalo C., 2005).

En la Precordillera, la formación volcánica La Negra, las formaciones calcáreas marinas del Grupo Chañarcillo y las formaciones volcánicas, volcanoclásticas y epiclásticas de Punta del Cobre y Bandurrias, representan depositación en el ámbito del arco Jurásico y del trasarco jurásico superior a cretácico inferior. Más al Este, la formación Cerrillos, de edad cretácico inferior a superior, documenta la acumulación de alrededor de 4000 m de espesor de sedimentos principalmente clásticos en una cuenca continental extensional (Arévalo C., 2005).

3.7.3. Síntesis de recursos minerales:

En la región, situaciones bien particulares producen las frecuentes zonas de alteración hidrotermal, diques y vetas. Estas estructuras relacionadas a sistemas hidrotermales afectaron zonas en distintas magnitudes y con frecuencia se forman en conjunto con depósitos de cobre, plata, oro y hierro (Arévalo C., 2005).

La mineralización de tipo metálico existe tanto en la Cordillera de la Costa como en la Precordillera. Para la Cordillera de la Costa, se ha podido distinguir mineralización de Fe, Fe-Au, Fe-Cu-Au, Cu-Au y Cu±Au-W distribuida en cinco episodios metalogénicos (127-125 Ma, 123-119 Ma, 113-106 Ma, 103-95 Ma y 91-78 Ma), cada uno relacionable con unidades magmáticas contemporáneas (Arévalo C., 2005).

Para la Precordillera, se han podido identificar manifestaciones minerales de Cu-Fe±Au, Cu-Au±Ag, Co, Cu-Ag-Co, Cu-Au, Cu, Mn, Cu, Cu-V, Cu-Ag y Cu-Au-Ag, en las ocurrencias de Cu-Fe±Au se han obtenido edades de 115 a 110 Ma. La mineralización no metálica comprende cuarzo, carbonato de calcio, arcillas comunes, áridos y dolomitas (Arévalo C., 2005).

3.7.4. Litología:

En la región de Atacama, a grandes rasgos, las rocas magmáticas y sedimentarias clásticas muestran una fuerte predominancia. Rocas metamórficas solo afloran en algunas áreas determinadas. La superficie geológica está nítidamente centrada en la presencia de un basamento rocoso de carácter ígneo (63%) y sedimentario (33,8%), cuya distribución espacial se encuentra delimitada en torno a los 27°S. Al Norte de este paralelo los procesos geológicos sedimentarios prevalecen por sobre los ígneos a partir de dinámicas de sedimentación geológica asociada al levantamiento altiplánico, mientras al sur de este paralelo dominan procesos ígneos vinculados con la orogenia andina. Cubriendo la Cordillera de la Costa y Precordillera se disponen extensas terrazas de sedimentos aluviales, coluviales y fluviales de edad Miocena (Gravas de Atacama, Mga) a miocena-pliocena (Depósitos aluviales y coluviales antiguos, MPa). Estos depósitos se habrían formado durante un período de agradación regional a gran escala, producido como

consecuencia de un alzamiento generalizado del altiplano, a partir del Mioceno medio (Novoa J., *et al.* 2008).

La cuenca del río Copiapó se encuentra sobre formaciones geológicas constituidas por depósitos no consolidados de sedimentos fluviales actuales y antiguos retrabajados; tales como gravas (entre ellas, Gravas de Atacama), areniscas y lutitas del curso actual de los ríos mayores, terrazas sub actuales y llanuras de inundación. Este tipo de depósitos corresponden a aluvios activos e inactivos, que han sido influenciados por los aportes de sedimentos de quebradas que desembocan en el valle, el que presenta dos fases diferentes de evolución. En el curso superior y medio presenta formas juveniles de paredes abruptas y sin meandros, donde predominan los materiales gruesos y deposición local de elementos finos originados por sedimentos de las quebradas que obstruyeron parcialmente el río. En el curso inferior se presenta una etapa de mayor avance en el desarrollo, las pendientes de las paredes son menos escarpadas y el fondo del valle es plano, predominando los elementos más finos; arenas finas, limos y arcillas (Gob. Chile, MOP, DGA, 2004).

Los alrededores del cauce presentan una amplia variedad de formaciones geológicas, siendo estas rocas ígneas tales como diorita (Diorita Labrea), microgranito, monzodiorita y secuencias volcano-sedimentaria de edad Cretácico – Jurásico (Arévalo C., 2005).

Durante el Jurásico Superior y el Cretácico Inferior se emplazaron en la Cordillera de la Costa al Oeste de la traza principal del SFA, los plutones Cerro Moradito, Cerro Morado y Sierra Chicharra, en rocas metamórficas, sedimentaria y volcánicas. Durante el Cretácico Inferior se emplazaron, al Este de la traza principal del SFA, cinco plutones mayores: La Brea, San Juan, San Gregorio, La Borracha y Sierra Atacama en rocas volcánicas y volcanoclásticas (Arévalo C., 2005).

La Precordillera, está formada mayoritariamente por rocas estratificadas. Aquí en el Jurásico se depositaron rocas volcánicas y volcanoclásticas de ambiente continental, durante el Jurásico Superior al Cretácico Inferior se acumularon rocas volcánicas, volcanoclásticas y epiclásticas, de ambiente continental a transicional (Arévalo C., 2005).

4. CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA.

La metodología de trabajo será descrita en tres etapas: Etapa de pre-campo, Etapa de Campo y Etapa de laboratorio.

4.1 Etapa de pre-campo.

Se investigó la ubicación y vías de acceso al área de estudio, analizando, además, de manera bibliográfica el sector mediante investigaciones anteriores. Consecutivamente se elaboró un mapa base topográfico y satelital del área de estudio, mediante uso de los programas ArcGIS y SASPLANET, con escala 1:16.000 (Anexo N°01), el cual se utilizó en la etapa de campo para orientación. Se desarrolló una breve descripción de la geomorfología del sector, incluyendo sus altos topográficos, valles, redes hídricas, el contexto geológico y finalmente se realizó una fotointerpretación del área de estudio.

4.2 Etapa de Campo.

Se realizaron 3 salidas a terreno (Anexo N°04) y se obtuvieron en total 37 muestras de sedimentos de aproximadamente 1Kg cada una, mediante el uso de martillo geológico para extraer sedimentos de depósitos consolidados y bolsas para muestras, en distintos sectores dentro del área de estudio. Estas fueron rotuladas utilizando en la codificación el número de muestra, el día de terreno y el punto de estudio, por ejemplo, la muestra MID1P1 indica que es la muestra uno, tomada el día 1 de terreno y se ubica en el punto 1. Los puntos elegidos para extracción de muestra fueron seleccionados según la cercanía con los relaves y la población, esto con la finalidad de estudiar que tan erosionados, mediante un medio eólico, se encuentran los relaves cercanos, a qué distancia podrían llegar a contaminar y si se encuentran partículas de estos en el cauce del río Copiapó (Figura N°17).

Conjuntamente se registraron datos macroscópicos mediante análisis de lupa, rayador, imán, ácido clorhídrico y huincha de medir, para realizar el levantamiento de 07 columnas estratigráficas a mano alzada en la libreta de terreno, esto debido a que solo 07 puntos de estudio poseían las características necesarias para realizar un adecuado levantamiento de columna estratigráfica, logrando así, un buen análisis del registro geológico (se logró observar contactos, litologías, granulometría, estructuras

sedimentarias y escala de las distintas facies). Todas las muestras fueron rotuladas con su respectivo código de muestra mediante el uso de marcador permanente y posteriormente esto se registró en una tabla Excel, junto con las coordenadas correspondientes de Norte y Este en Datum World Geodesic System 1.984 (WGS84) y proyección Universal Mercator (UTM) zona 19S (Tabla N°1).

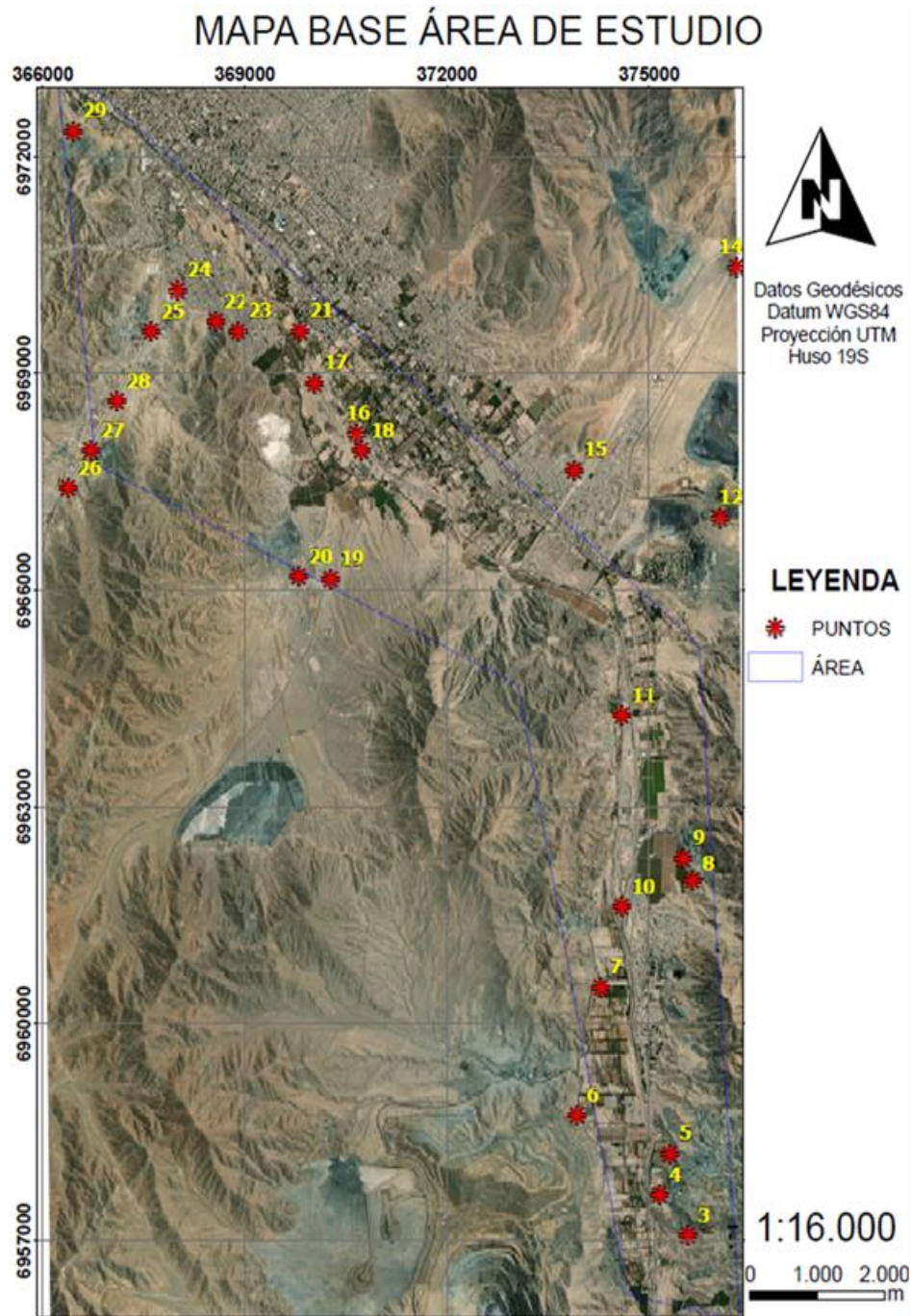


Figura N°17: La figura muestra los puntos estudiados en terreno (Elaboración propia con programa ARCGIS).

Tabla N°1: Tabla Excel con puntos de estudio en terreno, junto a sus respectivas coordenadas Norte y Este en UTM, WGS84 19S, muestras extraídas y columnas estratigráficas realizadas.

PUNTO	COORD. NORTE (m)	COORD. ESTE (m)	COTA m s.n.m	MUESTRAS	COLUMNA
1	6.955.627	375.041	517	M1D1P1	
2	6.955.626	375.063	519	M2D1P2	
3	6.957.058	375.578	590	M3DIP3-M4D1P3	C1
4	6.957.629	375.157	512	M5D1P4	
5	6.958.190	375.310	504	M6D1P5	C2
6	6.958.762	373.929	514	M7D1P6	
7	6.960.501	374.278	484	M8D1P7	
8	6.961.975	375.646	489	M9D1P8	
9	6.962.280	375.504	472	M10D1P9	C3
10	6.961.611	374.597	463	M11D2P10-M12D2P10	C4
11	6.964.261	374.598	448	M13D2P11	
12	6.966.999	376.052	474	M14D2P12	
13	6.971.974	377.280	516	M15D2P13	
14	6.970.467	376.298	491	M16D2P14	
15	6.967.655	373.887	449	M17D2P15-M18D2P15	
16	6.968.163	370.655	416	M19D2P16	
17	6.968.858	370.031	406	M20D2P17	
18	6.967.928	370.727	411	M21D2P18-M22D2P18-M23D2P18-M24D2P18	C5
19	6.966.151	370.273	448	M25D3P19	C6
20	6.966.183	369.800	445	M26D3P20	
21	6.969.581	369.814	395	M27D3P21	
22	6.969.709	368.567	405	M28D3P22	
23	6.969.582	368.903	406	M29D3P23	
24	6.970.146	367.997	389	M30D3P24	
25	6.969.566	367.603	409	M31D3P25	
26	6.967.411	366.375	506	M32D3P26	
27	6.967.926	366.714	485	M33D3P27	
28	6.968.612	367.095	451	M34D3P28	
29	6.972.349	366.448	405	M35D3P29	
30	6.9730.83	366.158	357	M36D3P30-M37D3P30	C7

4.3 Etapa de Laboratorio.

Se elaboraron adecuados levantamientos de las 07 distintas columnas estratigráficas, registradas en terreno, mediante el uso de programas SedLog y Adobe Illustrator.

Se llevó a cabo el secado de las muestras en Horno, facilitado por el laboratorio de estudio de suelos LEPUCV de Copiapó, a 90°C, durante 24 horas cada muestra, posteriormente se realizó un análisis granulométrico mediante tamizado, regido por la norma chilena NCh 3.236, utilizando un agitador de tamices mecánico, marca RO-TAP, con tamices de mallas de acero inoxidable (Fotografía N°1), se utilizó como indicador de fracción fina fácilmente transportable, mediante medio eólico, los tamices N° #30, N° #60 y N° #200 (0,595, 0,250 y 0,074 mm) (Fotografía N°2), facilitados por el departamento de Construcción Civil de la Universidad de Atacama. Esto con la finalidad de estudiar la cantidad de sedimento fino en cada muestra de fácil movilidad y dispersión mediante un medio eólico.



Fotografía N°1



Fotografía N°2

Fotografía N°1 y N°2: Las fotografías muestran el agitador de tamices mecánico, marca RO-TAP, con tamices de mallas de acero inoxidable N°#0.5 N°#16 N° #30, N° #60 y N° #200 desde arriba hacia abajo respectivamente (Elaboración propia).

Luego, se calculó el porcentaje propenso a erosión mediante un medio eólico de cada una de las muestras tamizadas. El proceso metalúrgico asociado a los relaves implica que éstos estén constituidos por material de granulometría inferior a 1 mm aprox. Entonces, para conocer la influencia de relaves en los sedimentos, se estudiaron las fracciones de granulometría inferior a 0,595 mm (tamiz #30) ya que este tamaño granulométrico ya es fácil de transportar mediante un medio eólico (erosión eólica).

Se realizaron estudios a las fracciones finas de cada muestra tamizada, mediante pistola de análisis XRF marca BRUKER ELEMENTAL modelo S1 TITAN, facilitada por el departamento de Geología de la Universidad de Atacama (Fotografías N°3 y N°4).



Fotografía N°3 y N°4: Las fotografías muestran la pistola de análisis XRF marca BRUKER ELEMENTAL modelo S1 TITAN vista de frente y de perfil (Elaboración propia).

Chile no cuenta con una normativa para calidad de suelos o sedimentos, el Ministerio del Medio Ambiente, el año 2011, analizó la posibilidad de normar el componente suelo, a través de un instrumento jurídicamente vinculante, para lo cual se inició la realización del estudio “Preparación de antecedentes para la elaboración de la norma de calidad primaria de suelos”. En el marco de las recomendaciones de ese estudio, en el año 2012 el Ministerio desarrolló un instrumento denominado “Guía Metodológica para la Gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes”, aprobado mediante Resolución Exenta N°406/2013. Esta guía expone, de manera práctica, los principales procedimientos involucrados en la gestión de suelos con potencial presencia de contaminantes (SPPC), ello en base a los principios de la evaluación de riesgo ambiental

y ecológico (ERA y ERE). Para esto se realizaron una serie de fases. La Fase 1 consta de identificación, priorización y jerarquización sistemática de los sitios con potencial presencia de contaminantes (SPPC) a escala regional, de manera de determinar los sitios relevantes dónde concentrar los esfuerzos de investigación. La Fase 2, consta de considerar la realización de muestreos de matrices ambientales, con el propósito de confirmar la presencia de contaminantes en el área de influencia del sitio. Y la Fase 3, consta de analizar las concentraciones de contaminantes en las matrices muestreadas en función de las vías de exposición y si genera un riesgo no aceptable a la salud humana o al medio ambiente. Con esto, ya se desarrollaría un plan de acción para gestionar los riesgos identificados, sin embargo, las fases no han sido completadas, por lo que aún no existe una normativa clara en Chile (MMA & CORFO, 2012; MMA, 2018). Por lo que, se compararon los resultados de laboratorio obtenidos mediante pistola de análisis XRF con las normas de calidad de suelos de Canadá (CCME, 2003), Brasil (CTSA, 2005) y USA (EPA, 2015) (Tabla N°2), para reflexionar que tan contaminadas se encuentran las áreas de estudio, además estas normas suelen ser el resultado de investigaciones científicas rigurosas y están respaldadas por instituciones técnicas y académicas de renombre.

Tabla N°2: Normas Canadienses y Brasileñas de calidad de suelo, y niveles de detección de la EPA de los Estados Unidos para diferentes usos del suelo, concentración de metales en mg/Kg (peso seco). Tomado y modificado de Carkovic *et al.* (2016).

País	USO DE SUELO	Concentración (ppm)				
		As	Co	Cu	Pb	Zn
Canadá	Agrícola	12	40	63	70	200
	Residencial/Parques	12	50	63	140	200
	Comercial	12	300	91	260	360
	Industrial	12	300	91	600	360
Brasil	Agrícola	35	35	200	180	450
	Residencial	55	65	400	300	1.000
	Industrial	150	90	600	900	2.000
USA	Residencial	0,68	2.3	310	400*	2.300**
	Industrial	3	35	4.700	800*	35.000**

Los tipos de suelos a los que hace referencia la tabla N°2, se clasifican de acuerdo con su uso (CCME, 2007):

- Agrícola: Donde la actividad primaria es la agricultura o el cuidado de ganado, e incluye tierra agrícola que proporciona un hábitat para vida silvestre residente y transitoria, además de flora nativa y granjas.
- Residencial/Parques: Donde la actividad primaria es la residencial o recreacional. Parque se define como la zona de contención entre las áreas de residencia y campamento, y excluye las tierras silvestres como parques nacionales o provinciales.
- Comercial: Donde la actividad principal es comercial (por ejemplo, centros comerciales), no residencial o de fábrica, y no incluye zonas de cultivo de alimentos.
- Industrial: Donde la actividad principal consiste en la producción, fabricación o construcción de bienes, y el acceso público a la propiedad es restringido.

Este estudio se enfoca en el área Residencial/Parques, por lo que se tomarán estos valores como referencia para las evaluaciones.

Adicionalmente, se estudiaron mediante el uso de Microscopio Binocular de laboratorio marca Motic (Fotografía N°5), aquellas muestras tamizadas con altos contenidos de elementos contaminantes, con la finalidad de rectificar los resultados de forma visual.



Fotografía N°5: La fotografía muestra el Microscopio Binocular del laboratorio marca Motic visto de frente.

La página del Servicio Nacional de Geología y Minería contiene información completa de cada relave en Chile en Google Earth (nombre, ubicación, estado, a quien pertenece, composición, etc.). Se extrajeron estos resultados y se realizó un mapa que muestra los estados de cada relave (Figura N°18) y un mapa que muestra a quién pertenece cada relave (Figura N°19), mediante el uso del programa ArcMap. Lo anterior, con la finalidad de comparar los resultados de laboratorio con la composición de los relaves en Copiapó y Tierra Amarilla, para así predecir una posible procedencia de estos elementos alóctonos. A partir de esta información, se puede observar la gran cantidad de relaves presentes en el área, se logra determinar que la mayoría de estos se encuentran inactivos, lo que significa que ya no están recibiendo más material debido a que la minera ha dejado de operar o ha encontrado una ubicación alternativa para depositar los desechos.

MAPA DE LOCALIZACIÓN DE DEPÓSITOS DE RELAVES (SERNAGEOMIN)

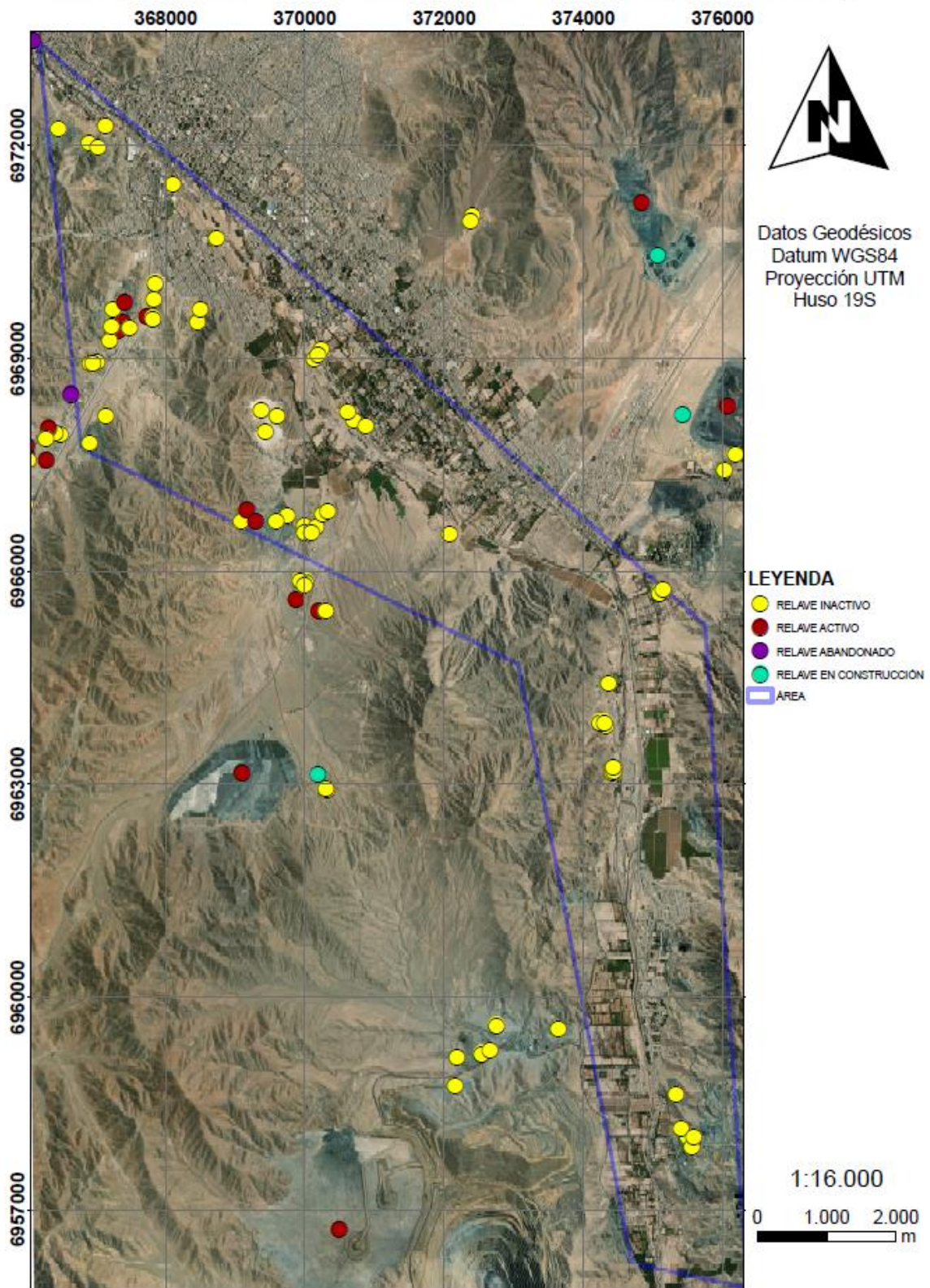


Figura N°18: Ubicación de relaves y su estado al año 2023, extraídos de la página de SERNAGEOMIN, 2023.

MAPA DE LOCALIZACIÓN DE DEPÓSITOS DE RELAVES (SERNAMEGOMIN)

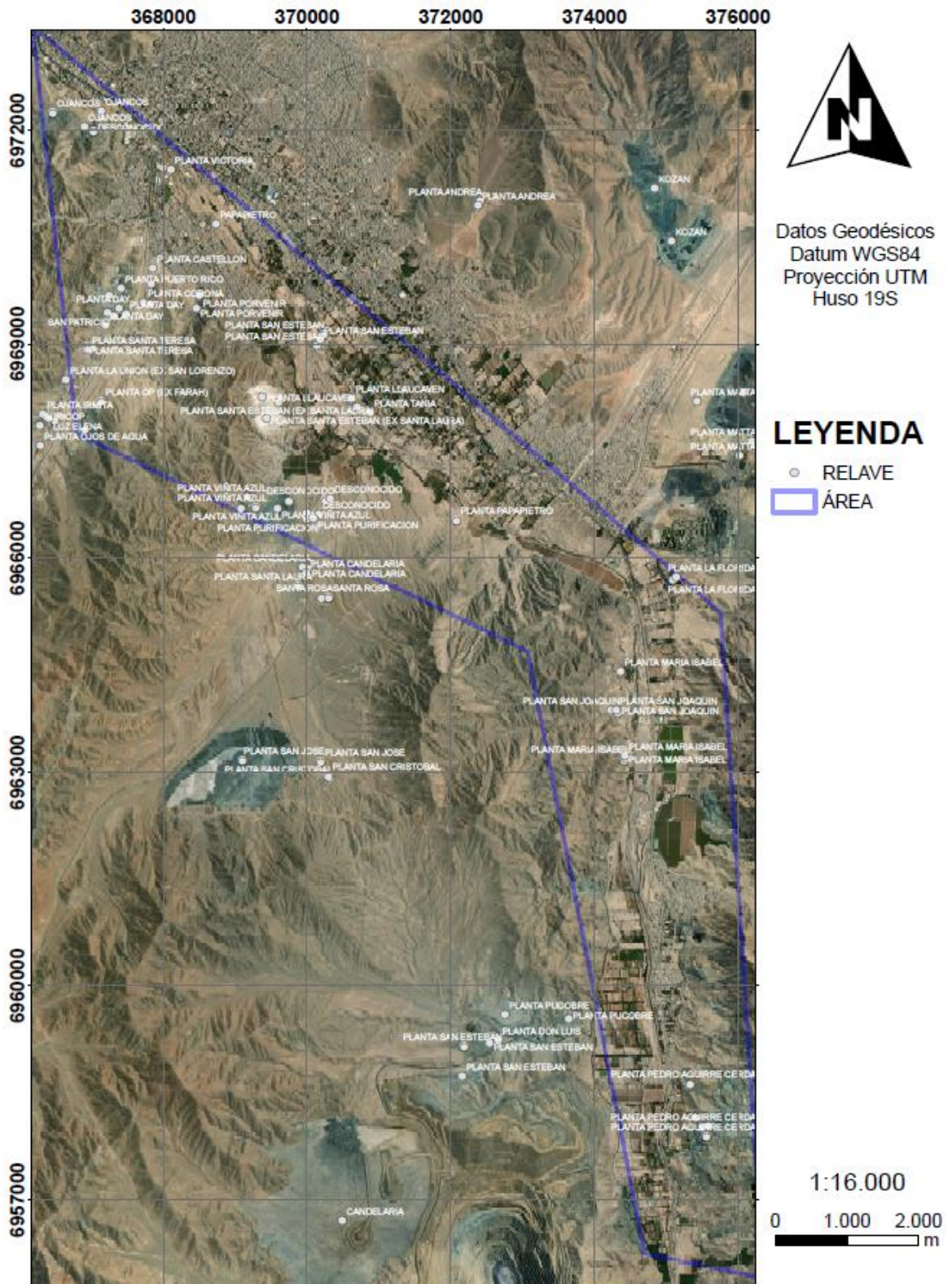


Figura N°19: Ubicación de relaves y nombre de la empresa a la cual pertenecen, extraídos de la página de SERNAGEOMIN, 2023.

5. CAPÍTULO V. RESULTADOS.

5.1 Resultados en etapa de pre-campo:

Los resultados principales de esta etapa fueron: Altos topográficos en el área que no sobrepasan la cota 700, interpretación de redes hídricas en el área de estudio del tipo dendrítico, descripción general del Valle de Copiapó presente en el área de estudio, geología general del área compuesta principalmente por depósitos semi a mal consolidados de sedimentos fluviales tales como grava, arena, limo con edades de Cuaternario y por rocas ígneas de diorita, microgabro y monzodiorita de edades Cretácico – Jurásico. En la fotointerpretación, se logran distinguir distintos depósitos de relaves, fundición y mineras presentes en el área de estudio (Figuras N°21, N°22, N°23 y N°24).

5.1.1 Fotointerpretación del área de estudio.

Con la finalidad de lograr una mejor fotointerpretación del área de estudio, se fraccionó el Mapa Base del Área de Estudio en 4 áreas más pequeñas (Fig. N°20): área 1.1, área 1.2, área 1.3 y área 1.4. Las áreas 1.1 y 1.2 con escala 1:10.000 y las áreas 1.3 y 1.4 con escala 1:5.000, esto debido a que las áreas 1.1 y 1.2 son de mayor tamaño. A continuación, se detalla cada una de las áreas mencionadas anteriormente.

SUBDIVISIÓN ÁREA DE ESTUDIO

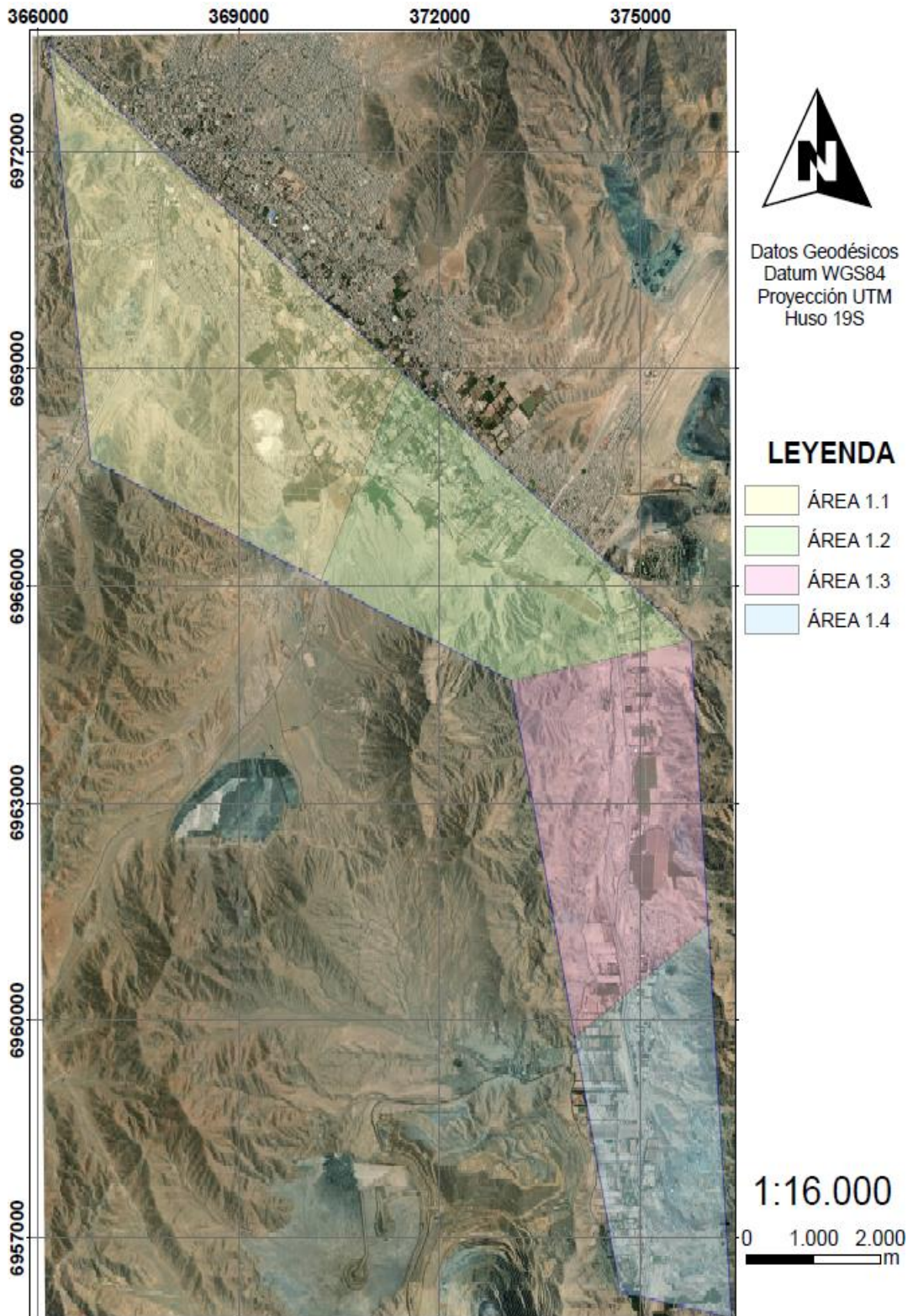


Figura N°20: La figura muestra el área de estudio fraccionada en 4 áreas más pequeñas (1.1, 1.2, 1.3, y 1.4) con la finalidad de lograr una mejor fotointerpretación (Elaboración propia).

➤ Área 1.1.

El área 1.1 (Fig. N°21), comprende un área de $19,6 \text{ Km}^2$, con coordenadas N6.973.460-6.968.954-6.966.067-6.967.735 m; E366.180-371.428-370.220-366.797 m. Se observan 11 relaves, 2 a un costado de la Universidad de Atacama, 1 a un costado del sector El Palomar, 4 a un costado de la Panamericana 5 Norte, los cuales de igual manera se encuentran cercanos al sector El Palomar, 3 a un costado del río Copiapó y 1 en el cuadrante inferior derecho del mapa. Todos dentro de la ciudad de Copiapó. Las áreas de los relaves fotointerpretados suman un total de $1,33 \text{ Km}^2$, por lo que el 6.8% del área 1.1 corresponde a relave.

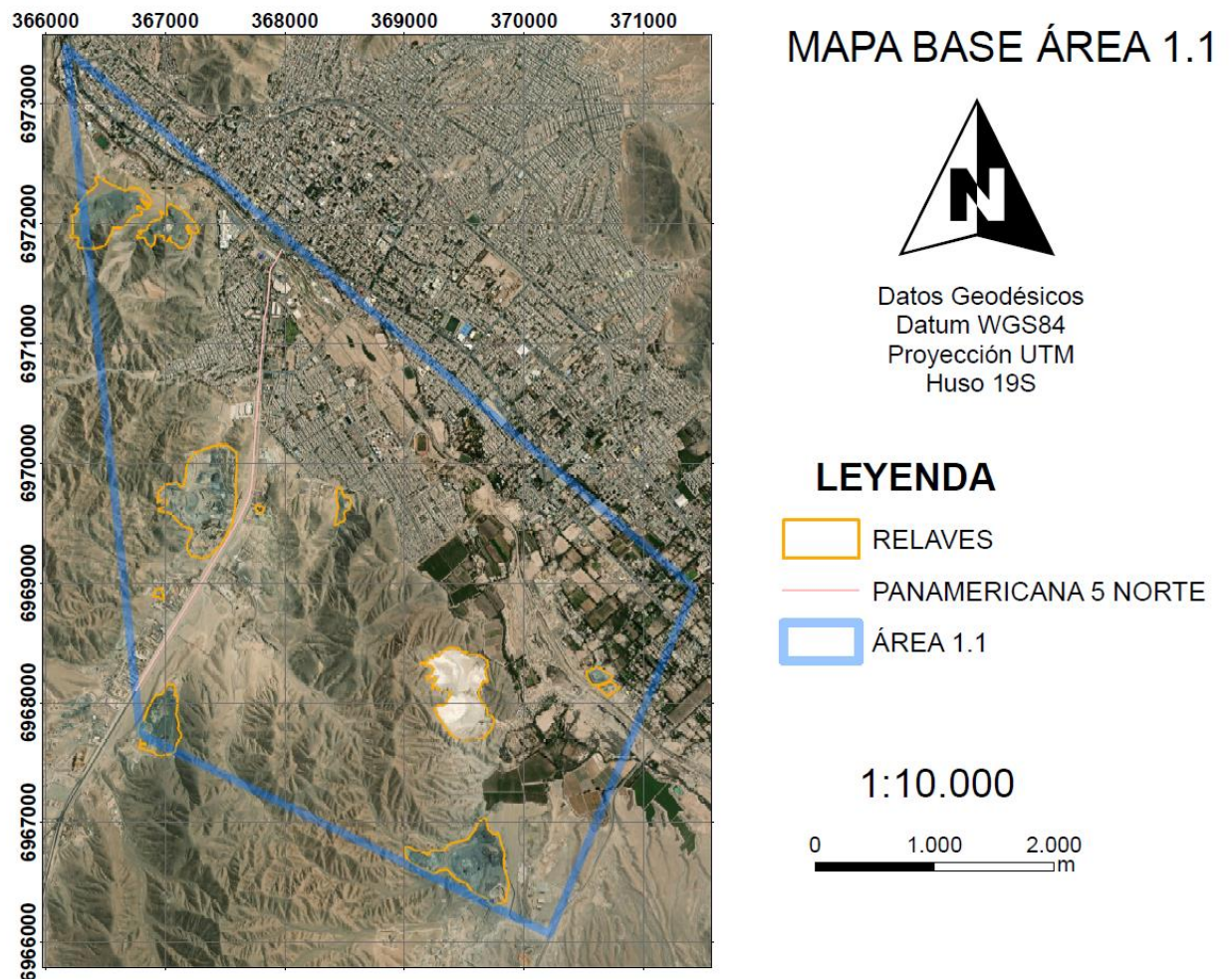


Figura N°21: La figura muestra el área 1.1, con ubicación de relaves en color naranja (elaboración propia con programa ARCGIS).

➤ Área 1.2.

El área 1.2 (Fig. N°22), comprende un área de $11,2 \text{ Km}^2$, con coordenadas N6.968.954-6.965.238-6.964.680-6.966.067 m; E371.428-375.754-373.066-370.220 m. En la imagen satelital, dentro del área no se observan relaves, sin embargo, se puede observar fuera del área, los grandes relaves de la fundición Paipote y Planta Matta, encerrados en circunferencias de color verde y amarillo respectivamente, los cuales tienen una alta probabilidad de estar siendo erosionados mediante un medio eólico. Las áreas de los relaves fotointerpretados suman un total de $1,61 \text{ Km}^2$.

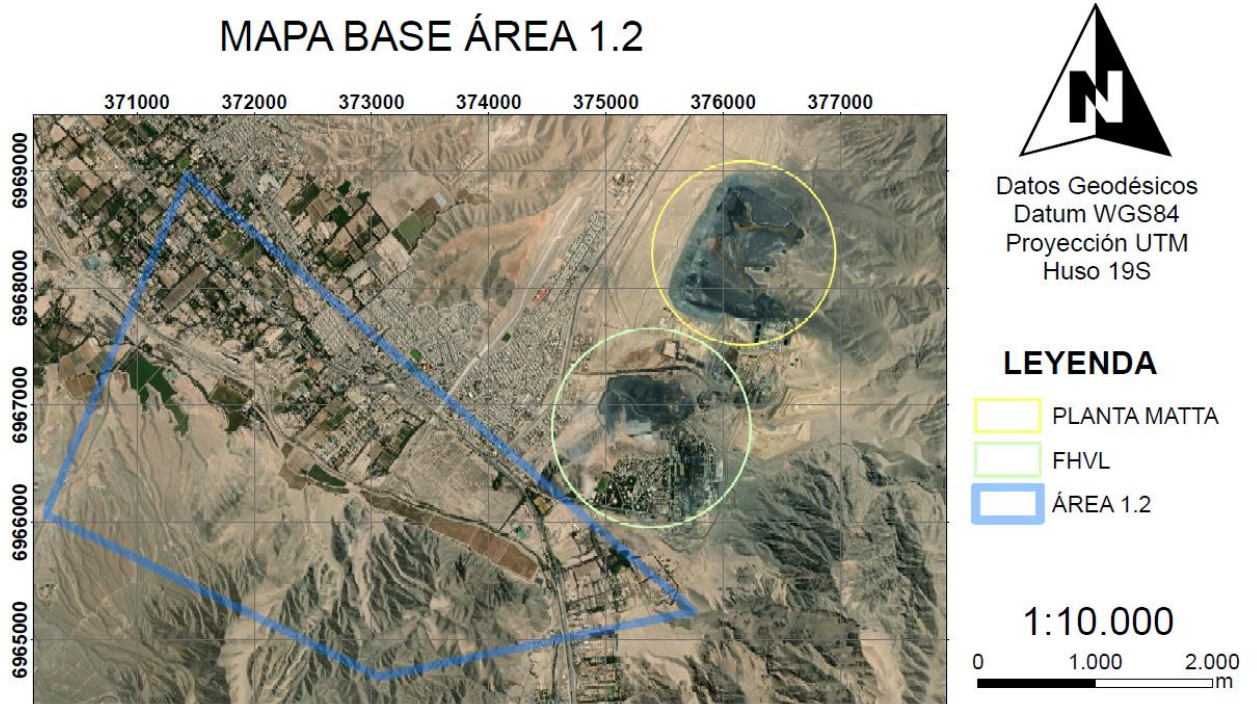


Figura N°22: La figura muestra el área 1.2 (polígono color azul), la fundición Hernán Videla Lira (circunferencia verde), Planta Manuel Antonio Matta Ruiz de Paipote (circunferencias amarillo) (elaboración propia con programa ARCGIS).

➤ Área 1.3.

El área 1.3 (Fig. N°23), comprende un área de 11 Km², con coordenadas N6.965.238-6.961.314-6.959.753-6.964.680 m; E375.754-376.007-374.019-373.066 m. En la figura se observan 8 relaves mineros dentro del área, 6 de estos se encuentran en las cercanías de la comuna de Tierra Amarilla y 2 a un costado de la Ruta C-35, próximos a la comuna. Las áreas de los relaves fotointerpretados suman un total de 0.16Km², por lo que el 1,45% del área 1.3 corresponde a relave.

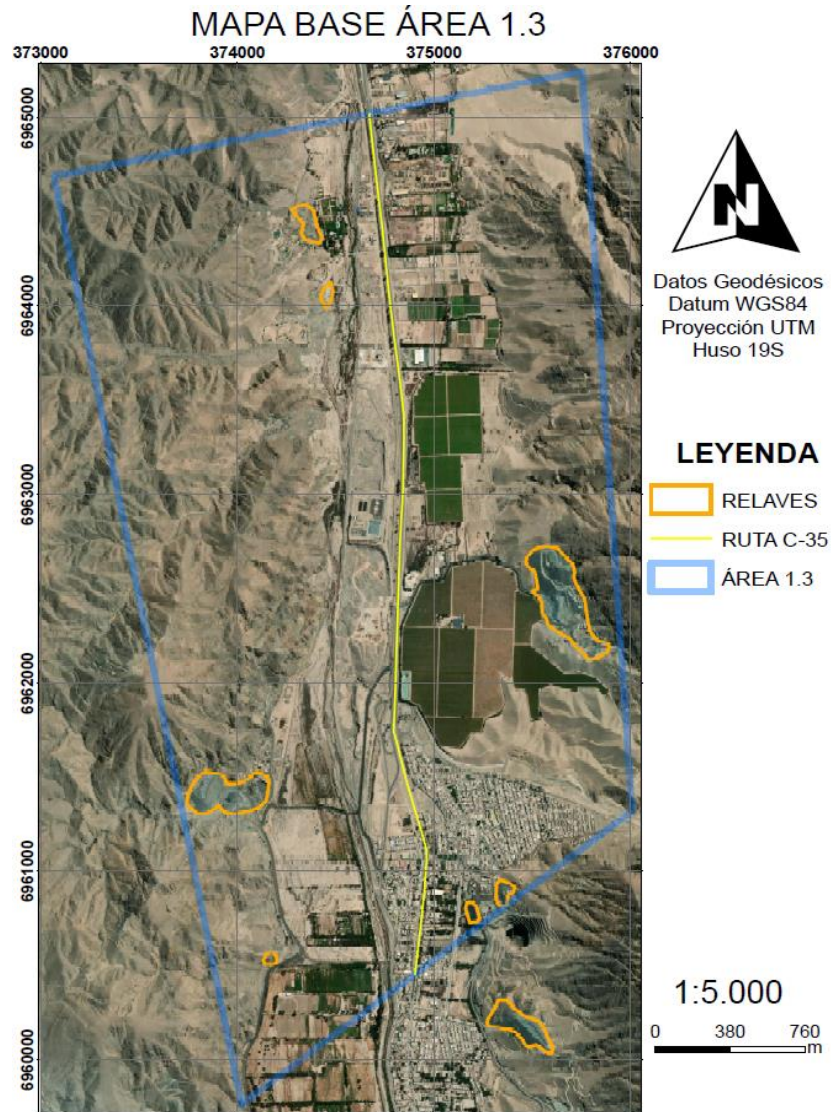


Figura N°23: La figura muestra el área 1.3, con ubicación de relaves en color naranja (elaboración propia con programa ARCGIS).

➤ Área 1.4.

El área 1.4 (Fig. N°24), comprende 8,48 Km², con coordenadas N6.961.314-6.955.888-6.956.243-6.959.753 m; E376.007-376.355-374.696-374.019 m. En la figura se observan 18 relaves situados en los alrededores de la comuna de Tierra Amarilla. Las áreas de los relaves fotointerpretados suman un total de 0.53Km², por lo que el 6,25% del área 1.4 corresponde a relave.

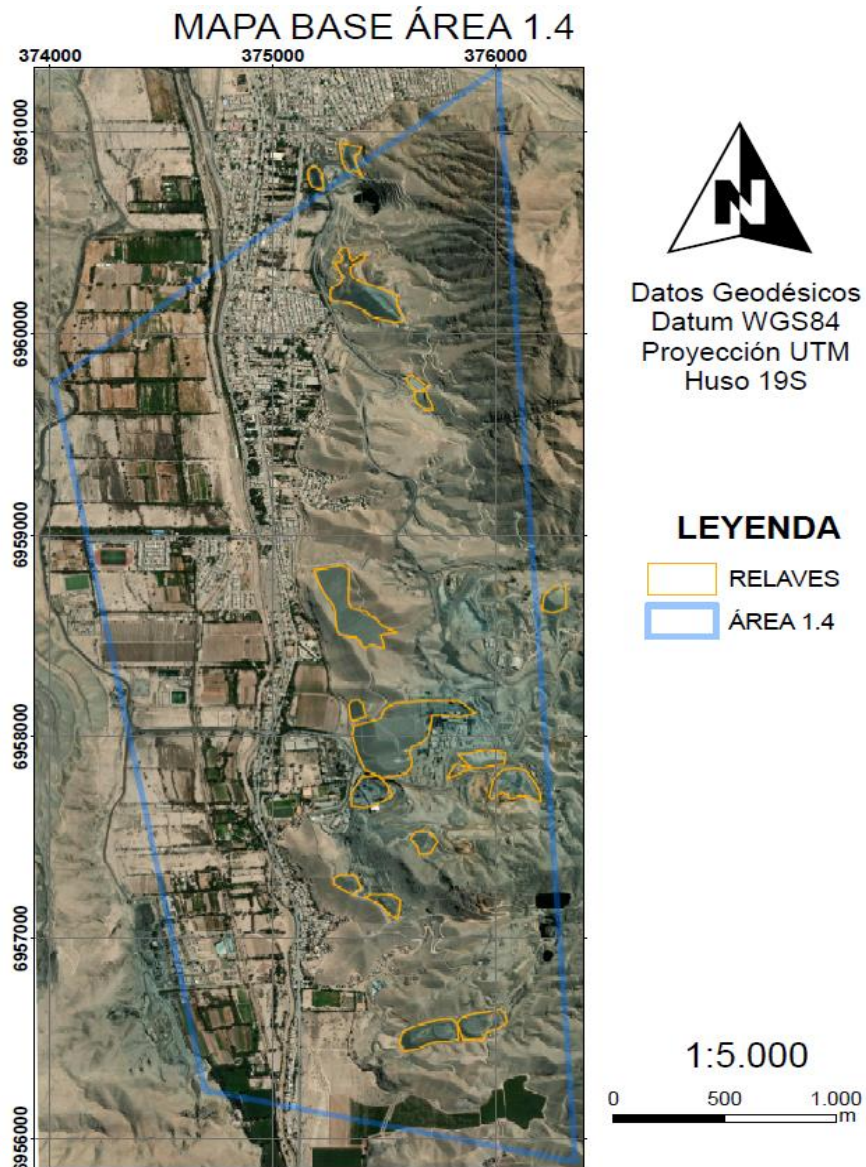


Figura N°24: La figura muestra el área 1.4, con ubicación de relaves en color naranja (elaboración propia con programa ARCGIS).

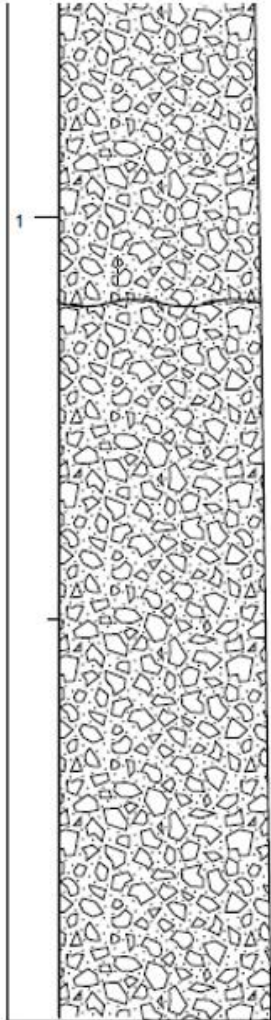
5.2 Resultados en etapa de campo:

Las 07 columnas estratigráficas realizadas en terreno a manos alzadas, fueron digitalizadas mediante el uso del programa SedLog. Igualmente se realizó una descripción macroscópica (con lupa) de aquellas muestras extraídas en terreno para añadir esta información en las columnas.

Columna estratigráfica N°01, Punto N°03.

Coordenadas UTM: 6.957.058N; 375.578E. Cota: 590 m s.n.m. Foto 03 de terreno (Anexo N°04).





Depósito no consolidado color pardo claro, clasificación monomítica, 5% matriz, 95% clasto, clasto soportado e inmaduro texturalmente, contiene clastos de caliza tipo Mudstone, grado de redondeamiento de subangular angular, grado de selección moderado, fábrica isotropa y empaquetamiento clasto soportado.

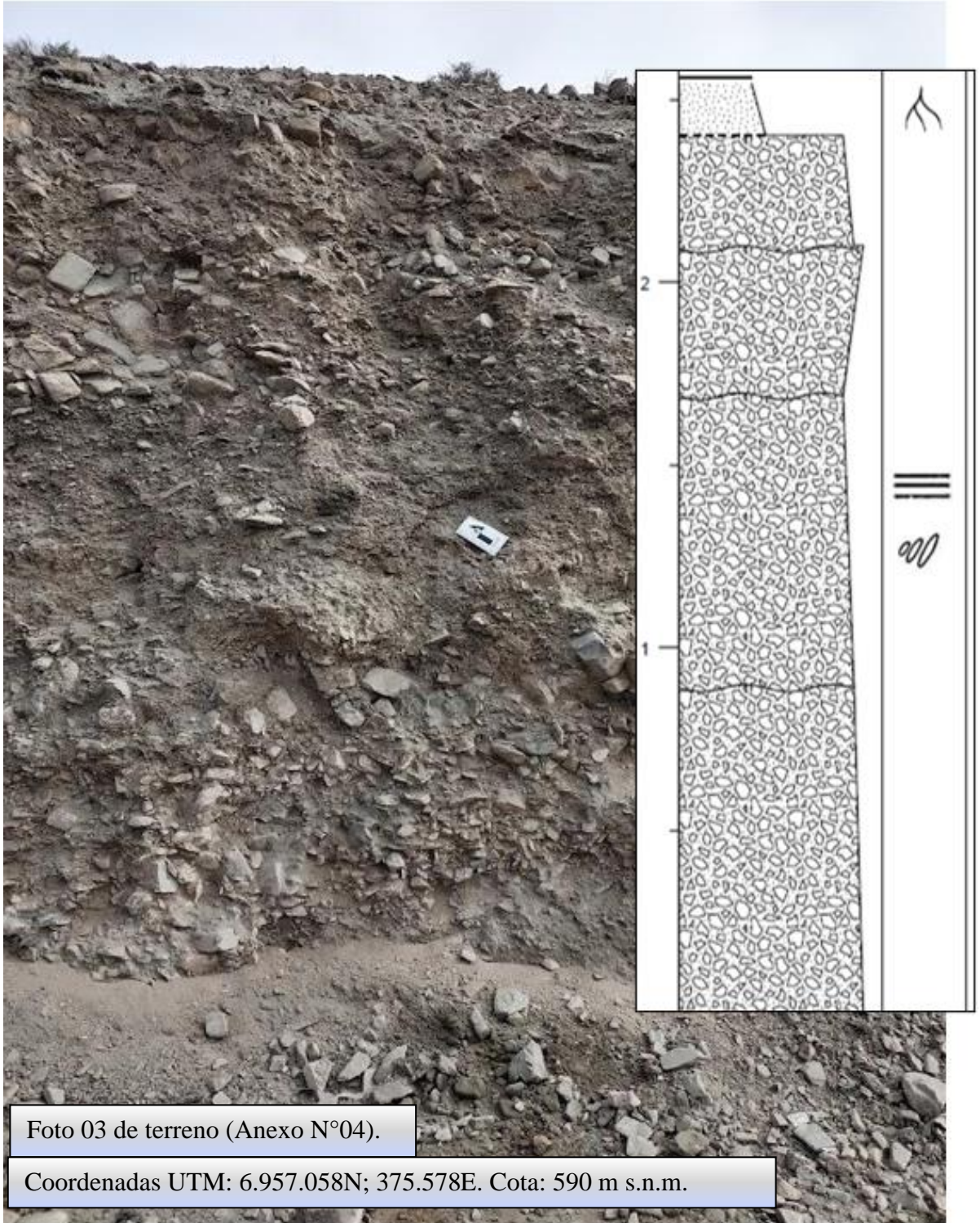
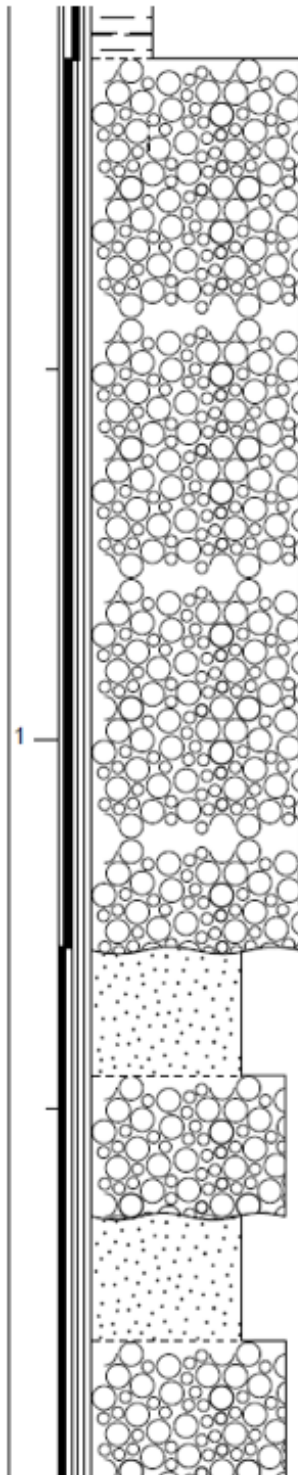


Foto 03 de terreno (Anexo N°04).

Coordenadas UTM: 6.957.058N; 375.578E. Cota: 590 m s.n.m.

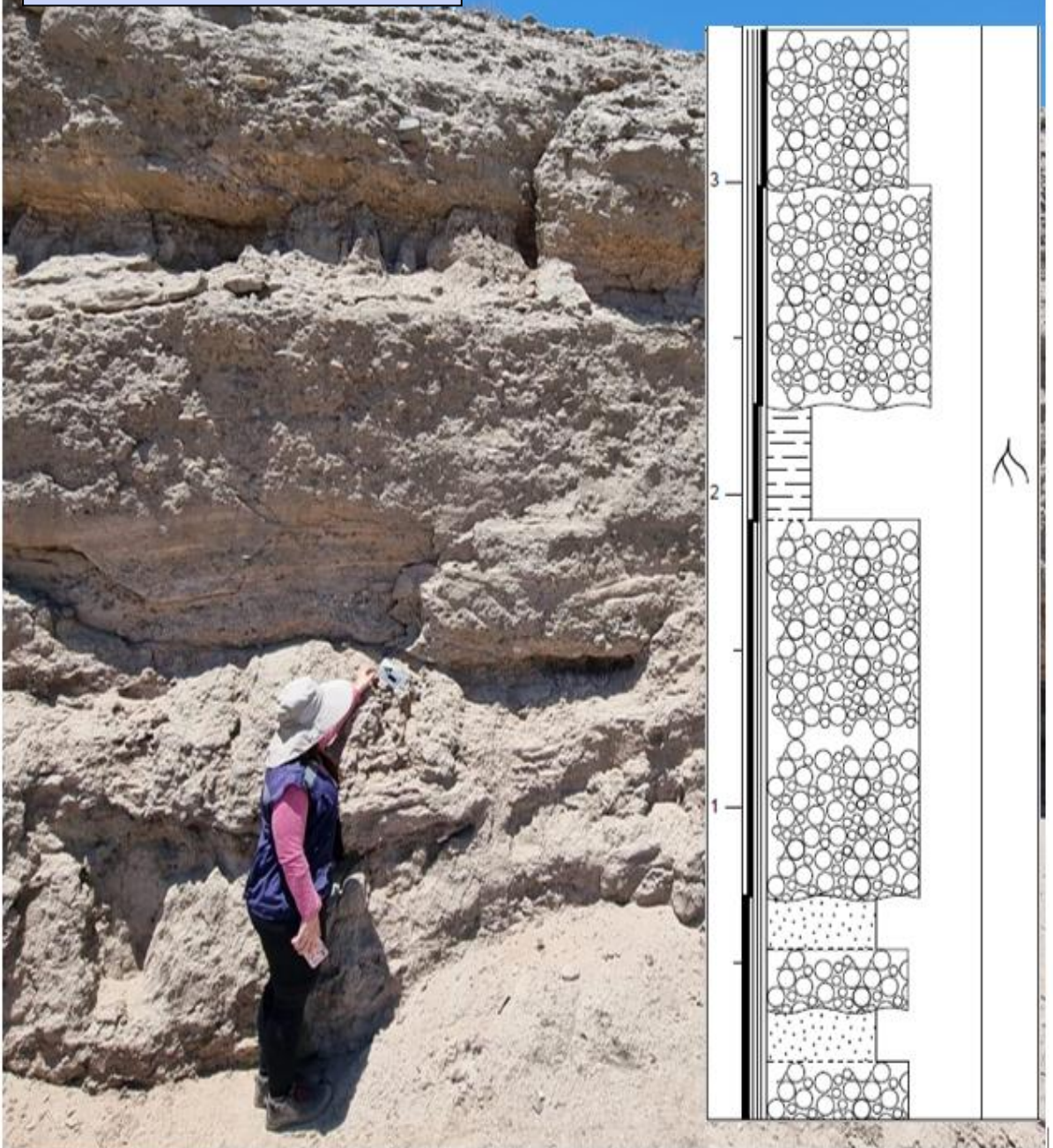


Depósito semi a bien consolidado color pardo grisáceo, la composición es polimictica, con 15% matriz y 85% clasto, clastosoportado e inmaduro texturalmente, el grado de redondeamiento de los clastos es redondeado a muy redondeado, el grado de selección es moderado, contiene cemento carbonatado y la fábrica es isótropa.

Depósito semi a bien consolidado compuesto por una alternancia entre arenas y gravas bien redondeadas. Ambas capas contienen composición polimictica y fábrica isótropa. Las gravas poseen color pardo grisáceo con matriz 5% y clasto 95%, clastosoportado e inmaduro texturalmente, grado de redondeamiento de redondeado a muy redondeado y grado de selección moderado. Las arenas poseen color pardo amarillento con 2% matriz y 98% clasto, inmadura texturalmente y clastosoportado, con cemento de carbonato de calcio, el redondeamiento de los clastos es de redondeado a muy redondeado y la selección es muy buena.

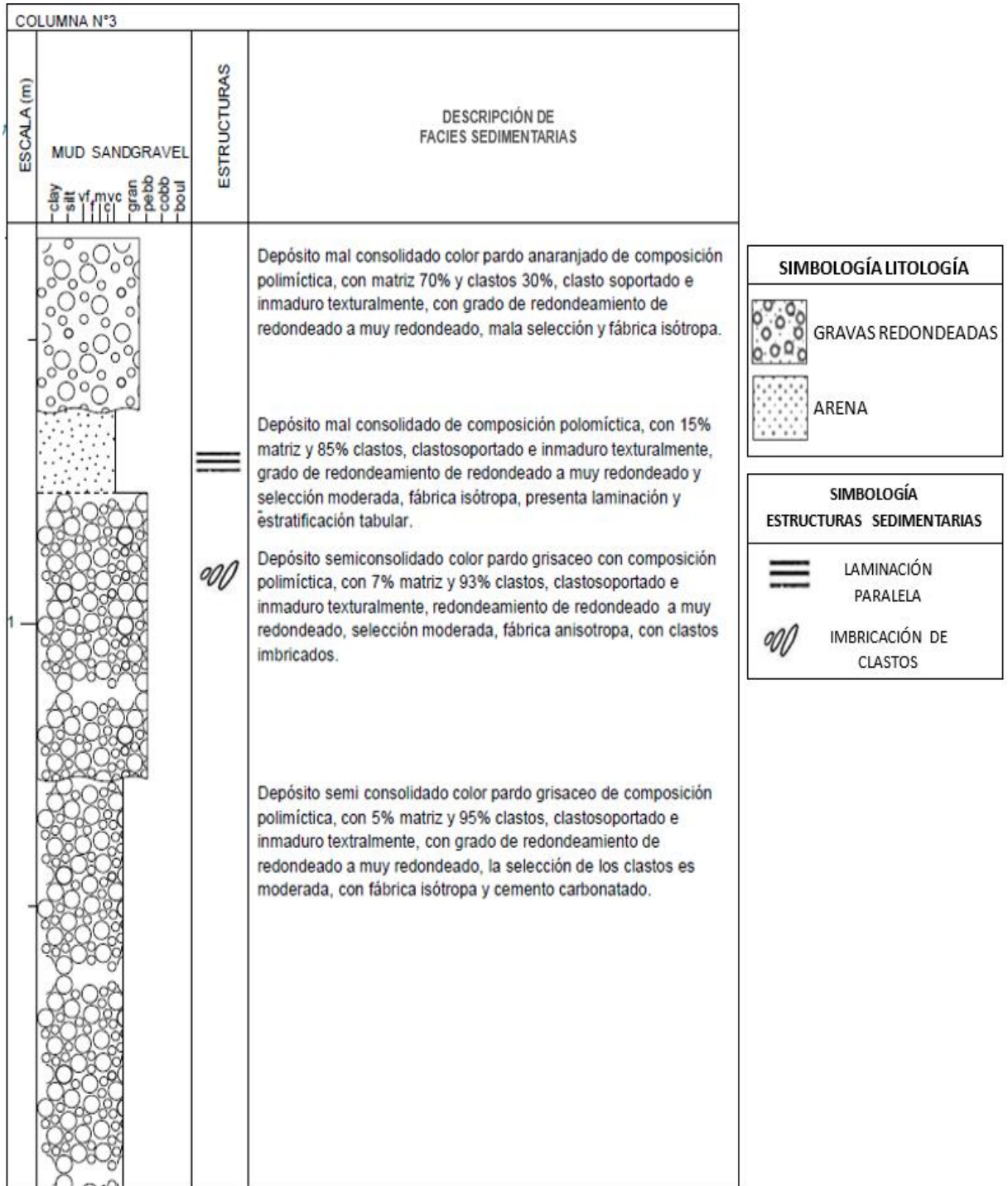
Coordenadas UTM: 6.958.190N; 375.310E. Cota: 504 m s.n.m.

Foto 04 de terreno (Anexo N°04).



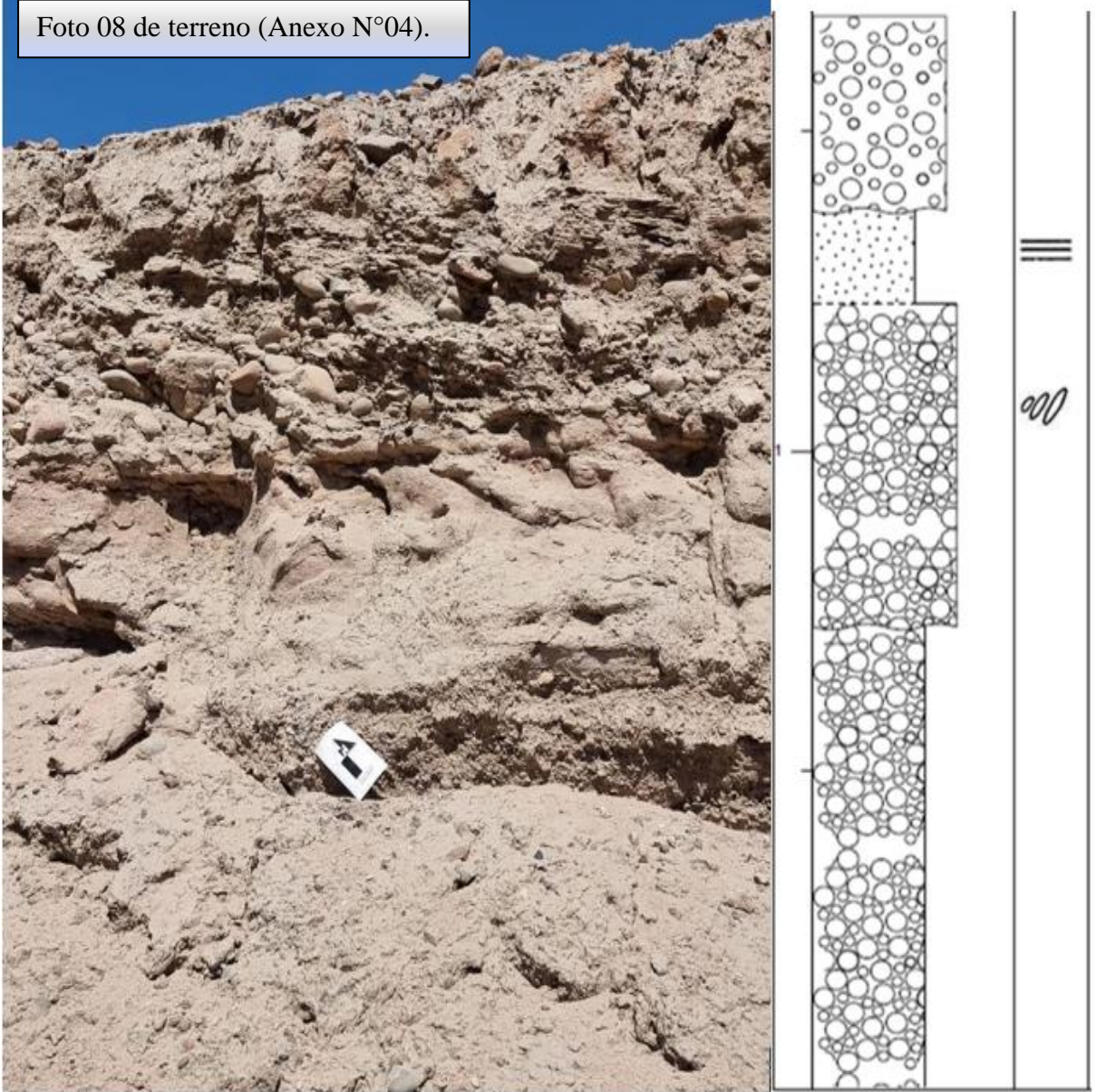
Columna estratigráfica N°03, Punto N°09.

Coordenadas UTM: 6.962.280N; 375.504E. Cota: 472 m s.n.m. Foto 08 de terreno (Anexo N°04).



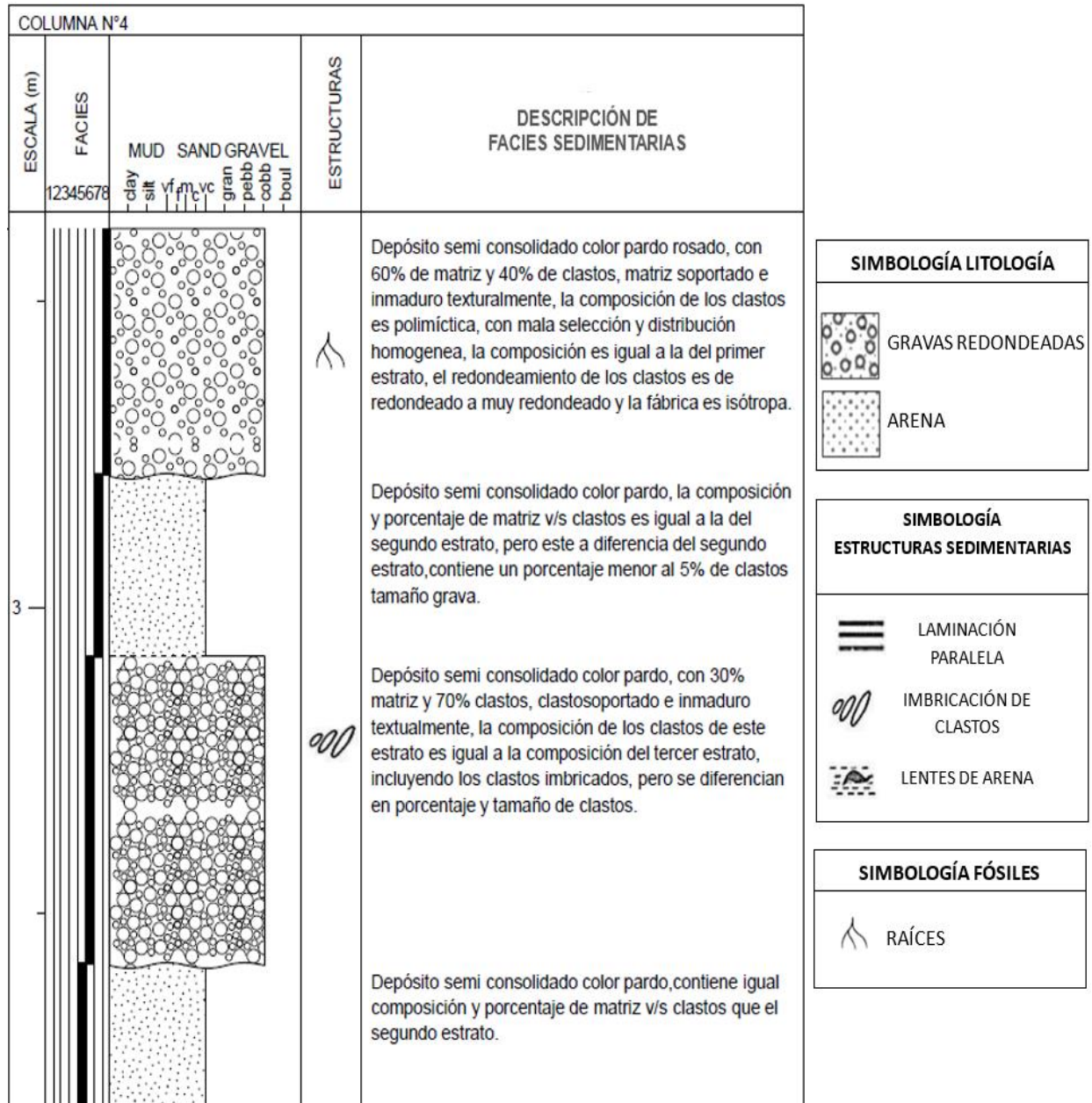
Coordenadas UTM: 6.962.280N; 375.504E. Cota: 472 m s.n.m.

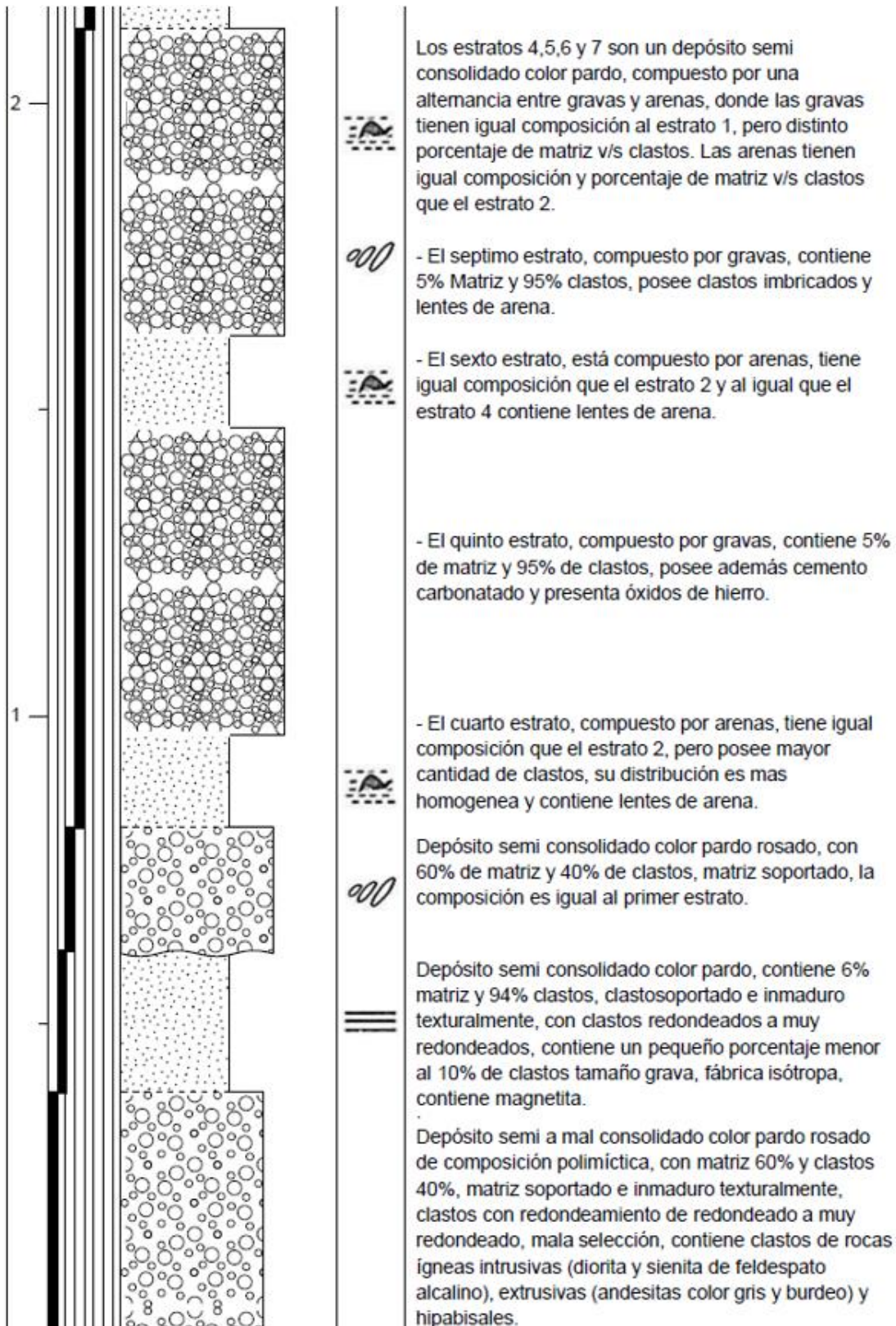
Foto 08 de terreno (Anexo N°04).



Columna estratigráfica N°04, Punto N°10.

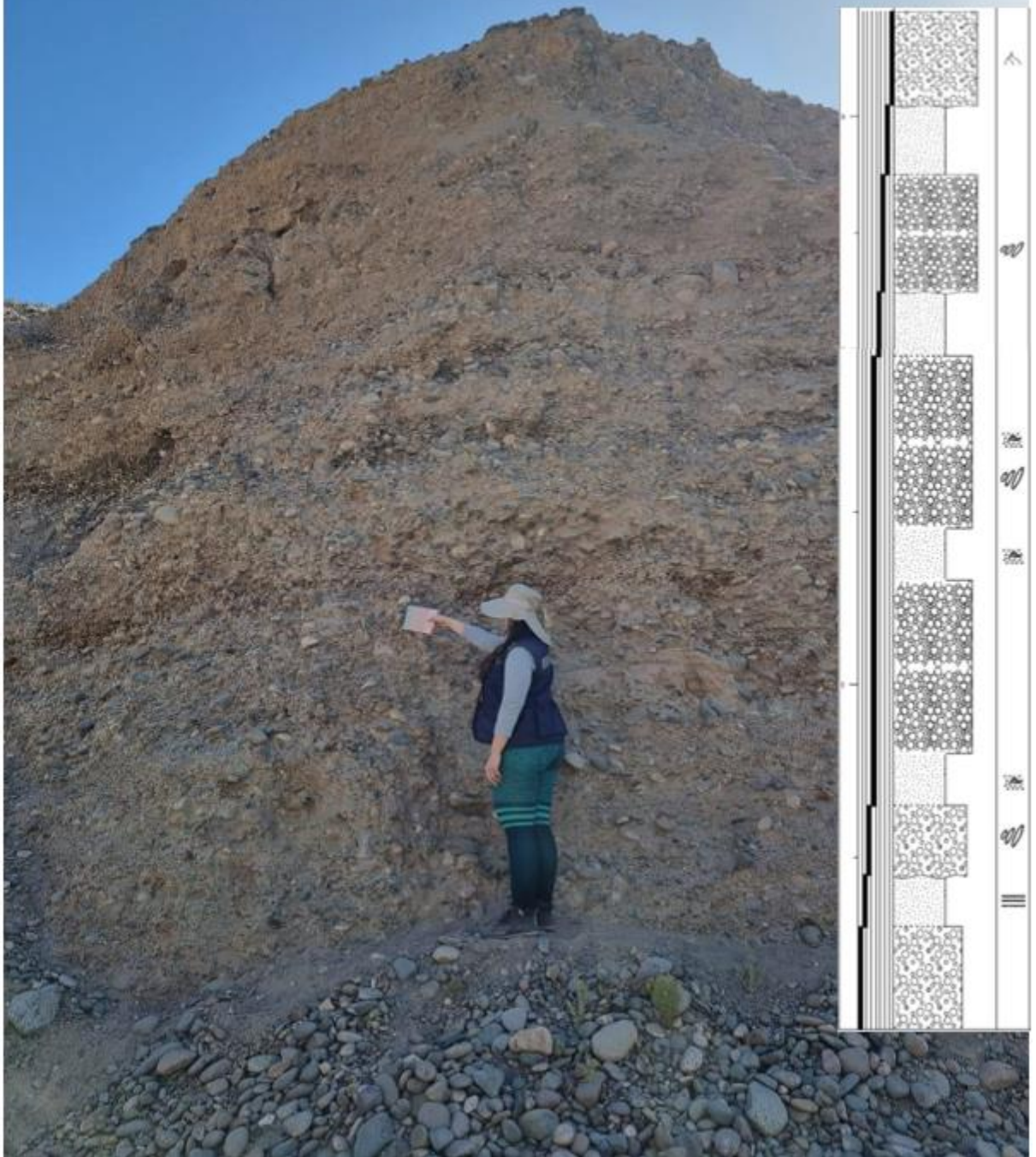
Coordenadas UTM: 6.961.611N; 374.597E. Cota: 463 m s.n.m. Foto 09 de terreno (Anexo N°04).





Coordenadas UTM: 6.961.611N; 374.597E. Cota: 463 m s.n.m.

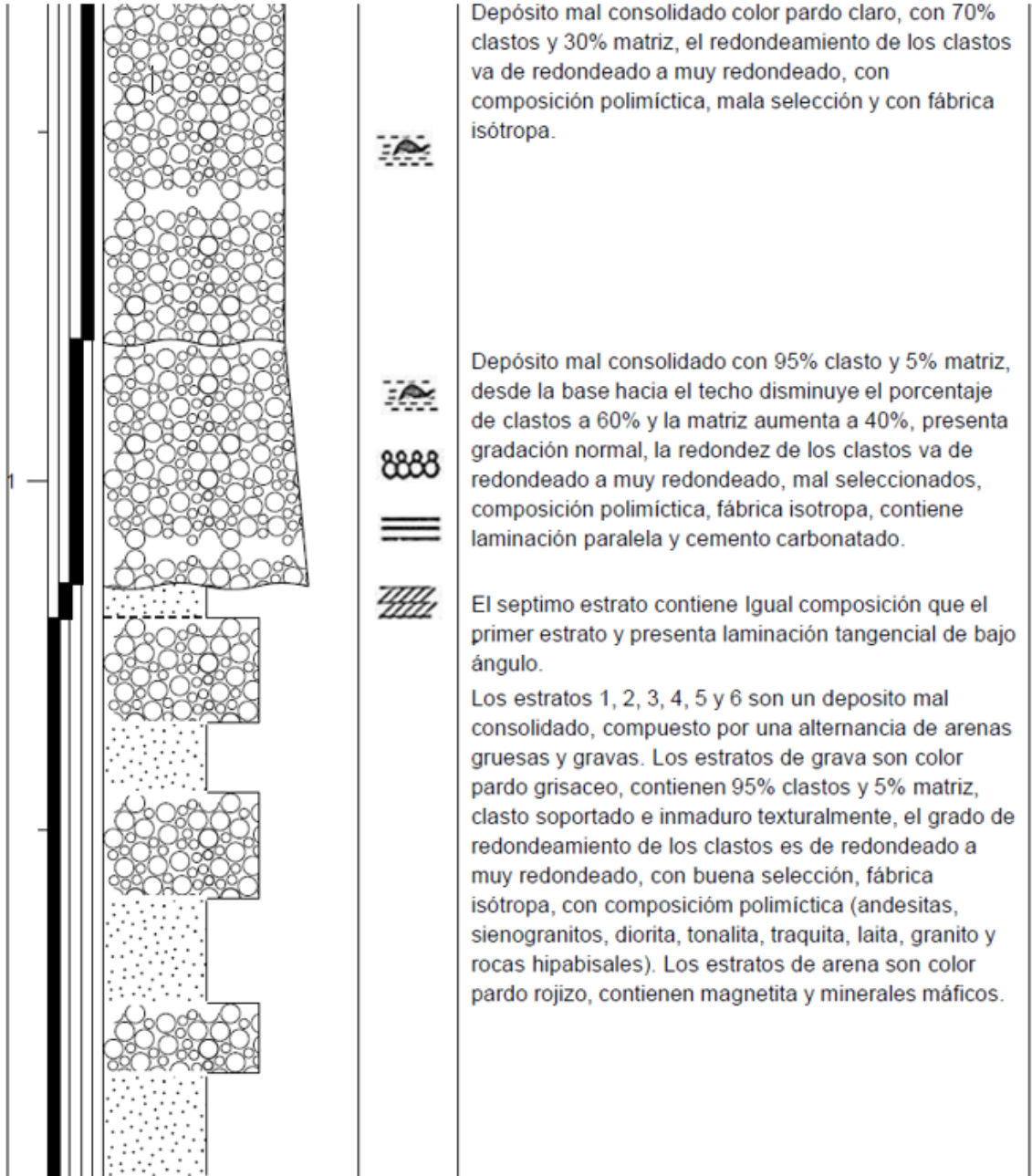
Foto 09 de terreno (Anexo N°04).



Columna estratigráfica N°05, Punto N°18.

Coordenadas UTM: 6.967.928N; 370.727E. Cota: 411 m s.n.m. Foto 18 de terreno (Anexo N°04). Las fotos 19 y 20 de terreno, muestran laminación paralela y tangencial de las facies 1 y 2.





Coordenadas UTM: 6.967.928N; 370.727E. Cota: 411 m s.n.m.

Foto 18 de terreno (Anexo N°04).

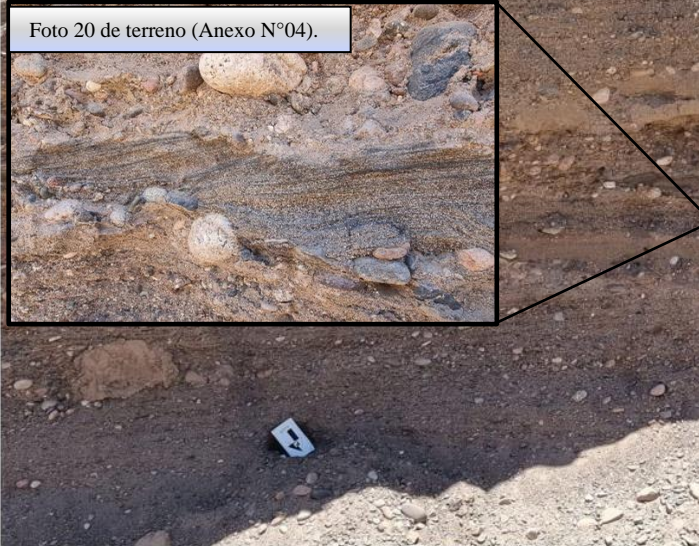
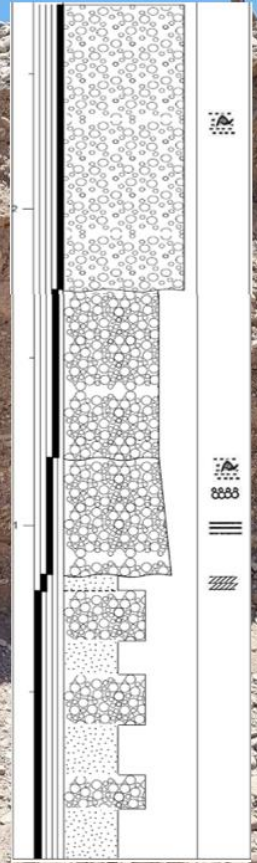
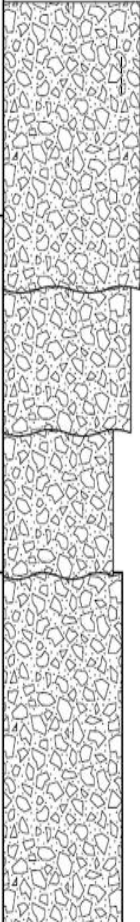


Foto 20 de terreno (Anexo N°04).



Columna estratigráfica N°06, Punto N°19.

Coordenadas UTM: 6.966.151N; 370.273E. Cota: 448 m s.n.m. Foto 21 de terreno (Anexo N°04).

COLUMNA N°6		ESTRUCTURAS	DESCRIPCIÓN DE FACIES SEDIMENTARIAS
ESCALA (m)	MUD SAND GRAVEL clay silt vf m vc gran pebb cobb boul		
1			Depósito semi a mal consolidado color gris con 30% clastos y 70% matriz, matriz soportado e inmaduro texturalmente, composición oligomictica igual al tercer estrato, con mala a muy mala selección, cemento carbonatado, la redondez de los clastos es de anguloso a sub redondeado y la fábrica es isotropa.
			Depósito semi a mal consolidado color gris con 94% clastos y 6% matriz, clasto soportado e inmaduro texturalmente, composición oligomictica, contiene clastos de tonalita, diorita y sienogranito, selección moderada, con cemento carbonatado, la redondez de los clastos es de sub anguloso a anguloso y la fábrica es isotropa.
		≡	Depósito semi a mal consolidado color pardo, 80% clastos y 20% matriz, clasto soportado e inmaduro texturalmente, la composición y selección es igual al primer estrato, con cemento de óxidos de hierro, la redondez de los clastos es de sub redondeado a sub anguloso y la fábrica es isotropa, presenta laminaciones.
		≡	Depósito semi a mal consolidado color pardo, 90% clastos y 10% matriz, clasto soportado e inmaduro texturalmente, la composición es monomictica, con buena selección de los clastos, contiene clastos de tonalita y diorita, el cemento es carbonatado, la redondez de los clastos es de sub redondeado a anguloso y la fábrica es isotropa, presenta laminaciones.

SIMBOLOGÍA LITOLÓGÍA

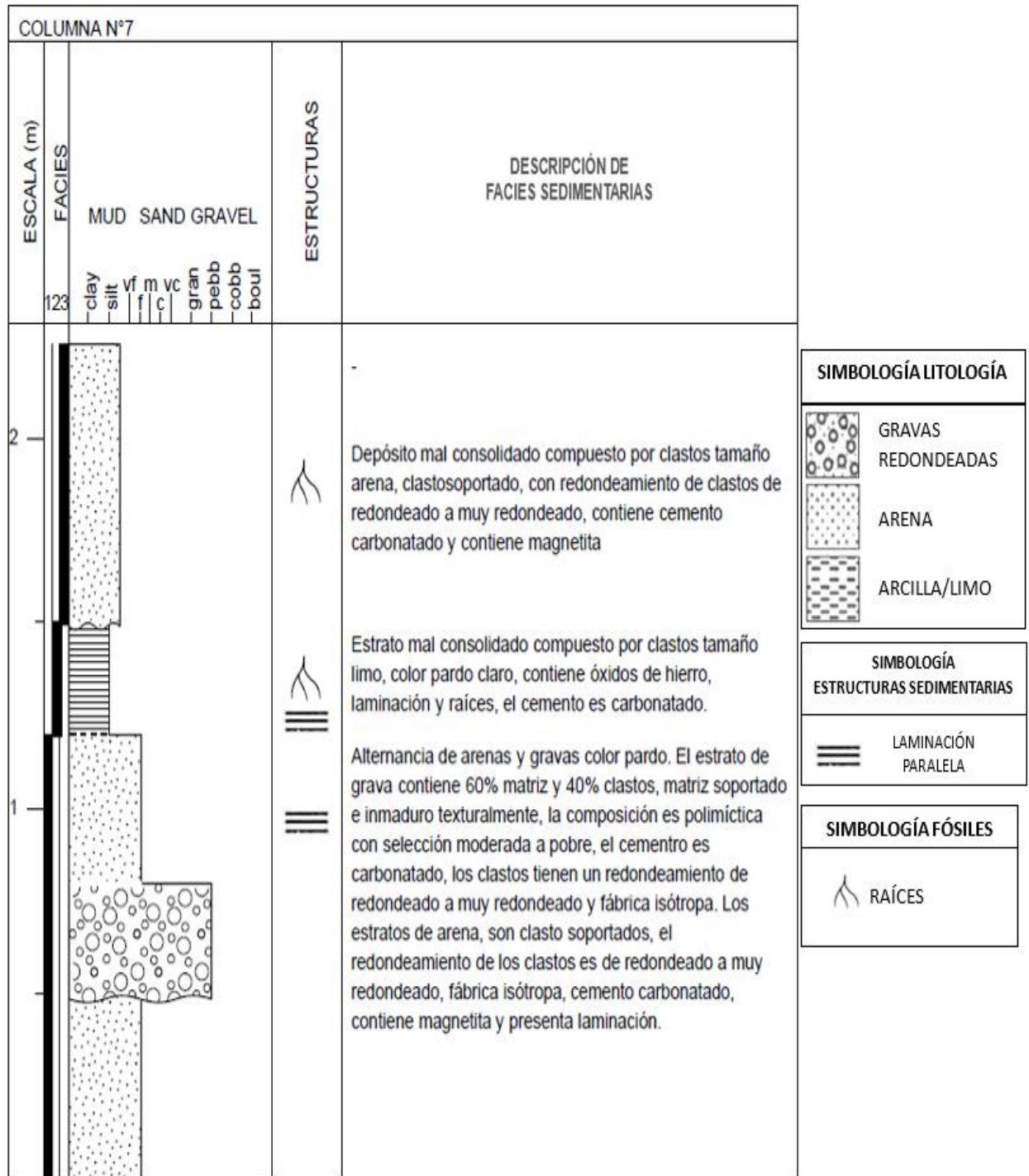
 GRAVAS ANGULOSAS

SIMBOLOGÍA ESTRUCTURAS SEDIMENTARIAS

 LAMINACIÓN PARALELA

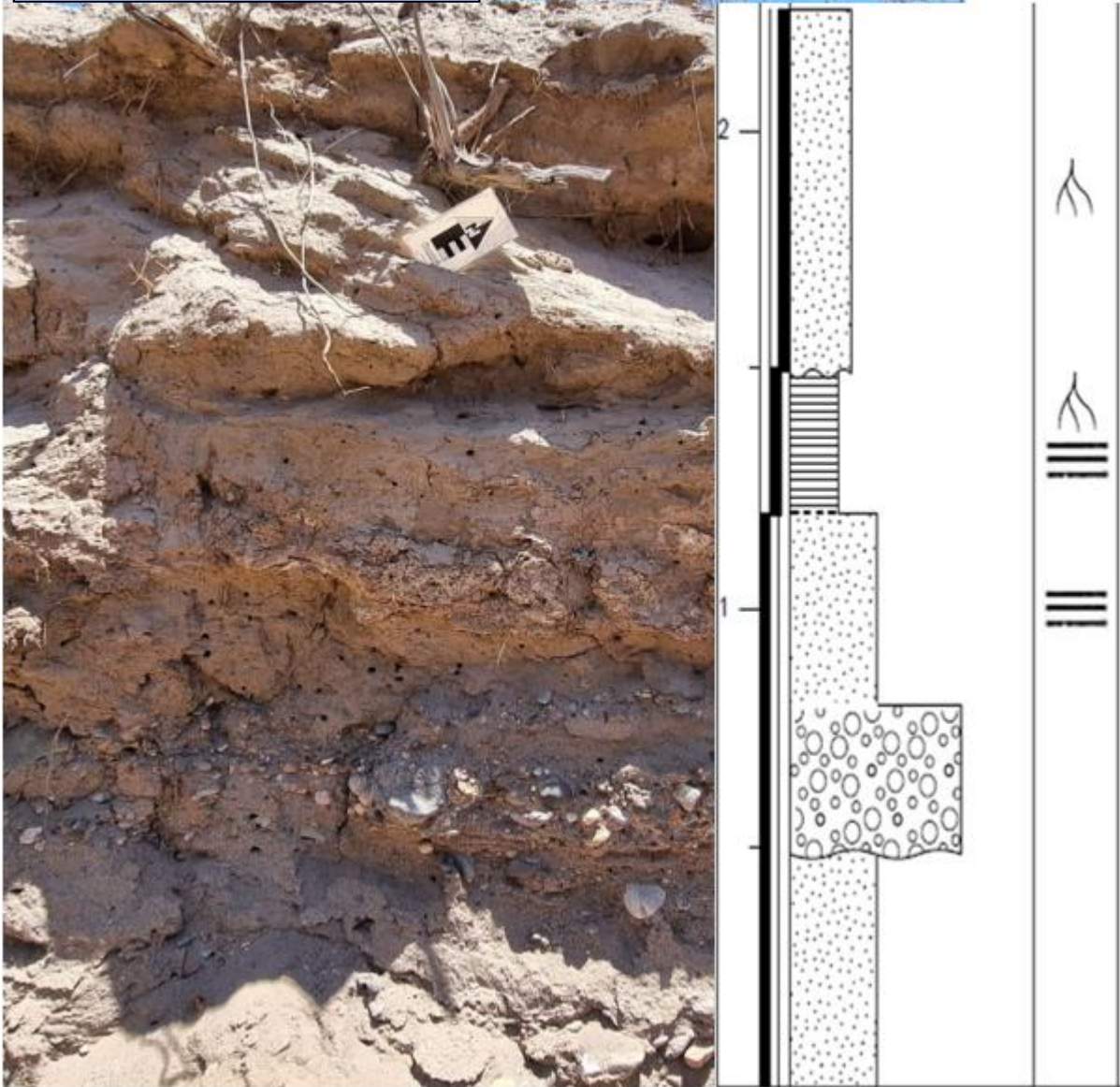
Columna estratigráfica N°07, Punto N°30.

Coordenadas UTM: 6.973.083N; 366.158E. Cota: 357 m s.n.m. Foto 32 de terreno (Anexo N°04).



Coordenadas UTM: 6.973.083N; 366.158E. Cota: 357 m s.n.m.

Foto 32 de terreno (Anexo N°04).



5.3 Resultados en etapa de laboratorio:

Luego de tamizar las muestras extraídas en terreno, se obtuvieron los siguientes resultados.

Se registró para cada muestra:

- Peso en kilogramos de la muestra completa (sin tamizar) en bolsa grande.
- Peso en kilogramos de la bolsa de muestra grande.
- Peso en kilogramos de la bolsa de muestra pequeña.
- Peso en kilogramos de la muestra tamizada en bolsa grande con tamiz # $\frac{1}{2}$ y #16.
- Peso en kilogramos de la muestra tamizada en bolsa pequeña con tamiz #30, #60 y #200.
- Peso en kilogramos de la muestra completa según concepto de tara (MC).
- Peso en kilogramos de la muestra tamizada según concepto de tara (MT).
- % Erosionable (%E).
- Total de muestra perdida.

La información completa de estos resultados se encuentra registrada en Anexo N°02. Sin embargo, debido a la extensión de estos y para lograr una mejor comprensión, se muestra una tabla resumen (Tabla N°3).

Tabla N°3: La tabla muestra un resumen de los resultados primordiales obtenidos luego de realizar el tamizado de muestras.

MUESTRA	MC	MT	%E
M1D1P1	0,836	0,403	48,21
M2D1P2	1,237	0,297	24,01
M3D1P3	0,565	0,192	33,98
M4D1P3	1,237	0,352	28,46
M5D1P4	0,889	0,406	45,67
M6D1P5	0,919	0,555	60,39
M7D1P6	1,639	0,905	55,22
M8D1P7	1,038	0,634	61,08
M9D1P8	1,406	0,391	27,81
M10D1P9	1,872	0,989	52,83
M11D2P10	1,606	1,135	70,67
M12D2P10	2,388	0,749	31,37
M13D2P11	2,803	0,877	31,29
M14D2P12			100
M15D2P13	2,458	1,167	47,48
M16D2P14	1,838	1,087	59,14
M17D2P15	1,607	0,574	35,72
M18D2P15	3,411	0,81	23,75
M19D2P16	0,401	0,374	93,27
M20D2P17	1,285	0,57	44,36
M21D2P18	0,256	0,135	52,73
M22D2P18			100
M23D2P18			100
M24D2P18	2,369	0,552	23,3
M25D3P19	2,407	0,902	37,47
M26D3P20	2,438	1,101	45,16
M27D3P21	2,608	1,352	51,84
M28D3P22			100
M29D3P23	2,206	1,512	68,54
M30D3P24	1,766	1,192	67,5
M31D3P25	2,102	0,949	45,15
M32D3P26	3,02	1,094	36,23
M33D3P27	2,583	2,125	82,3
M34D3P28	2,368	0,561	23,7
M35D3P29	2,412	0,928	38,5
M36D3P30			100
M37D3P30			100

Posteriormente, a partir de los resultados obtenidos mediante pistola de análisis XRF, igualmente se realizó una tabla (tabla N°4) para registrar y evaluar la composición de las muestras de granulometría propensas a erosión mediante un medio eólico.

Tabla N°4: La tabla muestra los resultados obtenidos, mediante pistola de análisis XRF, de los elementos y sus promedios en ppm. Se puede observar en color naranja intenso aquellos elementos en que la ppm sobrepasa el máximo rango estipulado en las normas de calidad de suelos de Canadá (CCME, 2003), Brasil (CTSA, 2005) y USA (EPA, 2015) para sectores residenciales (Tabla N°2), mientras que en color naranja suave se observan aquellos elementos en que la ppm sobrepasa el mínimo rango estipulado.

MUESTRA	Concentración del elemento en ppm						
	As	Co	Cu	Pb	Zn	Fe	Hg
M1D1P1	10	0	130	0	60	44880	0,001
M2D1P2	10	0	130	20	70	51540	0,001
M3D1P3	30	0	180	0	100	47130	0,001
M4D1P3	30	0	830	40	120	51170	0,001
M5D1P4	70	0	5750	80	90	46340	0,001
M6D1P5	90	0	2570	110	120	55400	0,001
M7D1P6	40	0	950	50	220	71420	0,001
M8D1P7	20	0	380	40	110	46660	0,001
M9D1P8	40	0	300	0	60	34050	0,001
M10D1P9	50	0	200	20	70	52880	0,001
M11D2P10	10	0	80	0	40	37270	0,001
M12D2P10	20	0	780	30	130	47970	0,001
M13D2P11	10	0	80	0	50	26670	0,001
M14D2P12	150	0	2040	140	300	45130	0,001
M15D2P13	10	0	70	0	70	39750	0,001
M16D2P14	20	0	160	50	130	42250	0,001
M17D2P15	50	0	120	0	50	42470	0,001
M18D2P15	20	0	160	30	70	40650	0,001
M19D2P16	20	0	3240	120	110	41940	0,001
M20D2P17	20	0	100	30	70	42010	0,001
M21D2P18	10	0	40	20	30	19910	0,001
M22D2P18	20	0	40	0	50	29070	0,001
M23D2P18	10	0	60	0	60	44360	0,001
M24D2P18	20	0	140	30	110	40950	0,001
M25D3P19	40	0	230	50	50	42380	0,001
M26D3P20	20	0	1160	50	130	92670	0,001
M27D3P21	20	0	90	0	80	45600	0,001
M28D3P22	10	0	140	0	50	57900	0,001
M29D3P23	20	0	190	0	80	41020	0,001
M30D3P24	30	0	3960	40	120	93290	0,001
M31D3P25	90	0	1470	150	570	74610	0,001
M32D3P26	30	0	680	40	110	59860	0,001
M33D3P27	20	0	810	60	150	65570	0,001
M34D3P28	30	0	360	0	50	46860	0,001
M35D3P29	30	0	540	30	110	71570	0,001
M36D3P30	10	0	250	20	70	49240	0,001
M37D3P30	10	0	40	0	40	28060	0,001
PROMEDIO	30,81	0	768,9189	33,7838	105,41	48932,4	0,001

As	(12-55 ppm)
	≥0,68 y ≤55
	>55

Cu	(63-400 ppm)
	≥63 y ≤400
	>400

Pb	(140-400 ppm)
	≥ 140

Zn	(200-2300 ppm)
	> 200

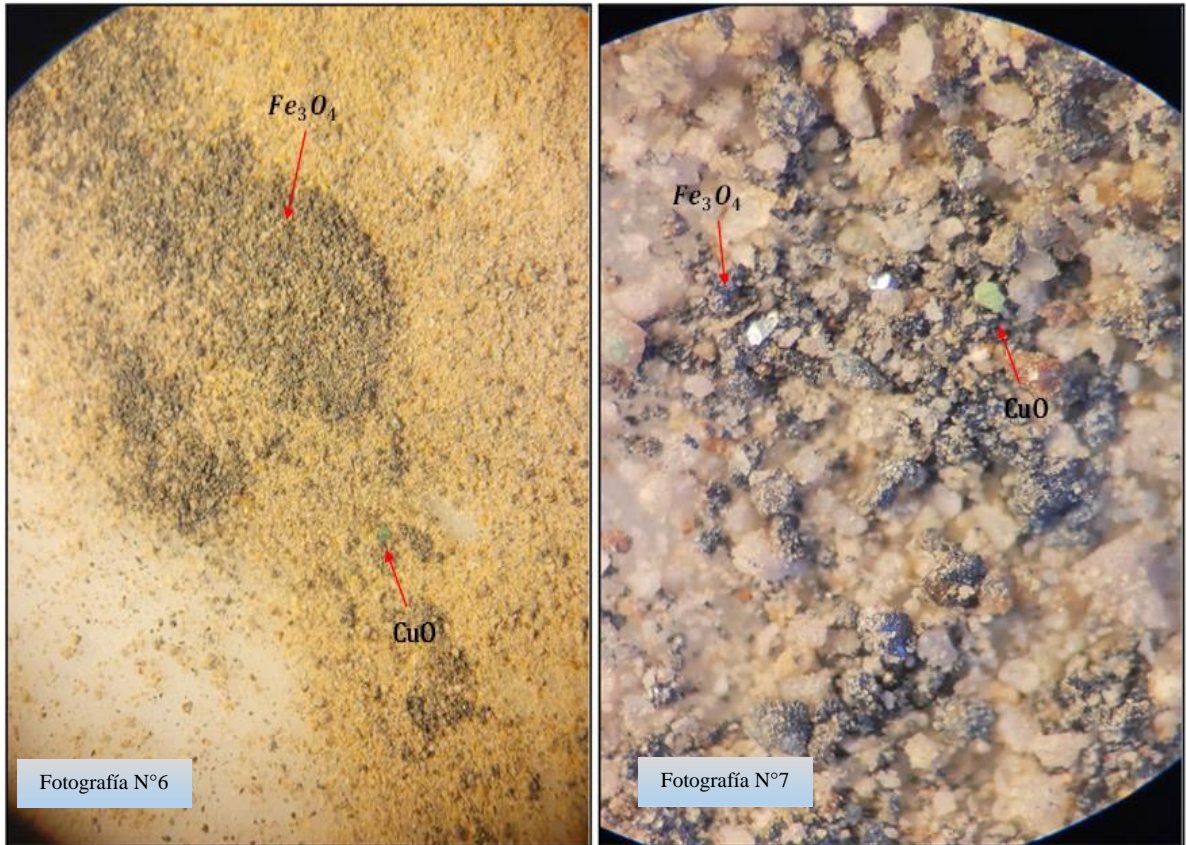
Para As, 0.68 ppm corresponde al mínimo rango estipulado en las normas de calidad de suelos de USA y 55 ppm corresponde al máximo rango estipulado en las normas de calidad de suelos de Brasil.

Para Cu, 63 ppm corresponde al mínimo rango estipulado en las normas de calidad de suelos de Canadá y 400 ppm corresponde al máximo rango estipulado en las normas de calidad de suelos de Brasil.

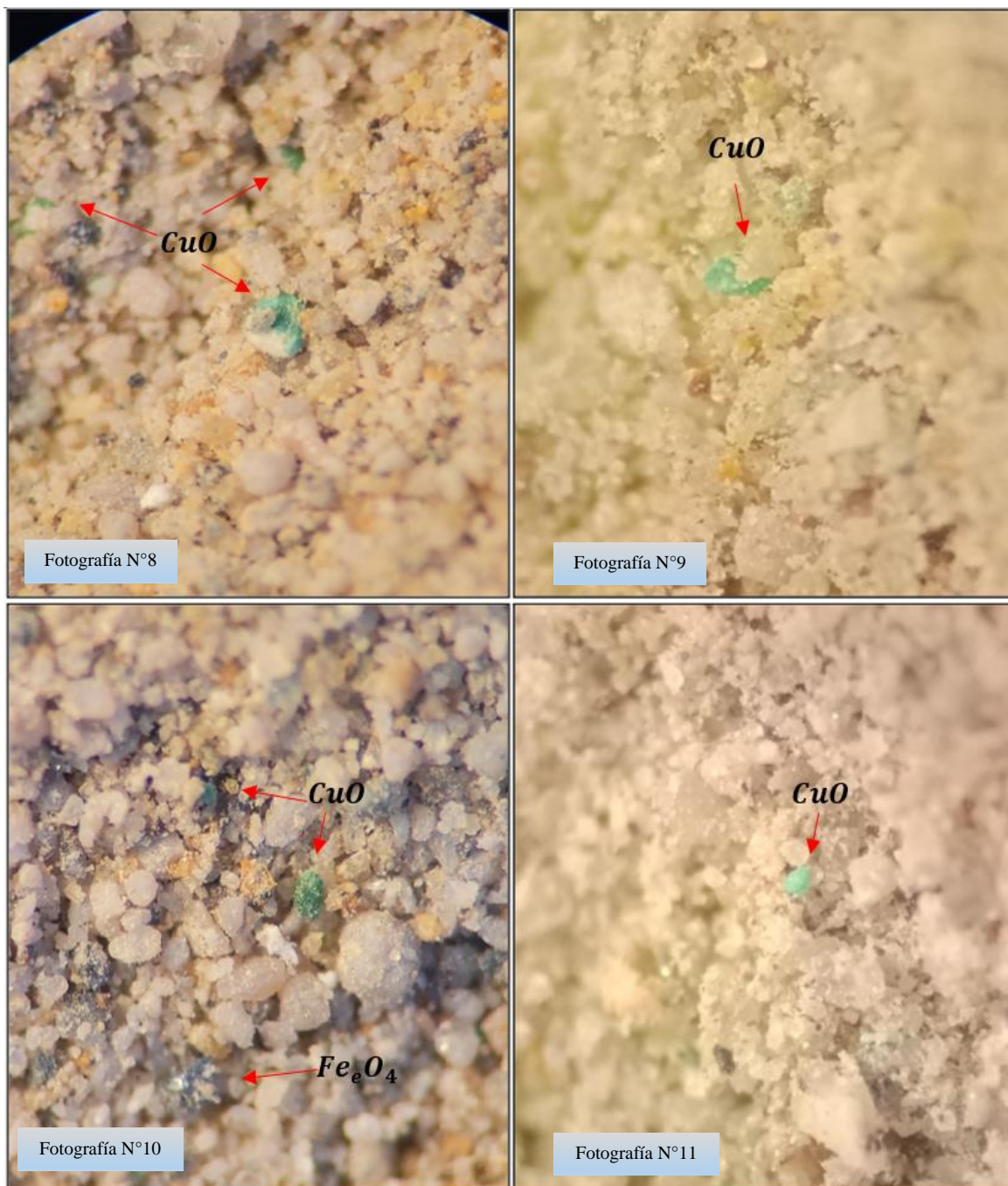
Para Pb, 140 ppm corresponde al mínimo rango estipulado en las normas de calidad de suelos de Canadá y 400 ppm corresponde al máximo rango estipulado en las normas de calidad de suelos de USA.

Para Zn, 200 ppm corresponde al mínimo rango estipulado en las normas de calidad de suelos de Canadá y 2.300 ppm corresponde al máximo rango estipulado en las normas de calidad de suelos de USA.

Al realizar un análisis mediante el uso de Microscopio Binocular de laboratorio marca Motic (Fotografía N°5), a aquellas muestras tamizadas con altos contenidos de elementos contaminantes (Fotografías N°6, N°7, N°8, N°9, N°10 y N°11), se observó la predominancia de minerales de cuarzo (SiO_2), feldespato potásico (KAlSi_3O_8), plagioclasa ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), calcita (CaCO_3), arcillas, pirita (FeS_2), calcopirita (CuFeS_2), hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4), epidota $\text{Ca}_2(\text{Al, Fe})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$ y óxidos de cobre (CuO).



Fotografía N°6 y N°7: Las fotografías muestran gran porcentaje de cristales de magnetita encontrados en las diferentes muestras. Las fotografías fueron tomadas con un aumento de 5X (elaboración propia).



Fotografía N°8, N°9, N°10 y N°11: Las fotografías muestran cristales de óxidos de cobre apreciados en varias de las muestras. Las fotografías fueron tomadas con un aumento de 5X (elaboración propia).

Se realizaron mapas de concentración de Cu, As, Pb y Zn (Figuras N°25, N°26, N°27 y N°28), ya que estos sobrepasan las concentraciones estipuladas por las normas de calidad de suelos de Canadá (CCME, 2003), Brasil (CTSA, 2005) y USA (EPA, 2015) (Tabla N°2).

CONCENTRACIONES DE Cu (ppm)

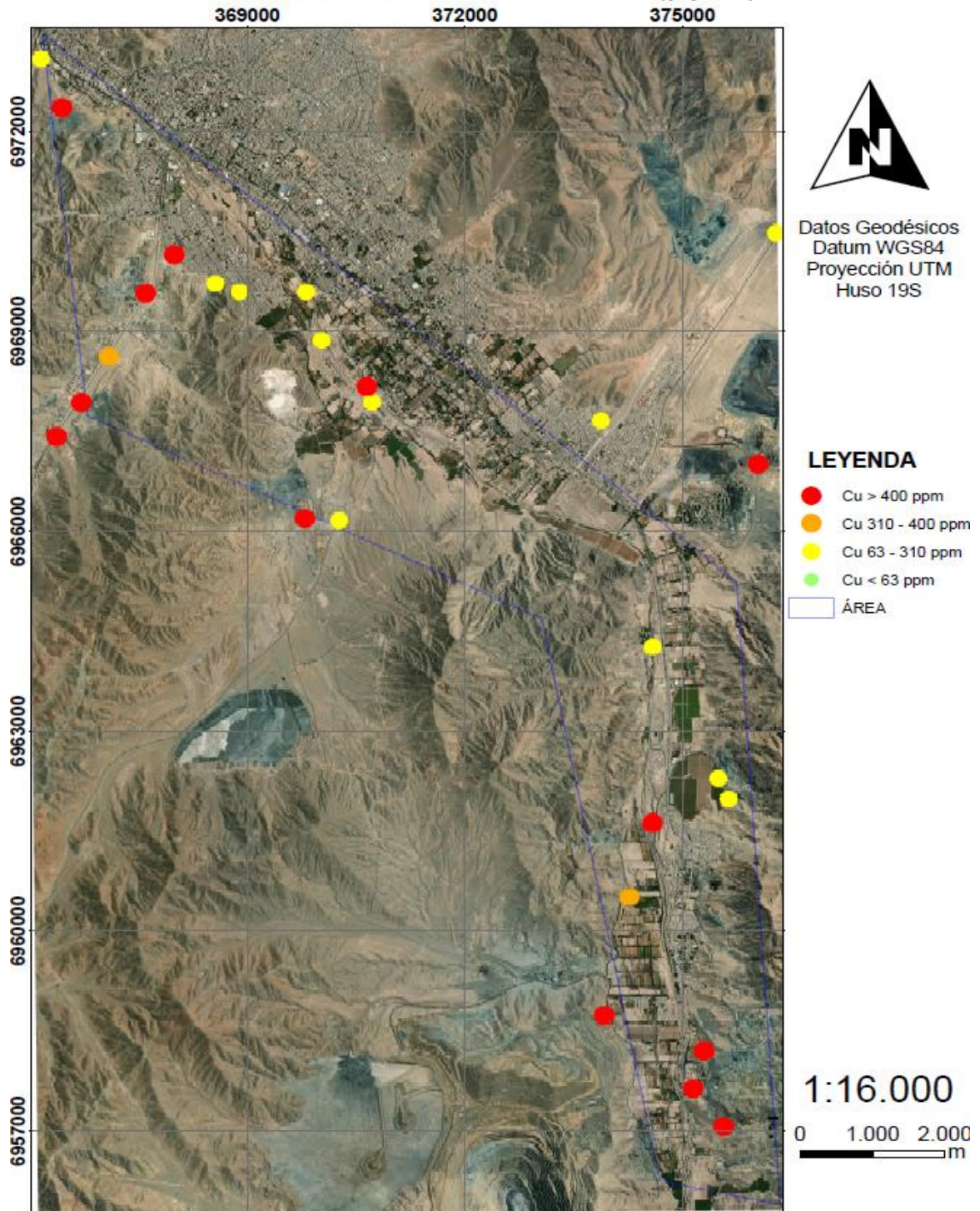


Figura N°25: La figura muestra concentraciones de Cu en los distintos puntos de estudio (elaboración propia con programa ARCGIS).

CONCENTRACIONES DE As (ppm)

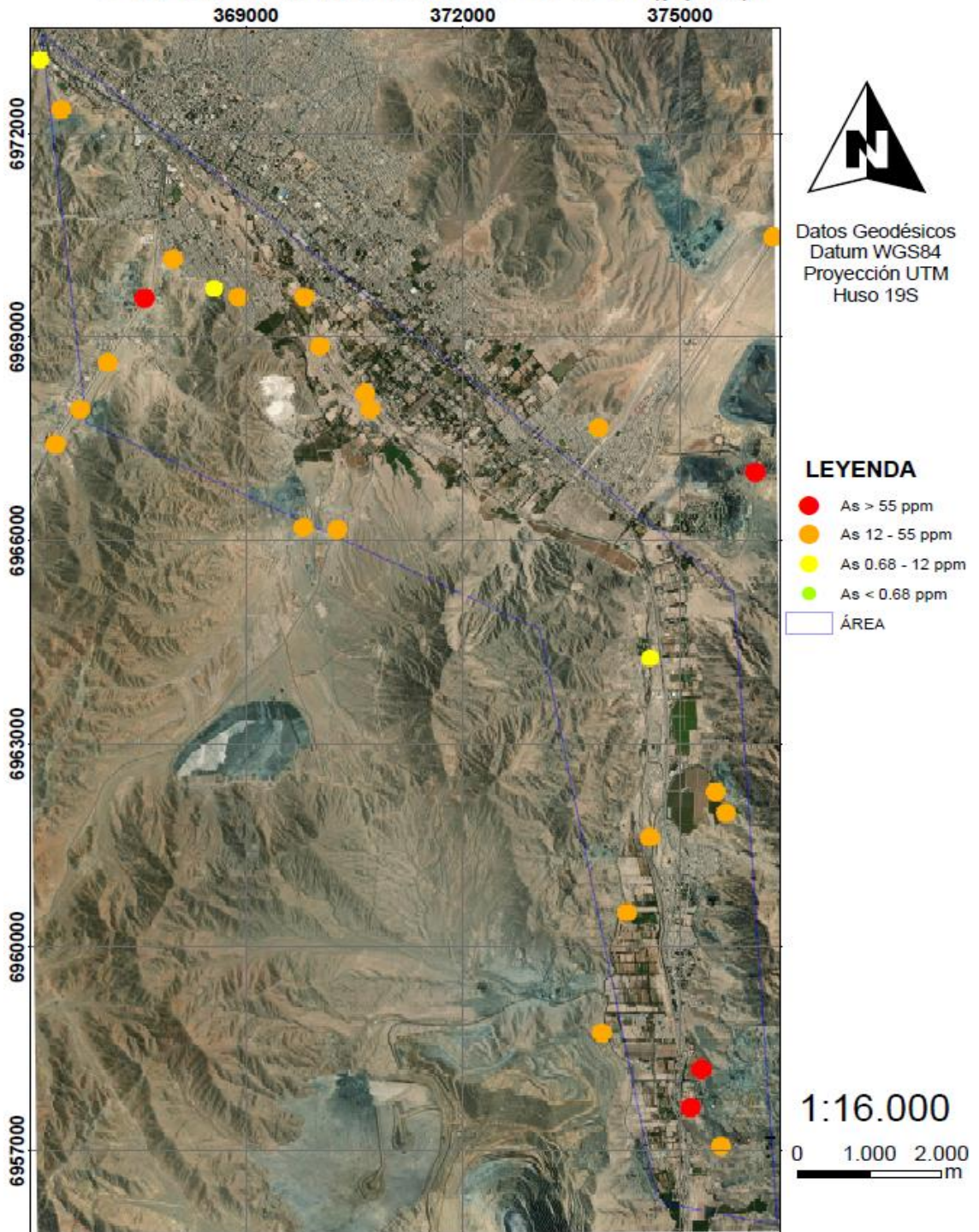


Figura N°26: La figura muestra concentraciones de As en los distintos puntos de estudio (elaboración propia con programa ARCGIS).

CONCENTRACIONES DE Pb (ppm)

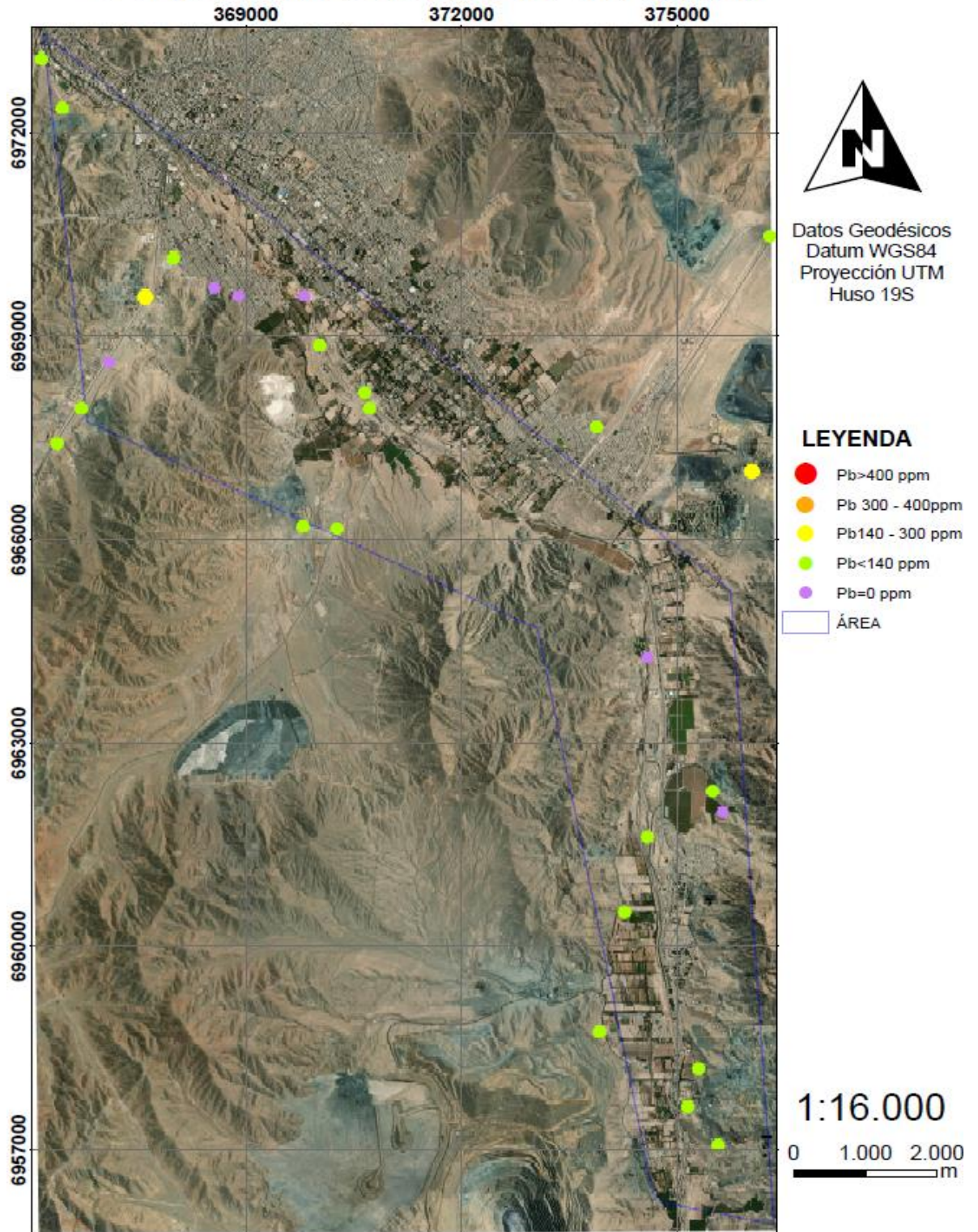


Figura N°27: La figura muestra concentraciones de Pb en los distintos puntos de estudio (elaboración propia con programa ARCGIS).

CONCENTRACIONES DE Zn (ppm)

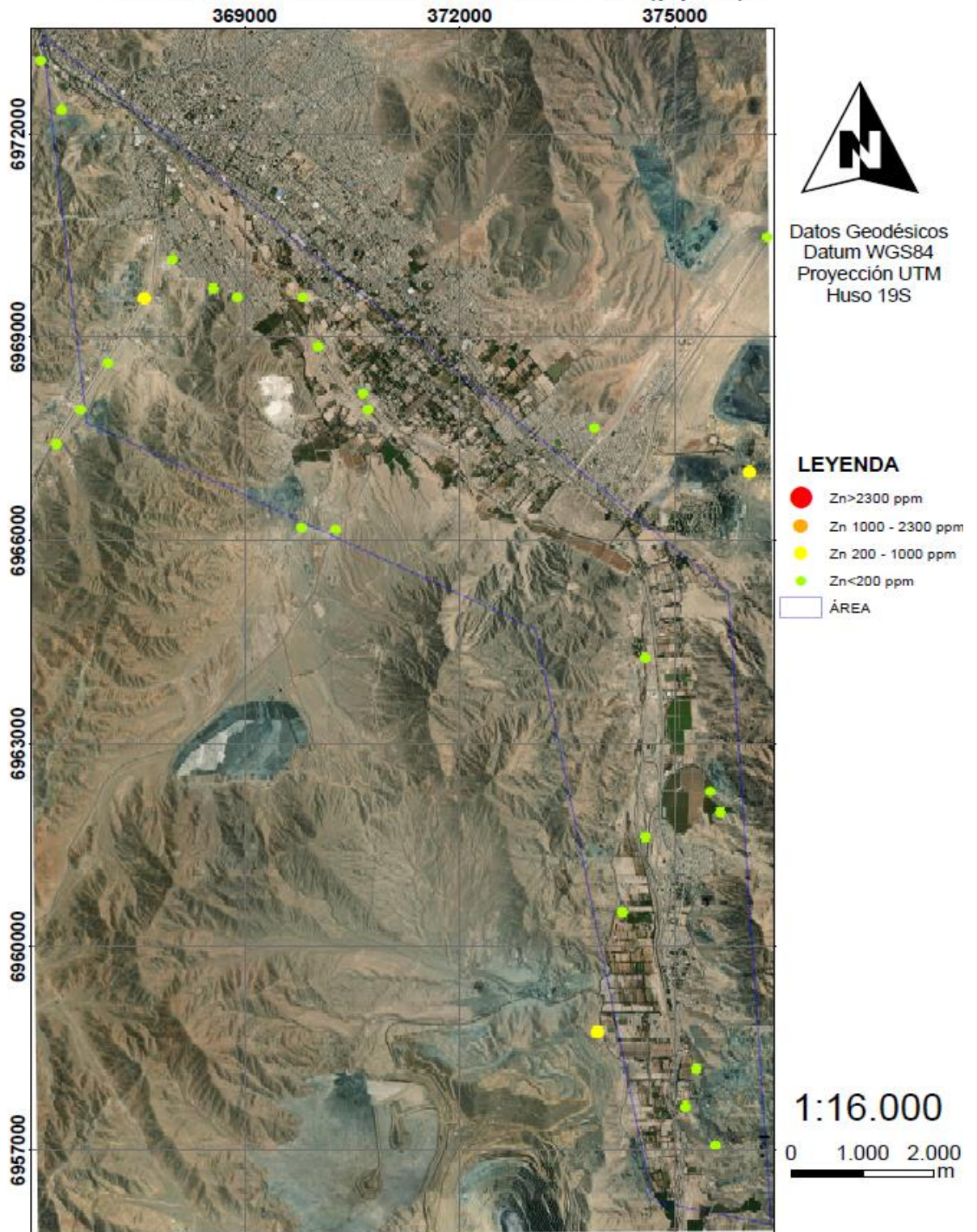


Figura N°28: La figura muestra concentraciones de Zn en los distintos puntos de estudio (elaboración propia con programa ARCGIS).

Las concentraciones de Cu son extremadamente elevadas en los sectores de Tierra Amarilla, Cancha Alianza, fundición Paipote, panamericana 5 Norte y el cerro a un costado de la Universidad de Atacama, según lo estipulado por las normas de calidad de suelos de Canadá (CCME, 2003), Brasil (CTSA, 2005) y USA (EPA, 2015) (Tabla N°2) (Figura N°25).

Las concentraciones de As son elevadas en todos los sectores de Copiapó y Tierra Amarilla, según lo estipulado por las normas de calidad de suelos de Canadá (CCME, 2003) y USA (EPA, 2015). Y sus valores son extremadamente elevados en fundición Paipote, al Sur de Tierra Amarilla y en la ruta 5 Norte según lo estipulado por las normas de calidad de suelos de Brasil (CTSA, 2005) (Tabla N°2) (Figura N°26).

Las concentraciones de Pb son altas en un punto de la panamericana 5 Norte y en la fundición Hernán Videla Lira, según lo estipulado por las normas de calidad de suelos de Canadá (CCME, 2003) (Figura N°27).

Las concentraciones de Zn son altas en un punto de la panamericana 5 Norte, en la fundición Hernán Videla Lira y en un punto de Tierra Amarilla, según lo estipulado por las normas de calidad de suelos de Canadá (CCME, 2003) (Figura N°28).

La información de la página del Servicio Nacional de Geología y Minería evidenciada en la figura N°19, muestra que todos los relaves del área de estudio pertenecen a plantas que procesan, oro y cobre (exceptuando 1 relave que proviene de la planta María Isabel y procesa hierro).

6. CAPÍTULO VI. DISCUSIONES.

Las columnas N°04 y N°05 fueron estudiadas en la cuenca del río Copiapó, estas 2 columnas denotan secuencias similares, compuestas por intercalaciones entre capas de gravas y capas de arenas (Figura N°29), donde las gravas contienen composición polimíctica, con clastos de rocas ígneas intrusivas (diorita y sienita de feldespatos alcalinos), extrusivas (andesitas) e hipabisales. En las 2 columnas se observan facies similares, compuestas por una alternancia de capas de gravas clasto soportadas y capas de arenas, estas secuencias son similares y no iguales debido a que contienen diferencias de espesor, en la columna N°04 los espesores de las capas de gravas clasto soportadas son mayores, lo cual indicaría que en esta área de la cuenca habría una tasa de deposición mayor.

Por otra parte, además de las facies de alternancias, se observa en ambos techos de las columnas, estratos de gravas matriz soportadas con igual composición, los estratos de gravas matriz soportadas indican condiciones de transporte y deposición más lenta, mientras que, los estratos clasto soportados indican condiciones de transporte energético y deposición rápida, indicando flujos turbulentos que transportan y depositan grandes clastos antes de que la matriz fina se asiente entre ellos. Estas columnas estratigráficas se correlacionan, debido a que contienen igual secuencia y litología, indicando un ambiente fluvial.

Igualmente, al analizar las muestras extraídas en terreno de los distintos estratos en las columnas N°01, N°04, N°05 y N°07, mediante pistola XRF, se evidencia un aumento de concentración de los distintos elementos hacia los estratos más actuales, por lo que sería de gran importancia controlar estos parámetros (Figura N°30).

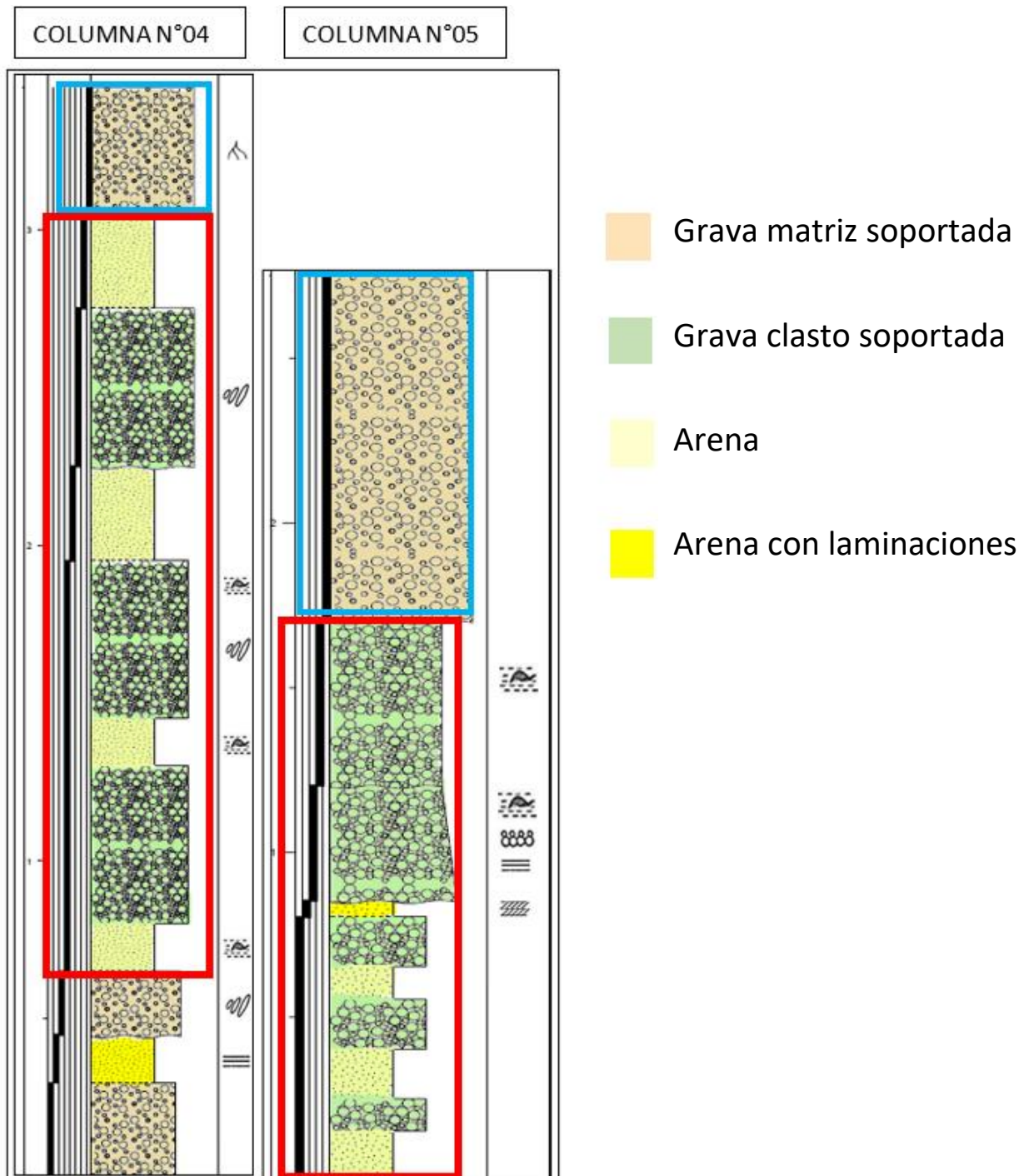


Figura N°29: Esta figura muestra la correlación de columnas N°04 y N°05, encerrado en cuadro azul se correlacionan los estratos de gravas matriz-soportadas y en cuadro rojo se correlacionan las alternancias de gravas clasto-soportadas y arenas.

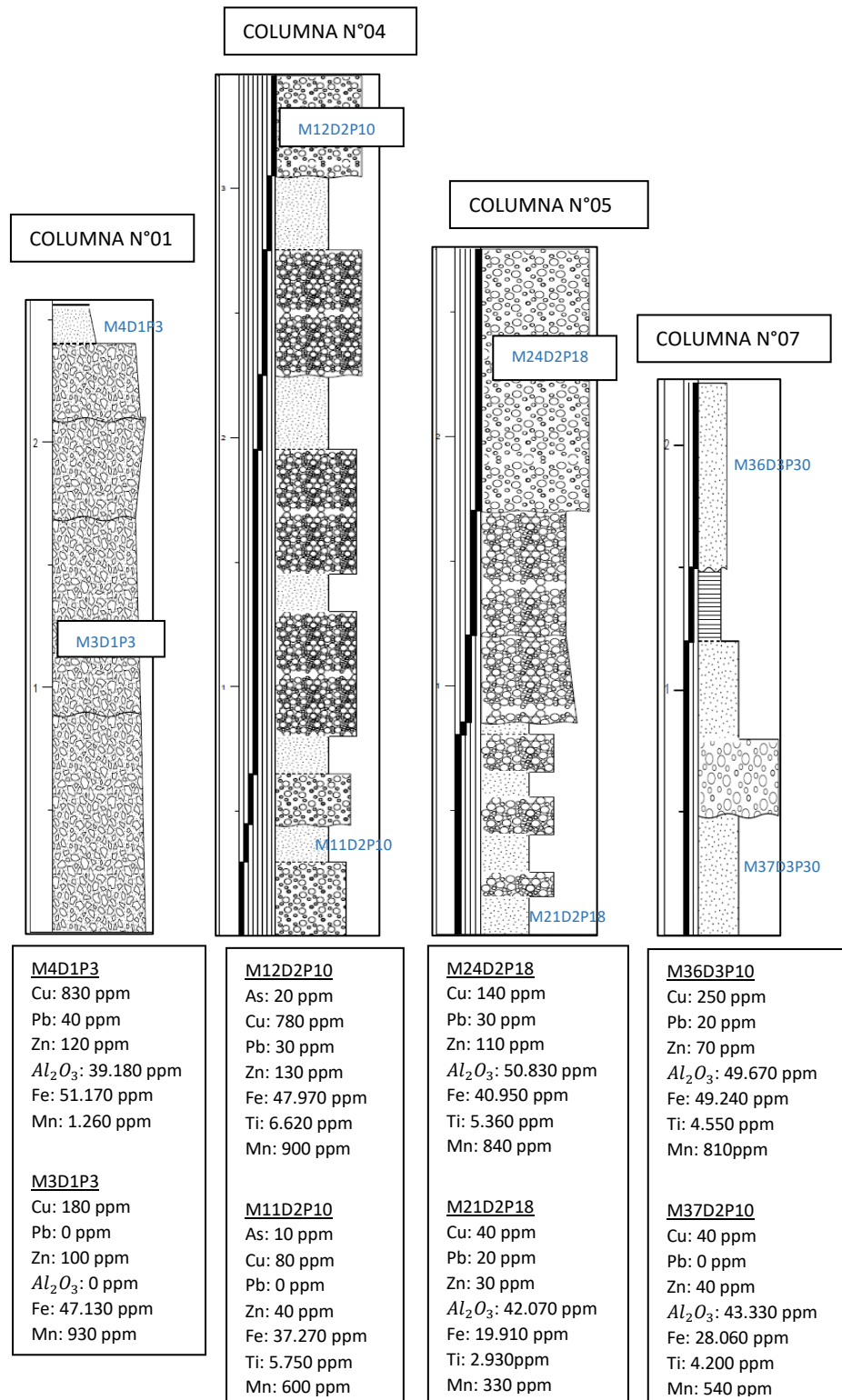


Figura N°30: La figura muestra las columnas N°01, N°04, N°05 y N°07, junto a las muestras y concentraciones extraídas de los distintos estratos.

Al estudiar los resultados de tamiz (Tabla N°3), se puede apreciar que, de las muestras extraídas, en promedio, al menos un 55,33% es erosionable mediante un medio eólico. Inclusive, hay muestras como la M14D2P12 donde el 100% es material propenso a erosión mediante un medio eólico y se compone de altas concentraciones de Cu, As, Pb y Zn (Tabla N°4) según las normas de calidad de suelos de Canadá (CCME, 2003), Brasil (CTSA, 2005) y USA (EPA, 2015).

Al contrastar los resultados de los análisis XRF obtenidos en laboratorio (Tabla N°4), con las normas de calidad de suelos de Canadá (CCME, 2003), Brasil (CTSA, 2005) y USA (EPA, 2015), se puede identificar y cuantificar que en 32 de las 37 muestras propensas a erosión eólica, se sobrepasa, en al menos 1 elemento, el máximo de concentración estipulado por las normas, lo cual es alarmante, sobre todo para los niveles de Cu, el cual en la mayoría de las muestras supera más del doble del máximo de concentración establecido por las normas de calidad de suelos de Brasil (400 ppm), que es quien establece la concentración máxima más alta para Cu, incluso en la muestra M5D1P4 se observa que sobrepasa el máximo por cuarto décuplo de veces. ($14 * 400 = 5.600$ ppm) (Gráfico N°1). Así también, se puede apreciar que en todas las muestras se sobrepasa el máximo de concentración de As estipulado por las normas de calidad de suelos de USA (0.68 ppm), quien establece la concentración máxima de As más baja; y ocasionalmente sobrepasa el máximo de concentración de As estipulado por las normas de calidad de suelos de Brasil (55 ppm), que es quien establece la concentración máxima más alta para As (Gráfico N°2). El elemento de Pb sobrepasa en 2 muestras la concentración máxima establecida por las normas de calidad de suelos de Canadá (140 ppm), que es quien establece la concentración máxima más baja para Pb, pero a modo general se encuentra bajo estos máximos estipulados, inclusive tiene valores de 0 ppm (Gráfico N°3). El elemento de Zn sobrepasa en 3 muestras la concentración máxima establecida por las normas de calidad de suelos de Canadá (200 ppm), que es quien establece la concentración máxima más baja para Zn, por lo que generalmente, igual, se encuentran bajo la normativa. Por otra parte, para el elemento de Hg, todas las muestras estudiadas tienen un valor de 0,001 ppm y el elemento de Co, en todas las muestras estudiadas tiene un valor de 0 ppm.

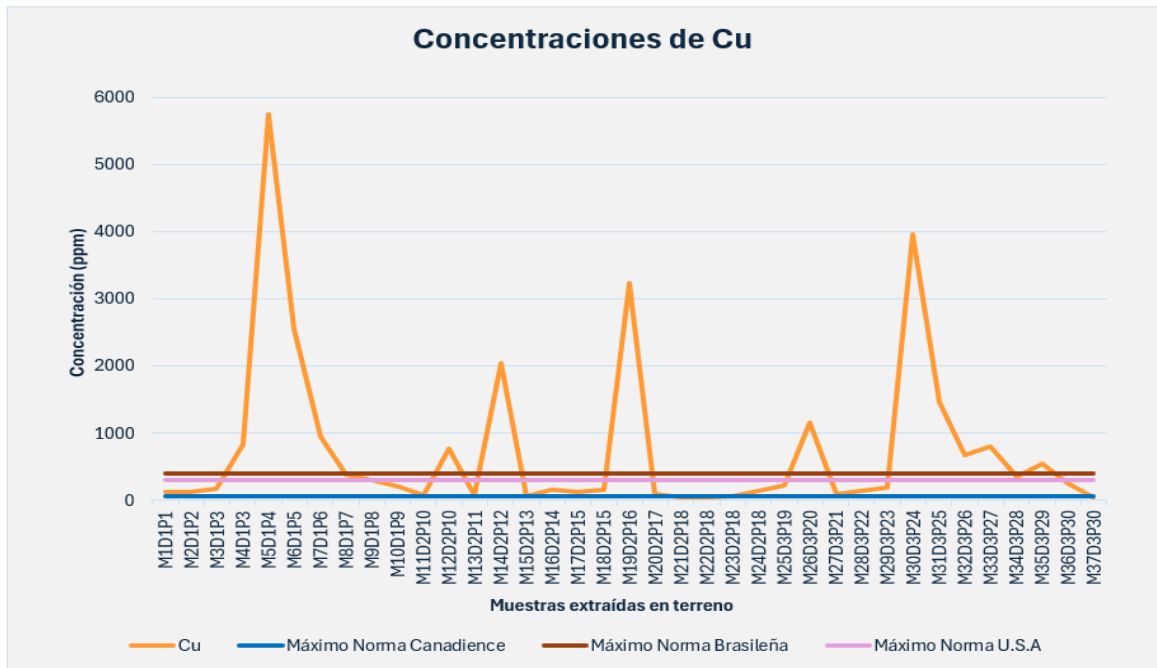


Gráfico N°1: El gráfico muestra concentraciones de cobre de cada muestra extraída en terreno, se puede observar que, en la mayoría de las muestras, este sobrepasa el máximo estipulado por las normas de calidad de suelos de Brasil, que es quien tiene la concentración máxima más alta (Elaboración propia con programa Excell).

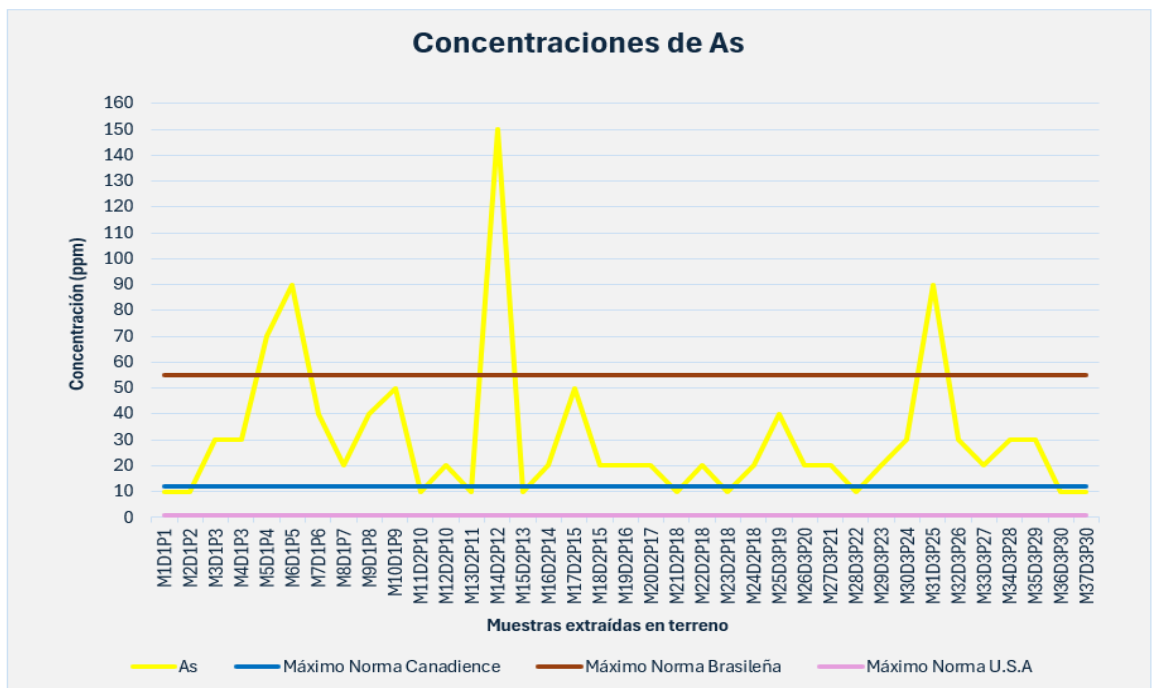


Gráfico N°2: El gráfico muestra concentraciones de arsénico de cada muestra extraída en terreno, se puede observar que, en todas las muestras, este sobrepasa el máximo estipulado por las normas de calidad de suelos de U.S.A, que es quien tiene la concentración máxima más baja (Elaboración propia con programa Excell).

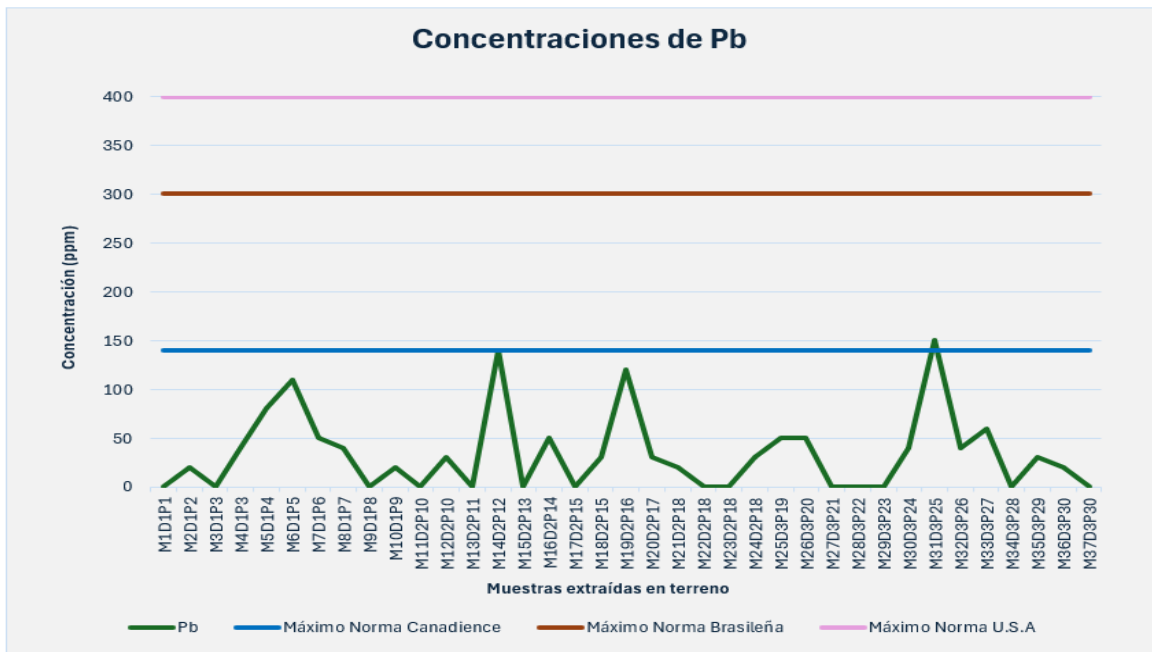


Gráfico N°3: El gráfico muestra concentraciones de plomo de cada muestra extraída en terreno, se puede observar que, en la mayoría de las muestras, este no sobrepasa el máximo estipulado por las normas de calidad de suelos e inclusive tiene valores de 0 ppm (Elaboración propia con programa Excell).

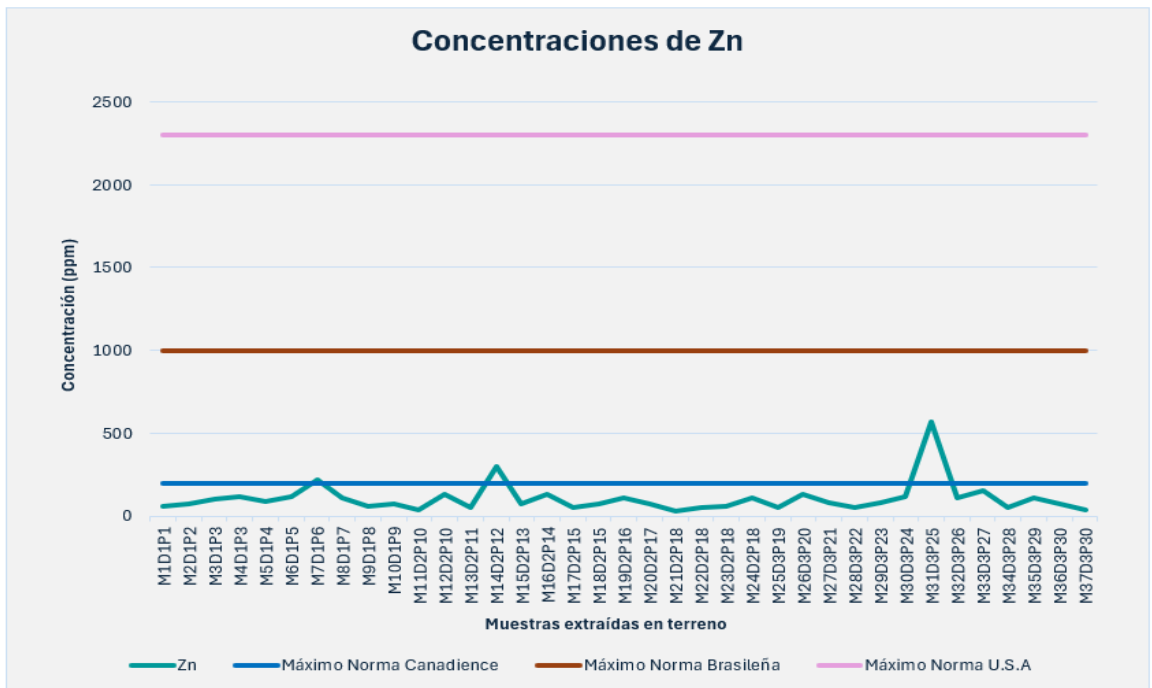


Gráfico N°4: El gráfico muestra concentraciones de zinc de cada muestra extraída en terreno, se puede observar que, en la mayoría de las muestras, este no sobrepasa el máximo estipulado por las normas de calidad de suelos canadienses, que es quien tiene la concentración máxima más baja (Elaboración propia con programa Excell).

Al comparar los promedios de la tabla N°4, con las normas de calidad de suelos de Canadá (CCME, 2003), Brasil (CTSA, 2005) y USA (EPA, 2015), se observa que, a modo general, en las muestras, el elemento de Cu sobrepasa el máximo estipulado por las normas de calidad de suelos de Brasil (400 ppm) y el elemento de As sobrepasa el máximo estipulado por las normas de calidad de suelos de USA (0,68 ppm). Mientras que los elementos de Co, Pb y Zn cumplen con los máximos estipulados.

De igual forma, se analizaron las concentraciones de hierro. Según la Normativa Secundaria de Calidad Ambiental para sedimentos marinos (NSCA.SM), establecida por el Decreto supremo N°46 del Ministerio del Medio Ambiente en Chile, el máximo permitido para concentraciones de hierro en sedimentos marinos es de 63 ppm en peso seco. Por otra parte, el Ministerio del Medio Ambiente también indica parámetros de 10 a 1.000 ppm para suelos agrícolas. Pero, no existe una normativa específica para concentraciones de hierro en suelos residenciales, dado que las concentraciones de hierro en sedimentos pueden variar dependiendo de la fuente de contaminación y las características del entorno, como la actividad biológica y la geología local (composición del suelo, erosión de rocas ricas en hierro, actividad volcánica, presencia de minerales de hierro, composición del basamento del sector), al haber erosión de rocas ricas en hierro, los parámetros podrían ser más altos. Por lo que se calculó un promedio de las concentraciones de hierro de las distintas muestras, entregando como resultado un promedio de 48.932,43243 ppm, mostrando que, al menos 9 muestras pasan el promedio (Gráfico N°5).

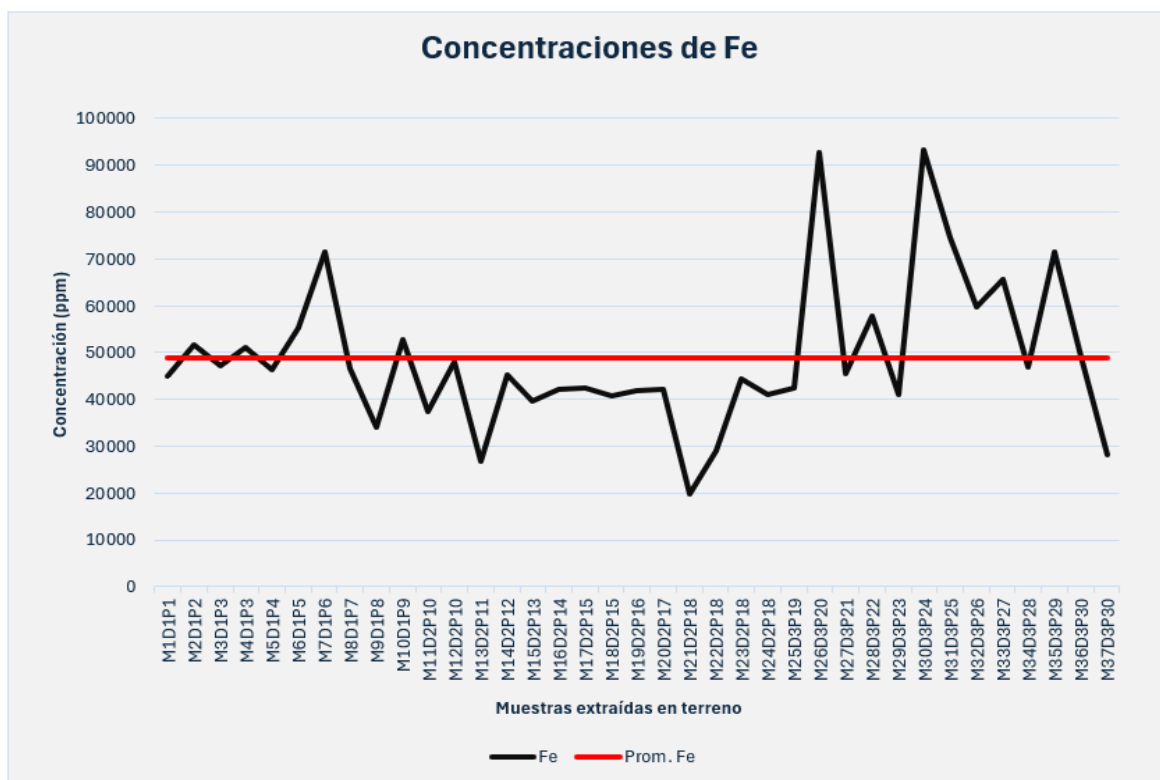


Gráfico N°5: El gráfico muestra concentraciones de hierro de cada muestra extraída en terreno (Elaboración propia con programa Excell).

Por otra parte, otro de los elementos de interés es el mercurio, este elemento al igual que los otros elementos de estudio, tampoco cuenta con una normativa clara en Chile, sin embargo, en Estados Unidos, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) establece un criterio de calidad ambiental para mercurio en diferentes matices, incluidos los sedimentos. Dependiendo de los distintos factores, el rango estipulado por esta entidad es de 0,1 a 1 ppm, por lo que el elemento de mercurio se encontraría 0.099 ppm bajo el mínimo de 0,1 ppm estipulado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.

Las Figuras N°25, N°26, N°27 y N°28, muestran concentraciones de Cu, As, Pb y Zn respectivamente en los distintos puntos estudiados, en estas figuras podemos observar que la contaminación más alta es en elemento de cobre, ya que es el elemento que más sobrepasa los máximos rangos estipulados por las normas de calidad de suelos de Canadá (CCME, 2003), Brasil (CTSA, 2005) y USA (EPA, 2015) (Tabla N°2). Las áreas con

mayor contenido de este elemento son las áreas de estudio 1.1 y 1.4 (Figuras N°21 y N°24).

Cabe mencionar que las altas concentraciones de los distintos elementos se concentran en puntos cercanos a la Universidad de Atacama, donde asisten estudiantes y profesores diariamente, al igual que en Tierra Amarilla, donde las concentraciones se centran en puntos cercanos a la escuela Luis Uribe. Igualmente, las concentraciones de Cu y As son elevadas en los sectores del Palomar, donde habitan familias y existen recintos educacionales y deportivos. Por otra parte, existen concentraciones elevadas de Cu, As, Pb y Zn en el cauce del río Copiapó, lo cual se podría estar filtrando al acuífero debido a la infiltración de agua de lluvia y/o meteórica, alterando las propiedades físicas y químicas del agua, lo cual conlleva a un impacto en la salud humana, vida acuática, calidad del agua, agricultura y por lo tanto la economía.

La información de la página del Servicio Nacional de Geología y Minería del año 2023, que entrega datos públicos de depósito de relaves (Figura N°19), explicaría las grandes cantidades de concentraciones de cobre y arsénico en el área, dado que el arsénico es un subproducto común de la minería de metales como el oro, cobre y otros minerales, durante el proceso de extracción y procesamiento de estos, el arsénico puede liberarse al medio ambiente en forma de partículas finas o disolverse en el agua (Rangel. E., *et al.* 2015).

7. CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

El estudio de las muestras extraídas de los distintos estratos de las columnas estratigráficas N°01, N°04, N°05 y N°07 evidencia un aumento en las concentraciones de los distintos elementos contaminantes hacia los estratos más actuales (Figura N°30). La figura N°18, muestra que evidentemente existe una falta de restricciones para el emplazamiento de poblaciones en las cercanías de depósitos de residuos mineros y una flexibilidad respecto al emplazamiento de depósitos de residuos en zonas pobladas. Los datos entregados por el SERNAGEOMIN evidencian que los depósitos de relaves en las comunas de Copiapó y Tierra Amarilla (sectores poblados) van en aumento, ya que para el año 2016 existían 79 relaves emplazados en la comuna de Copiapó y 34 en la comuna de Tierra Amarilla, el año 2020 existían 85 relaves emplazados en la comuna de Copiapó y 36 en la comuna de Tierra Amarilla, mientras que en el año 2023 se registran 92 relaves en la comuna de Copiapó y 37 en la comuna de Tierra Amarilla. Inclusive en una noticia publicada en el diario de Atacama con fecha 25 de julio del año 2023, se indica que Copiapó es la comuna con más cantidad de relaves en Chile y Atacama es considerada región con muy alta concentración (Anexo N°03).

En esta tesis se concluye que los elementos con mayor concentración, en las comunas de Copiapó y Tierra Amarilla, son el Cu y el As, según las normas de calidad de suelos de Canadá (CCME, 2003), Brasil (CTSA, 2005) y USA (EPA, 2015) (Tabla N°2), sobre todo el elemento de Cu (Figura N°25), que supera las normas por un mayor múltiplo de veces, superando más del doble del máximo establecido por las normas de calidad de suelos de Brasil (400 ppm), que es quien establece la concentración máxima más alta para Cu, sobrepasando el máximo incluso por cuarto décuplo de veces. ($14 * 400 = 5600$ ppm) (Gráfico N°1). Esto es debido a que las plantas mineras del sector procesan Cu y Au principalmente, emplazando relaves compuestos por grandes cantidades de Cu y As. Por otra parte, los niveles de Pb y Zn igualmente debieran ser monitoreados continuamente, dado que igual sobrepasan en algunas muestras el máximo parámetro establecido por las normas de calidad de suelos de Canadá (CCME, 2003) e igualmente las concentraciones de estos elementos aumentan con el paso del tiempo (Figura N°30), por lo que en un futuro su contaminación será aún mayor.

No se puede determinar si los niveles de Fe son altos, ya que no hay una normativa para estudiar estos parámetros en sedimentos, debido a que las concentraciones dependen de los factores geológicos del sector. Se calculó un promedio de las concentraciones de Fe de las distintas muestras, entregando como resultado un promedio de 48.932 ppm, mostrando que al menos 9 muestras pasan el promedio. Se concluye igualmente que los parámetros de Fe podrían provenir de las características del entorno del área de estudio (erosión de rocas ricas en Fe), estos parámetros podrían ser más altos debido a la erosión y disolución de rocas ferrosas circundantes (hematita, goethita, magnetita y limonita).

Se observan relaves ubicados a un costado del cauce del río Copiapó (Figura N°18), los cuales, debido a su granulometría, sin duda alguna están siendo erosionados mediante un medio eólico, motivo por el cual se depositan en el cauce del río, por lo que existe la probabilidad de que estos se filtren. Al haber contacto de los relaves con el agua, se produce un pH muy ácido, desencadenando a la vez la disolución de metales tóxicos presentes en los mismos relaves como lo son el arsénico, plomo, entre otros. Las infiltraciones en los depósitos pueden contaminar los cuerpos de agua y suelos, generando impactos negativos en otras actividades económicas como la agricultura, por lo que es de gran importancia un monitoreo y evaluación permanente de los mismos (Oyarzun R. *et al.*, 2010).

Finalmente, como posible método de remediación a las altas concentraciones de Cu y As; y evitar que aumenten aún más las concentraciones de Pb, Zn y Fe, se propone la fitoextracción de contaminantes, la fitoextracción es uno de los campos con mayores avances científicos y tecnológicos, consiste en la absorción de metales contaminantes mediante las raíces de las plantas y su acumulación en tallos y hojas (Figura N°31). La velocidad de remoción de un contaminante dependerá de la biomasa reunida durante la cosecha, del número de cosechas por año y de la concentración del metal en la biomasa cosechada. Se ha reportado una gran biodiversidad de especies con potencial, probado en campo y en laboratorio, para la fitoextracción (Figura N°32), se han identificado 163 taxones de plantas, pertenecientes a 45 familias, tolerantes a los metales y capaces de crecer en concentraciones elevadas (Vara M., & Oliveira H. 2003). En estudios recientes se ha demostrado que la fitoextracción es una solución prometedora para la limpieza de

sitios contaminados por una variedad de metales, aunque también tiene una serie de limitaciones (López M. & Morales O., 2022) (Tabla N°5). Si bien, este método no entregaría una solución inmediata, si disminuiría los niveles de material contaminante a largo plazo.

PROCESO GENERAL DE FITO-EXTRACCIÓN

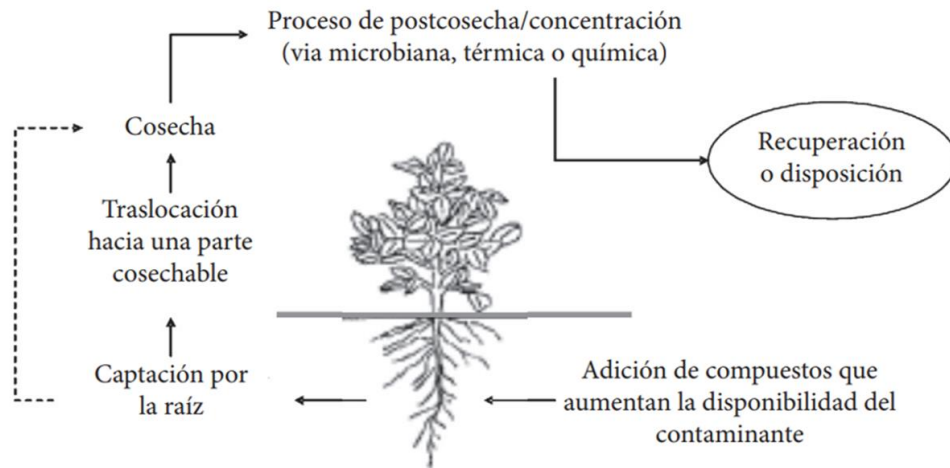


Figura N°31: La imagen muestra el proceso por el cual una planta realiza fitoextracción (Volke T., et al. 2005).

Tabla N°5: La tabla muestra ventajas y desventajas al emplear fitoremediación.

VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LA FITOREMEDIACIÓN	
VENTAJAS	LIMITACIONES
<ul style="list-style-type: none"> ● Aplicable in situ: evita la excavación. ● Menos destructiva para el ambiente. ● Bajos costos. ● Se requiere de un mínimo mantenimiento y el manejo de materiales es mínimo. ● Baja generación de residuos secundarios, bajas emisiones al aire y agua. ● Versátil para el tratamiento de una gama de compuestos peligrosos. ● Es posible atrapar metales que se encuentren en formas químicas móviles. ● Usualmente, el suelo queda fértil y puede crecer nueva vegetación. ● Concentración de contaminante: se generan menores volúmenes para disponer. 	<ul style="list-style-type: none"> ● El tipo de planta determina la profundidad de la zona a tratar (centímetros a metros). ● Aplicable para sitios con concentraciones bajas a moderadas. ● Riesgo de entrada de los contaminantes en la cadena trófica. ● Se desconoce la biodisponibilidad y toxicidad de productos. ● La hiperacumulación de metales tóxicos puede resultar tóxica para las plantas. ● Los contaminantes acumulados en hojas pueden liberarse al ambiente. ● Pueden requerirse varios ciclos de cultivo para obtener niveles adecuados de contaminantes. ● Tiempos largos de remediación (a-20 años). ● Puede depender de la estación del año. ● Los contaminantes deben estar biodisponibles.

Fuente: (Volke T., et al. 2005).

ESPECIES HIPER-ACUMULADORAS QUE PUEDEN
USARSE PARA LA FITO-EXTRACCIÓN DE METALES

ELEMENTO	ESPECIE	CONCENTRACIÓN* (MG·KG ⁻¹ , PESO SECO)	BIOMASA (TON·HA ⁻¹ ·AÑO ⁻¹)
Cadmio	<i>Thlaspi caerulescens</i>	3,000 (1)	4
Cobalto	<i>Haumaniastrum robertii</i>	10,200 (1)	4
Cobre	<i>H. katangense</i>	8,356 (1)	5
Plomo	<i>T. rotundifolium</i>	8,200 (5)	4
Manganeso	<i>Macadamia neurophylla</i>	55,000 (400)	30
Níquel	<i>Alyssum bertolonii</i>	13,400 (2)	9
	<i>Berkheya coddii</i>	17,000 (2)	18
Selenio	<i>Astragalus pattersoni</i>	6,000 (1)	5
Talio	<i>Iberis intermedia</i>	3,070 (1)	8
Zinc	<i>T. calaminare</i>	10,000 (100)	4

*Entre paréntesis se muestra la equivalencia para plantas no acumuladoras.

Figura N°32: La figura muestra un listado de plantas útiles para fitoextracción según el tipo de elemento que se requiera (Volke T., et al. 2005).

8. REFERENCIAS.

Agencia de Protección Ambiental (EPA). (2020). *Evaluación científica integrada del material particulado*.

Alonso C. (2021). *Copiapoa cinerea*.

Alvarez S. (2015). *Evaluación de la capacidad neutralizante de la zona no saturada sector bajo quebrada Paipote III región Atacama*.

Antonioletti R., Borcosque J., Schneider H. & Zárata E. (1972). *Características climáticas del Norte Chico (26° a 33° Latitud Sur)*.

Arévalo C. (2005). *Carta Geológica de Copiapó, región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería-Chile, Subdirección Nacional de Geología. Carta geológica de Chile, serie geología básica. No.91, Mapa escala 1:100.000*.

Arévalo C. (2009). *Mapa GIS. Geología del área Vallenar - Domeyko, región de Atacama, Escala 1:100.000*.

Arévalo C. & Grocott J. (1997). *El marco tectónico del Grupo Chañarcillo y la formación Bandurrias: un cinturón transpresivo sinistral del Cretácico temprano-tardío entre la cordillera costera y la Precordillera, Región de Atacama, Chile*.

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). (1994). *Ley 19.300. Ley sobre bases generales del medio ambiente. Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental*.

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). (2001). *Decreto N°95. Modificación del reglamento de sistema de evaluación ambiental*.

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). (2015). *Clima y vegetación de la región de Atacama*.

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). (2020). *Región de Atacama. Chile nuestro país*.

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). (2020b). *Relieve región de Atacama*.

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). (2021). *El desierto, la minería y la Agricultura de Copiapó*.

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). (2022). *Clima y vegetación región de Atacama*.

Biblioteca Nacional de Chile (BNd). (2020). *Memoria chilena. Origen de la gran minería del cobre (1904 – 1930)*.

Börgel, 1983. *Instituto Geográfico militar (IGM). Geomorfología región de Atacama*.

Bravo D. (2013). *Análisis de la incorporación de agua desalada al sistema hídrico en la cuenca del río Copiapó.*

Bravo M. (2019). *Análisis de la calidad del aire en la región de Atacama, Chile.*

Calderón M. & Miranda F. (2018). *Evaluación ambiental preliminar en los campamentos de Diego de Almagro, Copiapó y Tierra Amarilla próximos a sitios de minería metálica.*

Carkovic, A., et al. (2016). *Minería activa y heredada en un entorno urbano árido: desafíos y perspectivas para Copiapó, Norte de Chile.*

Castro C., Soto M., Fernández R., Märker M. y Rodolfi G. (2009). *Impacto en la geodinámica actual del Valle de Nantoco, cuenca del río Copiapó, asociado a la reconversión productiva.*

Corporación Nacional Forestal (CONAF). (2022). *Parques Nacionales de Chile.*

Conferencia de las Naciones Unidas Sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CNUMAD). (1992). *Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo.*

Castro C., Zúñiga A & Pattillo C. (2012). *Geomorfología y geopatrimonio del mar de dunas de Atacama, Copiapó (27° S), Chile.*

Cortés I., Ríos J., Gaete L. & Tchernitchin A. (2015). *Metales pesados en muestras ambientales de la región de Atacama. Situación postaluviones.*

Dawblin. (2012). *Tercera Región: Atacama.*

Diario Chañarillo. (2022). *De asentamiento precolombino a capital de Atacama: la historia de copiapó tras 278 años de existencia.*

Diario La Tercera (2010). *Onemi confirma a 33 mineros atrapados en yacimiento en Atacama.*

Hinsbergen D., Torsvik T., Schmid S., Mañenco L., Maffione M., Vissers R., Gürer D., Spakman W. (2019). *Arquitectura orogénica de la región mediterránea y reconstrucción cinemática de su evolución tectónica desde el Triásico.*

Eberle W. (1998). *El desarrollo histórico y los pasivos de la explotación minera en el curso medio y alto del Valle de Copiapó, III Región, Chile.*

Errázuriz A. (1998). *Manual de geografía de Chile.*

Franzese J. & Spalletti L. (2001). *Extensión continental del Triásico tardío al Jurásico temprano en el suroeste de Gondwana: segmentación tectónica y rifting previo a la ruptura.*

Fundación Aquae. (2020). *Definición de contaminación ambiental.*

Fundación Ayuda en Acción. (2023). *Contaminación ambiental, qué es y qué tipos existen*.

Galdames F. (2015). *Estudio de la geoquímica de sedimentos activos del río Copiapó luego de las inundaciones aluvionales de marzo 2015*.

Gerstmann R. (2016). *Enterreno Chile. Copiapó 1959*.

Gobierno regional de Atacama (GOREATACAMA). (2019). *Informe técnico. Sistema territorial cuencas hidrográficas. Plan regional de ordenamiento territorial*.

Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas (MOP), Dirección General de Aguas (DGA) (DGA) (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad*.

Gómez J. & Bustamante A. (2007). *Optimización de sistemas de riego en las cuencas de Copiapó y Huasco*.

Griem W. (2016). *Caminos y rutas de Atacama, Chile*.

Griem W. (2018). *Historia de Atacama, Chile*.

Griem W. (2019). *Actualizado de Historia de Atacama, Chile*.

Griem W. (2020). *Geología de la región de Atacama, Chile*.

Griem W. (2020b). *Morfología de la Región de Atacama, Chile*.

INaturalist, Chile. (2020). *Zorro Chilla (Lycalopex grisea)*.

INaturalist, Chile. (2020). *Lagartija Rayada Nortina” (Liolaemus alticolor)*.

Instituto Europeo de Química Física y Biología (IEQFB). (2021). *La Norma ISO 14.000: qué es y para qué sirve*.

Instituto geográfico Militar (IGM), 1986. *Geomorfología de la región de Atacama*.

Irastorza A., Zavala C., Campetella D., Turienzo M., Olivera D., Peralta F., Irastorza M., Martz P. (2021). *Deltas litorales hiperpicnales: un caso de estudio de la Formación Agrío del Cretácico Inferior en la Cuenca Neuquina, Argentina*.

ISOTools Excelence. (2016). *Norma ISO 14001:2015*.

Juliá C., Montecinos S., Maldonado A. (2018). *Características climáticas de la región de Atacama*.

Lingua. A. (2023). *El Diario de Atacama. Copiapó es la segunda comuna con mayor cantidad de relaves en Chile y Atacama es considerada región con muy alta concentración*.

López M. & Morales O. (2022). *Fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados*.

López R. (2020). *Contaminación minera del medio ambiente*.

Lutz G. (2015). *Análisis crítico de la entrada del adelantado Diego de Almagro a Chile en 1536*.

Martínez V. & Briceño T. (2018). *Caracterización del grado de dispersión en arcillas de la zona Sur-Oeste de la cuenca sedimentaria de Loja*.

Medina D. (2018). *El desierto florido de Atacama*.

Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2018). *Cuarto reporte del estado del medio ambiente*.

Ministerio del Medio Ambiente (MMA) & Corporación de Fomento de Producción (CORFO) (2012), *Guía Metodológica para la gestión de suelos con potencial presencia de contaminantes*.

Ministerio de Salud de Chile (MINSAL). (2020). *Ministerio de Salud confirma primer caso de coronavirus en Chile*.

Ministerio de Obras Públicas (MOP) & Dirección General de Aguas (DGA), Chile. (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del río Copiapó*.

Montero L. (2012). *Sobreexplotación de aguas subterráneas en la cuenca del Copiapó: los desafíos institucionales para la sostenibilidad hídrica*.

Mpodozis C. & Allmendinger R. (1993). *Tectónica extensional, Andes Cretácicos, Norte de Chile (27°S)*

Mahlburg S., Ramos V., Mpodozis C., Sruoga P. (1989). *Magmatismo silíceo del Paleozoico tardío al Jurásico en el margen de Gondwana: analogía con el Proterozoico medio en América del Norte*.

Novoa J, Tracol Y. & López D. (2008). *Paisajes eco-geográficos de la región de Atacama*.

Oficina Nacional de Emergencia (ONEMI). (2011). *Clima de Copiapó, región de Atacama*.

Orellana F. (2017). *Flora de la región de Atacama*.

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2015). *Directrices sobre salud y seguridad en la minería*.

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2016). *Contaminación del aire en el ambiente, evaluación global de exposición y la carga de enfermedad*.

- Ortiz J. (2019). Copiapó: *¿La contaminación afecta a todas las personas por igual?*
- Oyarzun R., Higuera P. & Cubas P. (2010). *Geoquímica ambiental e indicadores geobotánicos.*
- Pavéz O. (2020). *Apuntes del ramo de Gestión Ambiental en Universidad de Atacama.*
- Pérez M. (2016). *Asociación Geoinnova. Minería y medio ambiente: 3 casos de contaminación ambiental.*
- Pérez V. (2013). *Chile como el principal productor mundial de cobre.*
- Pindell J. & Dewey J., 1982. *Reconstrucción del Permo-Triásico de Pangea occidental y evolución de la región del Golfo de México/Caribe.*
- Pizarro J. & Devi A. (2018). *Sistema de aplicación para obtener la cantidad de material particulado controlando la acción eólica en relaves en la ciudad de Copiapó.*
- Quezada J., Cerda J. & Jensenm A. (2010). *Efectos de la tectónica y el clima en la configuración morfológica del relieve costero del norte de Chile.*
- Ramírez F. (2020). *Metodología para la evaluación de la susceptibilidad de erosión y potenciales inestabilidades físicas de un depósito de relave. Estudio de caso: Comuna de Copiapó, Chile.*
- Ramírez P. (2019). *Informe revela desastre ambiental en región de Copiapó.*
- Rangel E., Montañez L., Luévanos M., Balagurusamy N. (2015). *Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos.*
- Real Academia Española (RAE). (2019). *Definición de contaminar en el diccionario de la lengua española.*
- Red de Observadores de Aves y Vida Silvestre de Chile (ROC). (2018). *Gaviota dominicana.*
- Ríos J. Tchernitchin A. Cortés I. & Gaete L. (2015). *Metales pesados en muestras ambientales de la región de Atacama. Situación postaluviones.*
- Rivera C. (2017). *Historia de Atacama.*
- Riveros L. & Ferraro R. (1985). *La historia económica del siglo XIX a la luz de la evolución de los precios.*
- Rojas M., Zazopulos M., Saavedra M., Alfaro E. (2018). *Fitoestabilización de un tranque de relave en Copiapó, con la especie Schinus polygamus.*
- Rojos S., Aguilar G., Sepúlveda B. y Pavéz O. (2020). *Dinámica de la concentración de cobre, plomo, mercurio y arsénico en sedimentos del río Copiapó, Chile.*

- Russo R. & Silver P. (1996). *Formación de cordilleras, dinámica del manto y ciclo de Wilson*.
- Sistema de Información de Biodiversidad (SIB). Parques Nacionales. (2017). *Otaria flavescens, lobo marino de un pelo – León del océano de América del Sur*.
- Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). (1999). *Comprendiendo el drenaje ácido en minas*.
- Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN). (2005). *Pasivo ambiental minero*.
- Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN). (2007). *DS N°248. Definición de relave minero*.
- Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN). (2022). *Sernageomin investiga socavón de más de 32 metros de diámetro*.
- Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN). (2023). *Datos Públicos Depósito de Relaves*.
- Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN). (2024). *Preguntas frecuentes sobre relaves*.
- Sociedad Nacional de Minería (SONAMI). (2023). *Mapa Minero de Chile*.
- Solano C. (2019). *Riesgos naturales y modificación de la estructura del mercado de suelos: el caso de la inundación de Copiapó*.
- Soto M., Arriagada J., Castro C., Märker M. & Rodolfi G. (2010). *Aspectos geodinámicos de un paleoestuario del desierto marginal de Chile. Río Copiapó*.
- Tapia G., 2014. *Informe técnico. Inventario de cuencas, subcuencas y subsubcuencas de Chile. DGA. MOP. Chile*.
- Torrez D. (2021). *¿La Minería es un beneficio o un factor que perjudica a un país como Colombia?*
- Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y los Recursos Naturales (IUCN). (2012). *Lama guanicoe*.
- Uyenda S., 1982. *Zonas de subducción: una introducción a la subductología comparada*.
- Valenzuela P. (2015). *Sistema de medición de estabilidad de depósitos mineros de relave frente a la acción eólica, para su recuperación como espacio urbano sostenible. El caso de la ciudad de Copiapó en Chile*.
- Vara M., & Oliveira H. (2003). *Hiperacumulación de metales en plantas - Prospección de biodiversidad para tecnología de fitorremediación*.

Villarroel L., Morales J., Miranda P., Díaz C., Nils A. & Campos C. (2009). *Captura, cuantificación y caracterización del material particulado sedimentable en techumbres de la ciudad de Copiapó.*

Weather Spark. (2024). *El clima y el tiempo promedio en todo el año en Copiapó, Chile.*

ANEXOS

Anexo N°01, Mapa base del área de estudio.



Anexo N°02, Tablas con resultados de muestras tamizadas.

Anexo N°02.1: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M1D1P1.

M1D1P1			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	0,877	MUESTRA COMPLETA	0,836 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,041	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	0,403 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,016	% EROSIONABLE	48,2057 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	0,474		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	0,419	Total de muestra perdida	0 Kg

Anexo N°02.2: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M2D1P2.

M2D1P2			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	1,28	MUESTRA COMPLETA	1,237 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,043	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	0,297 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,017	% EROSIONABLE	24,0097 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	0,977		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	0,314	Total de muestra perdida	0,006 Kg

Anexo N°02.3: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M3D1P3.

M3D1P3			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	0,606	MUESTRA COMPLETA	0,565 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,041	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	0,192 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,016	% EROSIONABLE	33,9823 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	0,414		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	0,208	Total de muestra perdida	0 Kg

Anexo N°02.4: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M4D1P3.

M4D1P3			
	PESO KG		
		MUESTRA COMPLETA	1,237 Kg
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	1,279	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	0,352 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,042	% EROSIONABLE	28,4559 %
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,015		
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	0,925		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	0,367	Total de muestra perdida	0,002 Kg

Anexo N°02.5: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M5D1P4.

M5D1P4			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	0,933	MUESTRA COMPLETA	0,889 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,044	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	0,406 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,016	% EROSIONABLE	45,6693 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	0,525		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	0,422	Total de muestra perdida	0,002 Kg

Anexo N°02.6: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M6D1P5.

M6D1P5			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	0,962	MUESTRA COMPLETA	0,919 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,043	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	0,555 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,017	% EROSIONABLE	60,3917 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	0,406		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	0,572	Total de muestra perdida	0,001 Kg

Anexo N°02.7: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M7D1P6.

M7D1P6			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	1,682	MUESTRA COMPLETA	1,639 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,043	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	0,905 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,016	% EROSIONABLE	55,2166 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	0,777		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	0,921	Total de muestra perdida	0 Kg

Anexo N°02.8: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M8D1P7.

M8D1P7			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	1,082	MUESTRA COMPLETA	1,038 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,044	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	0,634 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,016	% EROSIONABLE	61,079 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	0,366		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	0,65	Total de muestra perdida	0,082 Kg

Anexo N°02.9: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M9D1P8.

M9D1P8			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	1,449	MUESTRA COMPLETA	1,406 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,043	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	0,391 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,016	% EROSIONABLE	27,8094 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	1,058		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	0,407	Total de muestra perdida	0 Kg

Anexo N°02.10: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M10D1P9.

M10D1P9			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	1,915	MUESTRA COMPLETA	1,872 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,043	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	0,989 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,016	% EROSIONABLE	52,8312 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	0,926		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	1,005	Total de muestra perdida	0 Kg

Anexo N°02.11: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M11D2P10.

M11D2P10			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	1,649	MUESTRA COMPLETA	1,606 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,043	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	1,135 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,017	% EROSIONABLE	70,6725 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	0,512		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	1,152	Total de muestra perdida	0,002 Kg

Anexo N°02.12: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M12D2P10.

M12D2P10			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	2,436	MUESTRA COMPLETA	2,388 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,048	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	0,749 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,016	% EROSIONABLE	31,3652 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	1,684		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	0,765	Total de muestra perdida	0,003 Kg

Anexo N°02.13: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M13D2P11.

M13D2P11			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	2,851	MUESTRA COMPLETA	2,803 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,048	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	0,877 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,016	% EROSIONABLE	31,2879 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	1,97		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	0,893	Total de muestra perdida	0,004 Kg

Anexo N°02.14: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M14D2P12.

M14D2P12			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE			
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA			
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA			
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16			
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200			

el 100% de la muestra es erosional

Anexo N°02.15: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M15D2P13.

M15D2P13			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	2,5	MUESTRA COMPLETA	2,458 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,042	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	1,167 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,016	% EROSIONABLE	47,4776 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	1,326		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	1,183	Total de muestra perdida	0,007 Kg

Anexo N°02.16: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M16D2P14.

M16D2P14			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	1,88	MUESTRA COMPLETA	1,838 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,042	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	1,087 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,016	% EROSIONABLE	59,1404 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	0,793		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	1,103	Total de muestra perdida	0 Kg

Anexo N°02.17: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M17D2P15.

M17D2P15			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	1,652	MUESTRA COMPLETA	1,607 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,045	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	0,574 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,016	% EROSIONABLE	35,7187 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	1,078		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	0,59	Total de muestra perdida	0 Kg

Anexo N°02.18: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M18D2P15.

M18D2P15			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	3,453	MUESTRA COMPLETA	3,411 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,042	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	0,81 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,016	% EROSIONABLE	23,7467 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	2,641		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	0,826	Total de muestra perdida	0,002 Kg

Anexo N°02.19: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M19D2P16.

M19D2P16			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	0,451	MUESTRA COMPLETA	0,401 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,05	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	0,374 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,016	% EROSIONABLE	93,2668 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	0,077		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	0,39	Total de muestra perdida	0 Kg

Anexo N°02.20: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M20D2P17.

M20D2P17			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	1,327	MUESTRA COMPLETA	1,285 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,042	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	0,57 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,016	% EROSIONABLE	44,358 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	0,757		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	0,586	Total de muestra perdida	0 Kg

Anexo N°02.21: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M21D2P18.

M21D2P18			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	0,272	MUESTRA COMPLETA	0,256 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,016	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	0,135 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,016	% EROSIONABLE	52,7344 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	0,137		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	0,151	Total de muestra perdida	0 Kg

Anexo N°02.22: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M22D2P18.

M22D2P18			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE			
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA			
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA			el 100% de la muestra es erosional
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16			
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200			

Anexo N°02.23: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M23D2P18.

M23D2P18			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE			
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA			
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA			el 100% de la muestra es erosional
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16			
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200			

Anexo N°02.24: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M24D2P18.

M24D2P18			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	2,417	MUESTRA COMPLETA	2,369 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,048	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	0,552 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,016	% EROSIONABLE	23,301 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	1,864		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	0,568	Total de muestra perdida	0,001 Kg

Anexo N°02.25: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M25D3P19.

M25D3P19			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	2,451	MUESTRA COMPLETA	2,407 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,044	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	0,902 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,016	% EROSIONABLE	37,474 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	1,548		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	0,918	Total de muestra perdida	0,001 Kg

Anexo N°02.26: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M26D3P20.

M26D3P20			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	2,482	MUESTRA COMPLETA	2,438 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,044	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	1,101 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,016	% EROSIONABLE	45,16 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	1,365		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	1,117	Total de muestra perdida	0 Kg

Anexo N°02.27: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M27D3P21.

M27D3P21			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	2,656	MUESTRA COMPLETA	2,608 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,048	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	1,352 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,016	% EROSIONABLE	51,8405 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	1,304		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	1,368	Total de muestra perdida	0 Kg

Anexo N°02.28: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M28D3P22.

M28D3P22			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE			
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA			
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA			
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16			
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200			

el 100% de la muestra es erosional

Anexo N°02.29: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M29D3P23.

M29D3P23			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	2,249	MUESTRA COMPLETA	2,206 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,043	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	1,512 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,016	% EROSIONABLE	68,5403 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	0,735		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	1,528	Total de muestra perdida	0,002 Kg

Anexo N°02.30: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M30D3P24.

M30D3P24			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	1,81	MUESTRA COMPLETA	1,766 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,044	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	1,192 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,016	% EROSIONABLE	67,4972 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	0,616		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	1,208	Total de muestra perdida	0,002 Kg

Anexo N°02.31: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M31D3P25.

M31D3P25			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	2,146	MUESTRA COMPLETA	2,102 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,044	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	0,949 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,016	% EROSIONABLE	45,1475 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	1,196		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	0,965	Total de muestra perdida	0,001 Kg

Anexo N°02.32: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M32D3P26.

M32D3P26			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	3,062	MUESTRA COMPLETA	3,02 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,042	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	1,094 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,016	% EROSIONABLE	36,2252 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	1,965		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	1,11	Total de muestra perdida	0,003 Kg

Anexo N°02.33: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M33D3P27.

M33D3P27			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	2,628	MUESTRA COMPLETA	2,583 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,045	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	2,125 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,016	% EROSIONABLE	82,2687 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	0,503		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	2,141	Total de muestra perdida	0 Kg

Anexo N°02.34: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M34D3P28.

M34D3P28			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	2,411	MUESTRA COMPLETA	2,368 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,043	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	0,561 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,016	% EROSIONABLE	23,6909 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	1,849		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	0,577	Total de muestra perdida	0,001 Kg

Anexo N°02.35: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M35D3P29.

M35D3P29			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	2,457	MUESTRA COMPLETA	2,412 Kg
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	0,045	MUESTRA TAMIZADA #30, #60 y #200	0,928 Kg
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	0,016	% EROSIONABLE	38,4743 %
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	1,523		
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	0,944	Total de muestra perdida	0,006 Kg

Anexo N°02.36: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M36D3P30.

M36D3P30			
	PESO KG		
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE			
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA			
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA			
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16			
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200			

el 100% de la muestra es erosional

Anexo N°02.37: Tabla con resultados de tamiz de la muestra M37D3P30.

M37D3P30	
	PESO KG
PESO DE MUESTRA COMPLETA (SIN TAMIZAR) EN BOLSA GRANDE	
PESO DE BOLSA GRANDE SIN MUESTRA	
PESO DE BOLSA PEQUEÑA SIN MUESTRA	
BOLSA GRANDE + TAMIZ #1/2 Y #16	
BOLSA PEQUEÑA + TAMIZ #30, #60 y #200	

el 100% de la muestra es erosional

Aldo Lingua

cronica@diarioatacama.cl

Un reciente estudio conjunto de la Universidad de Chile y la Universidad Católica del Norte detectó las comunas con mayor concentración de relaves mineros en Chile, y Copiapó ocupa el segundo lugar de la lista, con 87 ubicados en su territorio. El primer lugar lo tiene La Higuera, con 112.

El estudio determinó que 20 municipios albergan 619 de los 757 relaves. La mayoría de estos ubicados en la macrozona norte. Y pese a que las comunas que albergan los depósitos de desperdicios de la gran minería tienen presencia de grandes compañías, los investigadores dieron cuenta que de las 68 comunas con presencia de depósitos de relaves en Chile, cerca del 72% presenta un nivel de pobreza multidimensional superior al promedio nacional.

Atacama, junto a la Región de Coquimbo, son ambas denominadas regiones con muy alta concentración de relaves y el estudio advierte del riesgo social que representan.

También en la región destaca la presencia de Diego de Almagro, donde se da cuenta de la cantidad de relaves relativos a la población que ostenta, en la que se muestra a la comuna cordillerana como una de las con mayor concentración de desechos respecto de sus habitantes.

"Nuestro argumento plan-



DURANTE EL SEGUNDO MANDATO DE PIÑERA, SE INTENTÓ IMPLEMENTAR UN PLAN DENOMINADO "ADOPTA UN RELAVE", EL CUAL TERMINÓ EN FRACASO.

Copiapó es la segunda comuna con mayor cantidad de relaves en Chile y Atacama es considerada región con muy alta concentración

ESTUDIO. *Se estableció relación entre estos depósitos y pobreza multidimensional. Seremi de Minería aseguró que se encuentran trabajando en un plan de remoción de estos desechos.*

tea que los depósitos de relaves, como infraestructuras contaminantes e inseguras, no afectan de igual forma al territorio nacional. Así, la minería

en Chile no solo concentra el protagonismo económico en municipios favorecidos, sino que también concentra los 'riesgos e impactos' de sus acti-

vidades en municipios desfavorecidos", dice el documento.

EL ESTUDIO A FONDO

La investigación indica que el

29,4% de las comunas concentran el 81,8% de los depósitos de relaves. Es decir, 20 municipios albergan 619 de los 757 relaves. En la misma línea, el 5,9%

de los municipios muestran una muy alta concentración, siendo estos cuatro Andacollo (122 relaves), Copiapó (87 relaves), Illapel (68 relaves) y La Higuera (45 relaves) las comunas que albergan el 42,5% de estos depósitos contaminantes en el país (322 de los 757 depósitos).

Por otra parte, de las 68 comunas con presencia de depósitos de relaves en Chile, cerca del 72% presenta un nivel de pobreza multidimensional superior al promedio nacional. Es decir, la mayoría de los depósitos de relaves se encuentran en municipios con altos niveles de pobreza multidimensional. Los cuatro municipios mencionados anteriormente, en particular, presentan promedios de pobreza multidimensional por encima de la media nacional. "En efecto, se hace evidente que existe desigualdad en la territorialización de estas infraestructuras de residuos mineros en Chile" señala el artículo publicado en el Journal of Maps.

Sobre el estudio, el académico Fernando Campos, indicó que "nuestra investigación se pregunta por la geografía que construyen las infraestructuras de relaves mineros en el país. Su fortaleza está en ofrecer una mirada integrada y nacional respecto de las desigualdades socio-territoriales que se construyen y la afectación diferencial a la población cercana a faenas mineras. Con este trabajo y otras publicaciones que tenemos en evaluación, buscamos apoyar a las políticas públicas

territoriales, en específico, el plan nacional de depósitos de relaves”.

En esta línea, para los investigadores es muy relevante tener suficiente evidencia sobre estos depósitos por los riesgos que generan en los sistemas socioecológicos. Incluso, señala el estudio, se ha documentado que, después de ser abandonados, los relaves siguen siendo fuentes importantes de contaminación por metales pesados. Paralelamente, otras investigaciones nacionales han demostrado que los materiales de los relaves han afectado cursos de agua y suelos con contaminación química, lo que se traduce en un impacto en la flora y la fauna.

PLAN FALLIDO

Este es una problemática de la que se cuenta larga data. Varios son los proyectos que gubernamentales que han apuntado a lidiar con esto, siendo el más reciente el plan del segundo gobierno del Presidente Piñera, que intentó promover el programa “Adopta un relave”, que tenía como objetivo que las compañías mineras se hicieran cargo de estos residuos al

“La minería en Chile no solo concentra el protagonismo económico en municipios favorecidos, sino que también concentra los ‘riesgos e impactos’ de sus actividades en municipios desfavorecidos”

Fernando Campos
académico.

momento de iniciar nuevos procesos mineros. Este fue presentado el 2018 por el entonces subsecretario de minería Pablo Terrazas.

Sin embargo, el proyecto fue recibido con críticas por parte de la población, por el nombre, y pese a los esfuerzos del gobierno, el plan no prosperó y no fue considerado por la actual administración.

POLÍTICA ACTUAL

Desde la Seremi de Minería, establecieron que no continuaron con el plan presentado por Terrazas, pero que se encuentran conscientes de la problemática y, como dentro del plan de gobierno del Presidente Boric se encuentra el medio am-

“Actualmente, el plan nacional (de relaves) se encuentra en revisión por la División de Desarrollo Sostenible con la finalidad de llevar una correcta aplicabilidad y materialización de este”

Carlos Ulloa
seremi de Minería.

biente, es una temática en la que se encuentran trabajando.

Esto lo están haciendo por medio del plan de Política Nacional de Minería 2050, que fue presentando por el Ministerio de Minería en enero de este año. En él se detalla los planes de acción que deben tomar las divisiones regionales de la cartera, desde evaluación ambiental estratégica hasta la acción.

El plan consta de tres puntos claves: No contar con relaves críticos para la población al 2030 ni en situación de abandono al 2050; reducir la generación de relaves convencionales, fomentando otras formas de depositar como filtrados o espesados dando cumplimiento al 2030; y potenciar el rol fis-

calizador de Sernageomin en materia de seguridad, nuevas tecnologías y monitoreo de depósitos.

“También en el Plan Nacional de Depósitos de relaves en la que se plantea abordarlo en tres ejes: de seguridad de la población, enfocado en el pilar social; minería compatible con el medio ambiente, enfocado en el pilar ambiental, y economía circular e innovación, enfocado en el pilar económico. Actualmente, el plan nacional se encuentra en revisión por la División de Desarrollo Sostenible con la finalidad de llevar una correcta aplicabilidad y materialización de este”, explicó el seremi de Minería, Carlos Ulloa.

“El Ministerio de Minería ha identificado dentro de la clasificación de relaves, los denominados Depósitos de Revale Críticos que son aquellos que se ubican dentro de la zonas pobladas, considerados como prioritarios tanto desde el punto de vista de la salud de las personas y riesgo, como también para retirarlos y elaborar políticas públicas que incentiven su eliminación o traslado y/o re-procesamiento”, agregó. ☞

Anexo N°04, Imágenes extraídas en terreno.

Coordenadas UTM: 6.955.627N; 375.041E

Cota: 517 m s.n.m.

Foto 01, Pto.01



Coordenadas UTM: 6.955.626N; 375.063E

Cota: 519 m s.n.m.

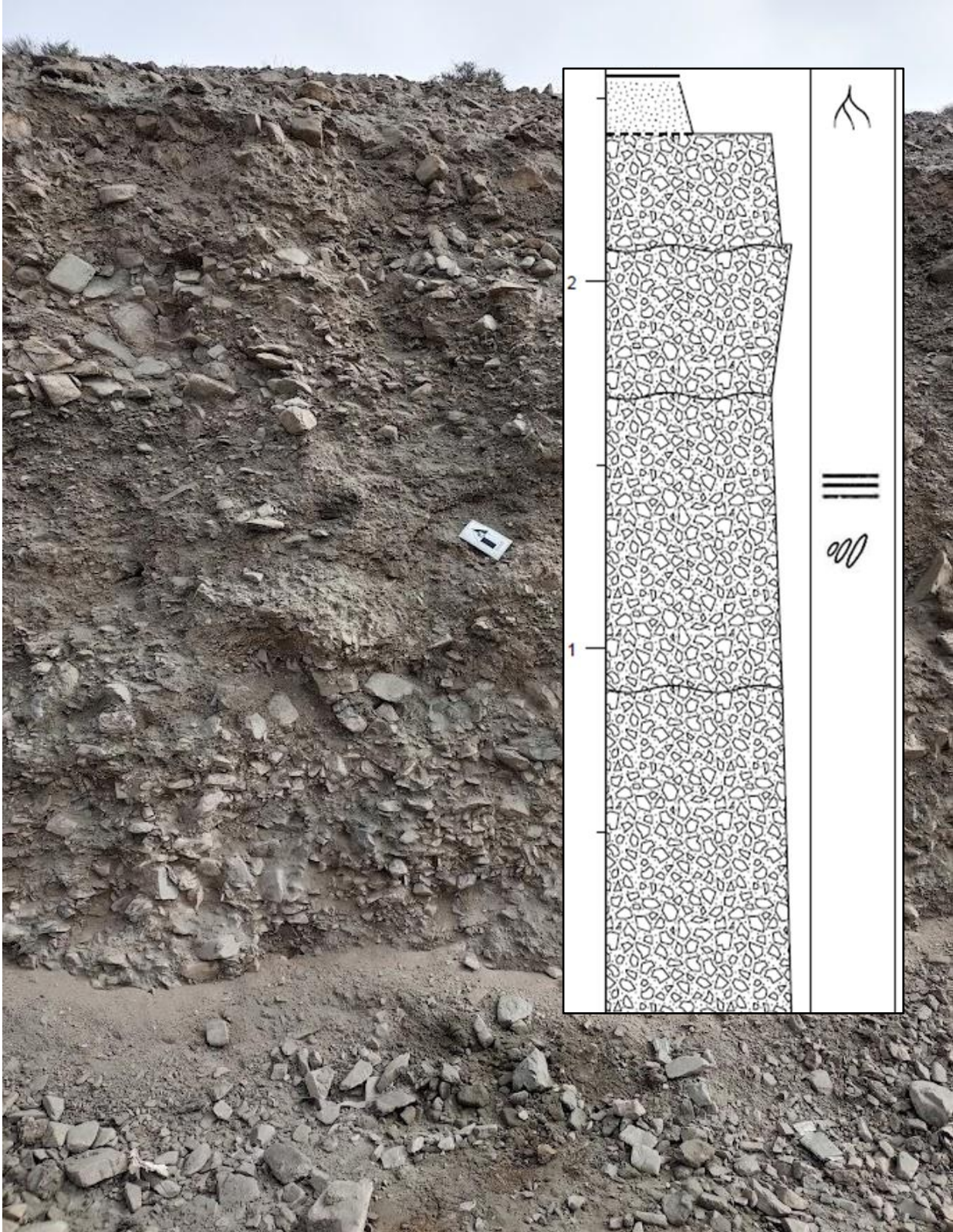
Foto 02, Pto.02



Coordenadas UTM: 6.957.058N; 375.578E

Cota: 590 m s.n.m.

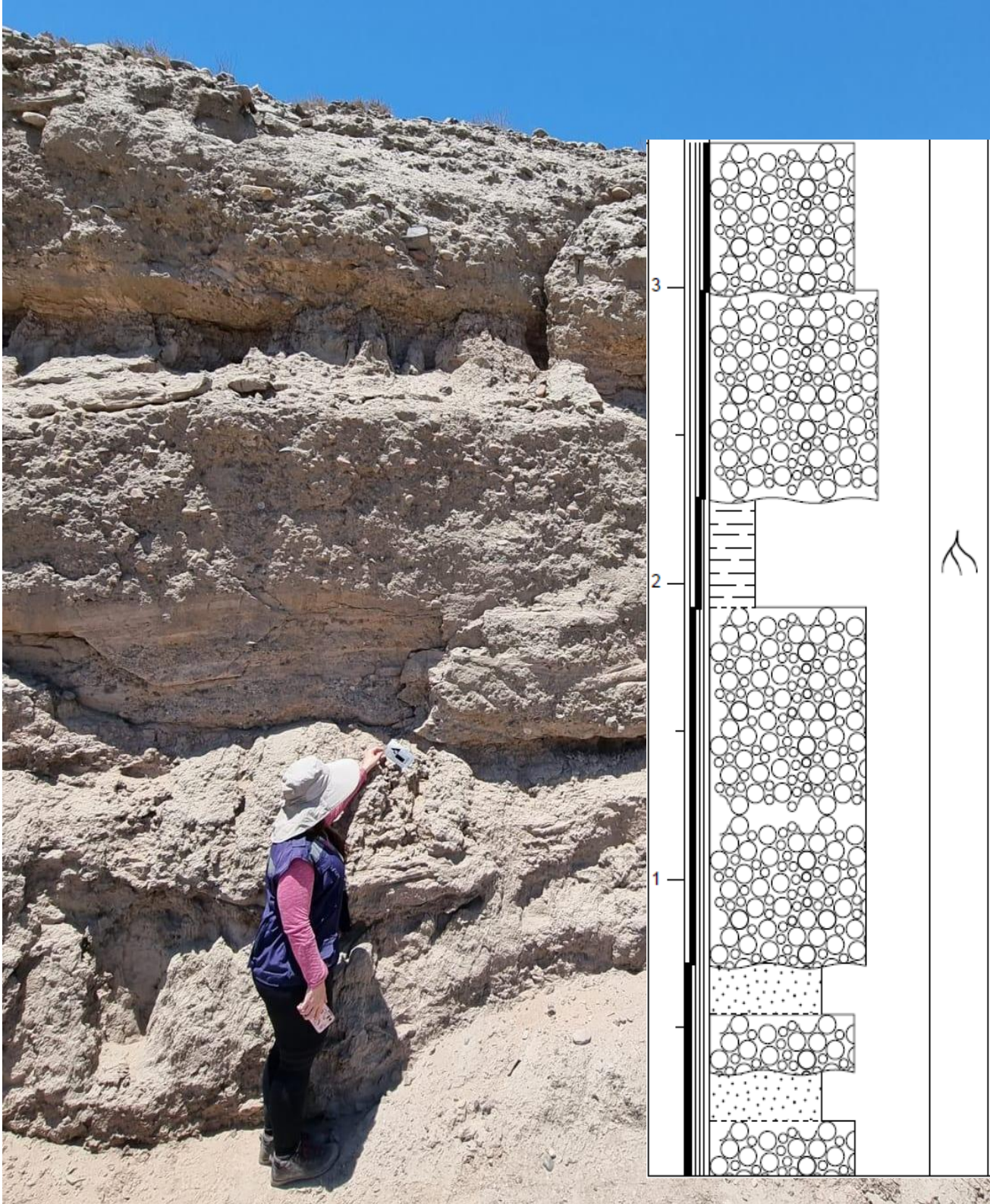
Foto 03, Pto.03



Coordenadas UTM: 6.958.190N; 375.310E

Cota: 504 m s.n.m.

Foto 04, Pto.05



Coordenadas UTM: 6.958.762N; 373.929E
Cota: 514 m s.n.m.
Foto 05, Pto.06



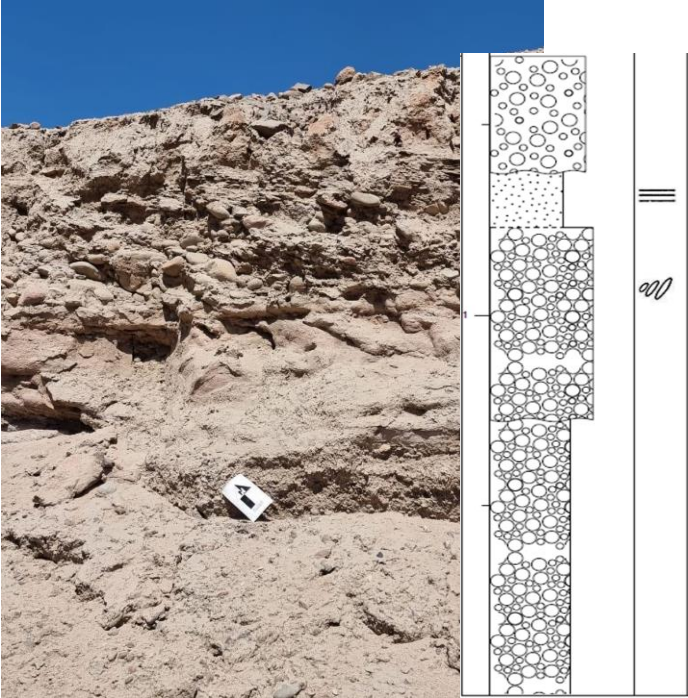
Coordenadas UTM: 6.960.501N; 374.278E
Cota: 484 m s.n.m.
Foto 06, Pto.07



Coordenadas UTM: 6.961.975N; 375.646E
Cota: 489 m s.n.m.
Foto 07, Pto.08



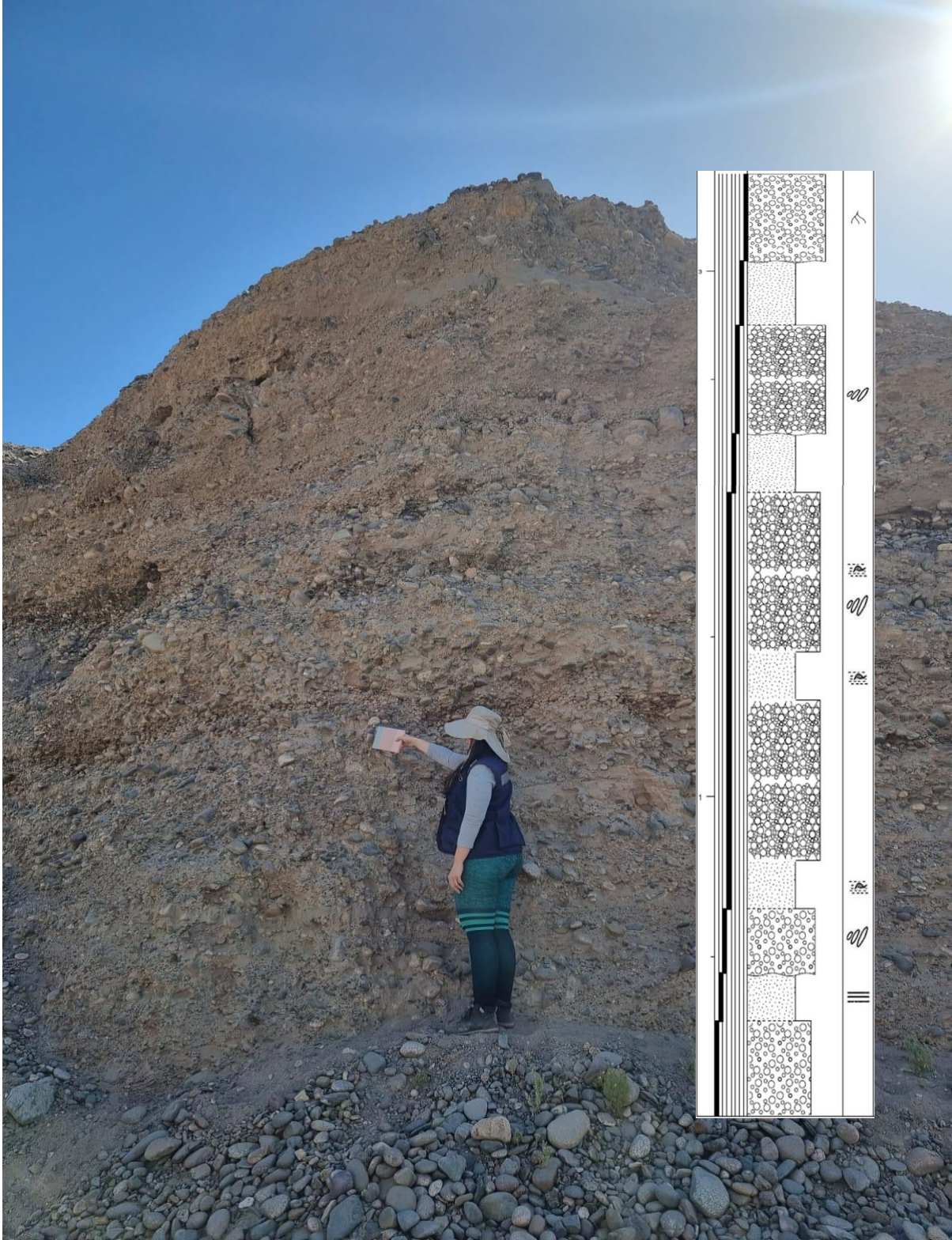
Coordenadas UTM: 6.962.280N; 375.504E
Cota: 472 m s.n.m.
Foto 08, Pto.09



Coordenadas UTM: 6.961.611N; 374.597E

Cota: 463 m s.n.m.

Foto 09, Pto.10



Coordenadas UTM: 6.964.261N; 374.598E
Cota: 448 m s.n.m.
Foto 10, Pto.11



Coordenadas UTM: 6.966.999N; 376.052E
Cota: 474 m s.n.m.
Foto 11, Pto.12



Coordenadas UTM: 6.971.974N; 377.280E

Cota: 516 m s.n.m.

Foto 12, Pto.13



Coordenadas UTM: 6.970.467N; 376.298E

Cota: 491 m s.n.m.

Foto 13, Pto.14



Coordenadas UTM: 6.967.655N; 373.887E

Cota: 449 m s.n.m.

Foto 14, Pto.15



Foto 15, Pto.15



Coordenadas UTM: 6.968.163N; 370.655E

Cota: 416 m s.n.m.

Foto 16, Pto.16



Foto 17, Pto.16, La foto muestra erosión eólica de relave.



Coordenadas UTM: 6.968.163N; 370.655E

Cota: 416 m s.n.m.

Foto 18, Pto.18



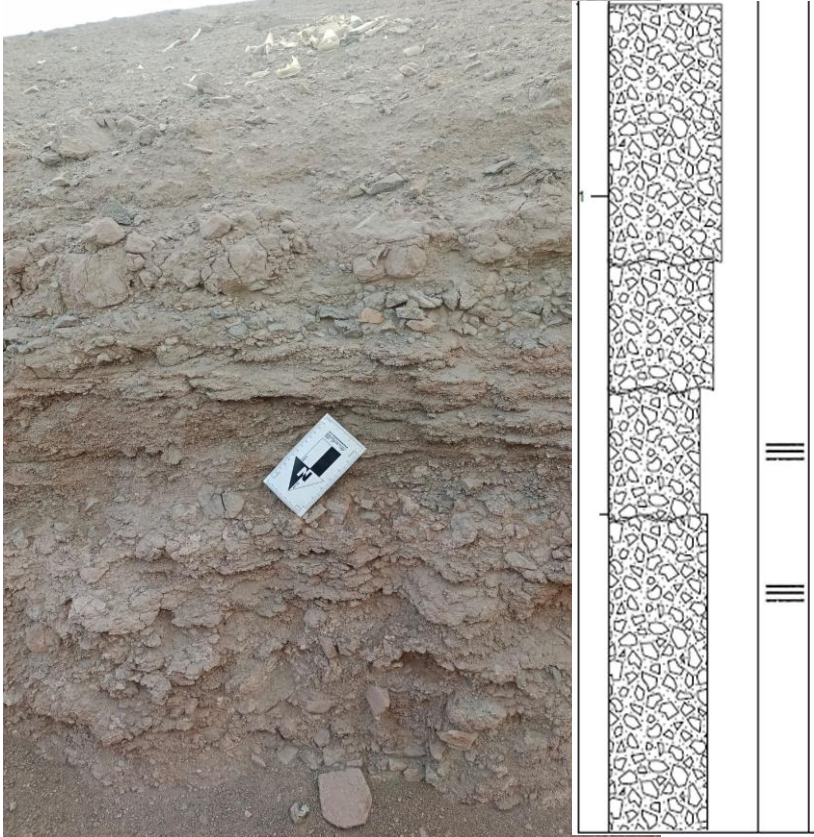
Foto 19, Pto.18



Foto 20, Pto.18



Coordenadas UTM: 6.966.151N; 370.273E
Cota: 448 m s.n.m.
Foto 21, Pto.19



Coordenadas UTM: 6.966.183N; 369.800E
Cota: 445 m s.n.m.
Foto 22, Pto.20



Coordenadas UTM: 6.969.581N; 369.814E
Cota: 395 m s.n.m.
Foto 23, Pto.21



Coordenadas UTM: 6.969.709N; 368.567E
Cota: 405 m s.n.m.
Foto 24, Pto.22



Coordenadas UTM: 6.969.582N; 368.903E
Cota: 406 m s.n.m.
Foto 25, Pto.23



Coordenadas UTM: 6.970.146N; 367.997E

Cota: 389 m s.n.m.

Foto 26, Pto.24



Coordenadas UTM: 6.969.566N; 367.603E

Cota: 409 m s.n.m.

Foto 27, Pto.25



Coordenadas UTM: 6.967.411N; 366.375E
Cota: 506 m s.n.m.
Foto 28, Pto.26



Coordenadas UTM: 6.967.926N; 366.714E
Cota: 485 m s.n.m.
Foto 29, Pto.27



Coordenadas UTM: 6.968.612N; 367.095E
Cota: 451 m s.n.m.
Foto 30, Pto.28



Coordenadas UTM: 6.972.349N; 366.448E
Cota: 405 m s.n.m.
Foto 31, Pto.29



Coordenadas UTM: 6.973.083N; 366.158E
Cota: 357 m s.n.m.
Foto 32, Pto.30

