



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

**ANOMALÍAS DE ARSÉNICO EN AGUAS Y SEDIMENTOS DE LA
QUEBRADA CAMIÑA, REGIÓN DE TARAPACÁ, CHILE.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

MIGUEL JOSÉ GARCÍA MOLINA

PROFESOR GUÍA:
CLAUDIO MOYA SÁEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LINDA DANIELE
CARMEN COPIER MELLA

SANTIAGO DE CHILE
2021

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE GEÓLOGO
POR: MIGUEL JOSÉ GARCÍA MOLINA
FECHA: 2021
PROF. GUÍA: CLAUDIO MOYA SÁEZ.

ANOMALÍAS DE ARSÉNICO EN AGUAS Y SEDIMENTOS DE LA QUEBRADA CAMIÑA, REGIÓN DE TARAPACÁ, CHILE.

La quebrada Camiña, ubicada en la región de Tarapacá, cuyo origen fluvial está en las laderas de los volcanes de la Cordillera de los Andes presenta altísimos niveles de arsénico (As) tanto en agua como sedimentos. Mediante el estudio realizado en la siguiente tesis, se buscó dar explicación a estas anomalías y determinar los posibles riesgos que implica convivir con estas concentraciones. Para la realización de este trabajo de modalidad remota, se utilizaron datos de trabajos anteriores y datos tanto del Sernageomin como de la DGA.

Las aguas de la quebrada Camiña tienen una variación en sus concentraciones de As a medida que esta desciende desde la alta cordillera hacia el mar, sin embargo, estos niveles en el río nunca se adaptan a los niveles de potabilidad ni los niveles de riego establecidos por la DGA. En los manantiales de la cuenca de la quebrada Camiña, los niveles de As son aun mucho más altos que las concentraciones en el río, principalmente hacia los manantiales más orientales ubicados en plena Cordillera Occidental de los Andes; los manantiales hacia la Precordillera y Depresión Central tienen niveles más tenues de As. En los meses de enero y febrero, donde las concentraciones de As son más altas, también lo son el caudal y las precipitaciones en la cuenca Camiña, por lo que las lluvias juegan un rol importante en la lixiviación de As en los sedimentos superficiales. De los riesgos calculados para las personas que habitan en la quebrada Camiña al beber de sus aguas, se obtuvo que la totalidad del río presenta un riesgo tanto cancerígeno como no cancerígeno para la salud, en tanto que solo 2 manantiales en la quebrada La Chiña (parte de la cuenca Camiña) y el agua de pozo no presentan riesgos para la salud humana y o animal.

Los sedimentos a lo largo de la quebrada Camiña, presentan anomalías positivas y concentraciones de As por sobre el promedio mundial y normas de salud internacionales, lo que pone en riesgo directamente a la salud de las personas que habitan en el área poblada. Un estudio realizado en cultivo de maíz comprobó que estos bioconcentran el As en sus raíces, mientras que en los granos sus niveles son mínimos y aptos para el consumo humano.

Las altas concentraciones de As en el río Camiña se deberían a los manantiales en la alta cordillera y a la geología de roca volcánica, la cual condiciona la existencia de bacterias que ayudarían al largo trayecto del As en la quebrada Camiña y su posterior adsorción en los sedimentos fluviales gracias a la alta concentración de óxido férrico.

A mi niño interior.

Agradecimientos

Partiré agradeciendo a mis padres, que desde el momento que nací hasta hoy, han demostrado ser las personas más incondicionales y honestas que a cualquier persona del mundo les hubiese gustado conocer. Me abre sacado la lotería dicen algunos, puede ser que sí, pero no todo el mundo vendría siendo igual que uno al abrirse al mundo. A pesar de todos los años de malos pasares, ellos siempre quedaron ahí, escuchando mis penas y celebran y reconocen mis éxitos más que yo mismo. También agradezco a mis hermanos, quienes son y serán siempre mi extensión perfecta.

Agradecer a mis vecinos que nos conocemos hace más de 21 años. Independiente que no juguemos tanto como cuando éramos niños, seguimos compartiendo los valores y el cariño incondicional que nos tenemos. Agradecer a mis amigos del colegio, que sin duda puedo decir y reconocer que hoy son amigos y compañeros incondicionales de la vida. Ojalá sigamos compartiendo en fiestas y juntas entre nosotros y recordar momentos de la niñez.

Agradecer a mis amigos de plan común, El lucho, el Juan C., el Armando, el Felipito, el benjita, el Gomez, el Mauricio. . . quienes me dieron una mano de comodidad y compañía. Al entrar a la Universidad el sentirse solo y ansioso de encajar en algún lugar me hizo llevarme muchas decepciones, pero luego los conocí a ustedes, y ustedes fueron diferentes. Agradecer por esos almuerzos y conversas en el casino de la U. . . eran mis momentos preferidos del día al igual que todas las quedadas de viernes en las tardes.

Agradecer a mis amigos y compañeros de Geo, El juan, el Ale, el Carlos, el Rodri, el Vi-cho, la Titi, el Keno, la javi Q, el Abuelo, la Joti, la Pili, la Mariela y el Maxi, quienes que desde los conocí el 2017 me acompañaron en este camino de la geología. Hubiese sido difícil empezar Geología sin ustedes a ser verdad. . . Además de los muchos viernes en el patio de los naranjos en que no paramos de reír o de bailar son de los recuerdos que más me llevo. También a los que se fueron sumando a compartir al poco tiempo como el Abuelo, el Juanma, el Tomy, Kim. . . me enseñaron otras formas de ver al mundo.

Agradecer a mis compañeros de la Rama de natación de la U, quienes me dieron un espacio de distracción que de disfrute todos los martes y jueves desde el 2018. Nunca pensé que iba a competir y obtener medallas por primera vez. Fue genial haberlos conocido, partiendo por la Valentina, que la casualidad de habernos conocido y su insistencia me abrió las puertas a participar en la rama y conocer a muchas personas nuevas con quienes compartir y hablar, algunos amigos/as hasta hoy.

A mis compañeros de mi generación final, partiendo con la Javi Jaque., que a pesar de que seamos agua y aceite en nuestras formas de pensar, se demostró que la confianza que se

desarrollo el 2018 siempre logro ser más fuerte. Al Cris, la Pauli y la Javi Carrasco, quienes en el último par de años de la universidad me toco trabajar bastante codo a codo, quienes con su gran inteligencia y perseverancia me vi desafiado a afinar mis habilidades como persona profesional y como integrante de un equipo; pd: gracias por clastosoportarme en el terreno de Geología de Campo 2. Agradecer a los amigos que se han quedado presentes durante estos largos meses de pandemia, quienes la distancia física no fue impedimento de seguir en contacto, también agradecer a aquellas amigos/as que ya no están, pero sus recuerdos viven en mí.

Quiero hacer un agradecimiento especial a algunas personas, partiendo por Juan Varela, en quien siempre me apoyé cuando sentí que estaba solo en estos últimos meses. Tú y tus formas de dar animo poco suaves son únicas, pero las más efectivas y llenas de una energía que me despierta el alma. Al igual que la Mariela Gutiérrez, gracias por escucharme y ser una persona con la que siempre podía contar en los tiempos difíciles, además alguien con quien nos informábamos a la par como íbamos con nuestras memorias y darnos consejos mutuos para seguir adelante en esta lenta y ardua tarea; y además de lo profesional, fuiste y seguirás siendo una gran amiga, compañera de mis aventuras de montañismo poco habituales que planeo. Un gran abracito también para la Javi Cáceres, quien, con su amabilidad y cercanía en su minuto para responder, daban ganas de continuar el día a día en las ultimas dificultades Universitarias; se que la distancia y otras cosas hacen que no hablemos tanto, pero de alguna forma mi cariño hacia ti siguio innato este tiempo de pandemia.

Quería dedicar unas líneas también para la Caro Pérez, sin duda fuiste una verdadera madrina Universitaria desde que te conocí. Siempre estuviste ahí para atender mis dudas en lo que me quedaba de plan común, mi hinteadora favorita para toda mi estadía en Geo y ahora que trabajas sigues siendo una modelo para seguir, no solo en lo Universitario/ Profesional, sino que también como un modelo de las personas más positivas que he conocido.

Finalmente agradecer a Claudio, quien me guio estos meses en mis ideas de como desarrollar la tesis, a la profesora Linda, quien su animo y ayuda a la hora de coordinar las fechas importantes de este proceso me dio mucha tranquilidad; y a la profesora Carmen, quien me conoce de hace varios años y siento que en parte el ramo que me dicto y su práctica en que participe me animo a comenzar esta tesis.

Para mi amigo/a desconocido/a:

Hey tu!, hemos decidimos tomar rumbos diferentes, hoy comienza mi navegación al mar de lo desconocido, pero recuerda:

Si alguna vez te encuentras a ti mism@ perdid@ en el medio del mar, no importa el momento, arrimare el hombro o surcaré el mundo para encontrarte. Puedes contar conmigo hoy y mañana, espiritualmente siempre estaré apoyándote. No importa dónde estés, ni lo que me digan los demás; la vida es un camino, un camino que elijo donde andar.

Como se dice en *The Avengers*, parte del camino es el final, he aquí el final del mio.

Miguel José García Molina

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Formulación de estudio propuesto	1
1.2. Hipótesis	2
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivo general	2
1.3.2. Objetivos específicos	2
2. Ubicación, Vías de acceso y Antecedentes minero-industriales de la Zona de Estudio	3
2.1. Ubicación y Vías de acceso	3
2.2. Antecedentes minero-industriales de la Zona de Estudio	6
3. Marco Geológico	9
3.1. Marco Geotectónico	9
3.2. Marco Morfoestructural	10
3.3. Geología Local	12
3.3.1. Formación Punta Barranco “Kipb” (Cretácico Inferior; ca. 131-129 Ma)	12
3.3.2. Formación Cerro Empexa "Ksce"(Cretácico Superior, ca. 74-66 Ma) .	12
3.3.3. Dioritas del Cretácico Superior “Ksd” (Cretácico Superior, ca. 69-66 Ma)	13
3.3.4. Formación Oxaya “Omo” (Oligoceno Superior-Mioceno Inferior, ca. 23-19 Ma)	13
3.3.5. Ignimbrita Moquella “Mim” (Mioceno Inferior, 19,3±0,8 Ma)	13
3.3.6. Ignimbrita Nama “Min” (Mioceno Inferior; ca. 18-15 Ma)	14
3.3.7. Formación el Diablo “Mimd”(Mioceno Inferior - Medio, ca. 16-8 Ma) .	14
3.3.8. Volcanes y secuencias volcánicas del Mioceno Superior "Msv"(Mioceno Superior, ca. 11-6 Ma)	15
3.3.9. Formación Mauque “Msm” (Mioceno Superior, ca. 10-8 Ma)	16
3.3.10. Ignimbrita Pumiri “Msp” (Mioceno Superior; ca. 9 Ma)	16
3.3.11. Volcanes del Mioceno Superior - Plioceno “MsPv(a)” (ca. 6-3 Ma) . .	17
3.3.12. Depósitos Aluviales del Pleistoceno - holoceno “PIHa”	17
3.3.13. Depósitos de Remoción en masa “PIHrm” (Pleistoceno - Holoceno, ca. >9-6 ka)	17
3.3.14. Depósitos Coluviales “PLHc”(Pleistoceno - Holoceno)	18
3.3.15. Depósitos Aluviales “Ha” (Holoceno)	18
3.3.16. Depósitos Fluviales “Hf” (Holoceno)	18
3.4. Geología estructural local	20

4. Metodología	24
4.1. Obtención de datos	25
4.1.1. Datos Hidroquímicos	26
4.1.2. Datos de Geoquímica de Sedimentos	27
4.2. Evaluación de la calidad de la información	29
4.2.1. Balance Iónico	29
4.2.2. Control de calidad QA/QC (Quality Assurance / Quality Control) de sedimentos	29
4.3. Caracterización hidroquímica	30
4.4. Análisis del riesgo por ingesta de As	31
4.5. Variación normal geoquímica de sedimentos	33
4.6. Niveles de enriquecimiento de los elementos y comparación con regulaciones ambientales vigentes	34
5. Resultados	35
5.1. Hidroquímica	35
5.1.1. Balance iónico	36
5.1.2. Diagrama de Piper	37
5.1.3. Diagrama de Schoeller Berkloff	39
5.1.4. Diagrama Stiff	41
5.1.5. Concentraciones y evolución temporal y espacial del Arsénico en aguas	47
5.2. Análisis riesgo de población por As en aguas	55
5.3. Análisis riesgo de población por arsénico en los suelos agrícolas	59
5.4. Resultados Química de sedimentos	61
5.4.1. Diagramas de dispersión en duplicados de sedimentos	61
5.4.2. Líneas de base Geoquímicas	63
5.4.3. Geoquímica y parámetros ambientales vigentes	65
5.4.4. Concentraciones anormales de elementos en sedimentos y geología pre- sente	67
5.4.4.1. Arsénico(As)	67
5.4.4.2. Cobalto(Co)	70
5.4.4.3. Cromo(Cr)	73
5.4.4.4. Molibdeno(Mo)	75
5.4.4.5. Antimonio(Sb)	77
5.4.4.6. Zinc(Zn)	80
6. Discusiones	82
6.1. Geoquímica de sedimentos y antecedentes mineros	82
6.2. Geoquímica de aguas y concentración de As en aguas	85
6.3. Relaciones entre concentraciones de As en sedimentos y aguas	89
7. Conclusiones y sugerencias	95
7.1. Conclusiones	95
7.2. Sugerencias	97
Bibliografía	98
A. Tablas de datos de aguas	103

B. Tabla “Transferencia de Arsénico en el sistema Agua-Suelo-Maíz”	110
C. Tabla de datos de sedimentos	111
D. Imagenes Complementarias del área de estudio	129

Índice de Tablas

5.1.	Error del balance iónico calculado	36
5.2.	Muestras de río de oeste a este. Muestra CC-11 no cumple con la hipótesis de que el valor de SDT aumenta río abajo.	41
5.3.	Cociente de peligro objetivo (THQ) de Riesgo no cancerígeno. En rojo muestras con valor sobre 5 THQ y verdes muestras bajo 1 THQ	56
5.4.	Riesgo Incremental de Cáncer de por Vida (ILRC). En rojo muestras con orden sobre 10^{-3} y verdes muestras de orden entre 10^{-6} a 10^{-4}	57
5.5.	Resumen de las estadísticas de las muestras de sedimentos	63
5.6.	Resumen parámetros ambientales vigentes y comparación con los datos en estudio	65
A.1.	Ubicaciones muestras de agua	103
A.2.	Presentación de datos Hidroquímicos	104
A.3.	Error de balance iónico en muestras de ríos, manantiales y pozo. En rojo están los datos descartados por tener error $>10\%$	105
A.4.	Tabla cálculo THQ para riesgos no cancerígenos	106
A.5.	Tabla cálculo ILCR para riesgos Cancerígenos.	106
A.6.	Datos estación de monitoreo calidad de aguas DGA en Altusa	107
A.7.	Datos estación pluviométrica DGA en Camiña (mm/mes)	108
A.8.	Caudal estación fluviométrica DGA en Altusa (m^3/s)	109
B.1.	Valores de los FBC y PFT para los sectores en estudio, modificado de Herrera Apablaza et al. (2017).	110
C.1.	Fecha de muestreo y ubicación	111
C.2.	Fecha de muestreo y ubicación (continuación)	112
C.3.	Fecha de muestreo y ubicación (continuación)	113
C.4.	Tipo de muestra y muestras Gemelas	114
C.5.	Tipo de muestra y muestras Gemelas (continuación)	115
C.6.	Tipo de muestra y muestras Gemelas (continuación)	116
C.7.	Factores Antropogénicos que podrían afectar la muestra (continuación)	117
C.8.	Factores Antropogénicos que podrían afectar la muestra (continuación)	118
C.9.	Concentraciones para elementos As, Cd, Co, Cr_2O_3 , Cu	119
C.10.	Concentraciones para elementos As, Cd, Co, Cr_2O_3 , Cu (continuación)	120
C.11.	Concentraciones para elementos As, Cd, Co, Cr_2O_3 , Cu (continuación)	121
C.12.	Concentraciones para elementos Hg, Mo, Pb, Sb, Zn	122
C.13.	Concentraciones para elementos Hg, Mo, Pb, Sb, Zn (continuación)	123
C.14.	Concentraciones para elementos Hg, Mo, Pb, Sb, Zn (continuación)	124
C.15.	Concentraciones para el Óxido férrico (Fe_2O_3)	125
C.16.	Concentraciones para el Óxido férrico (continuación)	126
C.17.	Tabla transformación de $Cr_2O_3\%$ peso a Cr ppm	127

C.18. Tabla transformación de Cr₂O₃%peso a Cr ppm (continuación) 128

Índice de Ilustraciones

2.1.	Ubicación geopolítica del área de estudio	4
2.2.	Ubicación y accesos a la zona de estudio a escala regional, además se muestran localidades cercanas a modo de referencia.	5
2.3.	(1)Prospecto Camiña (Pacci et al., 1980) (2)Prospecto Quistagama (Pacci et al., 1980) (4)Prospecto Limpire (Pacci et al., 1980; Ordoñez y Rivera, 2004) (8)Pumire (Gajardo et al., 2004)	6
2.4.	Proyecto de exploración geotérmica Pampa Lirima y Fuentes de aguas termales dentro del área de estudio	8
3.1.	Evolución de la configuración de la tectónica de placas en el margen occidental de Sudamérica. Geometría de placas en el Cretácico Superior a Mioceno Superior (75-10 Ma) y desde el Mioceno Superior al presente (< 10 Ma) (Charrier et al., 2007).	9
3.2.	Unidades Geomorfológicas región de Tarapacá. Modelo de elevación realizado a partir de imagenes DEM.El área de estudio se ubica entre lla Depresión Central, Precordillera y Cordillera Occidental.	11
3.3.	Mapa de secuencias volcánicas, Rocas estratificadas y Depósitos en la zona de estudio	19
3.4.	Mapa de todas las estructuras presentes en el área de estudio, junto a la geología local	21
3.5.	Estructuras geológicas sector sur área de estudio.	22
3.6.	Estructuras geológicas sector norte área de estudio.	23
4.1.	Esquema de la metodología utilizada en este trabajo	25
4.2.	Mapa de las muestras Hidroquímicas Geoquímica de Sedimentos tomadas en estudios o trabajos anteriores.	28
4.3.	Diagrama esquemático explicativo de los ambientes sedimentarios muestreados: cauce fluvial activo o recientemente activo (1), planicie de inundación (2), terraza fluvial (3) y drenaje (4).(Astudillo W. et al., 2015)	30
5.1.	Diagrama Piper con las muestras del área de estudio	37
5.2.	Diagrama Schoeller Berkloff muestras área de estudio	39
5.3.	Mapa con diagramas de Stiff, escala 20 Meq/l	42
5.4.	Mapa con diagramas de Stiff, escala 80 Meq/l	44
5.5.	Mapa con diagramas de Stiff, escala 5 Meq/	45
5.6.	Mapa con diagramas de Stiff, escala 1,25 Meq/l	46
5.7.	Concentración de As (mg/l) por punto de muestreo y comparacion respecto a las normas de agua vigentes. El cuadro B corresponde a un zoom de A para cierto grupo de muestras de bajas concentraciones que están en el recuadro rojo dentro del cuadro A	48

5.8.	Mapa de concentraciones de As (mg/l) de muestras de río interpolada a la cuenca de la quebrada Camiña.	49
5.9.	Mapa de interpolación de concentraciones de As (mg/l) de muestras de río sin muestra C1 en la cuenca de la quebrada Camiña.	50
5.10.	Mapa de concentraciones de As (mg/l) en muestras de manantiales y pozo, interpolada a toda el área de estudio.	51
5.11.	Comportamiento promedio mensual del As en estación calidad de aguas de altura (promedio concentraciones mensuales 1983 - 2019).	52
5.12.	Caudal promedio mensual estación fluviométrica de altura (1978 - 2001). . . .	53
5.13.	Precipitaciones promedio mensual estación pluviométrica de Camiña (1971 - 2020).(Datos de precipitaciones en anexos A.7).	53
5.14.	Caudales, Precipitaciones y Concentraciones de As en promedios mensuales. . .	54
5.15.	Área poblada y muestras dentro de esta.	55
5.16.	Detalle área poblada y muestras con riesgo cancerígeno / no cancerígeno y las que no presentan riesgo alguno.	58
5.17.	Ilustración de maíz de la zona de muestra S1A de Herrera Apablaza et al. (2017). Porcentaje rojo corresponde a parte de la planta con mayor concentración de As respecto al suelo donde está ubicada, análogamente el porcentaje verde es para concentraciones menores respecto al suelo.	60
5.18.	Diagramas de dispersión XY de muestras duplicadas para los elementos y compuesto As, Cd, Co y Cr ₂ O ₃ . En el diagrama del Cd se visualizan 4 pares, esto se debe a que hay 2 pares de muestras que contienen la misma concentración tanto en duplicado como en muestra original, por lo que el punto es exactamente el mismo.	61
5.19.	Diagramas de dispersión XY de muestras duplicadas. Para los elementos Cu, Hg, Mo, Pb, Sb y Zn	62
5.20.	Línea de base geoquímica propuesta (verde) y anomalías positivas (rojo) para As. En negro, muestra excepcional de 10000 mg/kg.	68
5.21.	Concentraciones de As respecto a normativas CEQG y promedio mundial. . .	69
5.22.	Línea de base geoquímica propuesta (verde), anomalías positivas (rojo) y anomalías negativas (azul) para Co.	71
5.23.	Concentraciones de Co respecto a promedio mundial.	72
5.24.	Línea de base geoquímica propuesta (verde) y anomalías positivas (rojo) y anomalías negativas (azul) para Cr.	73
5.25.	Concentraciones de Cr respecto a normativas CEQG y promedio mundial. . . .	74
5.26.	Línea de base geoquímica propuesta (verde) y anomalías positivas (rojo) y anomalías negativas (azul) para Mo.	75
5.27.	Concentraciones de Mo respecto promedio mundial.	76
5.28.	Línea de base geoquímica propuesta (verde) y anomalías positivas (rojo) y anomalías negativas (azul) para Sb. En negro, muestra excepcional de 2000 mg/kg. .	78
5.29.	Concentraciones de Sb respecto a normativas CEQG y promedio mundial. . .	79
5.30.	Línea de base geoquímica propuesta (verde) y anomalías positivas (rojo) para Zn. .	80
5.31.	Concentraciones de Zn respecto a normativas CEQG y promedio mundial. . .	81
6.1.	Yacimientos N°1 y 2 descritos en la Carta Geológica Camiña y concentraciones de elementos estudiados en sedimentos cercanos a esta. Concentraciones en rojo corresponden a muestras por encima de la línea de base calculada para cada elemento en este estudio.	83

6.2.	Yacimiento N°4 descrito en la carta Camiña y concentraciones de elementos estudiados en sedimentos cercanos a esta. Concentraciones en rojo corresponden a muestras por encima de la línea de base calculada para cada elemento en este estudio.	84
6.3.	Concentración de As en mg/l y diagramas de Stiff muestras de manantiales de la Codillera Occidental.	85
6.4.	Diagramas de Stiff típicos, modificado de De Ferrer (2001)	86
6.5.	Concentración de As en mg/l y diagramas de Stiff de muestras de la Depresión Central y Precordillera	87
6.6.	Áreas de énfasis para lograr una mejor discusión sobre las relaciones de concentraciones entre aguas y sedimentos en toda el área de estudio.	89
6.7.	Mapa de concentraciones de aguas y sedimentos, área 1	90
6.8.	Mapa de concentraciones de aguas y sedimentos, área 2	92
6.9.	Mapa de concentraciones de aguas y sedimentos, área 3	93
D.1.	Imagen cuenca quebrada Camiña	129
D.2.	Cuadro de detalle con lugares, poblados y las rutas que se usan para llegar a los lugares y poblados donde se tomaron muestras dentro del área de estudio . . .	130

Capítulo 1

Introducción

1.1. Formulación de estudio propuesto

Hoy en día, el problema de contaminación por arsénico (As) de los recursos hídricos y de suelos es de importancia mundial. Estos han alcanzado niveles tóxicos en distintas zonas de todos los 20 países latinoamericanos. (Bundschuh et al., 2020).

El As se libera naturalmente en el medio ambiente y se moviliza de fuentes geogénicas que comprenden: (i) rocas volcánicas y emisiones, siendo transportado este último a miles de kilómetros de la fuente, (ii) depósitos minerales metálicos, que se exponen a los seres humanos y al ganado a través de agua potable o la cadena alimentaria, y (iii) los fluidos geotérmicos ricos en As que ascienden desde depósitos geotérmicos profundos que contaminan las fuentes de agua dulce (Bundschuh et al., 2020).

El desafío para la mitigación se ve incrementado por la minería y las actividades relacionadas a ella, ya que el As se transporta por afluentes esporádicos o por los ríos a largas distancias que incluso alcanzan la zona costera y producen la posterior contaminación de esta. El reconocimiento del problema del As por parte de las autoridades en varios países ha llevado a buscar muchas soluciones, pero aún faltan estrategias a largo plazo solucionar estos problemas. Es común que solo se informe de la concentración total de As en distintas áreas, pero faltan datos sobre las fuentes de As, la movilización, la especiación, la movilidad y las vías, lo que es imprescindible para evaluar la calidad de cualquier fuente de agua, es decir, pública y privada.

En Chile, las condiciones de aridez, hidrotermalismo, volcanismo activo y actividades de la minería en el norte grande han sido argumentos para interpretar concentraciones elevadas de elementos traza en las aguas subterráneas, tales como silicio, litio, boro y arsénico (Herrera Apablaza et al., 2018). El geotermalismo es común en el norte grande de Chile, dado a la gran cantidad de volcanes presentes al pertenecer a la zona volcánica norte.

Todas estas condiciones mencionadas, dan para interpretar que en Chile y principalmente en el norte de nuestro país, la población rural o de pequeños pueblos está constantemente expuesta al peligro por las altas concentraciones de arsénico (As) en aguas y sedimentos. En el presente trabajo se estudiarán las relaciones que existen entre las concentraciones de As en las aguas y en los sedimentos de la quebrada Camiña y sus alrededores. Además de

determinar su posible origen y evaluar el riesgo de la exposición que se tiene de este elemento, tanto para el consumo de agua potable como la actividad agrícola (ganadería y cultivo) de la quebrada Camiña.

1.2. Hipótesis

La quebrada Camiña al no poseer actividad minera a gran escala, es un área de estudio idónea para el análisis de los altos niveles de As. Es decir que se propone como caso de estudio basándose en la hipótesis que los valores registrados sean prevalentemente de origen natural y la movilización ocurre mediante el desplazamiento de las aguas altas en la cordillera hacia el valle en la Precordillera-Depresión Central.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

El objetivo de esta investigación es confirmar y analizar la relación química que existe entre el agua y los sedimentos de la cuenca de la quebrada Camiña (19°33' S, 70°11' O) para así determinar el origen de los aportes de As en la zona de estudio e identificar si el origen de este es geológico o no. Finalmente se espera determinar el impacto de las condiciones ambientales la presencia de arsénico en el suelo y agua en la quebrada Camiña.

1.3.2. Objetivos específicos

En fin de lograr el objetivo general, se plantearon los siguientes objetivos específicos para abarcarlo:

1. Estudiar la evolución hidroquímica de las aguas en la cuenca de la quebrada Camiña.
2. Evaluar la relación de la geoquímica de las aguas de la cuenca de la quebrada Camiña con la de los sedimentos de los terrenos aledaños.
3. Obtener una relación entre las concentraciones de arsénico en el suelo y de las aguas termales aguas arriba de la quebrada Camiña.
4. Evaluar el riesgo de la exposición de los habitantes de la quebrada Camiña al arsénico presente tanto en sus aguas como en los suelos de uso agrícola y ganadero.
5. Estudiar el comportamiento temporal de las concentraciones de As en el río Camiña y evaluar factores que podrían influir en estas.

Capítulo 2

Ubicación, Vías de acceso y Antecedentes minero-industriales de la Zona de Estudio

Cabe mencionar primero que el área de estudio fue definida gracias a los datos hidroquímicos disponibles de estudios anteriores, los cuales abarcaban parte de la cuenca de la quebrada Camiña (Anexos, figura D.1). Esta extensión rectangular comprende parte de la Depresión Central, la Precordillera y Cordillera Occidental del sector de la quebrada Camiña.

2.1. Ubicación y Vías de acceso

El área de estudio se ubica entre las comunas de Camiña y Colchane (Provincia del Tamarugal, región de Tarapacá, Chile), abarcando dentro de estas comunas la cuenca de la quebrada Camiña y la parte cordillerana de la quebrada Berenguela. En el área de estudio también se incluye la parte alta de la quebrada Caritalla y sus afluentes principales, esta se encuentra en la comuna de Camarones (Provincia de Arica, región de Arica y Parinacota)(figura 2.1).

La principal ruta de acceso al área es la A-45, tomando el desvío de la Ruta 5 Norte hacia el oriente en Zapiga (km 1.846 desde Santiago), entrando por la ladera sur de la quebrada Camiña a la altura de Calatambo. Existe también un acceso secundario no pavimentado, la ruta A-41 en el km 1.871 de la ruta 5 norte, tomando el desvío hacia el oriente en Hacienda de Tana. Ambas rutas se unen a la Ruta 5 Norte hacia el oeste (figura 2.2).

En la figura D.2 presente en el anexo, se muestra con mayor detalle las rutas de acceso a las ubicaciones donde se tomaron los datos.

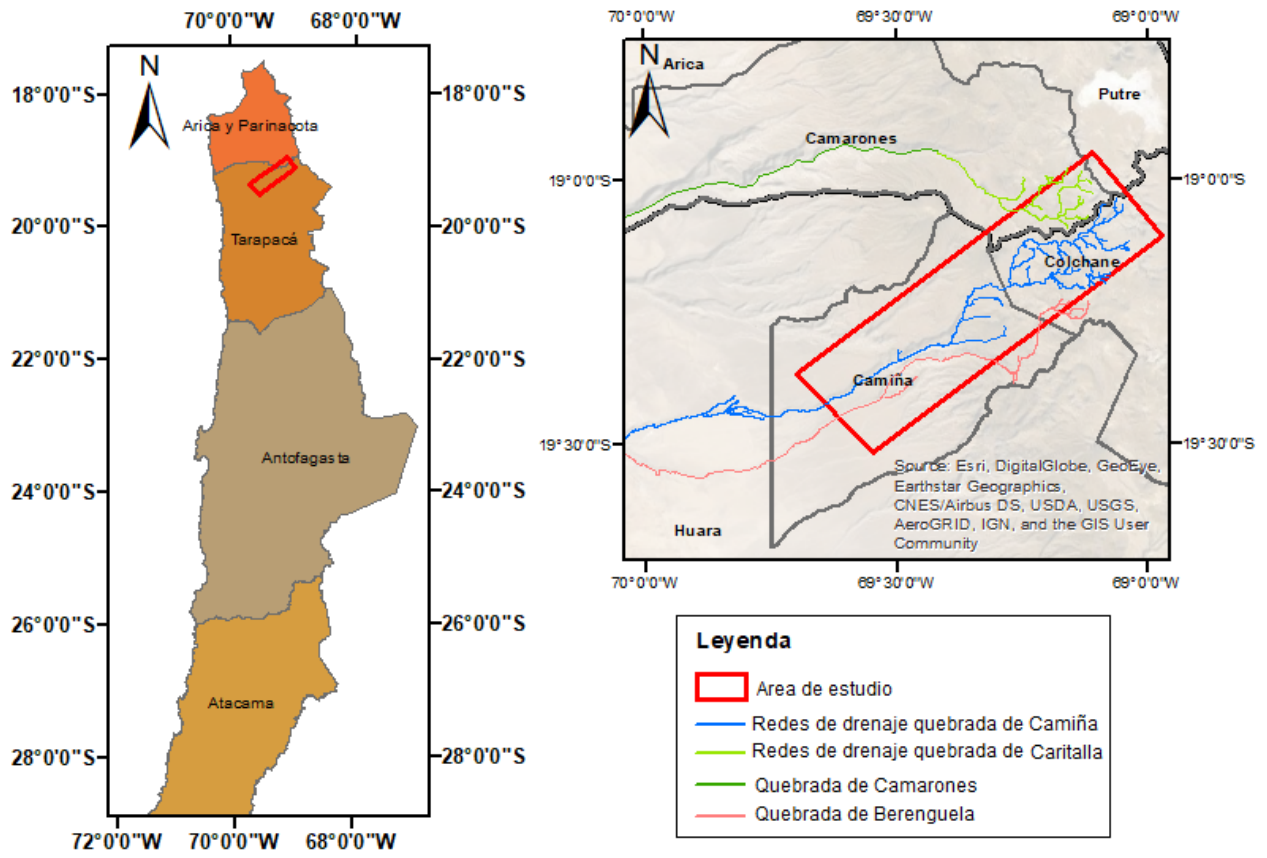


Figura 2.1: Ubicación geopolítica del área de estudio

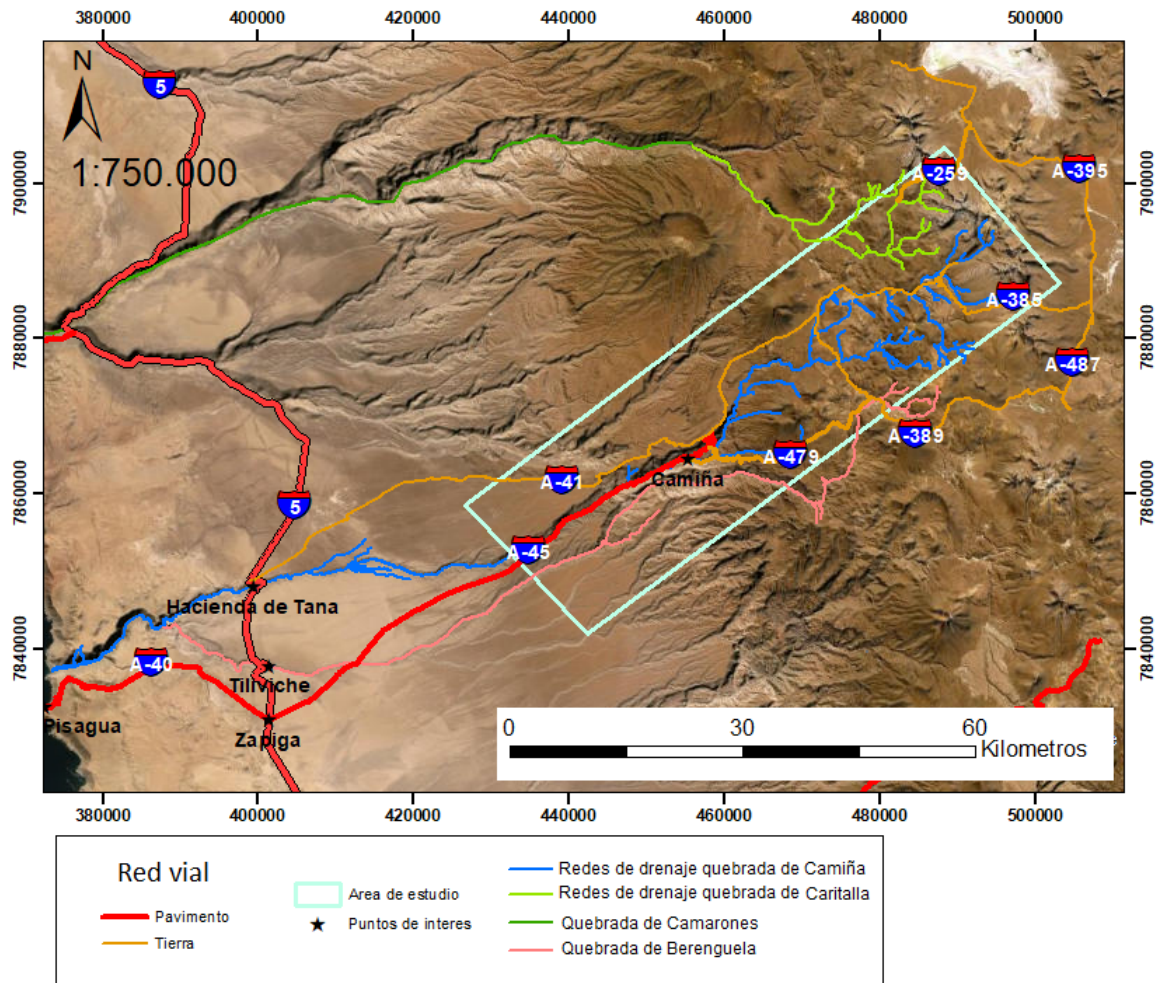


Figura 2.2: Ubicación y accesos a la zona de estudio a escala regional, además se muestran localidades cercanas a modo de referencia.

2.2. Antecedentes minero-industriales de la Zona de Estudio

Dentro del área de estudio se encontraron tres zonas de prospectos metálicos y uno de yacimientos de rocas y minerales industriales. Ninguno de estos 4 yacimientos (figura 2.3) está siendo explotado de manera industrial, solo el Prospecto Limpire de polimetales y oro ha sido explotado de manera artesanal.

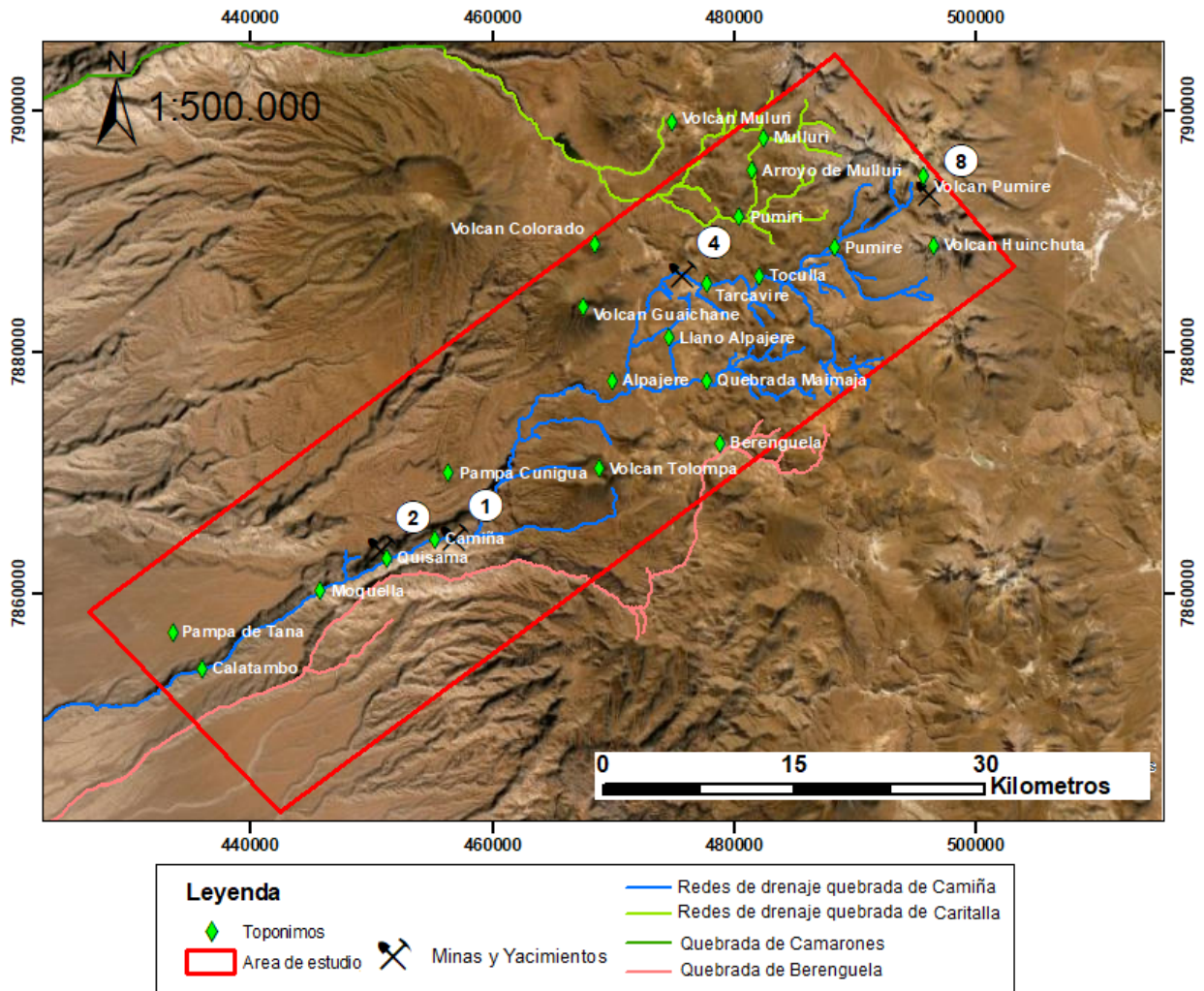


Figura 2.3: (1)Prospecto Camiña (Pacci et al., 1980)
(2)Prospecto Quistagama (Pacci et al., 1980)
(4)Prospecto Limpire (Pacci et al., 1980; Ordoñez y Rivera, 2004)
(8)Pumire (Gajardo et al., 2004)

A continuación, se detallan los prospectos y minas dentro del área de estudio junto a la información básica que se adjunta en la carta geológica Camiña (Valenzuela et al., 2014). Esta información básica corresponde al tipo de mena o metales extraídos, su roca de caja, su ubicación relativa y observaciones generales.

- **"1"Prospecto Camiña: -Mena:** Cu, limonita, sulfato de Al y Mg, turmalina, pirita.
-**Roca Caja:** Fm. Cerro Empexa (Ksce).
-**Ubicación:** Aledaño al poblado de Camiña.
-**Observaciones:** Parcialmente cubierta por secuencias terciarias y cuaternarias.

- **"2"Prospecto Quistagama: -Mena:** Cu, calcopirita, crisocola, pirita, pirrotina, cumbanita.
-**Roca Caja:** Fm. Cerro Empexa (Ksce).
-**Ubicación:** Quistagama.
-**Observaciones:** Solo reconocimiento superficial.

- **"4"Prospecto Limpire -Mena:** polimetálico, Au.
-**Roca Caja:** volcán Mulluri (Msv(b)), Domos Dacíticos (Msv(f)), Fm. Mauque (Msm).
-**Ubicación:** 2km al noroeste de Tarcavire.
-**Observaciones:** trincheras recientes; interesante como blanco de exploración.

- **"8"Pumire: -Mena:** Compuestos de azufre.
-**Roca Caja:** Volcanes del Mioceno Superior - Plioceno (MsPv(a)).
-**Ubicación:** Ladera Sur del Cerro Pumire.
-**Observaciones:** Sin explotación.

Existe otro antecedente relativamente cercano al área de estudio (a 80 km al suroeste del poblado de Camiña). Este trata de un proyecto de exploración geotérmica llamado Pampa Lirima, realizado por parte de Energía Andina S.A.. Energía Andina S.A. financió para su estudio la tesis de Achurra (2010), donde se utiliza al As como elemento trazador de las aguas termales al ser uno de los elementos más conservativos (W. Giggenbach y Glover, 1992; W. Giggenbach et al., 1994), por lo que tuvo que recoger en su trabajo de campo muestras en los puntos donde el agua recién aflora en superficie (de fuentes y baños termales), muestras que fluctúan concentraciones entre los 0,08 y los 1,9 mg/L de As. Este trabajo, evidencia que las fuentes de aguas termales son aguas con alto contenido de As en nuestra área de estudio. La ubicación respecto al área de estudio del proyecto geotérmico Pampa Lirima se muestra en la figura 2.4.

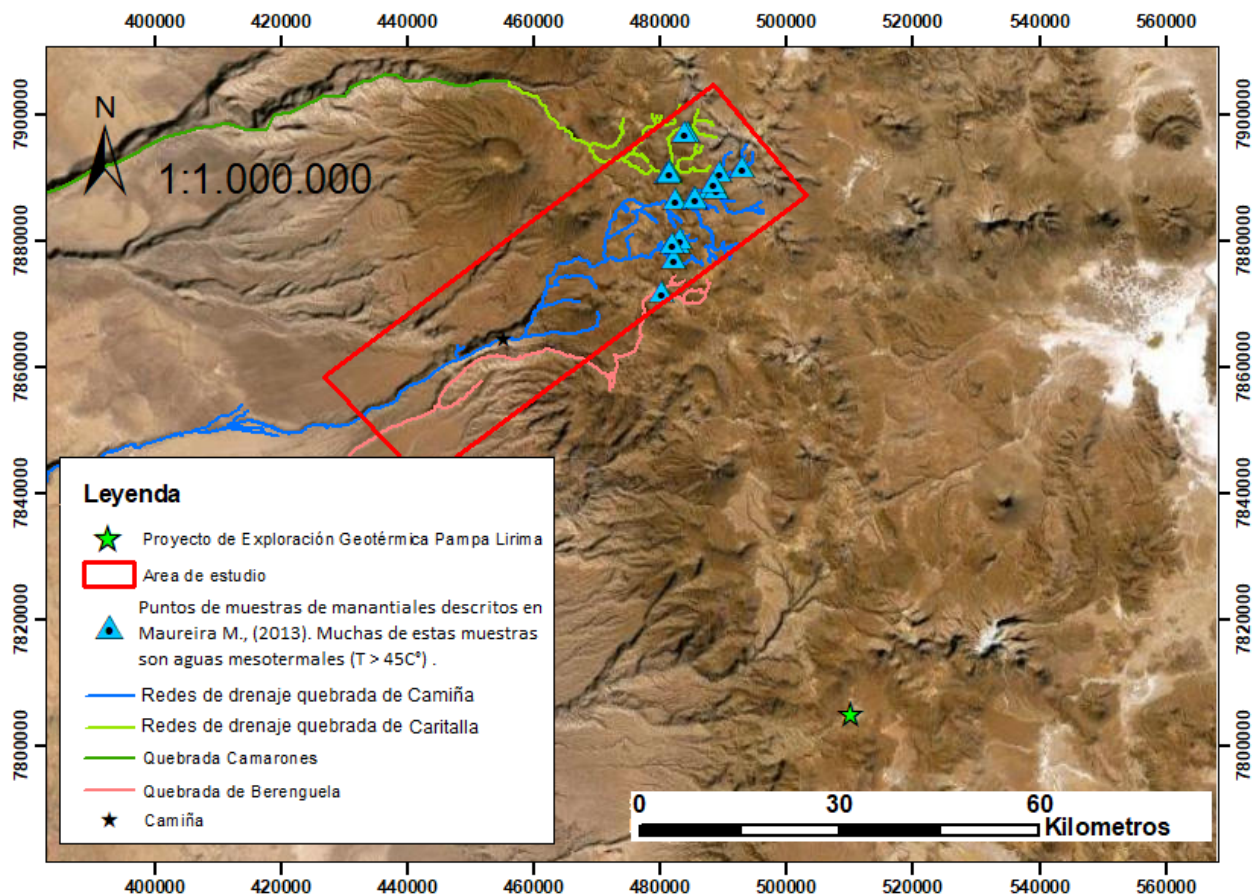


Figura 2.4: Proyecto de exploración geotérmica Pampa Lirima y Fuentes de aguas termales dentro del área de estudio

Capítulo 3

Marco Geológico

El marco Geológico se abarca con 4 aristas, estas son el marco geotectónico, el marco morfoestructural, la geología local y la geología estructural presente en el área de estudio. Cabe mencionar que de estas 4, la geología estructural es la menos relevante para los desarrollos posteriores, puesto que no hay influencia de las fallas o pliegues en las discusiones y conclusiones posteriores.

3.1. Marco Geotectónico

El margen occidental de Sudamérica corresponde a un margen continental activo, en el que la placa Nazca se subduce bajo la placa Sudamericana. Esta convergencia ha sido continua desde el Jurásico Inferior con episodios de mayor deformación durante Cretácico Inferior, Eoceno Medio, y Oligoceno Superior – Mioceno Inferior, lo que ha llevado a trasladar el arco magmático desde la Cordillera de la Costa hasta la posición actual en la cordillera de los andes (Charrier et al., 2007, 2009, 2013; Bertrand et al., 2014). Después de estos eventos las placas de Nazca y Sudamérica se han movido a la misma tasa absoluta de 37 mm / año (a 23°S), dando una convergencia total de 74 mm / año en el dirección N78°E a los 23°S (Tasara, 2005). Estas condiciones, al menos, desde el Eoceno, han propiciado una configuración tectónica favorable para el acortamiento cortical en el margen occidental de Sudamérica y el consecuente desarrollo del Orógeno Andino en los Andes Centrales (Herrera Escobar, 2013).

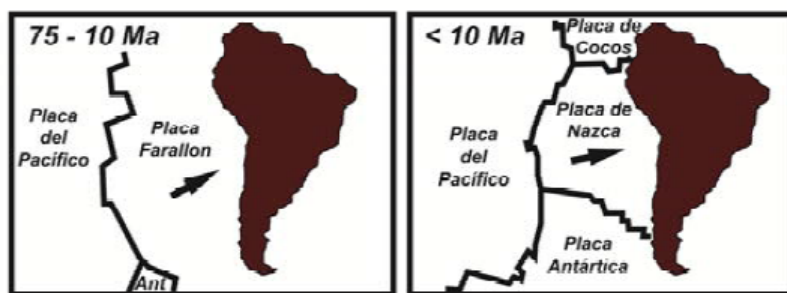


Figura 3.1: Evolución de la configuración de la tectónica de placas en el margen occidental de Sudamérica. Geometría de placas en el Cretácico Superior a Mioceno Superior (75-10 Ma) y desde el Mioceno Superior al presente (< 10 Ma) (Charrier et al., 2007).

3.2. Marco Morfoestructural

La configuración morfoestructural entre los 19° y 20° en el norte de Chile está definida de oeste a este como: Cordillera de la Costa, Depresión Central, Precordillera y Cordillera occidental (figura 3.2).

- **Cordillera de la Costa:** Es un cordón montañoso estrecho que en la región de Tarapacá tiene dimensiones de entre 20 – 40 km de ancho. Presenta una altura promedio de 1.500 m.s.n.m. Con una disposición aproximada norte sur entre los 18°S y los 28°S. Por el flanco oeste se expone un acantilado de entre 1000 m.s.n.m. hasta 2.000 m.s.n.m. (Mortimer y Saric, 1975).
- **Depresión Central:** La Depresión Central en la región de Tarapacá corresponde a una cuenca de ante-arco la cual la componen sedimentos acumulados durante el Oligoceno tardío-Mioceno medio (Digert et al., 2003)). Esta unidad morfoestructural tiene un ancho promedio de 55 km y una inclinación entre 1° a 2° hacia el oeste (García et al., 2011). En la zona de estudio los drenajes separan superficies interfluviales denominadas pampas. Esta depresión fue rellenada por capas de sedimentos e ignimbritas depositados durante el Oligoceno-Mioceno.
- **Precordillera:** Es una región estrecha de 50 – 80 km de ancho que presenta alturas que van desde 1.900 m.s.n.m. en su parte occidental hasta aproximadamente 4.000 m.s.n.m. hacia el este. Se presenta como una superficie regular levemente abombada producto del desarrollo de estructuras contraccionales a nivel regional, estas estructuras son principalmente pliegues y flexuras que generan desniveles topográficos de hasta 800 m en el límite de la Depresión Central y Precordillera (García et al., 2011). La mayor diferencia de la Precordillera respecto a la Depresión Central es su elevada pendiente, pues en una distancia relativamente corta hay un gran cambio en la elevación del terreno. Otra característica importante de la Precordillera en la región de Tarapacá es que es atravesada por múltiples quebradas que permiten el flujo de agua entre la Cordillera Occidental y la Depresión Central.
- **Cordillera Occidental:** Corresponde a la zona donde se ubica el arco volcánico actual. Se ubica inmediatamente al este de la Precordillera y presenta una topografía muy irregular. Esta alta cordillera está formado por edificios volcánicos del Mioceno-Holoceno y secuencias volcánicas y sedimentarias deformadas del Mioceno-Plioceno. Su ancho oscila entre los 50 – 100 km y Su altitud varía entre 3300 m.s.n.m. y 4800 m.s.n.m., con algunos picos que se elevan a 6350 m.s.n.m. (García, 2002; Charrier et al., 2005; Cembrano et al., 2007)

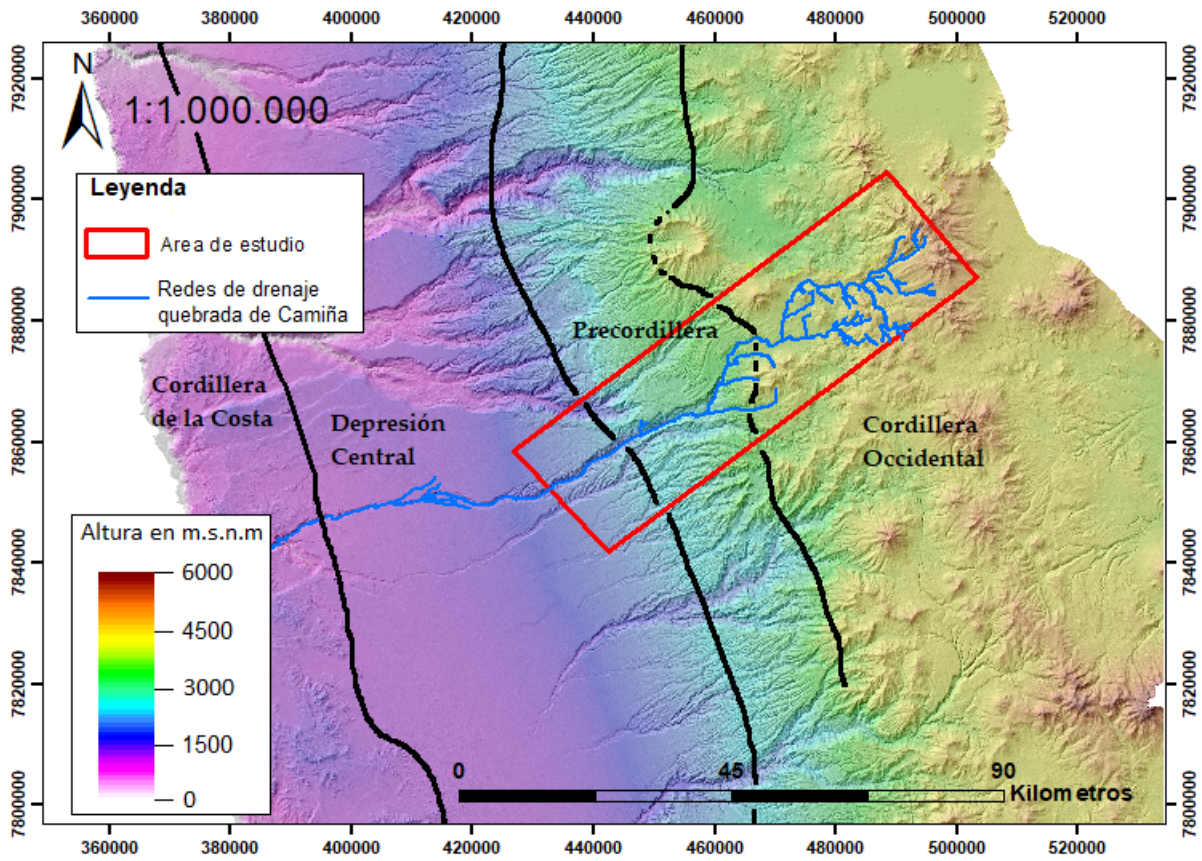


Figura 3.2: Unidades Geomorfológicas región de Tarapacá. Modelo de elevación realizado a partir de imágenes DEM. El área de estudio se ubica entre la Depresión Central, Precordillera y Cordillera Occidental.

3.3. Geología Local

3.3.1. Formación Punta Barranco “Kipb” (Cretácico Inferior; ca. 131-129 Ma)

Corresponde a una sucesión continental, sedimentaria y volcánica, suavemente deformada, definida por Cecioni y García (1960). Está constituida por rocas volcánicas y volcanoclásticas de colores pardo-rojizo, que alcanza 1.200 m de espesor (Thomas, 1970) en Blanco et al. (2012). En la Precordillera de la Carta geológica Miñimiñi (García et al., 2013), la que corresponde a una sucesión sedimentaria y volcánica continental, compuesta de areniscas y limolitas, con intercalaciones de lavas andesíticas, cuya base se encuentra cubierta, y que subyace en discordancia angular a rocas asignadas a la Formación Cerro Empexa (Ksce), en la quebrada Camiña (o quebrada de Tana en García et al., 2013). La Formación Punta Barranco, en la Carta Camiña, consiste en una sucesión de 210 m que incluye areniscas, areniscas arcósicas, limolitas y fangolitas, equivalentes a las rocas sedimentarias acorde a Blanco et al. (2012) y Vásquez y Sepúlveda (2013).

3.3.2. Formación Cerro Empexa "Ksce"(Cretácico Superior, ca. 74-66 Ma)

La Formación Cerro Empexa fue definida al sureste de Chacarilla, en la Carta geológica Guatacondo, como una sucesión continental de brechas, conglomerados, areniscas, fangolitas y traquitas (Galli y Dingman, 1962), de 1.300 m de espesor (Tomlinson et al., 2001) Se subdivide en facies Ksce(a) y Ksce(b), siendo Ksce(a) la que se encuentre dentro de nuestra área de estudio.

La Formación Cerro Empexa, en el área de la quebrada Camiña y de Berenguela (Ksce(a)), corresponde a una sucesión de depósitos volcánicos y sedimentarios continentales, de colores predominantemente azulado y secundariamente burdeo, que alcanza 1.000 m de espesor. La asociación litológica del sector occidental puede dividirse en tres sucesiones estratificadas distribuidas de oeste a este de la siguiente manera: Sucesión inferior, Sucesión media y Sucesión superior.

- **Sucesión inferior** de lavas andesíticas a andesítico-basálticas (55-58% SiO₂) de piroxeno, porfíricas y masivas, que aflora entre las localidades de Jajara y Quisama, a lo largo de las quebradas Camiña y de Berenguela (Valenzuela et al., 2014).
- **Sucesión media** de 450 m, que aflora al este de Quistagama y al oeste de Quisama en la ladera norte de la quebrada Camiña, de color gris y rojizo granodecreciente compuesta por conglomerados matriz-soportados y areniscas conglomerádicas, con lentes de areniscas y conglomerados (1 m de espesor y 15-30 m ancho). Los conglomerados son masivos, mal seleccionados, con clastos de tamaño guijarro a bloque (<2 m), subredondeados a subangulosos (Valenzuela et al., 2014).
- **Sucesión superior** de 165 m, que aflora en la quebrada Camiña al este de Quisama y ampliamente en ambas laderas de la quebrada Berenguela, con dos ciclos granodecrecientes, compuesta por areniscas conglomerádicas y areniscas finas. Su base y techo no están expuestos (?)

3.3.3. Dioritas del Cretácico Superior “Ksd” (Cretácico Superior, ca. 69-66 Ma)

Las Dioritas del Cretácico Superior corresponden a dos cuerpos intrusivos hipabisales microdioríticos de biotita y clinopiroxeno, de afinidad andesítica (54% SiO₂), que afloran en la quebrada Camiña y Berenguela, al este de la localidad de Quisama. Se infiere que la diorita intruye la zona de contacto entre la Formación Punta Barranco (Kipb) y la Formación Cerro Empexa (Ksce(a))(Valenzuela et al., 2014).

3.3.4. Formación Oxaya “Omo” (Oligoceno Superior-Mioceno Inferior, ca. 23-19 Ma)

La Formación Oxaya (OMo) corresponde a una unidad principalmente volcánica, de 1.000 m de espesor, definida por Montecinos (1963) como una sucesión compuesta por ignimbritas, rocas sedimentarias clásticas y lavas subordinadas, que se distribuye extensamente a lo largo de la Precordillera y Depresión Central del Norte de Chile desde los 18°S hasta los 19°15'S. Se ubica de manera general hacia el margen suroeste del área de estudio, en todo lo que es la Precordillera.

3.3.5. Ignimbrita Moquella “Mim” (Mioceno Inferior, 19,3±0,8 Ma)

Fue definida informalmente por Pinto (1999) como un depósito volcánico, de hasta 20 m de espesor, que aflora en la localidad de Moquella y sus alrededores (quebrada Camiña y quebrada Berenguela), en la parte oriental del área. Sobreyace concordantemente a los depósitos sedimentarios del techo de la Formación Oxaya y subyace, en discordancia de erosión, a las gravas del Miembro Superior de la Formación El Diablo. Es una roca de colores pardo anaranjado y pardo rojizo. Corresponde a una toba de lapilli pumicítica, con textura piroclástica (Pinto, 1999).

3.3.6. Ignimbrita Nama “Min” (Mioceno Inferior; ca. 18-15 Ma)

La Ignimbrita Nama, descrita por Pinto (1999) en la localidad homónima 10 km al norte de Camiña. Corresponde a una unidad de flujo piroclástico representada por una toba de composición dacítica a riolítica, de 200 m de espesor, distribuida ampliamente en la Pampa Cunigua, en el sector central a nor-occidental del área, donde alcanza más de 150 km² de exposición. Sobreyace a tobas de la Formación Oxaya (OMo), y subyace y engrana con los depósitos de la Formación El Diablo (Mimd) hacia el oeste (García et al., 2004).

La Ignimbrita Nama corresponde a una toba de ceniza vítrea, soldada, maciza, de composición dacítica a riolítica (70% SiO₂) que además exhibe fenocristales y fiammes. La matriz (55-65%) es vítrea, con albita amorfa, pigmentada con minerales de arcilla y óxidos de Fe-Ti (García et al., 2004).

3.3.7. Formación el Diablo “Mimd”(Mioceno Inferior - Medio, ca. 16-8 Ma)

La Formación El Diablo, definida por Tobar et al. (1968), corresponde a una sucesión sedimentaria continental clástica, con espesores mínimo y máximo de 5 y 350 m, respectivamente. Está constituida principalmente por conglomerados y areniscas gruesas de tonalidades oscuras, con intercalaciones evaporíticas delgadas. De acuerdo a Vogel (1975) y Vogel y Vila (1980), la formación se divide en miembro inferior y miembro superior. Se distribuye ampliamente en toda el área de la Carta Geológica Miñimiñi (Depresión Central y Precordillera) y dentro de la Carta Geológica Camiña la zona de la Precordillera sur. Dentro del área de estudio, solo se presenta el miembro superior, el cual está constituido principalmente por estratos conglomeráticos de color gris oscuro, de granulometría gruesa y clastos sub-redondeados que alcanzan hasta 40 cm de diámetro, de composición predominantemente andesítica. Su espesor mínimo es de 10 m en las cercanías del poblado de Camiña, y su máximo es de 180 m hacia el extremo suroeste del área de estudio.

La Formación El Diablo sobreyace a la Formación Oxaya (OMo) principalmente mediante una para-concordancia de carácter regional. En el área de estudio, esta formación abarca los pediplanos que rodean la quebrada Camiña, desde el poblado de Calatambo en el sureste hasta Moquilla en el noreste, donde alcanza una potencia de 350 m. Además, abarca la totalidad de la pampa de Tana. También tiene un afloramiento particular al sur del poblado de Camiña (Valenzuela et al., 2014).

3.3.8. Volcanes y secuencias volcánicas del Mioceno Superior "Msv" (Mioceno Superior, ca. 11-6 Ma)

Los volcanes y secuencias volcánicas del Mioceno Superior están compuestos por lavas, rocas piroclásticas y domos que tienen una amplia extensión, además de coladas de lava, principalmente andesíticas, relacionadas a centros de emisión que están fuera de la carta Camiña. Se dividen en 7 sub facies volcánicas, de las cuales cuatro están presentes en el área de estudio.

- **Msv(a):** También llamada '**Andesita Camiña**', químicamente es una andesita de piroxenos y andesitas basálticas de olivino. Corresponde a estratos de lava, expuestos en el margen noroeste de la zona de estudio. El afloramiento se distribuye de manera elongada en dirección noreste-suroeste en el área de estudio.

La Andesita Camiña (Msv(a)) sobreyace, en discordancia de erosión, a los depósitos del Miembro Superior de la Formación El Diablo (Mimd), cerca de la parte más occidental del área, su techo es la superficie de erosión actual. La Andesita Camiña (Msv(a)) presenta un espesor promedio de 100 m. Corresponde a una lava andesítica, predominantemente fresca, de colores negro y gris oscuro. La colada, en su parte central presenta una textura maciza y bandeada, y en su base y techo, una textura principalmente brechosa (Valenzuela et al., 2014; García et al., 2013).

Los antecedentes cronológicos de la Andesita Camiña (Msv(a)) son consistentes con sus relaciones estratigráficas y permiten asignarla al Mioceno Superior (8,3 Ma)(García et al., 2013).

- **Msv(b):** Esta asociación de litologías fue reconocida en rocas provenientes de remanentes de centros eruptivos al norte de las ruinas de Toculla (en el margen norte del área de estudio). Químicamente está compuesta de andesitas de clinopiroxeno, dacitas y tobas de ceniza cristalinas subordinadas (Valenzuela et al., 2014).
- **Msv(c):** Corresponden a andesitas de piroxenos y dacitas y tobas de lapilli subordinadas. Esta asociación de litologías fue reconocida en el volcán Tolompa (al centro del área de estudio y al este de la quebrada Camiña) (Valenzuela et al., 2014).
- **Msv(f):** Corresponden a domos dacíticos (65% SiO₂), en la porción central del área de estudio, en el flanco este del volcán Tolompa, cuyos afluentes caen hacia la quebrada de Maimaja, la que conduce hasta la quebrada Camiña. (Valenzuela et al., 2014).

3.3.9. Formación Mauque “Msm” (Mioceno Superior, ca. 10-8 Ma)

Lahsen (1973) definió informalmente la Serie de Mauque como un conjunto de rocas sedimentarias, grises a verdosas, constituidas por una alternancia de areniscas brechosas y conglomerádicas epiclásticas. Los afloramientos más extensos de la Formación Mauque se distribuyen entre el volcán Tolompa y el poblado de Berenguela, también al este y al norte del llano de Alpajere. La unidad se dispone en discordancia sobre la Formación Cerro Empexa (Ksce)

La Formación Mauque en la Carta Camiña (García et al., 2013) corresponde a una sucesión sedimentaria y volcánica formada principalmente por estratos de areniscas medias a muy gruesas, areniscas conglomerádicas, conglomerados polimícticos y monomícticos, con intercalaciones locales de conglomerados brechosos, lavas, tobas, brechas volcánicas y depósitos laháricos.

En la ladera este del volcán Colorado y el llano Alpajere se presenta como una sucesión de 28 m de areniscas. En el sector de Berenguela la sucesión alcanza 155 m en total.

3.3.10. Ignimbrita Pumiri “Msp” (Mioceno Superior; ca. 9 Ma)

La Ignimbrita Pumiri es una unidad informal descrita por primera vez en la Carta Geológica Camiña (Valenzuela et al., 2014). Corresponde a una toba de lapilli cristalina de olivino, clinopiroxeno, biotita y hornblenda, de color blanco amarillento.

Esta unidad se dispone en discordancia de erosión sobre la Formación Mauque (Msm) y subyace en pseudo-concordancia a lavas provenientes de los volcanes Tolompa (Msv(c)) hacia el suroeste, Mulluri (Msv(b)) hacia el noroeste, y Pumire (MsPv(a)) hacia el este. El espesor de esta unidad es de 80 m y es variable en sus afloramientos occidentales, en la quebrada Camiña, al este de las ruinas de toculla, donde disminuye su espesor entre 10 m - 5 m.

3.3.11. Volcanes del Mioceno Superior - Plioceno “MsPv(a)” (ca. 6-3 Ma)

Los volcanes Pumire, Guaiguasi y Huinchuta, del Mioceno Superior-Plioceno corresponden a un conjunto de centros volcánicos que forman una franja de orientación norte-sur alineada al extremo nor-oriental del área de estudio, cuyos productos corresponden a lavas, de composición andesítica (60% SiO₂) de anfíbola y tobas de ceniza líticas. Estos volcanes se encuentran muy cercanos uno a otro, por lo que sus límites no se encuentran claramente definidos (Valenzuela et al., 2014).

Ubicados en el extremo noreste de la Carta Camiña, abarcan una extensión areal de 180 km² y alcanzan alturas de 5.370 m s.n.m., 5.100 m s.n.m. y 5.369 m s.n.m., respectivamente. Sus rocas sobreyacen en para-concordancia a lavas asociadas al volcán Mulluri (Msv(b)) y a otros centros más antiguos ubicados hacia el oeste. Por otra parte, sus rocas se encuentran cubiertas en discordancia de erosión por Depósitos Glaciares (PIHm). Los tres centros emisores corresponden a estratovolcanes, cuya altura supera los 500 a 700 m desde su base hasta su cumbre. Los remanentes de coladas provenientes de estos centros alcanzan espesores de 60 m y anchos de 1 a 2 km, con una extensión aproximada de 3 km². Las lavas presentan lóbulos menores y bandeamiento de flujo con orientaciones al suroeste y al este. Los cráteres de estos centros se encuentran afectados por erosión glacial, la cual se manifiesta en la presencia de morrenas glaciares de tipo terminal y lateral (Valenzuela et al., 2014).

3.3.12. Depósitos Aluviales del Pleistoceno - holoceno “PIHa”

Corresponden a depósitos, principalmente, constituidos por gravas en forma de abanico, de matriz de tamaño medio y clastos de diversos tamaños (1 cm a 20 cm), clasto-soportados, pobremente consolidados, adosados a laderas de cerros, y disectados por cursos fluviales. En planta, muestran una morfología típica de abanico aluvial y de abanicos aluviales compuestos, con amplias planicies en los márgenes frontales de los cuerpos. En el área de estudio, se reconocen estos depósitos en laderas y bases de las unidades volcánicas miocenas presentes, como en el volcán Tolompa o Huaichane. Los depósitos de gravas siguen la pendiente de las laderas y forman planicies en sus porciones distales. Cubren un área aproximada de 53,18 km² (Valenzuela et al., 2014).

3.3.13. Depósitos de Remoción en masa “PIHrm” (Pleistoceno - Holoceno, ca. >9-6 ka)

Los depósitos de remoción en masa en el área de estudio corresponden a deslizamientos rotacionales, que se distribuyen principalmente a lo largo de la quebrada Camiña, específicamente en Toculla por el noreste y entre las localidades de Jasjara y Altuza en el suroeste. Estos depósitos están restringidos y adosados a abruptos escarpes (600 m de altura) en las áreas mencionadas. En la quebrada Camiña, los depósitos de deslizamiento, en conjunto, cubren un total de 36,4 km², con un equivalente en volumen de 301.040 m³ (Farías Sarmiento, 2012).

Los bloques rotados originados por las remociones muestran límites claros, determinados por superficies de rotura en escarpes y laderas, además de preservar la disposición original de las unidades afectadas. En general, muestran características de deslizamientos rotaciona-

les secuenciales múltiples, exhibiendo escarpes principales y secundarios (Farías Sarmiento, 2012).

3.3.14. Depósitos Coluviales “PLHc”(Pleistoceno - Holoceno)

Los depósitos coluviales activos se distribuyen principalmente en las quebradas del frente precordillerano, asociadas a altos escarpes que exhiben a las formaciones El Diablo (Mimd) y Oxaya (OMo). Los depósitos presentan morfología de conos de deyección gravitacionales, y también se adosan en las superficies bajo los escarpes de bloques deslizados (PIHrm). En la Cordillera Occidental, se distribuyen en amplias superficies aledañas a altos topográficos y centros eruptivos de edad miocena a pleistocena, en forma de escombros de falda. En ambos casos, contienen clastos provenientes de las unidades cercanas, muy mal seleccionados (caóticos), de tamaño grava a bolones y bloques, clastosoportados en una matriz de arena fina a limo. Su contenido detrítico es considerado local, y sus orígenes son derivados de procesos gravitacionales (Valenzuela et al., 2014).

3.3.15. Depósitos Aluviales “Ha” (Holoceno)

Los depósitos aluviales activos se encuentran restringidos a laderas de alta pendiente en la Cordillera Occidental y áreas muy restringidas en las quebradas de la Precordillera. Están constituidos por bloques, gravas, arenas y limos, de proveniencia local o proximal, correspondientes a productos de meteorización y erosión de volcanes del Mioceno Superior (Msv), del Mioceno Superior-Plioceno (MsPv) y del Pleistoceno (Plv) (Valenzuela et al., 2014).

3.3.16. Depósitos Fluviales “Hf” (Holoceno)

Los depósitos fluviales activos están restringidos al fondo de las quebradas formadas por el paso de cauces activos, estacionales y esporádicos. Están constituidos principalmente por intercalaciones de limos, arenas finas a gruesas, arenas gruesas con clastos gravas, que generalmente muestran estratificación cruzada y gradación inversa y normal de clastos; y gravas de tamaño ripio, grava y subordinadamente de bloques sub-redondeados, imbricados y soportados por una matriz arena y gravilla (Valenzuela et al., 2014).

En la Depresión Central y Precordillera, están restringidos a los valles más profundos. En la Cordillera Occidental, los depósitos fluviales se forman por crecidas estacionales de cauces o por entrampamiento natural. En cursos de baja energía, distribuidos en la Cordillera Occidental, los depósitos fluviales se encuentran en conjunto con carbonatos y sulfatos indiferenciados precipitados entre clastos y vegetación superficial. Las quebradas en la cordillera occidental son alimentadas por aguas provenientes de áreas que tienen manifestaciones termales (Valenzuela et al., 2014).

La visualización de todas las unidades geológicas presentes en el área de estudio, se exponen de manera gráfica en la figura 3.3.

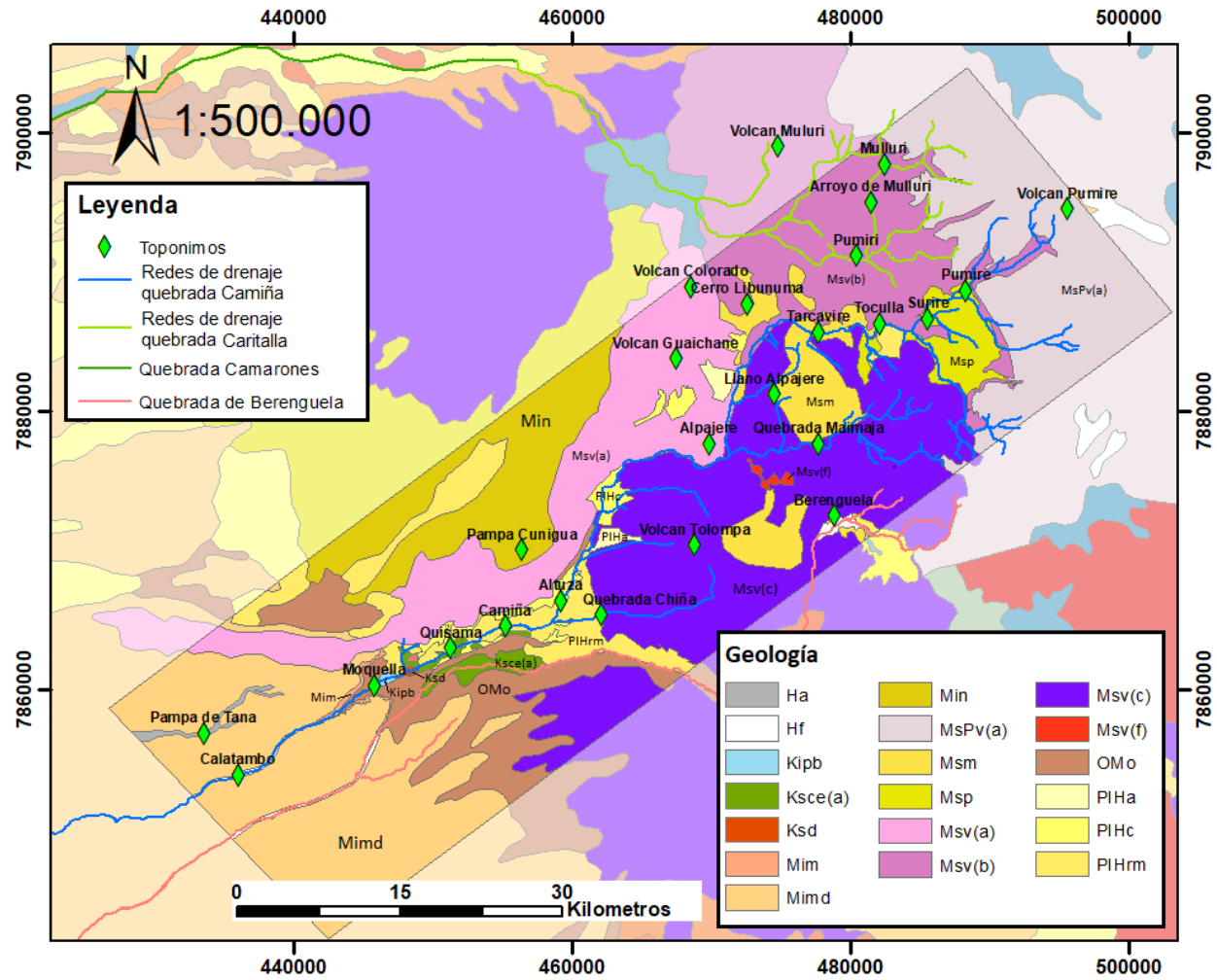


Figura 3.3: Mapa de secuencias volcánicas, Rocas estratificadas y Depósitos en la zona de estudio

3.4. Geología estructural local

De manera general, las estructuras presentes en la quebrada Camiña tienen una orientación preferencial NNW-SSE. Estas corresponden a:

- **Flexura de tana:** En la Pampa Tana, el Miembro Superior de la Formación El Diablo (ex Miembro Pacagua de Formación Latagualla) es afectado por un anticlinal de orientación ca. $N30^{\circ}W$ que causa un desnivel sobre la planicie de aproximadamente 50 m (Pinto, 1999; Pinto et al., 2004)
- **Flexura Moquilla:** Esta estructura se ubica en la parte central del área poblada de la quebrada Camiña, la Flexura Moquilla (Pinto, 1999; Pinto et al., 2004), se extiende por al menos 15 km, con un rumbo $N25-35^{\circ}O$ y vergencia oeste. En la superficie, la flexura presenta una amplitud máxima de 150 m, pero en el techo de la Formación Oxaya (OMo), la amplitud aumenta hasta 300 m. El plegamiento ocurrió simultáneamente con la depositación de la cobertura oligo-miocena, entre aproximadamente 25 y 8 Ma (Pinto, 1999; Pinto et al., 2004). No se observa una falla ciega, cuya propagación sea la responsable del flexuramiento. Se infiere que el flexuramiento se produjo como propagación de un pliegue anticlinal mayor formado en las rocas del basamento Cretácico (figura 3.5).
- **Flexura Quistagama:** Corresponde a una flexura menor, Se desarrolla paralela a la flexura Moquilla, 1 km más al este de la última, produciendo un resalto topográfico de casi 100 m, la inclinación de su limbo de 15° al oeste, y una longitud de onda de 700 m. Su extensión hacia el sureste desde la quebrada Camiña se desvanece en menos de 1 km a lo largo de su rumbo (figura 3.5) (Herrera Escobar, 2013).
- **Falla Jajara:** Corresponde a una falla inversa observada al oeste de la localidad de Quisama. Es también paralela a la Falla Quisama y actúa de manera similar a ella desplazando al substrato Pre-Oligoceno por sobre la Ignimbrita Moquilla (ex Miembro inferior de la Formación Latagualla) (figura 3.5)(Toro, 2015).
- **Falla Quisama:** La Falla Quisama corresponde a una falla inversa de alto ángulo ($50^{\circ}E$), de rumbo NNO-SSE, que afecta a la Formación Cerro Empexa produciendo un rechazo cercano a los 70 m, alzando el bloque oriental con respecto al bloque occidental, y afectando también a la suprayacente Formación Oxaya (figura 3.5) (Valenzuela et al., 2014).

- **Falla de Umayani:** La falla Umayani, ubicada entre Toculla y Tarcavire, corresponde a una falla inversa que tiene vergencia este y monta a la Formación Mauque sobre lavas del Mioceno Superior, por medio de rampas de alto ángulo (40° - 45°). Esta falla tiene vergencia opuesta a la falla Vilacollo (figura 3.6) (Valenzuela et al., 2014).
- **Falla Vilacollo:** La falla Vilacollo, ubicada entre el volcán Churicoyo y cerro Libunuma, corresponde a una falla inversa que tiene vergencia oeste y monta a la Formación Mauque sobre lavas del Mioceno Superior, por medio de rampas de alto ángulo (40° - 45°). Esta falla tiene vergencia opuesta a la falla Umayani (figura 3.6) (Valenzuela et al., 2014).

La visualización de las estructuras geológicas presentes en el área de estudio, se exponen de manera grafica en la figura 3.4

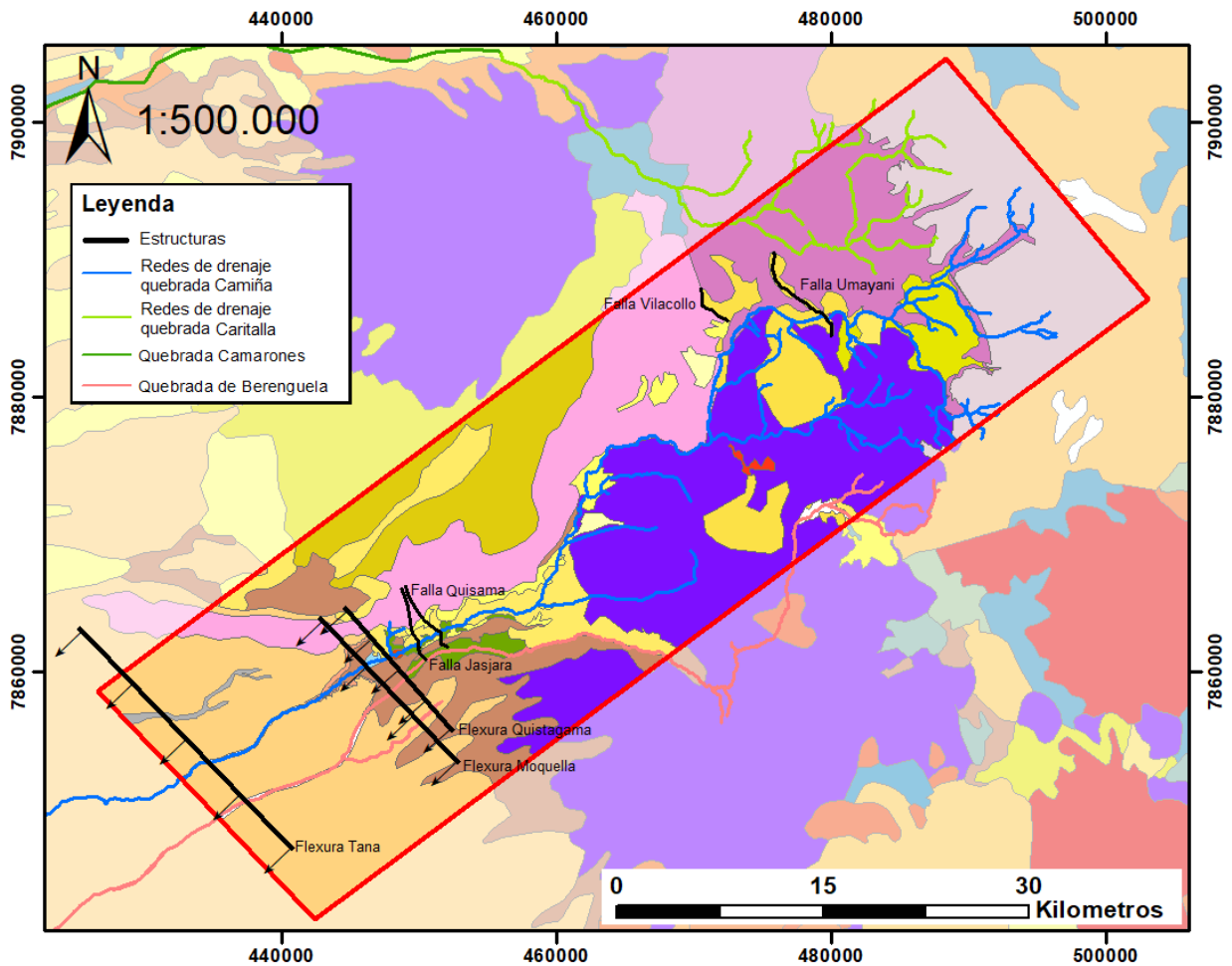


Figura 3.4: Mapa de todas las estructuras presentes en el área de estudio, junto a la geología local

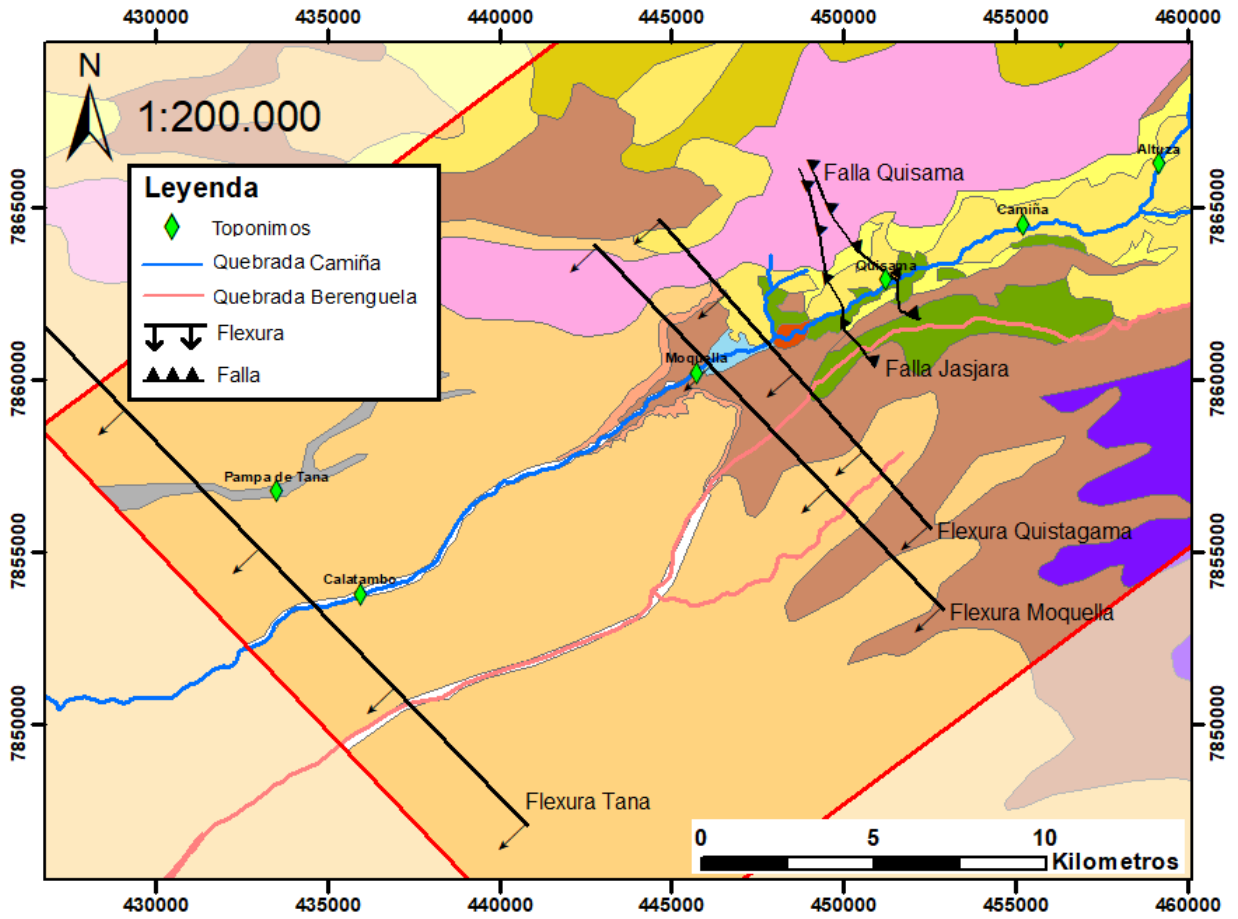


Figura 3.5: Estructuras geológicas sector sur área de estudio.

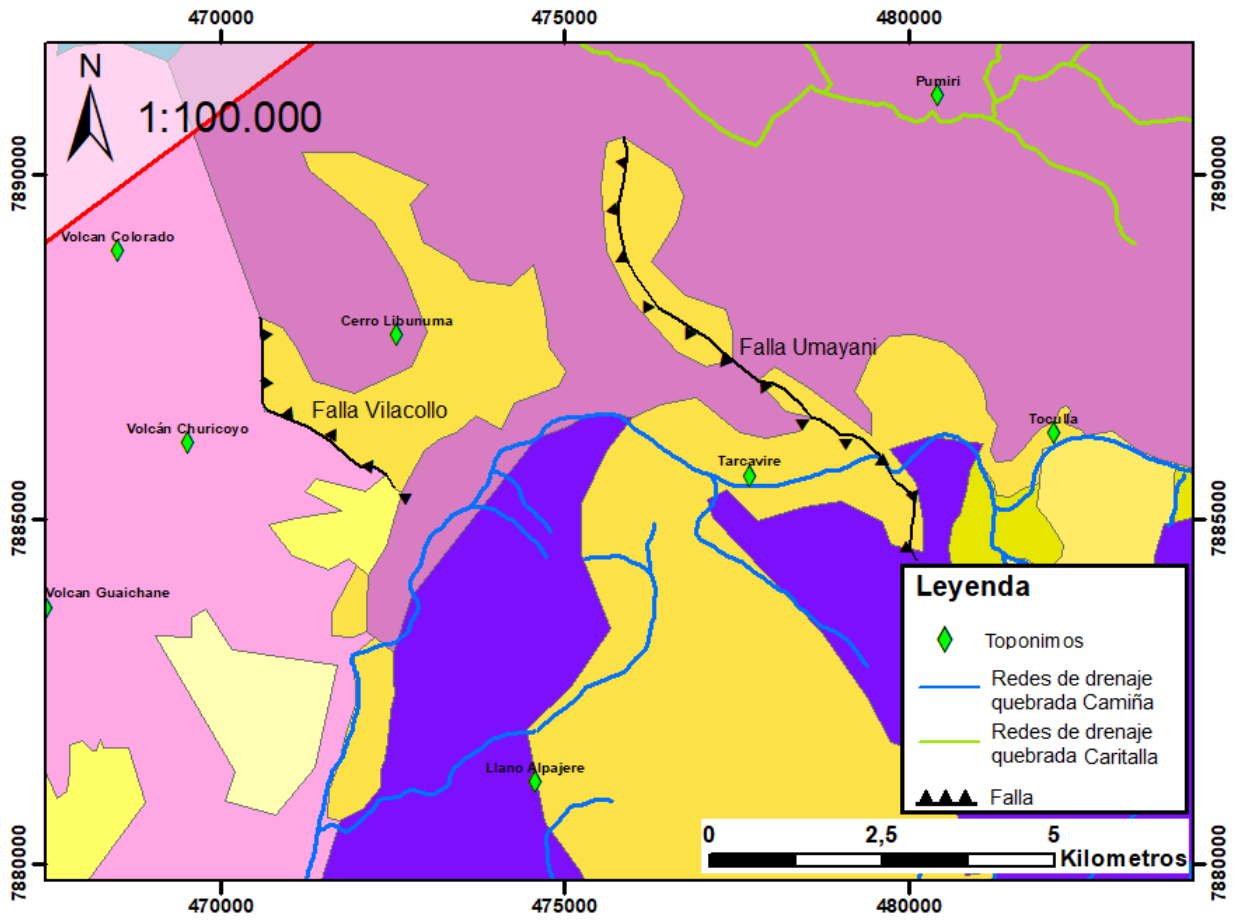


Figura 3.6: Estructuras geológicas sector norte área de estudio.

Capítulo 4

Metodología

Gran parte de la realización de este trabajo requirió el uso de varias metodologías para trabajar con los datos y o muestras más correctas, logrando así los mejores y más certeros resultados. La metodología comienza con la obtención de los datos de aguas y sedimentos, los cuales fueron obtenidos de trabajos previos. Estos datos requerían una evaluación de calidad de información, para eso los datos Hidroquímicos fueron sometidos al cálculo de error del balance iónico, mientras que los datos de sedimentos, solo se trabajaron con aquellos elementos que presentaron la mayor correlación entre la muestra y su duplicado.

Con las muestras de aguas seleccionadas, se procedió a hacer una caracterización Hidroquímica para conocer los tipos de agua que corresponde cada muestra, además se analizaron las muestras según sus concentraciones de As y posteriormente se calculó el riesgo de cada muestra para ver si presentaba riesgo cancerígeno o no cancerígeno. Con los elementos seleccionados de los sedimentos, se elaboró una línea de base geoquímica para cada uno, además de también, elaborar una tabla comparativa de las concentraciones de los elementos con las regulaciones ambientales vigentes. El orden de las aplicaciones de estas metodologías se muestra en el esquema de la figura 4.1.

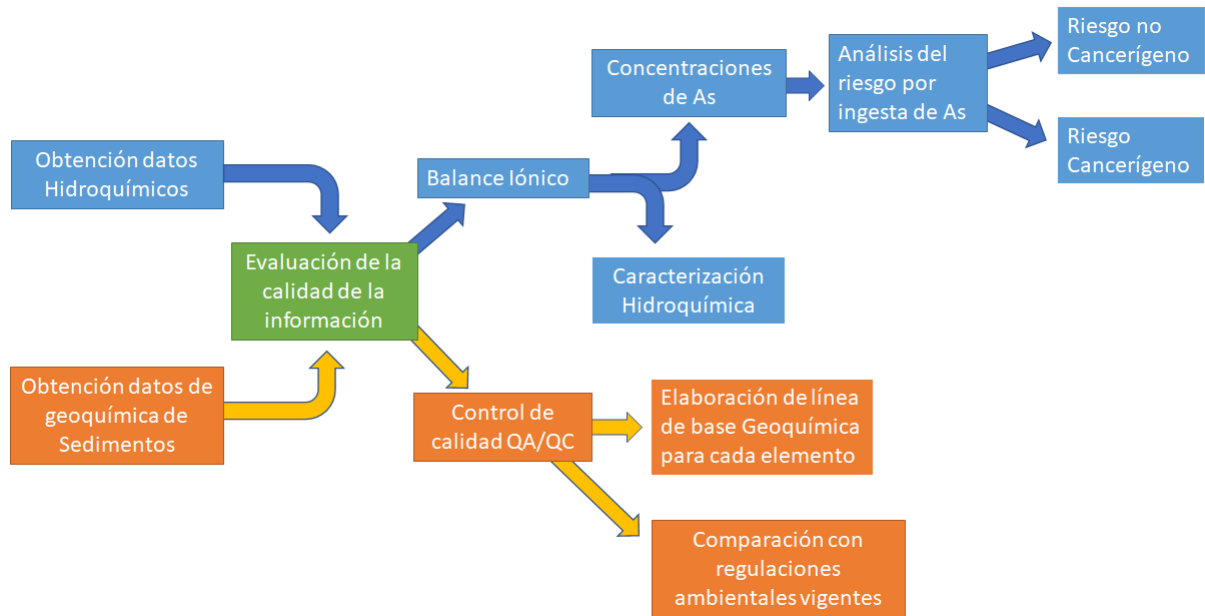


Figura 4.1: Esquema de la metodología utilizada en este trabajo

Cabe mencionar también que no todos los resultados están de la mano con la metodología utilizada a continuación, sino que se obtienen de manera particular e independiente. Estos son como el análisis de las concentraciones y la evolución temporal y espacial del As en aguas en la sección 5.1.5 y el análisis de riesgo de población por As en suelos agrícolas en la sección 5.3, el cual solo necesito de bibliografía correspondiente para su realización.

4.1. Obtención de datos

Como se mencionó previamente debido a la pandemia Covid-19 no fue posible realizar campañas de terreno para la recolección de muestras como parte de los trabajos asociados al estudio de la presente tesis. Por lo anterior, como parte de la recopilación de antecedentes fueron seleccionados una serie de estudios que incluyen muestras hidroquímicas y de geoquímica de sedimentos cuyas campañas de muestreo representan un periodo de tiempo relativamente acotado (2012 a 2015). Cabe destacar que parte de las muestras hidroquímicas no conducen dentro de la cuenca de la quebrada Camiña, sino que a quebradas vecinas (figura D.1), por lo que su análisis solo será referencial y no tendrán relevancia en las conclusiones.

Los datos de las muestras de hidroquímicas de agua para la realización de este trabajo, fueron tomados de las memorias de título de Claudio Sierra (Sierra Gutiérrez, 2016) y Gustavo Maureira (Maureira M., 2013), también se suma los datos de una estación hidroquímicas de la DGA, ubicada en el sector de Altuzza en el área de estudio. Finalmente, también se recogieron los datos de Geoquímica de Sedimentos, de la base de datos de Geoquímica de Sedimentos de la Hoja Pisagua (Astudillo W. et al., 2015). Las muestras de aguas y sedimentos recopiladas, junto a sus autores se muestran en la figura 4.2.

4.1.1. Datos Hidroquímicos

Las muestras de aguas en el área de estudio, fueron recolectadas en dos estudios, el primero hecho por Gustavo Maureira, quien efectuó dos campañas de terreno en los meses de mayo y octubre del año 2012, con el fin de obtener datos para el estudio “Alteración Hidrotermal y Geoquímica de las Aguas Termales en el Área de la Concesión Geotérmica Licancura III, I región de Tarapacá, Chile ” (Maureira M., 2013). Para el análisis químico de las aguas termales, en Maureira M. (2013) se procedió recolectando las muestras en botellas de polietileno de alta densidad (HDPE) de 300 ml, siguiendo el procedimiento propuesto por W. F. Giggenbach y Goguel (1989). Las muestras de aniones y cationes fueron filtradas con una membrana de 0,45 μm instalada en un portafiltras y una bomba de vacío. Las muestras de cationes fueron acidificadas con 1ml de HNO_3 (4 normal) cada 100 ml de muestra. El filtrado mencionado tuvo como objetivo el prevenir el crecimiento de algas que podría remover Mg , NH_3 y SO_4 , además de evitar el ingreso de material en suspensión o cúmulos de bacteria que podrían afectar los equipos de laboratorio y los resultados de los análisis. La acidificación evita la precipitación de cationes y de algunos metales en traza. Los análisis químicos de las muestras de agua fueron realizados en el New Zealand Geothermal Analytical Laboratory del GNS Science en Nueva Zelanda y en Thermochem Inc en Estados Unidos. Estos análisis consistieron en cromatografía iónica, espectrometría de emisión óptica con fuente de plasma acoplado (ICP-OES), espectrometría de emisión por llama (FES) y el método de auto titulación para determinar alcalinidad (AT)(Maureira M., 2013).

El segundo trabajo, realizado por Claudio Sierra, constó de 2 campañas de terreno. La primera campaña se realizó durante la primera semana de febrero del año 2014, y la segunda campaña de terreno se efectuó los días 8 y 9 de septiembre del año 2015, con el fin de obtener datos para el trabajo “Caracterización Hidrogeoquímica e Isotópica de las Aguas de la quebrada Camiña, región de Tarapacá, Chile” (Sierra Gutiérrez, 2016). Para el muestreo químico, en cada punto fue necesario tomar un volumen de 6 Litros de agua, los cuales fueron almacenados en botellas plásticas de 1 Litro con tapón de seguridad, para impedir el ingreso de aire y evitar fugas. Las muestras químicas fueron enviadas al laboratorio Analítico de la Universidad Católica del Norte ubicado en la ciudad de Antofagasta, excepto las muestras C-1 y C-2 las cuales fueron enviadas por encargo, al laboratorio del DICTUC, perteneciente a la Pontificia Universidad Católica de Chile, ubicada en Santiago. Las muestras químicas enviadas al laboratorio Analítico de la Universidad Católica del Norte utilizaron los métodos analíticos de Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma por Inducción (ICP-AES), Volumetría, Gravimetría y Absorción Molecular (UV), mientras que las muestras C-1 y C-2 enviadas al DICTUC, en Sierra Gutiérrez (2016) no se especifica que método fueron utilizado en ellas.

Por último, también existen muestras en el área de estudio que forman parte de la red de monitoreo de calidad de aguas superficiales de la Dirección General de Aguas(DGA). Estas corresponden a una estación de monitoreo de calidad de las aguas de la quebrada Camiña, en el sector de Altusa. Por lo que existe una gran cantidad de datos de la concentración de As a través del tiempo en el mismo punto, los que servirán para evaluar en el tiempo la evolución del elemento químico disuelto en las aguas de la quebrada Camiña. Además, en esta misma estación, existen los datos de los caudales promedios mensuales, con los cuales se buscara si existe una relación de estos con la concentración de As.

4.1.2. Datos de Geoquímica de Sedimentos

Todas las muestras de geoquímica de sedimentos identificadas en el área de estudio corresponden a una sola fuente de información. Estos datos fueron recopilados por el Sernageomin, quien llevo a cabo un estudio de suelos en el área el año 2015. Este estudio entrega los resultados de los análisis químicos que se utilizaron para la confección de la "Geoquímica de sedimentos de la Hoja Pisagua, Regiones de Tarapacá y de Arica y Parinacota" (Astudillo W. et al., 2015), la cual se ubica entre los 19°00' y los 20°00' de latitud sur y desde los 69°00' de longitud oeste hasta el Océano Pacífico, abarcando una superficie aproximada de 14.130 km².

Los puntos de muestreo del estudio de Sernageomin fueron seleccionados de manera tal que formaron una grilla regular, con una densidad de 1 muestra por cada 20 km². El procedimiento utilizado para obtener una muestra representativa del suelo a muestreo sigue los siguientes pasos:

- Dejado las manos libres de elementos u objetos que pudieran contaminar las muestras.
- Ambientar los elementos de muestreo, que correspondieron a palas de PVC.
- Retirado las costras y/o depósitos salinos y sedimentos eólicos superficiales, para obtener el sedimento subyacente a ellos.

En cada punto de muestreo se recolectó al menos una muestra de entre 2kg y 4kg, a una profundidad máxima de unos 15 cm. El material muestreado corresponde a sedimentos de cauces fluviales activos, cauces fluviales recientemente activos, planicies de inundación, terrazas fluviales y pampas. Posteriormente, en el laboratorio del Sernageomin, las muestras fueron preparadas (secadas, tamizadas y pulverizadas) luego se almacenó en frascos plásticos transparentes estériles, destinados al análisis químico (Astudillo W. et al., 2015).

Los frascos con las muestras preparadas (fracción <180 μm pulverizada) se enviaron para sus análisis químicos al laboratorio AcmeLabs (laboratorio canadiense con certificación internacional), en el que, mediante espectrometría de emisión (ICPES) se determinó la abundancia total de: 11 óxidos mayores y menores (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , MnO , TiO_2 , P_2O_5 y Cr_2O_3), con concentraciones expresadas en porcentaje en peso (%) y de 46 elementos trazas (Au, Ag, As, Ba, Be, Bi, Cd, Co, Cs, Cu, Ga, Hf, Hg, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Th, Tl, U, V, W, Y, Zn, Zr, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu), con concentraciones expresadas en partes por millón (ppm), y para el oro en partes por billón (ppb) (Astudillo W. et al., 2015).

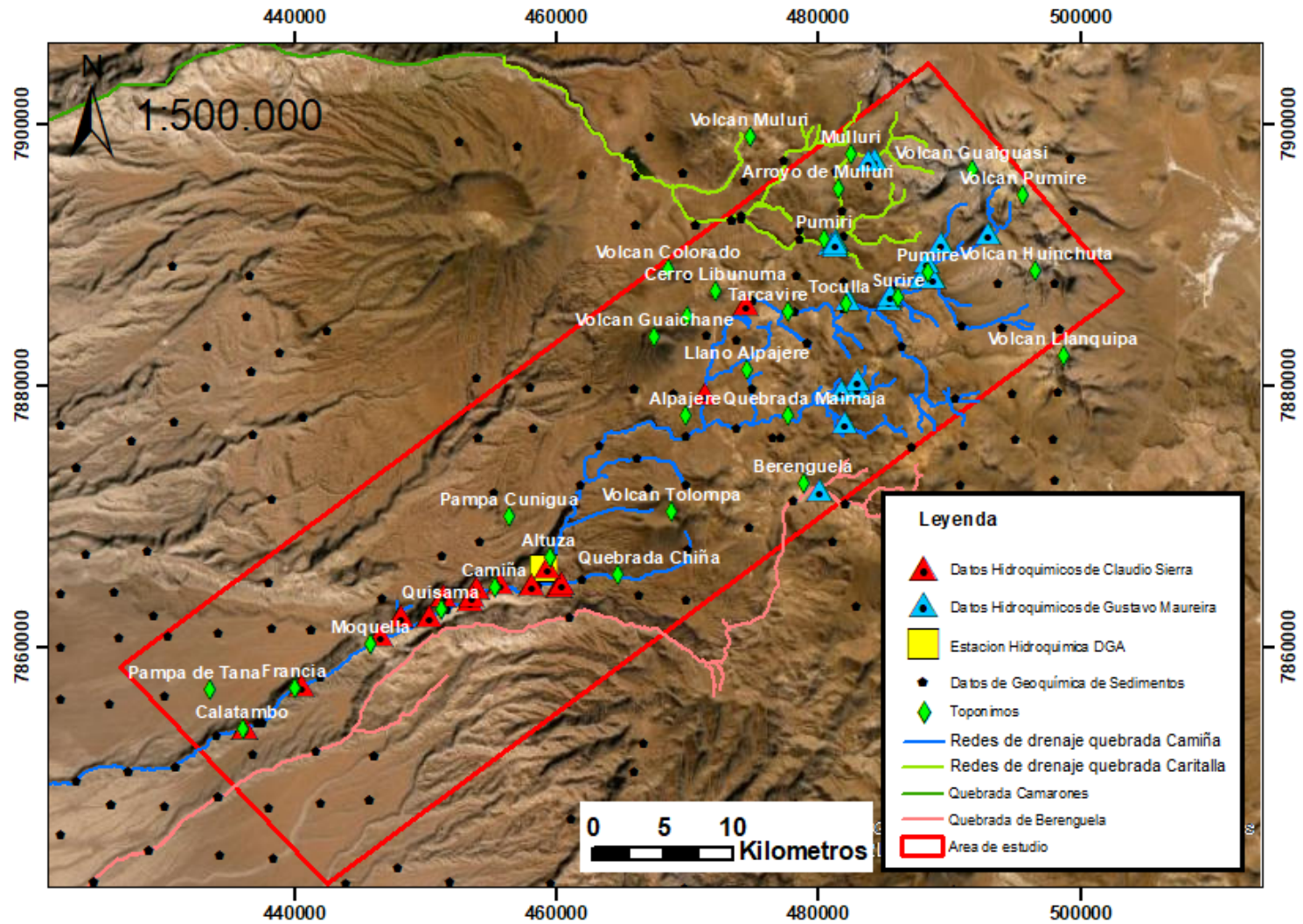


Figura 4.2: Mapa de las muestras Hidroquímica Geoquímica de Sedimentos tomadas en estudios o trabajos anteriores.

4.2. Evaluación de la calidad de la información

4.2.1. Balance Iónico

Frente a la necesidad del aseguramiento/control de calidad del trabajo analítico en la química del recurso hídrico, el cálculo del balance de iones resulta un procedimiento simple, preciso y cuyos datos son fáciles de interpretar (Knights y Stenner, 1999).

El balance de iones es la verificación de que la suma de miliequivalentes (meq) de aniones es aproximadamente igual a la suma de miliequivalentes de cationes; esto último aprovechando la electro-neutralidad del agua, propiedad que puede distorsionarse si existen ciertos fenómenos, ocasionando el conocido y problemático desequilibrio de iones (Knights y Stenner, 1999). Para el cálculo del balance de iónico, se utilizan las sumas de los aniones (HCO_3^- , SO_4^{-2} , Cl^- , NO_3^-) y las suma de los cationes (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}). Cabe mencionar que estas sumas se realizan calculando primero los meq/l de cada anión y catión. La fórmula para el cálculo del Balance iónico (BI) se presenta a continuación:

$$BI = \frac{(rc - ra) * 100}{rc + ra}$$

Donde rc corresponde a la suma de cationes en meq/L y ra corresponde a la suma de aniones en meq/L.

Valores más grandes que el 5% sugieren una significancia de error de Balance iónico suficiente para excluir el dato en el análisis posterior. Sin embargo, en este estudio, dado los escasos datos, se considera un error admisible máximo de +/-10%.

4.2.2. Control de calidad QA/QC (Quality Assurance / Quality Control) de sedimentos

Se trabajó con los elementos químicos el programa Excel. Se sometieron a un control de calidad, en donde se buscaron aquellos datos numéricos que se encontraban bajo el límite de detección (LD). Si los valores bajo el LD instrumental sobrepasaban el 50% del total de datos, se descartaba el elemento químico; de lo contrario, si menos del 50% de los datos se encontraba bajo el LD, los valores bajo el LD se dividían por dos (LD/2), para limitar la pérdida de información. Los datos que se encontraron sobre el LD, se dejan con el mismo valor del LD máximo, para no sobreestimar los resultados.

Aquellas muestras que contaban con duplicados se graficaron en diagramas de dispersión XY. La muestra original se graficó en el eje "X" y el duplicado en el eje "Y", este análisis se realizó para seleccionar aquellos elementos que mostrarán una correlación mayor o igual al 90% en el análisis de duplicados $R^2 > 0,9$, es decir, el menor error. Los elementos seleccionados que tienen una correlación $< 0,9$ son descartados de este estudio. En el caso de las muestras duplicadas con $R^2 > 0,9$, se dejaron el valor de la muestra original.

En la hoja de Pisagua de Sedimentos del Sernageomin, existen muestras de distintos ambientes sedimentarios (figura 4.3), algunas de estas muestras comparten la misma ubicación espacial (X,Y,Z), a pesar de que esto no sea realmente posible, se descartaran las muestras

que en estos puntos no sean de ambiente sedimentario tipo fluvial activo y/o reciente, esto porque para objetos de interpretación, el sedimento fluvial activo y/o reciente es el que está influenciado directamente por el agua.

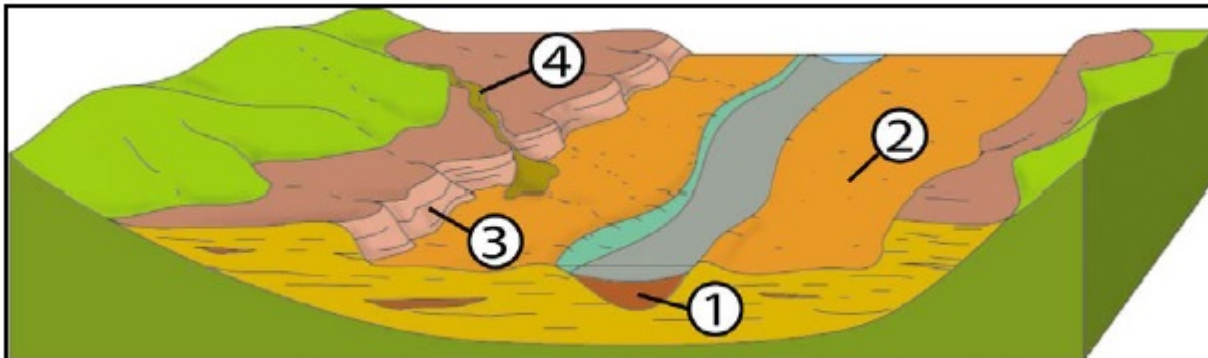


Figura 4.3: Diagrama esquemático explicativo de los ambientes sedimentarios muestreados: cauce fluvial activo o recientemente activo (1), planicie de inundación (2), terraza fluvial (3) y drenaje (4). (Astudillo W. et al., 2015)

4.3. Caracterización hidroquímica

Las fuentes de datos para la caracterización hidroquímica fueron obtenidas exclusivamente en las tesis de Gustavo Maureira (Maureira M., 2013), y Claudio Sierra (Sierra Gutiérrez, 2016). De Maureira M. (2013) se obtuvieron 20 muestras con 14 elementos medidos en aguas, mientras que en Sierra Gutiérrez (2016) se obtuvieron 22 muestras con 21 elementos. De estos elementos, solo 10 estaban en ambos estudios y solo 7 de estos se ocuparon para la caracterización Hidroquímica (K, Na, HCO_3 , Cl, Ca, Mg, SO_4).

La caracterización de las muestras químicas se realizó utilizando diagramas Schoeller- Berkaloff, Diagramas Piper y Diagramas de Stiff. Los diagramas Schoeller- Berkaloff y Piper fueron creados utilizando el software EASY_QUIM v5.0 y los Diagramas de Stiff con Geochemist's Workbench Community Edition 15.0. Además de ayudarse con ArcGIS 10.5 para visualizar los diagramas de Stiff en un mapa.

4.4. Análisis del riesgo por ingesta de As

En parte de las poblaciones de la quebrada Camiña, la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) del Ministerio de Obras Públicas ha facilitado la construcción de sistemas de Agua Potable Rural (APR), por lo que se han instalado plantas de tratamiento de agua potable, que al captar aguas del río disminuyen las concentraciones de As a niveles de potabilidad definidos por la DGA (0,01 mg/l). En el río Camiña, la concentración de As rodea los 0,6 mg/l. Sin embargo, es muy probable que no todos los hogares tengan acceso al agua potable tratada al estar más aislados de las localidades principales, por lo que se evaluarán los riesgos del consumo de agua de las muestras de río y manantiales que se encuentran en el sector poblado.

En este trabajo se replicó el planteamiento utilizado en Daniele et al. (2019) en el que utilizó un enfoque determinista para evaluar los riesgos no cancerígenos del As, que tienen un valor umbral de toxicidad (o dosis de referencia RfD) que está disponible en Chou y Harper (2007), documento desarrollado por la Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) y la Environmental Protection Agency (EPA).

Riesgo no Cancerígeno

Se calculó el riesgo usando un peso humano adulto promedio de 70 kg y una tasa promedio de consumo de agua de 1 litro al día. Para calcular la dosis media diaria, se considera que la dosis dependía únicamente de la ingestión de agua y la concentración de As, por lo que se normalizan los valores con el peso corporal en función del tiempo. Se asumió que la ingestión de 1 L de agua sea de manantial, del río o de pozo ocurrió todos los días durante un período de 30 años (bebiendo agua de solo una fuente). La evaluación del riesgo para la salud se calculó utilizando la ecuación desarrollada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) para metales no cancerígenos como lo muestran Petróczi et al. (2008):

$$THQ = \frac{EF * FD * DIM}{RfD * W * T}$$

Donde THQ es el cociente de peligro objetivo, EF es la frecuencia de exposición (día * años⁻¹), FD es la duración de la exposición (años), DIM es la ingestión diaria de metales (mg * día⁻¹), RfD es la dosis de referencia (mg * kg⁻¹ * día⁻¹), W es el peso corporal promedio de un adulto (kg) y T es el tiempo de exposición promedio para los no carcinógenos (número de días * año⁻¹ * FD).

La EPA (IRIS, 2007) ha obtenido una “Chronic oral Reference Dose” (RfD) de 0,0003 mg As / kg / día para arsénico inorgánico, basada en un “No observable adverse effect level” NOAEL de 0,0008 mg As / kg / día para los efectos dérmicos y las posibles complicaciones vasculares que se dieron en una población agrícola taiwanesa expuesta a arsénico en agua de pozo (W.-P. Tseng, 1977; W. Tseng et al., 1968). La EPA (IRIS, 2007) aplicó un factor de incertidumbre de 3 en el NOAEL para obtener el RfD (esto para tener en cuenta la falta de datos reproductivos y la incertidumbre sobre si el NOAEL representa a todos los individuos sensibles).

Para la evaluación de riesgos, valores de THQ <1 indican que existe un riesgo reducido

para la salud, mientras que los valores entre 1 y 5 representa un nivel de preocupación por el peligro para la salud humana y valores de THQ >5 implican un nivel de riesgo preocupante (Naughton y Petróczi, 2008).

Riesgo Cancerígeno

La posibilidad de riesgos de cáncer a través de la ingesta de niveles cancerígenos de As se estimó utilizando el Riesgo Incremental de Cáncer de por Vida (ILCR) (Liu et al., 2013).

$$ILCR = CDI * CSF$$

Donde CDI (mg/kg/día) es la ingesta diaria crónica de carcinógeno químico que representa la dosis diaria promedio de exposición al carcinógeno químico durante toda la vida.

El ILCR de la EPA de EE. UU. se obtiene utilizando el factor de pendiente de cáncer (CSF), que es el riesgo producido por una dosis promedio de por vida de 1 mg / kg de peso corporal al día y es específico del contaminante (Bamuwanye et al., 2015). La EPA ha determinado que el arsénico inorgánico es un carcinógeno humano y le ha asignado la clasificación de cáncer, Grupo A (IRIS, 2007). Las estimaciones cuantitativas de la EPA del riesgo carcinogénico de las exposiciones orales incluyen un factor de pendiente de cáncer de 1,5 mg / kg / día.

El valor ILCR en el consumo de agua representa la probabilidad de riesgos para la salud de por vida de un individuo debido a la exposición a elementos pesados cancerígenos (Pepper et al., 2012). El nivel de riesgo de cáncer aceptable (ILCR) para fines regulatorios se considera dentro del rango de 10^{-6} a 10^{-4} (Li y Zhang, 2010). El valor de CDI se calculó sobre la base de la siguiente ecuación:

$$CDI = \frac{C * DI}{BW}$$

Donde C es la concentración del agua para beber contaminada (mg/L). DI es la tasa media de consumo de agua potable (L/día). BW es el peso corporal en (kg). Se calculó el riesgo usando un peso humano adulto promedio de 70 kg y una tasa promedio de consumo de agua de 1 litro al día.

4.5. Variación normal geoquímica de sedimentos

Siguiendo la metodología de Sepulveda Donoso (2020), para observar de manera representativa los elementos químicos de cada muestra de sedimentos de este estudio, se emplean dos metodologías:

(i) la técnica iterativa $\pm 2\sigma$ que utiliza el promedio y la desviación estándar (σ) y que consiste en que todos los valores más allá de la media $\pm 2\sigma$ se omiten del conjunto de datos y el nuevo rango medio $\pm 2\sigma$ calcula utilizando los datos que no fueron omitidos. Este método se repite hasta que el total de los valores del conjunto de datos se encuentren dentro del rango $\pm 2\sigma$ para asemejar los datos a una distribución normal (Gałuszka et al., 2015; Matschullat et al., 2000).

Y (ii) percentiles, se calculan las medidas de posición 25 y 75, para conocer el alcance de los datos con la siguiente ecuación:

$$P_k = L_{i-1} + \frac{\frac{K+N}{100} - F_{i-1}}{f_i} * C_i$$

Donde L_{i-1} corresponde al límite inferior del intervalo percentil k, F_{i-1} corresponde a la frecuencia acumulada hasta el intervalo anterior al percentil k, f_i corresponde a la frecuencia del intervalo percentil k y C_i corresponde a la amplitud del intervalo percentil k (Rustom Jabbaz, 2012).

De esta manera, se calculó una línea de base geoquímica con la información disponible para sedimentos. Se definieron los rangos de los elementos que caracterizan la zona de estudio, nombrando de esta manera como anomalías positivas a aquellas concentraciones que se encuentran sobre el límite superior de la línea base, y anomalías negativas a las concentraciones que se encuentran bajo el límite inferior de la línea de base geoquímica (Quiroz Villanueva, 2018).

4.6. Niveles de enriquecimiento de los elementos y comparación con regulaciones ambientales vigentes

Para analizar los niveles de enriquecimiento de los elementos químicos de la Geoquímica de Sedimentos de la Hoja Pisagua de Sernageomin Astudillo W. et al. (2015), las concentraciones fueron comparadas con los valores propuestos para la corteza continental superior o Upper Continental Crust (UCC) planteados por Rudnick et al. (2003).

Por otro lado, para regular la calidad del agua y establecer valores límite de concentración del As se utilizaron los valores planteados por la norma calidad del agua potable (Nch 409/1) de Chile y la Environmental Protection Agency (EPA) de Estados Unidos.

Para los sedimentos de agua dulce debido a que Chile no cuenta con una normativa de suelos y/o sedimentos se compararon las concentraciones de los sedimentos con aquellas propuestas por la CCME mediante la guía provisional de calidad de sedimentos o Interim Sediment Quality Guideline (ISQG) y el nivel de efecto probable o Probable Effects Level (PEL)(CEQG'S, 2002).

Capítulo 5

Resultados

5.1. Hidroquímica

En esta sección se muestran y explican los desarrollos para obtener los distintos resultados sobre la Hidroquímica de las muestras de agua en pozos, ríos y manantiales. Estos resultados tienen enfoques en el tipo de agua al cual pertenece cada muestra y posteriormente un análisis sobre las concentraciones de As en cada una.

Las fuentes de datos para estos análisis fueron obtenidas en las tesis de Gustavo Maureira (Maureira M., 2013), y Claudio Sierra (Sierra Gutiérrez, 2016). En los estos autores, se compartían las concentraciones de 10 elementos, de los cuales se ocuparon solo 8 (K, Na, HCO₃, Cl, Ca, Mg, SO₄, As). Los otros datos a utilizar fueron los datos de monitoreo de calidad de aguas superficiales de la DGA en la quebrada Camiña en Altusa, los cuales fueron utilizados para ver la variación de As a través del tiempo. Además de los datos de elementos y compuestos químicos obtenidos de las tesis (Sierra Gutiérrez, 2016) y Maureira M. (2013), fueron relevantes el tipo de muestra y los parámetros fisicoquímicos como los Sólidos Disueltos Totales y temperatura. Toda esta información mencionada se muestra en la tabla A.2 en los anexos.

5.1.1. Balance iónico

Previo a la caracterización e interpretación de los datos químicos, fue necesario evaluar la coherencia y consistencia de estos. Para esto es necesario establecer un balance iónico que permita observar si existen errores analíticos de considerable relevancia en la medición. Primero se calcularon las concentraciones de iones y cationes en cada muestra, pero en Meq/l (la concentración de cada uno de los elemento en mg/l se tuvo que dividir por su peso equivalente para obtener la concentración en Meq/L). Luego de eso se aplicó la formula descrita en la sección 4.2.1 para calcular el balance iónico de cada muestra.

De un total de 42 muestras, 11 de estas superaron el umbral de 10% de error en el balance iónico (tabla 5.1), aun así, una muestra que superó este umbral fue admitida para el posterior análisis, esto para evitar la ausencia de datos de muestra de río al frente del poblado de Camiña, por lo que finalmente se seleccionaron 32 muestras para ser trabajadas. Dentro de estas 32 muestras, 27 están bajo el 5% de error en el balance iónico, mientras que 4 están entre 5% y 10% (C1, CC-8 y CC9) y una por encima del umbral, con un 12,73% (CC-10).

Tabla 5.1: Error del balance iónico calculado

Muestra	Error balance ionico:	Muestra	Error balance ionico:	Muestra	Error balance ionico:
C1	8,0	CC-8	8,2	PUL	-4,1
C2	-3,4	CC-9	6,8	PUM	1,0
C3	-21,3	CC-10	12,73 ^a	TU	-1,2
C4	-35,3	CC-11	4,8	NOC	-2,6
C5	-47,7	CC-12	2,6	AVE	-1,4
C6	-21,4	CC-13	4,7	MAN	-26,6
C7	-3,9	CC-14	5,0	MAS	-3,8
C8	-18,4	CC-15	3,8	MUY	1,6
C9	-19,5	Avo	2,7	PU1	0,5
C10	-13,7	AN	-0,4	PU2	-1,9
CC-3	10,0	BE	-3,0	PU3	-2,4
CC-4	-2,3	CO	-33,2	PU4	-2,8
CC-5	18,9	JA	-3,8	MU1	2,3
CC-6	4,0	JU	-1,9	MU2	3,0

^a Único valor sobre el 10% aceptado

5.1.2. Diagrama de Piper

Las muestras de agua se clasifican a través del diagrama de Piper (figura 5.1). En el diagrama se puede observar de manera general que los cationes presentes hacen que las muestras de agua varíen entre muestras cálcicas y sódico – potásicas, mientras que en los aniones las muestras varían entre aguas cloruradas y sulfatadas. Los tipos predominantes de agua se definen gracias a variaciones de las concentraciones de los cationes Ca^{2+} - Na^+ y los aniones Cl^- - SO_4^{2+} . En el diagrama se pueden notar 3 grupos principales:

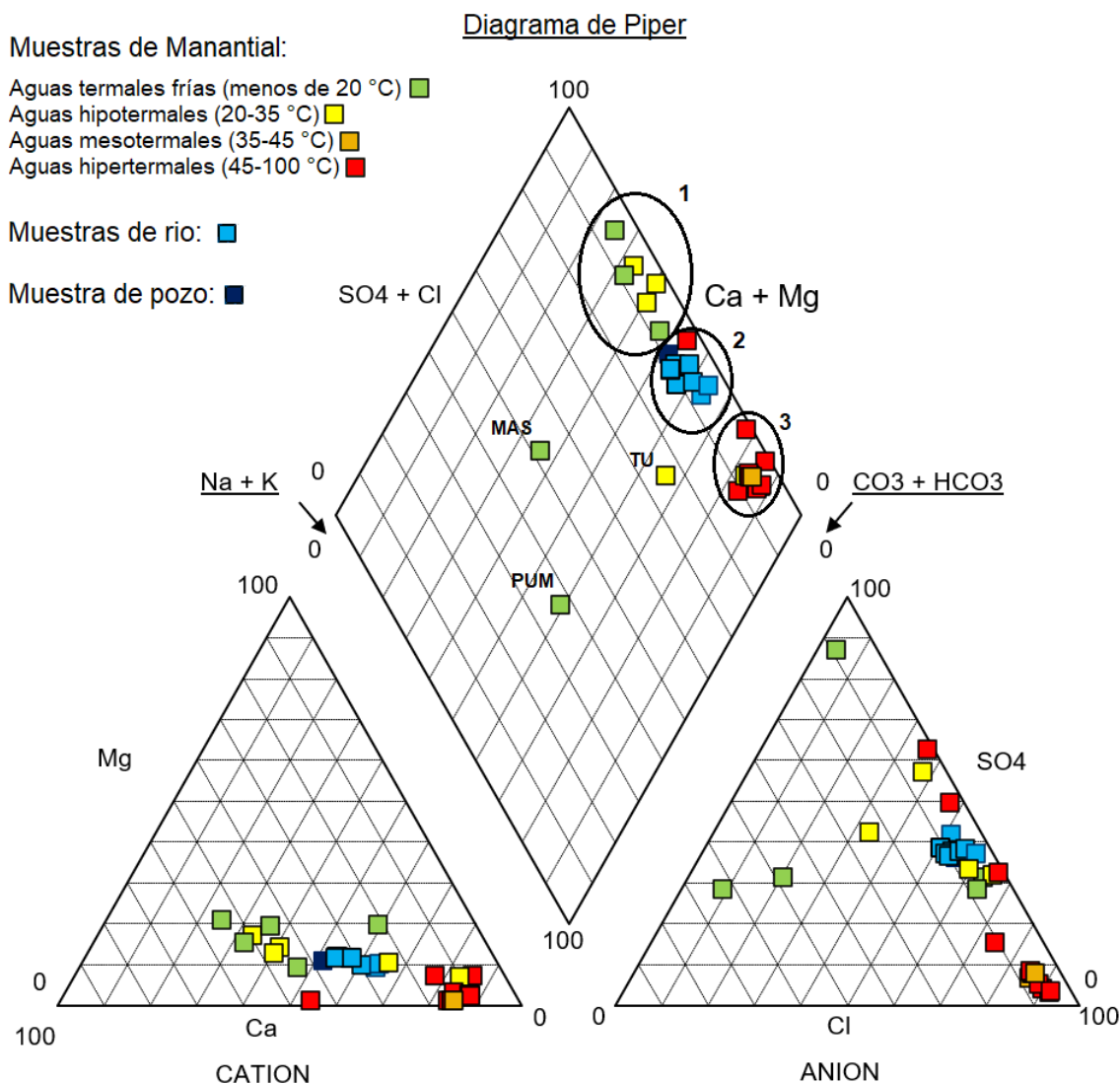


Figura 5.1: Diagrama Piper con las muestras del área de estudio

Un primer grupo, corresponde a la totalidad de aguas de los manantiales de la Depresión Central y la Precordillera, a excepción de una muestra de manantial que proviene de la Cordillera Occidental, específicamente del sector de quebrada Maimaja. Este primer grupo se subclasifica en 3 distintos, como aguas cloruradas cálcicas (donde entran 3 muestras), luego como sulfatadas cálcicas (donde entran 2 muestras) y finalmente una como clorurada sódica – cálcica. Todas estas aguas de manantial corresponden a aguas hipotermas y termales frías.

El segundo grupo, representa a la totalidad de las muestras de agua de río (cuadrados celestes), incluyendo también la única muestra de pozo (ubicada en la Depresión Central) y una muestra de manantial que proviene de la Cordillera Occidental, del sector de Berenguela. Las muestras de este grupo se clasifican como cloruradas - sulfatadas sódicas.

El tercer grupo, representa solo muestras de agua de manantiales de la Cordillera Occidental. Las muestras de este grupo se clasifican como cloruradas sódicas, a excepción de una muestra la cual está ubicada en las faldas del volcán Pumire, esta muestra es clasificada como Sulfatada Sódica. Casi todas las muestras en este grupo corresponden a aguas mesotermiales e hipertermales a excepción de una muestra hipotermal.

Existen 3 excepciones que no clasifican dentro de niun grupo dentro del diagrama diamante de Piper, estas corresponden a muestras de manantiales de la Cordillera Occidental, las cuales son:

(MAS), ubicada en el brazo sur de la quebrada Maimaja, correspondería a una muestra bicarbonatada cálcica. Esta muestra es manantial de Cordillera Occidental y corresponde a una muestra de agua termal fría.

(TU), en las ruinas de Toculla (sector Toculla), correspondería a una muestra sulfatada-clorurada sódica. Esta muestra está cerca de la zona donde se clasificaron las muestras del grupo 3 y corresponde a una muestra de agua mesotermal.

(PUM), ubicada cerca de Pumire, correspondería a una muestra bicarbonatada sódica. Esta muestra es manantial de Cordillera Occidental y corresponde a una muestra de agua termal fría.

5.1.3. Diagrama de Schoeller Berkaloff

Dentro de lo que son las concentraciones de iones en las muestras de agua, los iones de Na^+ y Cl^- , son las que muestran una mayor variabilidad, permitiendo diferenciar las muestras de mejor manera en comparación a los otros elementos que se presentan en el diagrama de Schoeller Berkaloff, puesto que en estos elementos se nota una mayor diferencia a la hora de formar conjuntos. También se tomaron en cuenta los Sólidos Disueltos Totales (SDT) a la hora de establecer conjuntos, puesto que respaldan que efectivamente las muestras tienen mayor concentración total de iones más que otras y no solamente viendo las diferencias en los iones de Na^+ y Cl^- . Las muestras de agua se pueden clasificar en 3 zonas dentro del diagrama de Schoeller Berkaloff (figura 5.2).

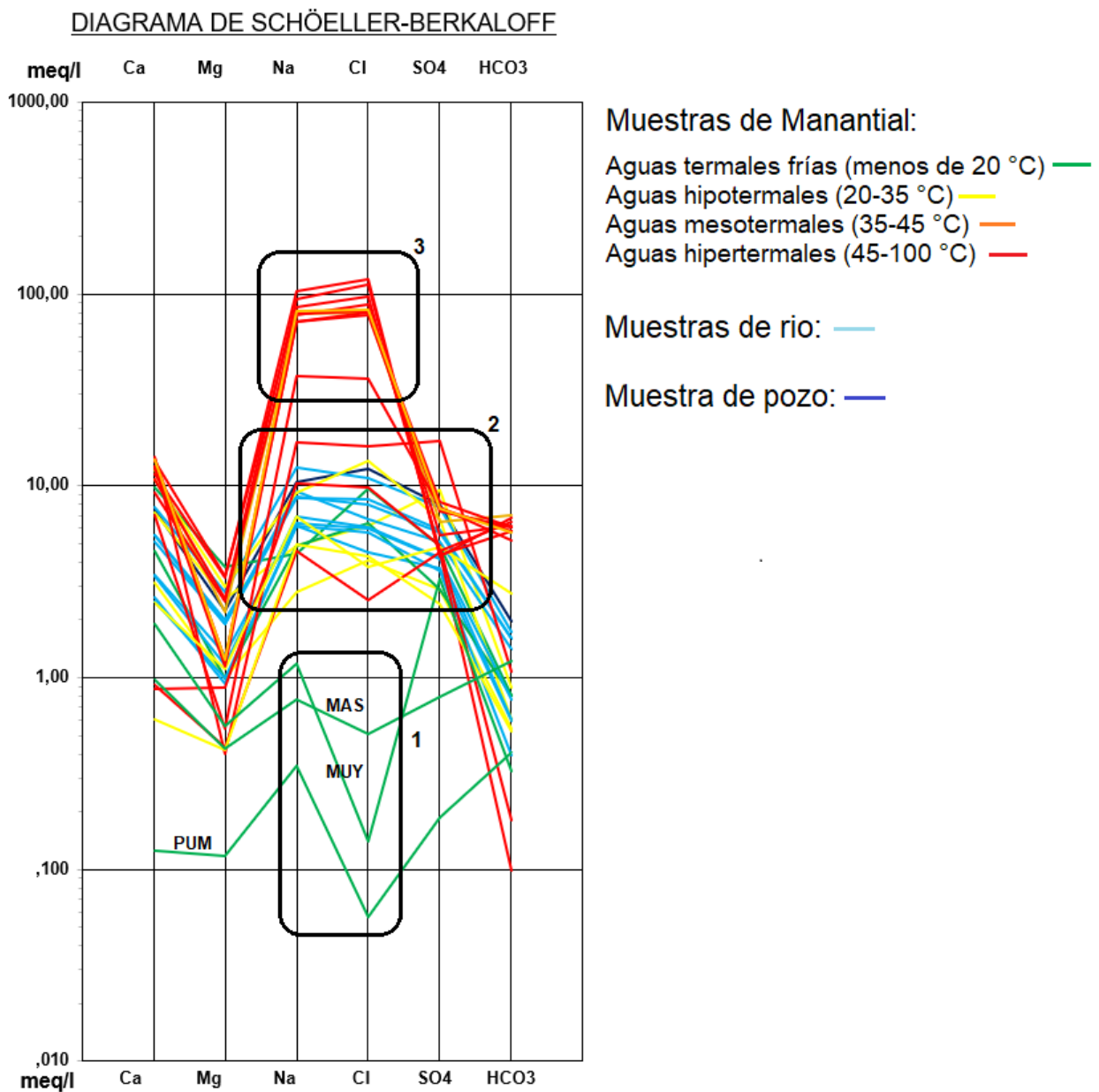


Figura 5.2: Diagrama Schoeller Berkaloff muestras área de estudio

El primer grupo se caracteriza exclusivamente por 3 muestras de manantial de la Cordillera Occidental (PUM, MUY, MAS), estas demuestran tener concentraciones muy bajas de los iones de Na^+ y Cl^- en comparación a todas las demás muestras, además de que estas muestras tienen valores de SDT dentro del rango de 50 mg/l – 300 mg/l. PUM excepcionalmente presenta concentraciones muy bajas respecto a Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- y SO_4^{-2} , excepto por el HCO_3^- que presenta concentraciones similares a otras muestras. Adema estas 3 muestras de manantial de la Cordillera Occidental corresponden a aguas termales frías, de menos de 20°C.

El segundo Grupo o zona dentro del diagrama se caracteriza por las muestras de río, la muestra de pozo y de los manantiales de la Precordillera, la Depresión Central y parte de los Manantiales de la Cordillera Occidental. Estas muestras se caracterizan por tener concentraciones de los iones dentro de rangos de 1 Meq/L y 10 Meq/L. Estas muestras tienen un parámetro fisicoquímico SDT dentro del rango de 400 mg/l – 2300 mg/l. Este segundo grupo en el diagrama de Schoeller Berkloff comparte las mismas muestras del grupo 1 y 2 de las muestras del Diagrama de Piper, a excepción de MUY.

El tercer grupo se caracteriza exclusivamente por muestras de aguas de manantial de la Cordillera Occidental, este grupo destaca, además de por su sobresaliente contenido de Na^+ y Cl^- en comparación a las otras muestras, en que todas sus muestras tienen un contenido muy alto de SDT por encima de los 3000 mg/l, mientras que todas las otras muestras en el estudio son valores inferiores a 2300 mg/l. Este tercer grupo, se puede relacionar con el tercer grupo del diagrama de Piper, puesto que comparte 10 muestras de las 13 muestras definidas en el de Piper.

5.1.4. Diagrama Stiff

En las Figuras 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6 se presentan los diagramas Stiff de la muestra de pozo, de los manantiales y de las de río del área de estudio. Para ello se tuvieron que presentar en 4 distintas escalas de Meq/l para apreciar bien las diferencias entre uno y otros.

En las muestras de río, en la figura 5.3 existe un aumento de las concentraciones de los elementos Na, K, Ca, Mg y Cl a medida que se avanza hacia el oeste río abajo; en la zona alta de la quebrada Camiña, en la Cordillera Occidental estas concentraciones (de río) son relativamente bajas en comparación a aguas abajo. Luego en el sector de Altuzza, la muestra CC-14 muestra un repunte de estos elementos mencionados, para continuar aumentando hasta la muestra más aguas abajo (CC-8) que contiene la mayor concentración de estos. La concentración de SO_4^{2+} , aumenta levemente aguas abajo, mientras que la concentración de HCO_3^- no aumenta de manera significativa en todas las muestras de río. Además de verlo a través de las concentraciones de los iones, esta variación positiva de las concentraciones en las muestras de río es posible apreciarla en los valores de SDT de cada muestra de río (tabla 5.2). Sin embargo, la muestra CC-11 no sigue por poco esta regla, disminuyendo ligeramente después de CC-12 (disminuye 52 mg/l), luego CC-8 es más alta que todas las anteriores.

Tabla 5.2: Muestras de río de oeste a este. Muestra CC-11 no cumple con la hipótesis de que el valor de SDT aumenta río abajo.

Muestras de río de oeste a este	SDT(mg/l)
C1	576
CC-15	623
CC-14	717
CC-13	747
CC-10	947
CC-12	1012
CC-11	960
CC-8	1400

La única muestra de pozo, la muestra C2 (figura 5.3), se caracteriza por tener una concentración de Na^+ y Cl^- estable en 15 Meq/l, muy bajas concentraciones de HCO_3^- y Mg^{2+} y concentraciones de SO_4^{2+} y Ca^{2+} cercanas a los 10 Meq/l. La muestra C2 contiene un valor de SDT 1235 mg/l, lo que es un valor aproximadamente medio de SDT de las muestras CC-8 y CC-11; además que geográficamente C2 se encuentra a la mitad entre CC-8 y CC-11, por lo que podría ser buen reflejo de como sería el valor de SDT en una muestra de río en la posición de C2.

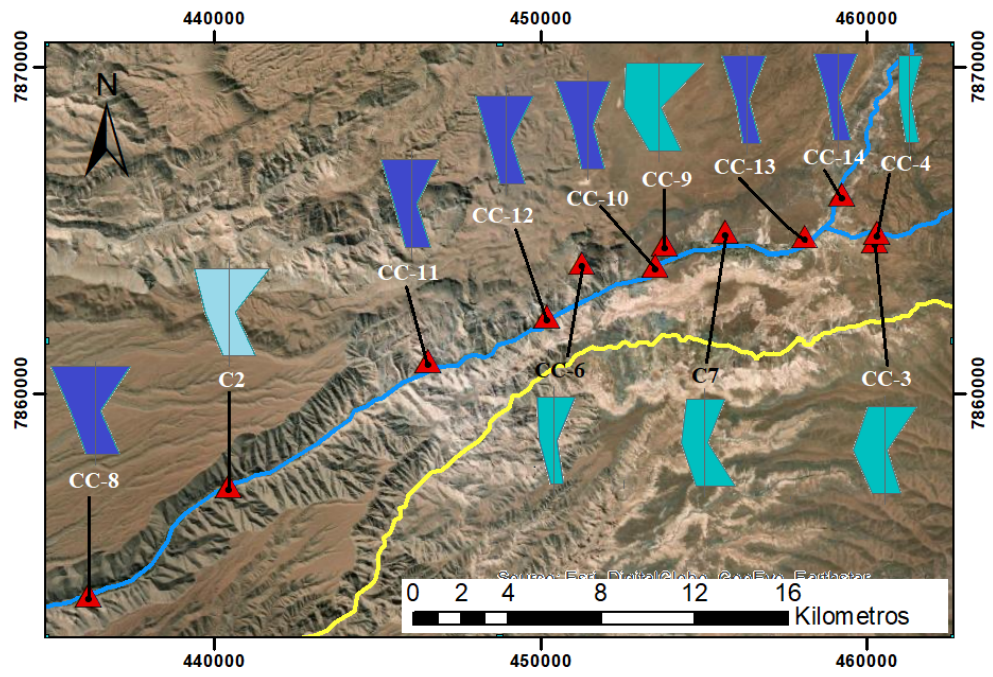
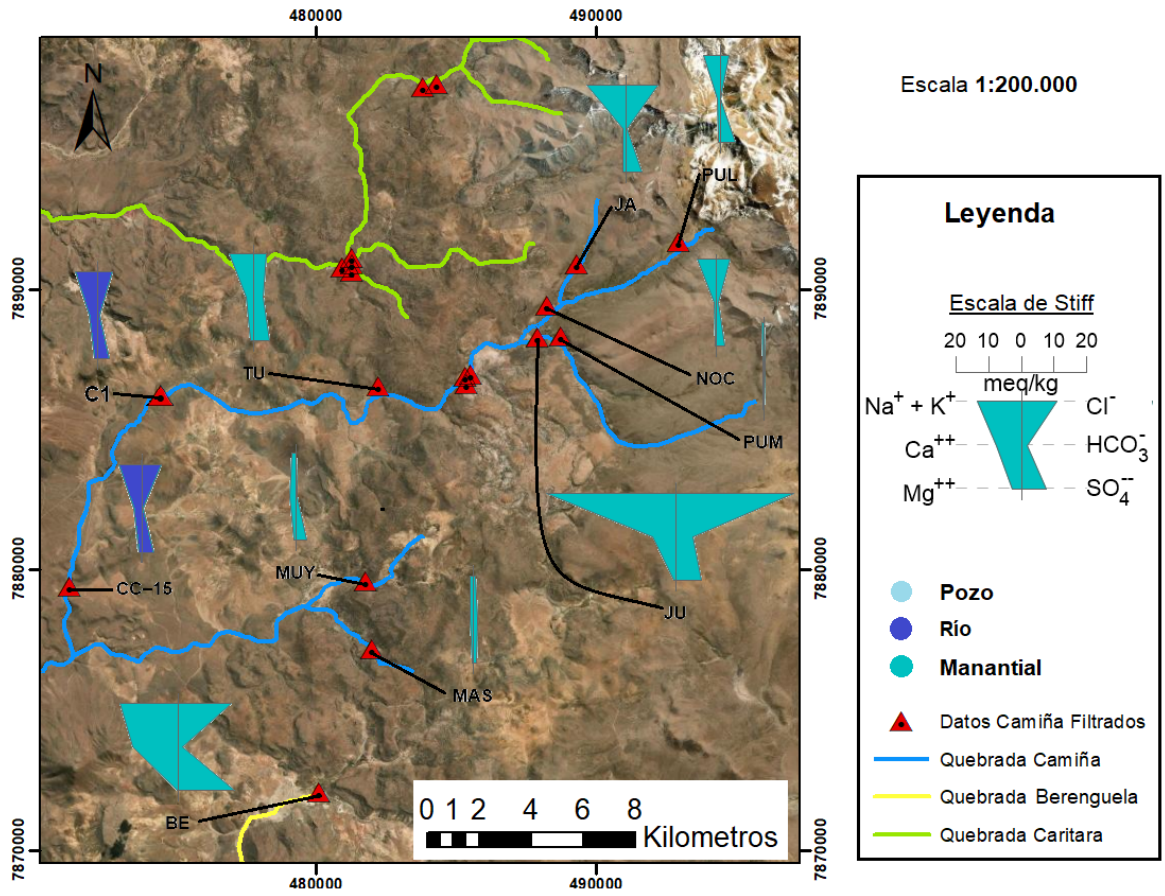


Figura 5.3: Mapa con diagramas de Stiff, escala 20 Meq/l

Las muestras de manantiales evidencian gran variedad a la hora de clasificarlas. Las muestras en la cuenca de la quebrada Caritalla (muestras MU1, MU2 y PU1, PU2, PU3, PU4) muestran concentraciones cercanas a los 100 Meq/L de Na^+ y Cl^- (figura 5.4). Mientras que en la cuenca de la quebrada Camiña, en el sector de Surire, las muestras de AVO, AN, AVE muestran concentraciones similares, cercanas a los 100 Meq/L (figura 5.4); en el sector de Pumire, JU resalta con 40 Meq/L para las concentraciones de Na^+ y Cl^- . Este conjunto podría ser comparado con el grupo 3 del día grama de Schoeller Berkaloff.

La muestra CC-9 es la muestra que presenta mayor concentración de Ca^{2+} , Na^+ y Cl^- en el sector bajo de la cuenca Camiña, comparte una alta concentración de Ca^{2+} con CC-3 (figura 5.3).

Las muestras C7 y CC-6 (figura 5.3), presentan similares concentraciones de iones de Na^+ y Cl^- , aunque presentan una marcada diferencia en la concentración de SO_4^{2+} .

Las muestras de PUL, JA, TU (figura 5.3) muestran concentraciones similares para SO_4^{2+} , de unos 6 Meq/l. Las muestras NOC y MUY (figura 5.3) muestran un bajo nivel de SO_4^{2+} , similares a las muestras CC-6 y CC-4, con 3 Meq/L.

La muestra BE en la quebrada Berenguela, muestra la con mayor concentración de SO_4^{2+} de toda el área (figura 5.3).

Las muestras MUY, MAS y PUM (figura 5.5) tienen concentración de los elementos muy baja, solo MUY sobresale en su concentración de SO_4^{2+} y PUM (figura 5.6) destaca porque todos sus elementos mayoritarios están bajo la unidad de Meq/l de concentración.

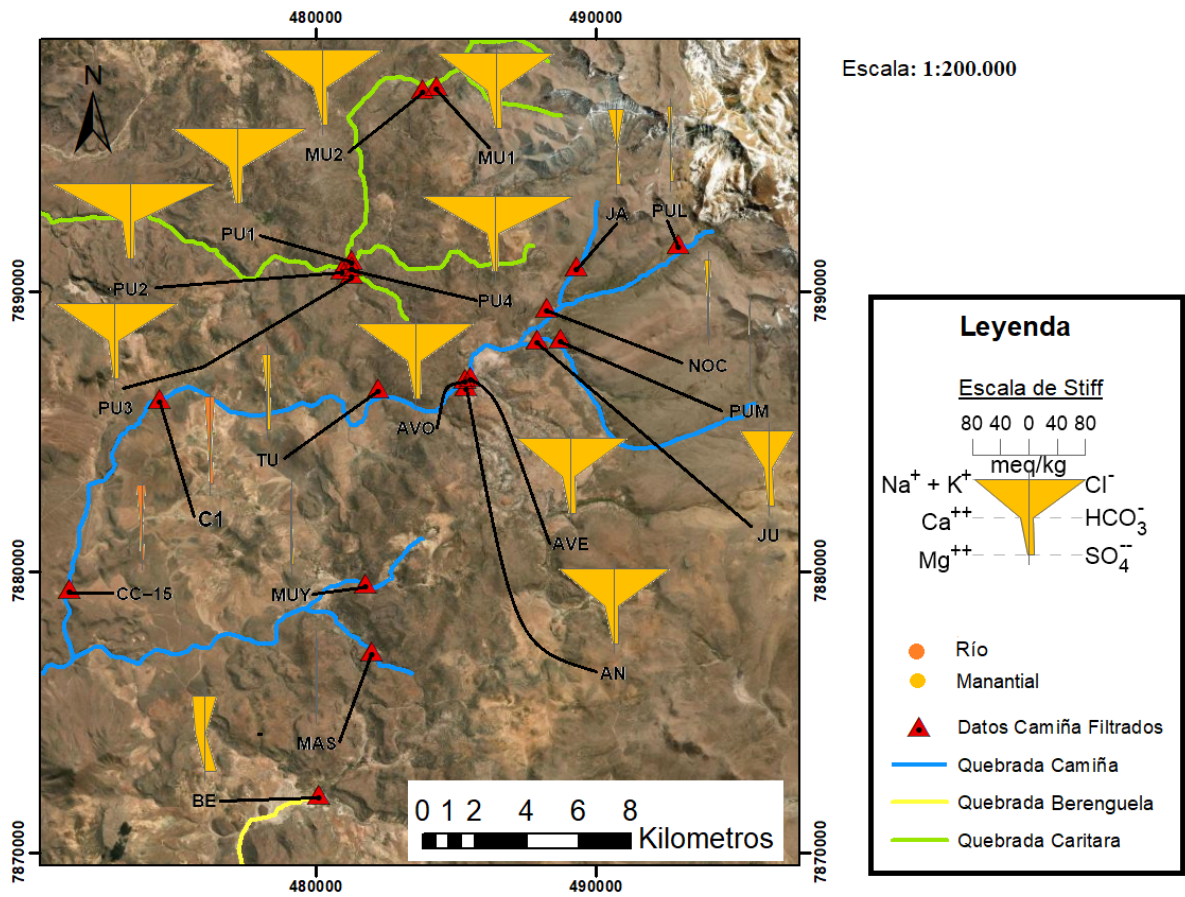


Figura 5.4: Mapa con diagramas de Stiff, escala 80 Meq/l

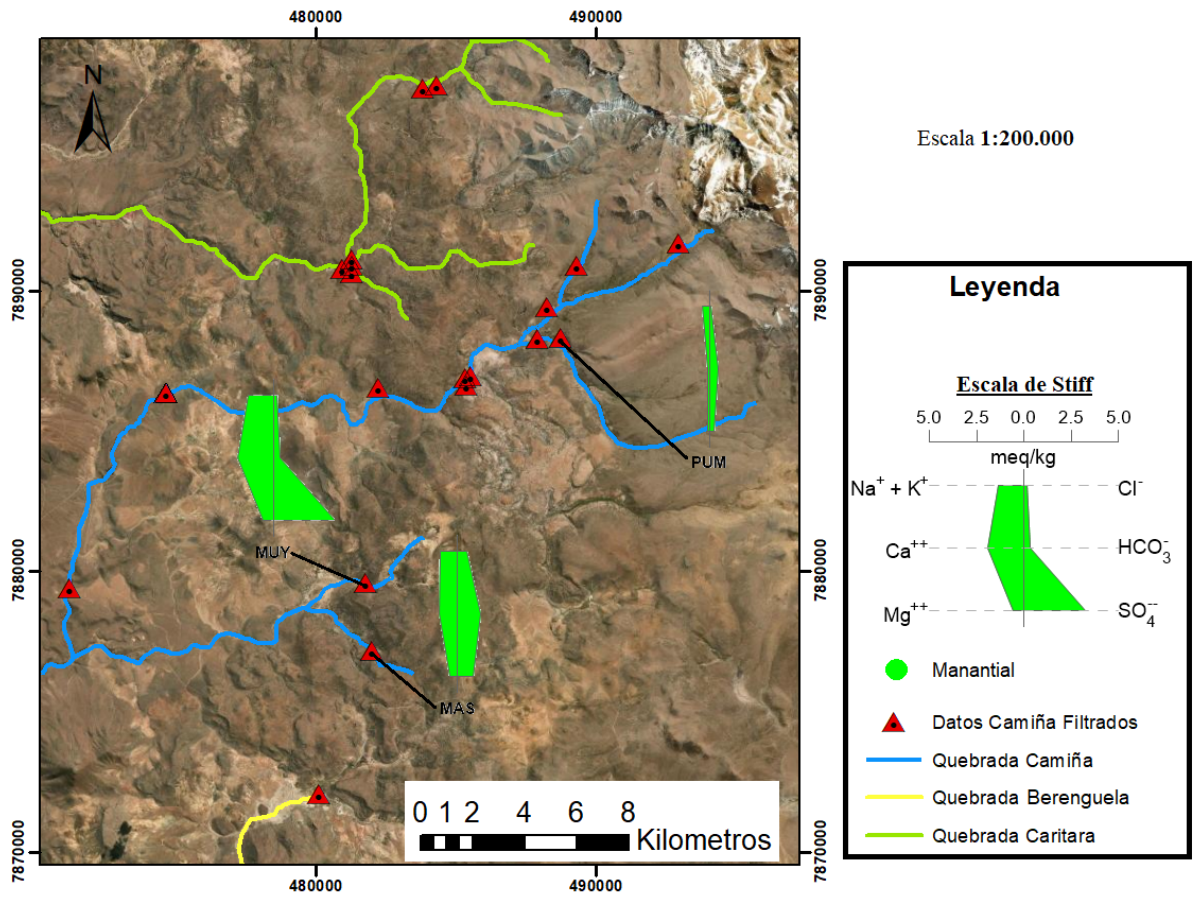


Figura 5.5: Mapa con diagramas de Stiff, escala 5 Meq/

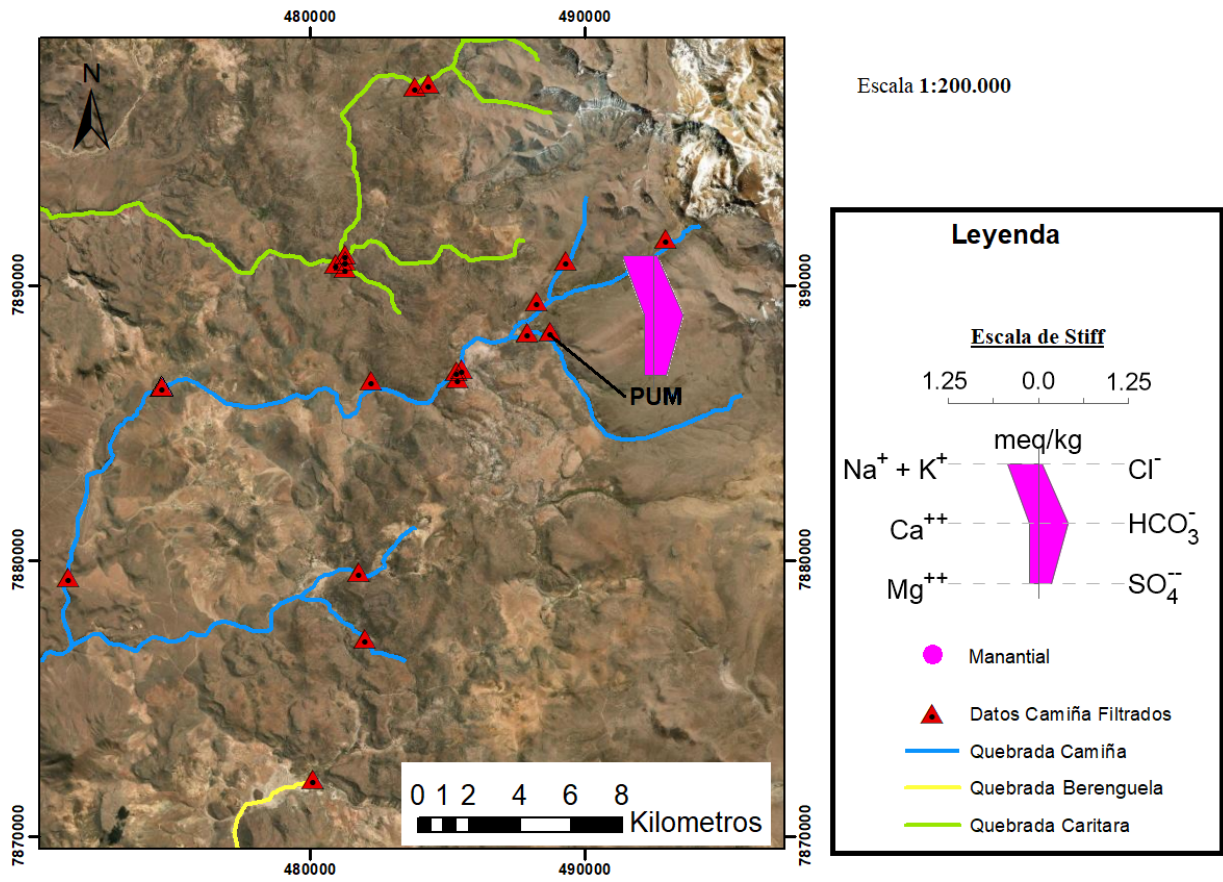


Figura 5.6: Mapa con diagramas de Stiff, escala 1,25 Meq/l

5.1.5. Concentraciones y evolución temporal y espacial del Arsénico en aguas

En esta sección se buscó dimensionar de manera gráfica los distintos datos que se recopilaban sobre el As en aguas. Para ello con el fin de conocer las concentraciones de cada punto de muestreo, se graficaron en tablas de As (mg/l) por punto de muestreo, esto para mostrar que existen diferencias notables entre cada una. Para las muestras con una concentración menor a 1 mg/l, se hizo un gráfico anexo, para visualizar a una menor escala sus concentraciones. Las concentraciones de estas últimas muestras (menores a 1 mg/l) se comparan a los estándares establecidos por la NCh 409 y la NCh 1333, para definir que aguas son potables para personas / animales y cuales son aptas para el regadío. Dentro de las muestras recogidas, solo las muestras MU1 y MU2 no presentan datos de concentración de As.

En la figura 5.7A se observa que las concentraciones en las muestras BE, JU, PU1, PU2, PU3, PU4, AVE, AVO, AN superan con creces la concentración de mg/l de As a diferencia de las muestras restantes. Todas estas muestras están sobre 1 mg/l de As y de por sí superan los umbrales establecidos para agua potable y agua de riego.

En la figura 5.7B se puede observar como las muestras CC-6, C7, CC-8, CC-11, CC-12, CC-10, CC-9, NOC, CC-13, CC-14, CC-15, TU superan el umbral de 0,1 mg/l de As que define las aguas aptas para el riego y con creces el umbral de agua potable de 0,01 mg/l de As. Luego las muestras MUY, MAS, PUM, CC-3, CC-4 superan el umbral de agua potable, pero se encuentran bajo del umbral para uso de riego. Finalmente, las muestras JA, PUL, C2 y C1 están bajo el umbral de límite de concentración para agua potable, por lo que estas muestras cumplen el propósito para ser bebible por animales / personas y también ser usadas para la agricultura

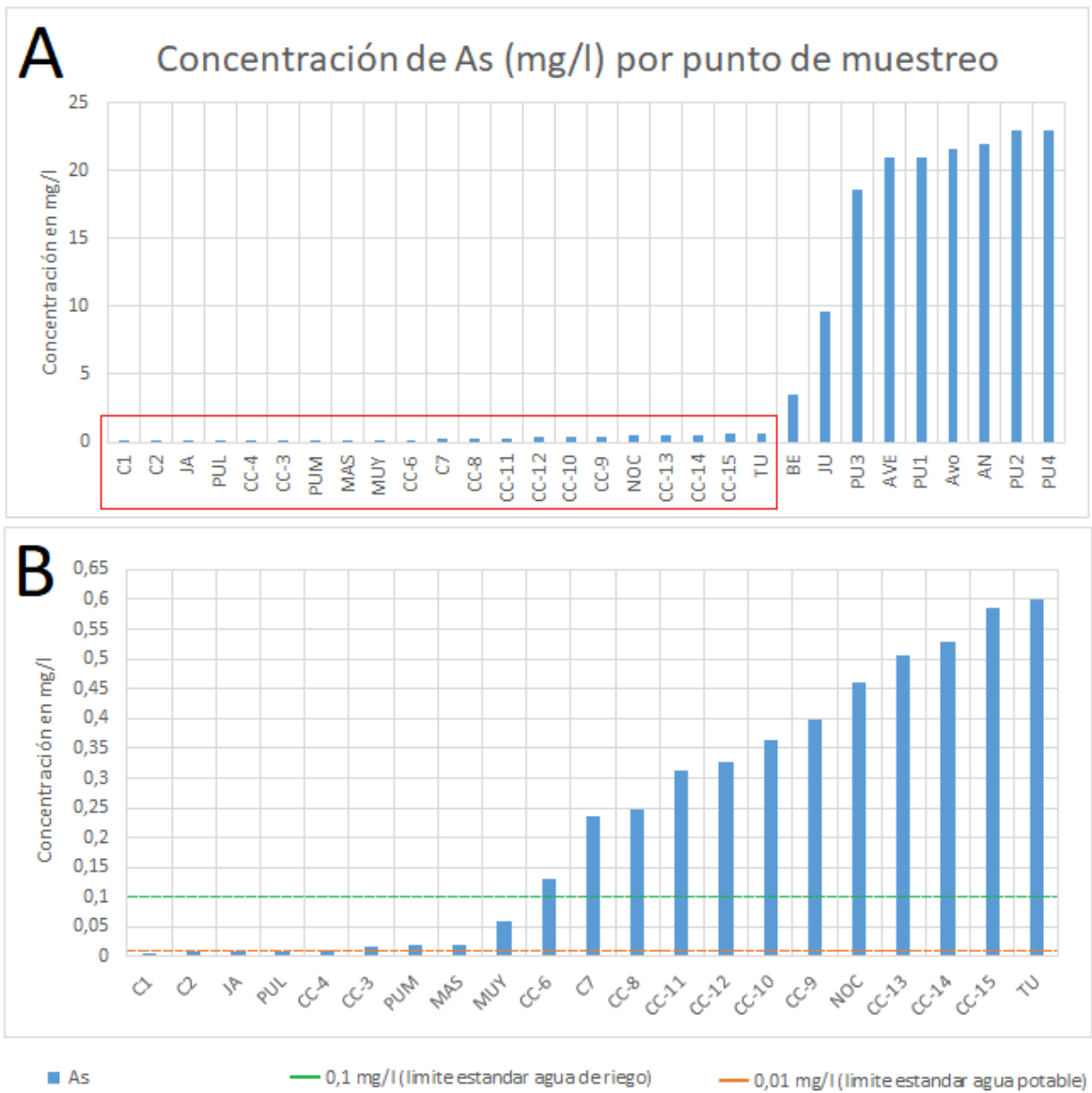


Figura 5.7: Concentración de As (mg/l) por punto de muestreo y comparación respecto a las normas de agua vigentes. El cuadro B corresponde a un zoom de A para cierto grupo de muestras de bajas concentraciones que están en el recuadro rojo dentro del cuadro A

Para conocer una aproximación espacial del As se crearon tres mapas de isoconcentraciones de As en aguas en el área de estudio, dos de estos mapas corresponde a muestras de río (creados interpolando valores con método Kriging ordinario con semivariograma esférico) y el otro corresponde a las fuentes de manantiales y pozos (creado interpolando valores con método IDW (Ponderación de distancia inversa)).

De la figura 5.8 se puede observar que la concentración de As disminuye hacia la muestra C1, también que las muestras CC-15 y CC-14 están en "islas" de altas concentraciones y que desde la muestra CC-14 hacia el suroeste se aprecia un disminución en las concentraciones de As.

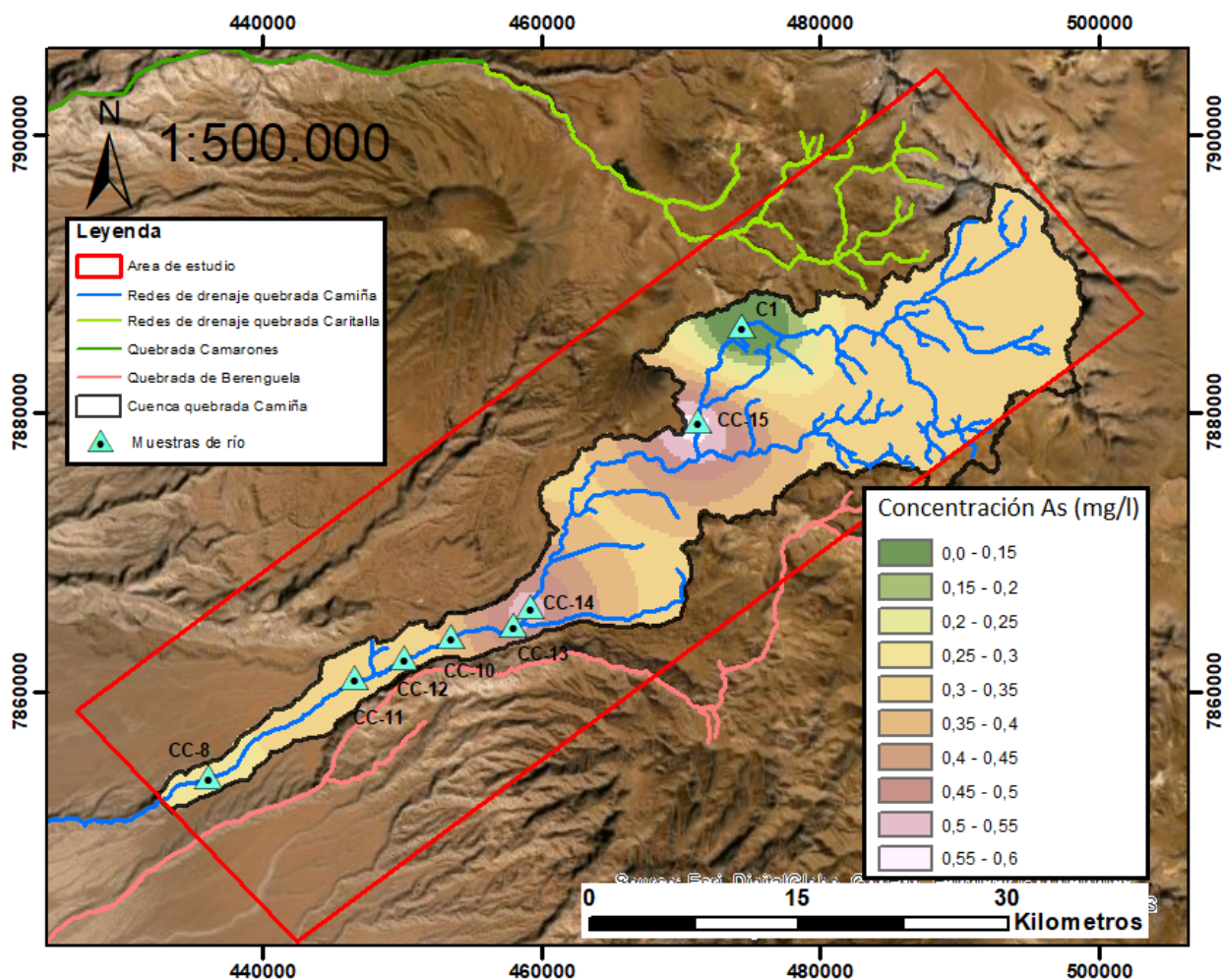


Figura 5.8: Mapa de concentraciones de As (mg/l) de muestras de río interpolada a la cuenca de la quebrada Camiña.

Esta interpolación no muestra ser muy fidedigna, ya que demuestra que hay puntos exclusivos donde el As se concentra más mientras que a su alrededor disminuye y luego vuelve a crecer (punto CC-15 hacia punto CC-14) y el punto C1, que hace que se cree un área exclusiva donde el As es extremadamente bajo.

Para mejorar la calidad de la interpolación, se creó la figura 5.9, la cual descarta la muestra C1 de la interpolación y logra una imagen mucho más concluyente. De la figura 5.9 se puede observar que la concentración de As disminuye hacia río abajo, siendo el área alrededor de CC-15 y la parte alta de la cuenca Camiña de concentraciones más altas. Esta figura (5.9) tiene una mayor coherencia que la figura 5.8, ya que no existen “islas” o “depresiones” de mayores o menores concentraciones como lo es en la figura 5.8, además que las concentraciones de As se notan que van de mayor a menor en el sentido del río (este a oeste).

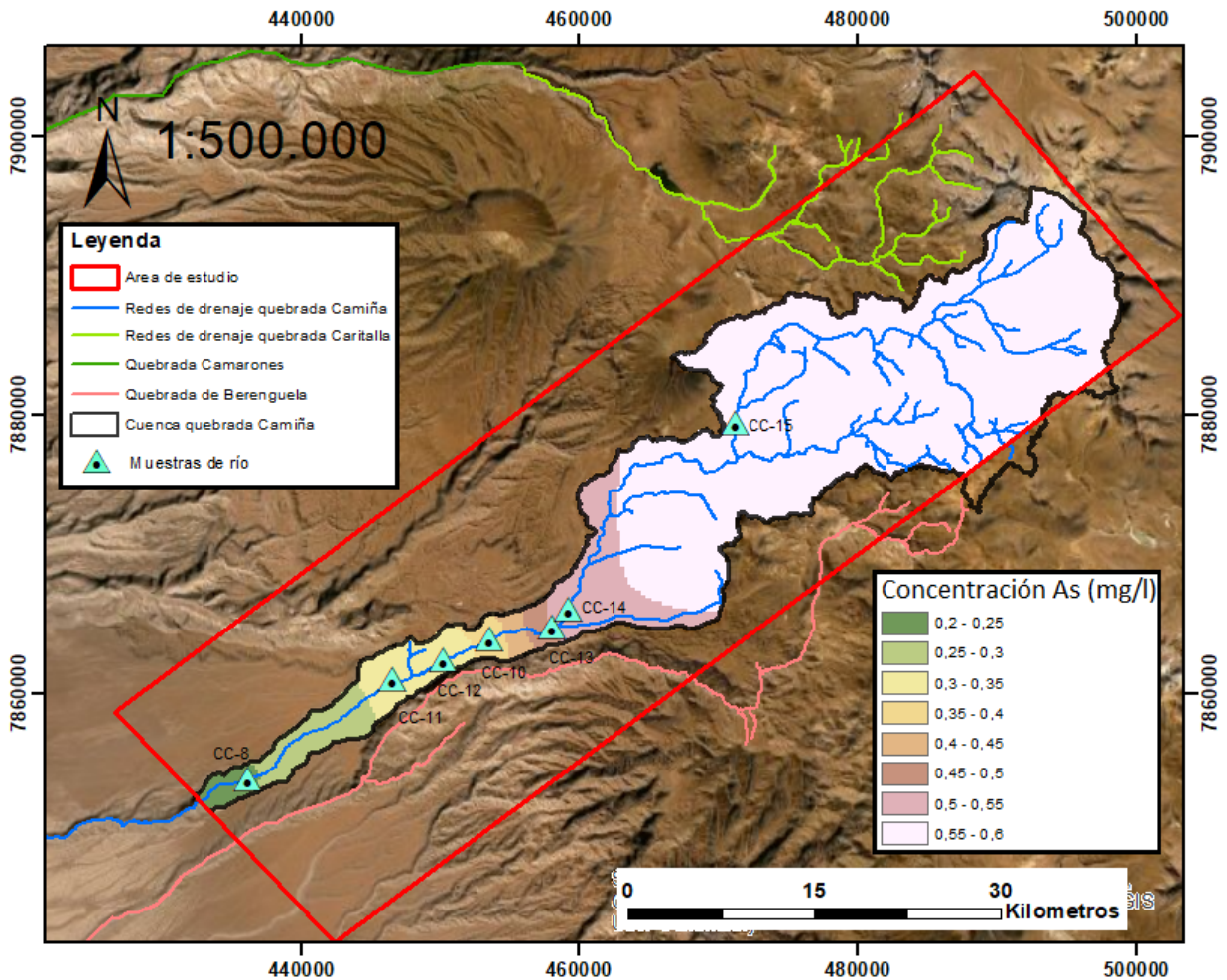


Figura 5.9: Mapa de interpolación de concentraciones de As (mg/l) de muestras de río sin muestra C1 en la cuenca de la quebrada Camiña.

De la figura 5.10, de isoconcentraciones de As en aguas subterráneas (manantiales y pozo) se pueden observar concentraciones muchísimo más altas de As respecto a las muestras de río. Concentraciones que superan los 20 mg/l en algunas zonas de la Cordillera Occidental. Las mayores concentraciones de As se ubican hacia el sector donde están las muestras PU1, PU2, PU3, PU4 en la quebrada Caritalla y las AVE, AN, AVO en la quebrada Camiña. No se podría concluir exactamente que las concentraciones más altas de As están asociadas a la Cordillera Occidental, puesto que muestras como PUL y JA están más aguas arriba que las muestras AVE, AN, AVO en la quebrada Camiña y presentan concentraciones de 4 orden de magnitud más bajas. Para esta figura (5.10) solo las muestras MU1 y MU2 no influyen en la interpolación, ya que no presentan datos de concentración de As.

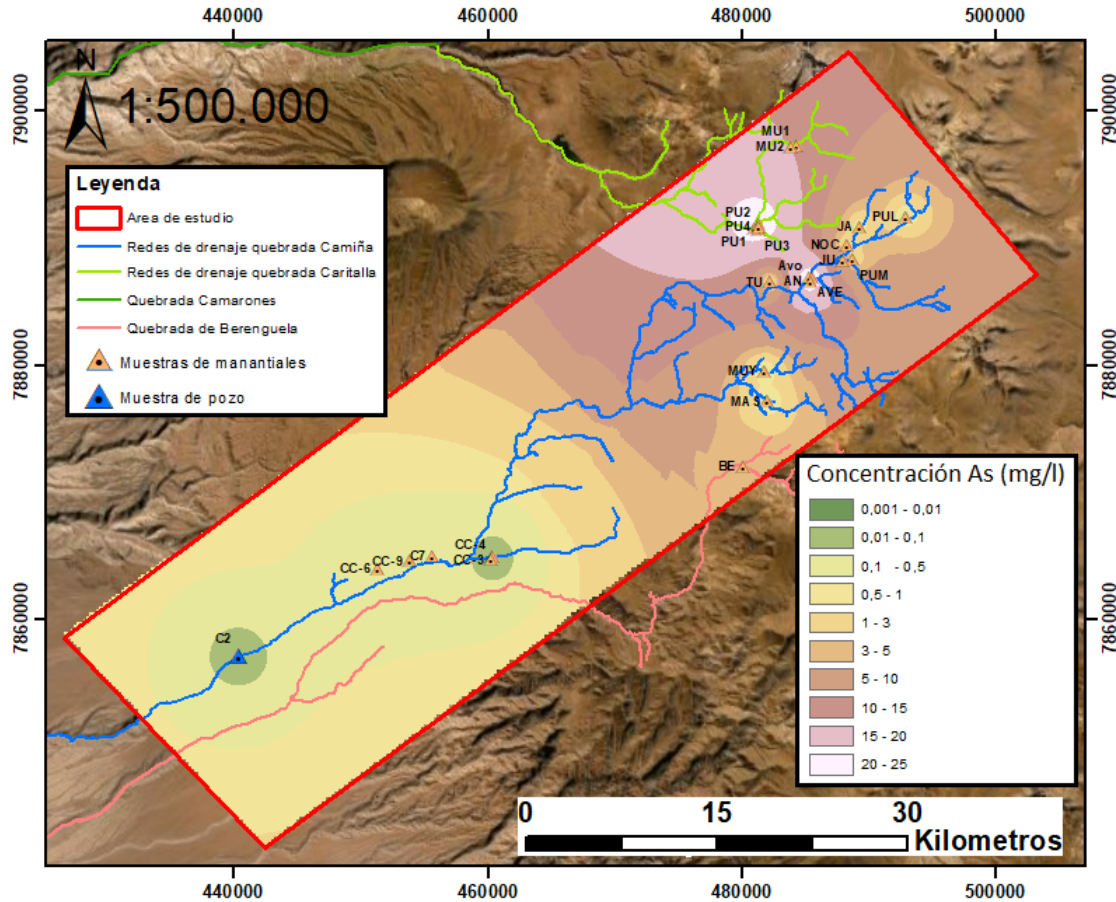


Figura 5.10: Mapa de concentraciones de As (mg/l) en muestras de manantiales y pozo, interpolada a toda el área de estudio.

Con el fin de conocer el comportamiento temporal del As en la quebrada Camiña durante un año, se realizó un diagrama (figura 5.11) que abarca los promedios mensuales de las concentraciones de As desde 1983 hasta 2019. Estos datos fueron obtenidos en la estación de monitoreo de calidad de aguas de la quebrada Camiña en Altusa. Datos en anexos A.6.

Las concentraciones de As en la estación de monitoreo mencionada se han encontrado en todo el periodo por sobre ambos estándares existentes de agua: de agua potable (NCh-409) y de agua para riego (NCh-1333). En el diagrama se puede notar, que existe un máximo promedio de concentración de As en el mes de diciembre con un valor de 0,61 mg/l, mientras que el valor más bajo corresponde al mes de junio con un promedio de 0,36 mg/l. Los meses de primavera y verano muestran en general las mayores concentraciones, siendo el caso opuesto otoño e invierno, en que estos descienden a los niveles mas bajos. Por ultimo, el As fluctúa alrededor del valor de los 0,45 mg/l en promedio de todo el año.

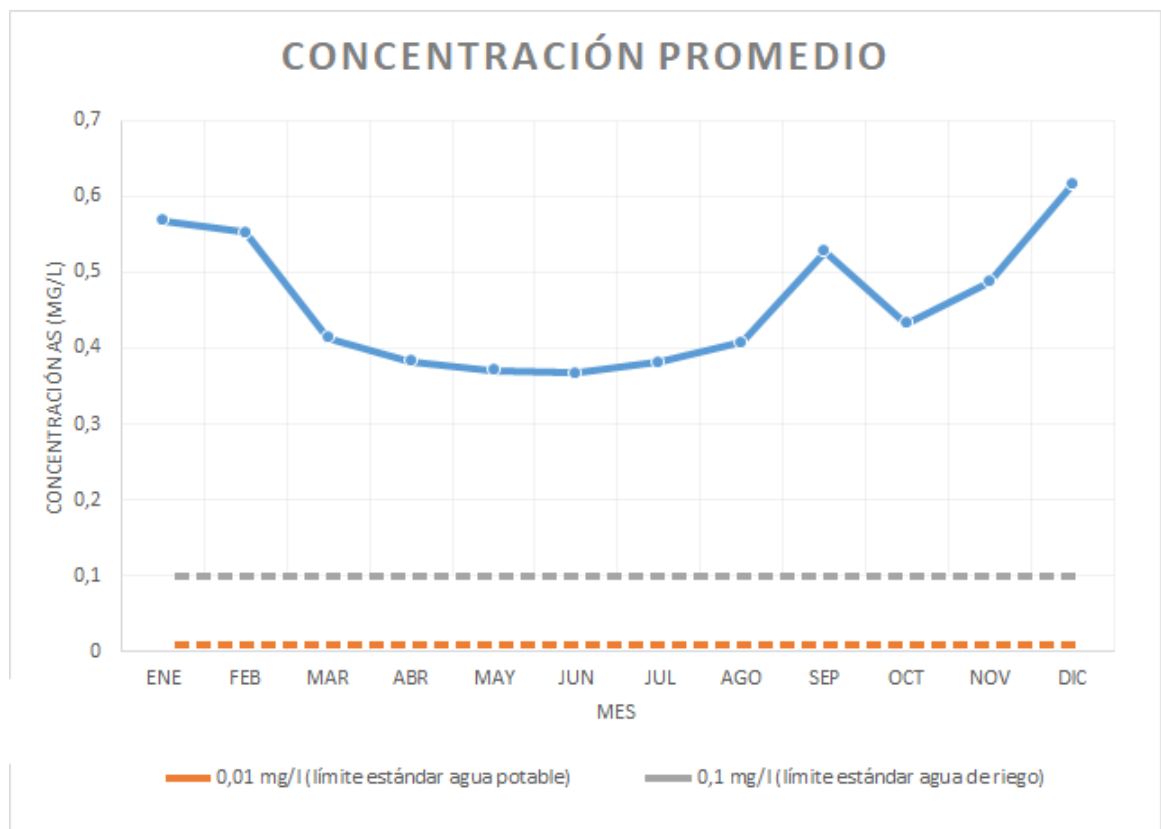


Figura 5.11: Comportamiento promedio mensual del As en estación calidad de aguas de altusa (promedio concentraciones mensuales 1983 - 2019).

La estación fluviométrica en Altuza, se encontró vigente entre los años 1978 – 2001 (Anexos A.8), por lo que para comparar de una manera más certeza la concentración de As y el caudal, se procedió a promediar los caudales mensuales disponibles en todo el periodo mencionado (figura 5.12). El caudal en la quebrada Camiña, específicamente en Altuza, durante las épocas estivales de verano es elevado en comparación al resto del año, posiblemente producto de la precipitación episódica en el Altiplano andino y/o Precordillera en los meses de verano. (figura 5.13)

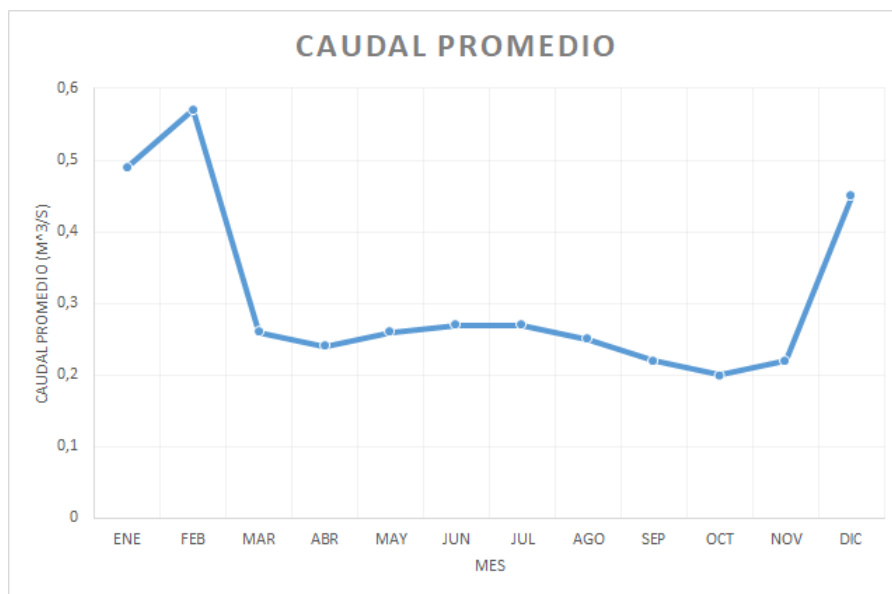


Figura 5.12: Caudal promedio mensual estación fluviométrica de altuza (1978 - 2001).

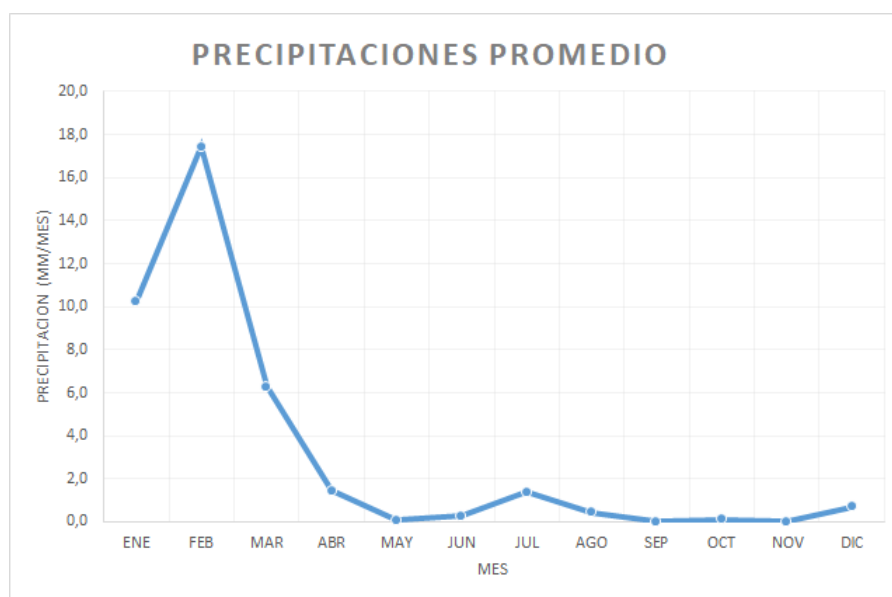


Figura 5.13: Precipitaciones promedio mensual estación pluviométrica de Camiña (1971 - 2020). (Datos de precipitaciones en anexos A.7).

Observando el diagrama combinado (figura 5.14) se puede decir que las mayores concentraciones de As en el río se ubican mayoritariamente entre meses de diciembre y febrero, en comparación a los caudales, se tiene también que los meses de diciembre, enero y febrero es donde el río es más caudaloso y finalmente, las precipitaciones son en promedio más abundantes y existentes entre los meses de enero y febrero. Opuestamente los meses de marzo, abril, mayo, junio, julio y agosto, donde las concentraciones son las menores durante el año, a la vez que también las precipitaciones y caudal.

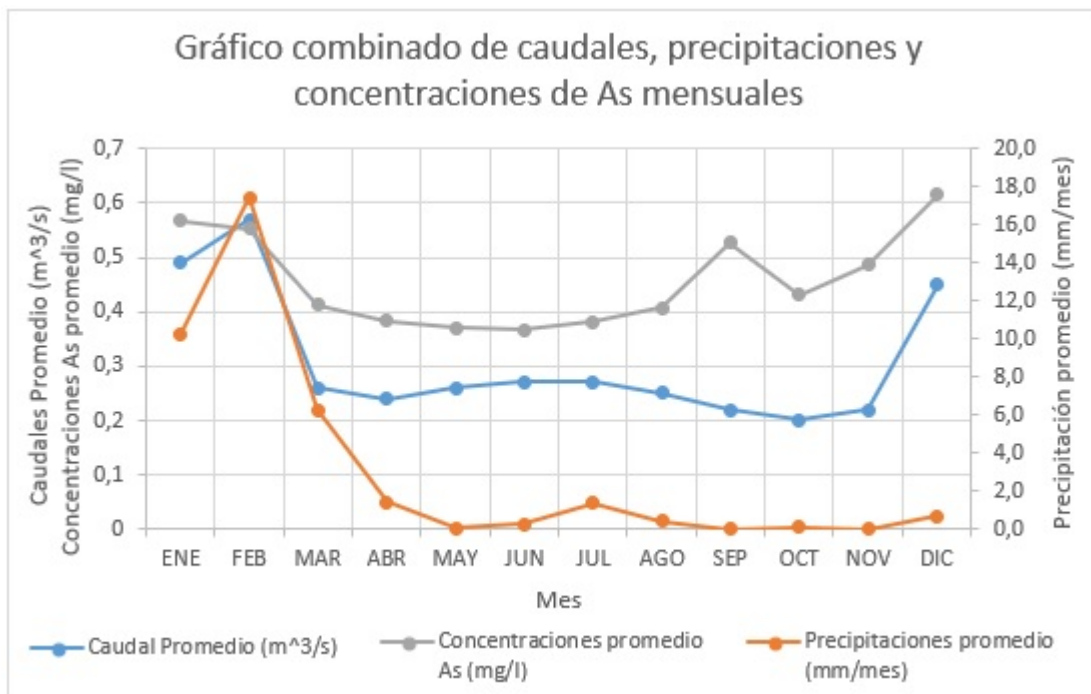


Figura 5.14: Caudales, Precipitaciones y Concentraciones de As en promedios mensuales.

5.2. Análisis riesgo de población por As en aguas

En esta sección se visualizan los cálculos de riesgos cancerígenos y no cancerígenos para las muestras de agua en el área poblada del área de estudio (figura 5.15). Para lograr ello se tuvieron que aplicar las metodologías y formulas descritas en la sección 4.4.

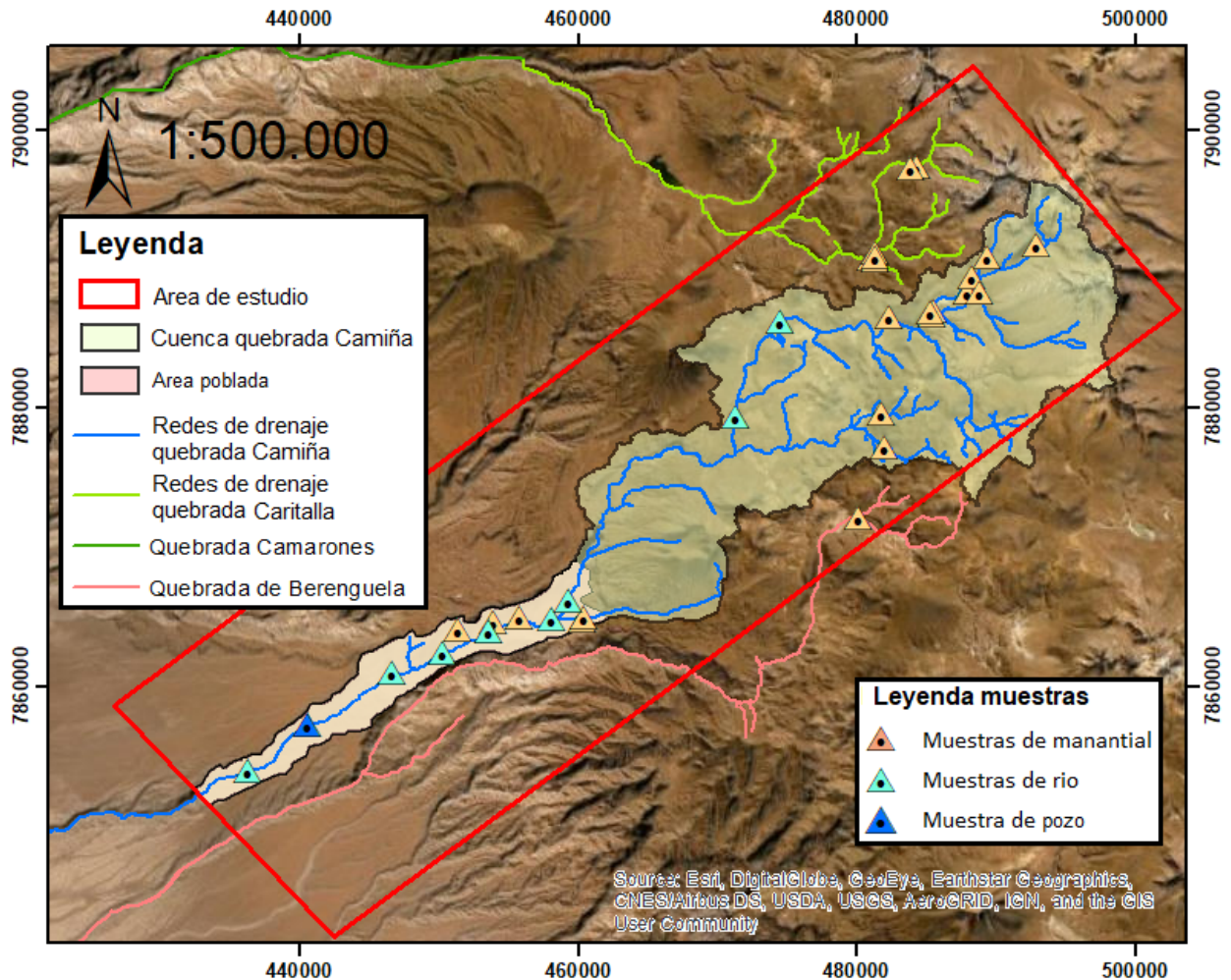


Figura 5.15: Área poblada y muestras dentro de esta.

Las muestras dentro de esta área rosa en la figura 5.15 (área poblada) vendrían siendo las muestras de río: CC-8, CC-11, CC-12, CC-10, CC-13 y CC-14. Las muestras de manantiales: CC-6, CC-9, C7, CC-4, CC-3 y la muestra de pozo C2.

Riesgo no cancerígeno

El riesgo no cancerígeno se calculó usando la metodología de Daniele et al. (2019), descrita en la sección 4.4; siguiendo lo descrito en la sección mencionada, se calculó el riesgo no cancerígeno asumiendo el peso de un humano adulto promedio de 70 kg y una tasa promedio de consumo de agua de pozo, manantial o río (los cálculos se consideran bebiendo agua perpetuamente solo de una fuente de muestreo) de 1 litro de agua al día durante 30 años y por último se considera un “Chronic oral Reference Dose” (RfD) de 0,0003 mg As / kg / día.

Conociendo estos datos, se hicieron los cálculos respectivos con la fórmula presente en la sección 4.4, cuyos desarrollos se encuentran en la tabla A.4 en anexos. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.3.

Tabla 5.3: Cociente de peligro objetivo (THQ) de Riesgo no cancerígeno.
En rojo muestras con valor sobre 5 THQ y verdes muestras bajo 1 THQ

Muestra	As mg/L	THQ	Muestra	As mg/L	THQ
C2	0,0095	0,45	CC-11	0,314	14,95
CC-4	0,011	0,52	CC-12	0,326	15,52
CC-3	0,017	0,81	CC-10	0,364	17,33
CC-6	0,13	6,19	CC-9	0,399	19,00
C7	0,236	11,24	CC-13	0,506	24,10
CC-8	0,246	11,71	CC-14	0,529	25,19

Se puede observar que, para el riesgo no cancerígeno, el cociente de peligro objetivo comienza a partir de valores mayores a los 0,021 mg/l de concentración de As, ya que con concentraciones superiores podrían superar el 1 THQ, con el que se determina que ya existe un riesgo para la salud humana. En el área poblada existen 9 muestras que contienen concentraciones que superen los 5 THQ, por lo que implican un riesgo preocupante. En el área poblada solo las fuentes de las muestras C2, CC-4 y CC-3 descartarían un riesgo no cancerígeno para la salud humana.

Riesgo cancerígeno

El riesgo cancerígeno se calculó usando la metodología de Bamuwanye et al. (2015), descrita en la sección 4.4; Se calculó el riesgo usando un peso humano adulto promedio de 70 kg y una tasa promedio de consumo de agua de pozo, manantial o río (se considera tomar de solo un punto de muestreo) de 1 litro al día y un factor de pendiente de cáncer de 1,5 mg / kg / día. Sabiendo estos datos, se hicieron los cálculos respectivos con la fórmula introducida en la sección 4.4, cuyos desarrollos se encuentran en la tabla A.5 en anexos. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.4.

Tabla 5.4: Riesgo Incremental de Cáncer de por Vida (ILRC). En rojo muestras con orden sobre 10^{-3} y verdes muestras de orden entre 10^{-6} a 10^{-4}

Muestra	As mg/l	ILCR	Muestra	As mg/l	ILCR
C2	0,0095	2,0E-04	CC-11	0,314	6,7E-03
CC-4	0,011	2,4E-04	CC-12	0,326	7,0E-03
CC-3	0,017	3,6E-04	CC-10	0,364	7,8E-03
CC-6	0,13	2,8E-03	CC-9	0,399	8,6E-03
C7	0,236	5,1E-03	CC-13	0,506	1,1E-02
CC-8	0,246	5,3E-03	CC-14	0,529	1,1E-02

Se puede observar que para el riesgo cancerígeno, el Riesgo Incremental de Cáncer de por Vida en el área poblada comienza a partir de valores mayores a los 0,13 mg/l de concentración de As, ya que con concentraciones superiores o iguales a esta, se superaría el ILCR de orden 10^{-4} , con el que se determina que ya existe el riesgo de cáncer, por lo que solo las muestras C2, CC-4, CC-3 no presentarían un riesgo significativo de cáncer.

En la imagen 5.16 se puede apreciar las muestras del área poblada con su identificación, lo que ayuda a observar espacialmente donde fueron tomadas las muestras que presentan un riesgo cancerígeno / no cancerígeno y las que no presentan riesgo alguno.

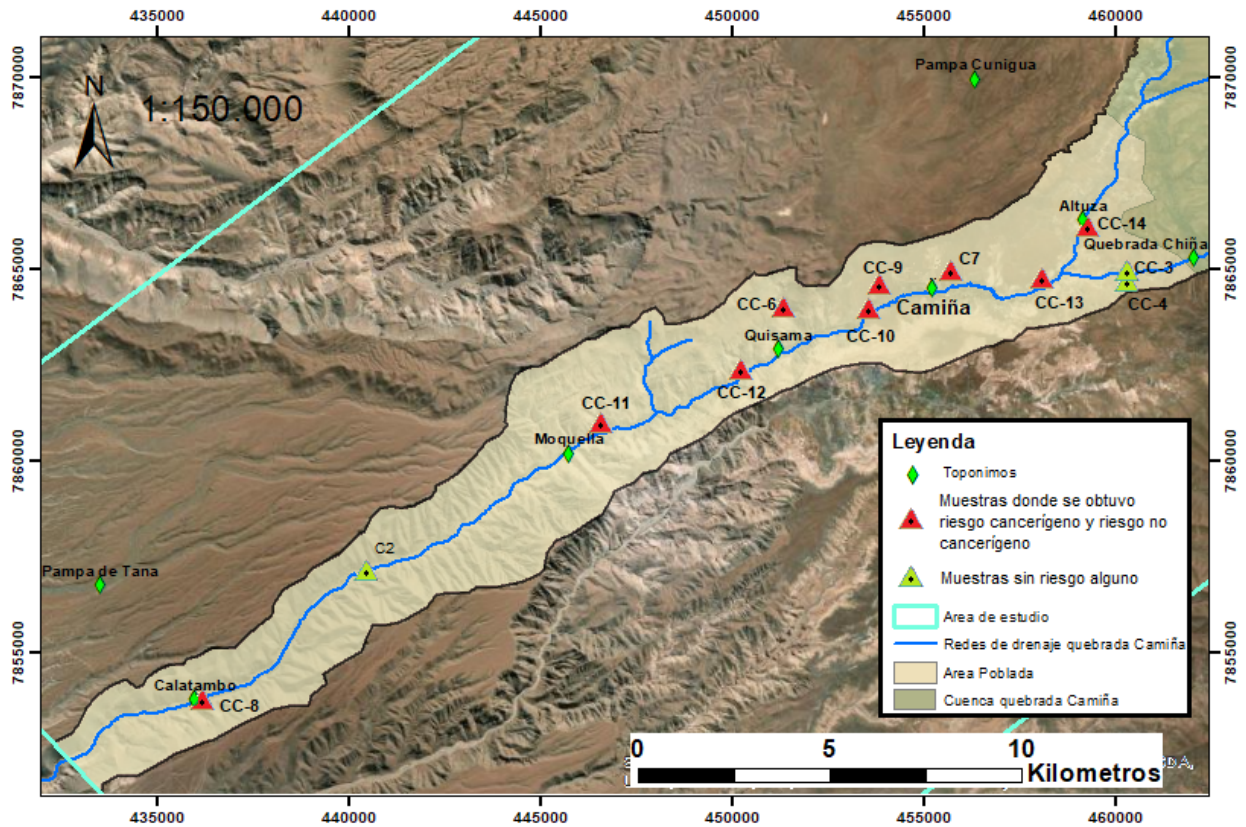


Figura 5.16: Detalle área poblada y muestras con riesgo cancerígeno / no cancerígeno y las que no presentan riesgo alguno.

5.3. Análisis riesgo de población por arsénico en los suelos agrícolas

Las aguas de río que corren por la quebrada Camiña, contienen concentraciones de As que van desde los 0,4 mg/l a 0,6 mg/l superan constantemente el umbral de la legislación chilena NCh 1333 que establece que las aguas mayores a 0,1 mg/L en As no son aptas para riego. Sin embargo, estas aguas del río y manantiales (que también superan esta norma) que se encuentran en las laderas de la quebrada son captadas para uso de riego en cultivos de maíz en diversos predios y parcelas. Por parte de los sedimentos, El As en los suelos cultivados se presenta entre 64 y 448 mg/kg (Herrera Apablaza et al., 2017).

En Chile la normativa vigente del Decreto Supremo DS977-1996, Reglamento Sanitario de los Alimentos, (Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 13 de mayo de 1997), fija el nivel máximo de la concentración de As en granos de cultivos en 200 g/kg (0,2 mg/kg).

Para efecto de este estudio, se toma como referencia el trabajo “Transferencia de As en el sistema Agua-Suelo-Maíz” (Herrera Apablaza et al., 2017), en el cual se evidencia que las bajas concentraciones de As en los granos de maíz a pesar sus las altísimas concentraciones en el suelo y agua son debido a los procesos biológicos de la planta de bioacumulación y translocación, donde el fruto corresponde a la última sección de transporte de sustancias dentro de la morfología de las plantas.

- **Factor de bioconcentración (FBC):** Se utiliza para medir la capacidad de captación de un metal por una planta (raíz y parte aérea) con relación a su concentración en el suelo.
- **Factores de traslocación (PFT):** Depende de los distintos órganos vegetativos. Se calculan dividiendo la concentración del metal en el órgano de interés (tallo, hojas, flores, semillas o frutos) respecto a la concentración del metal en la raíz.

Las aguas naturales usadas para el riego de Maíz *Zea mays L.* cultivados en la quebrada Camiña son dulces, levemente alcalinas, enriquecidas con nitrato y contaminadas con elevadas concentraciones de As que superan en aproximadamente 40 veces la norma chilena para agua potable y cinco veces la norma de riego. Los suelos cultivados de Camiña son arenosos, no salinos, de pH neutro-levemente alcalino, poseen escasa materia orgánica y están contaminados con boro y As (Herrera Apablaza et al., 2017).

Las plantas de maíz *Zea mays L.* bioconcentra As con un factor de bioconcentración mayor que 1, resultando ser un excelente fitorremediador. El As acumulado en planta tiende a almacenarse en la raíz, impidiendo concentraciones elevadas de As en partes aéreas, a pesar de los altos niveles de As en suelos. Las concentraciones de As en las diferentes partes de la planta de maíz presentaron el siguiente orden: raíz > hoja > grano (tabla B.1 en anexos). El consumo de granos de choclo provenientes de Camiña no presenta riesgo, ya que presentaron concentraciones de As relativamente bajas (Herrera Apablaza et al., 2017).

En la figura 5.17 se puede apreciar con las concentraciones correspondientes como el maíz actúa de fitorremediador respecto al suelo, concentrando más de 3 veces el As del suelo en las raíces y dejando que partes aéreas como la hoja tenga una concentración muy baja y el grano que finalmente es el que se consume con una concentración casi 10.000 veces menor respecto al suelo.

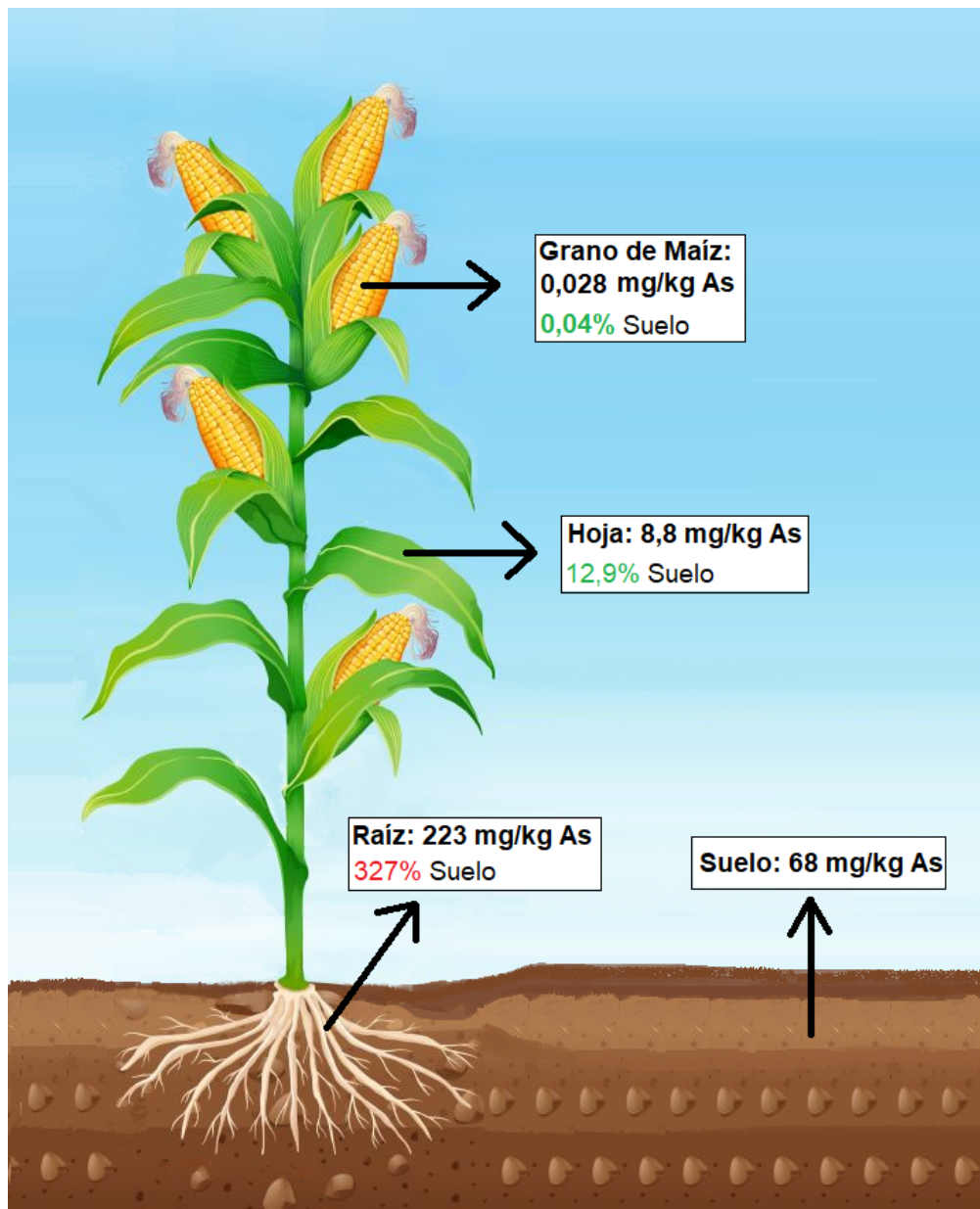


Figura 5.17: Ilustración de maíz de la zona de muestra S1A de Herrera Apablaza et al. (2017). Porcentaje rojo corresponde a parte de la planta con mayor concentración de As respecto al suelo donde está ubicada, análogamente el porcentaje verde es para concentraciones menores respecto al suelo.

5.4. Resultados Química de sedimentos

En esta sección se muestran y explican los desarrollos para obtener los distintos resultados sobre la geoquímica de sedimentos. Estos resultados tienen enfoques en buscar en qué lugar y que elementos están sobre las normas vigentes para la salud y también si estos están sobre una línea de base que se calculará en esta misma sección.

Para comenzar, de un total de 902 puntos de muestreo de la Hoja Pisagua de Sernageomin (Astudillo W. et al., 2015), 103 (11%) se ubicaron dentro de la zona de estudio. Luego se trabajó con los elementos químicos As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Pb, Sb y Zn en el programa Excel de acuerdo a la metodología de la sección 4.2.2, donde se logró confirmar que ni un elemento de los mencionados superaba 50% del total de datos bajo el límite de detección, por lo que se procedió al análisis de duplicados presentes dentro del área de estudio.

5.4.1. Diagramas de dispersión en duplicados de sedimentos

Para obtener información sobre aquellos elementos que mostrarán una mayor correlación ($R^2 > 0,9$), se realizaron diagramas XY, que exhibieron el comportamiento de los elementos de las muestras duplicadas de la zona de estudio (Astudillo W. et al., 2015).

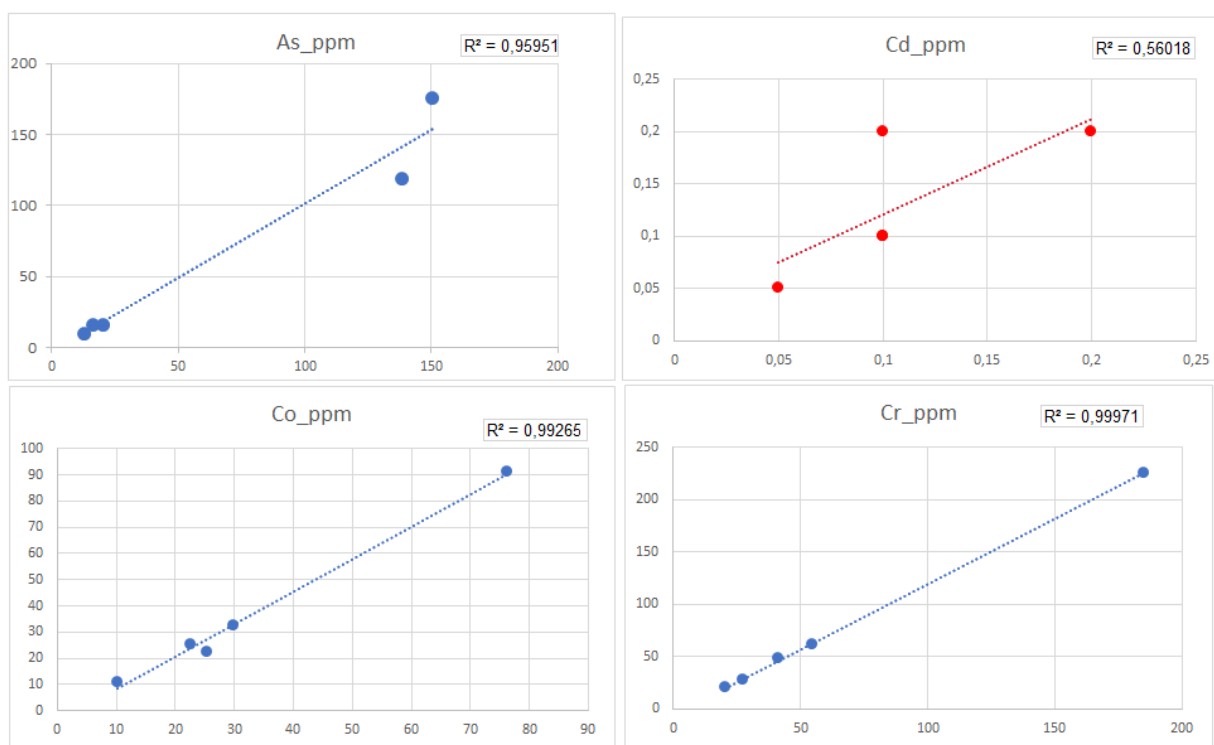


Figura 5.18: Diagramas de dispersión XY de muestras duplicadas para los elementos y compuesto As, Cd, Co y Cr_2O_3 . En el diagrama del Cd se visualizan 4 pares, esto se debe a que hay 2 pares de muestras que contienen la misma concentración tanto en duplicado como en muestra original, por lo que el punto es exactamente el mismo.

Para el caso del Cr, en la Hoja Pisagua de Sernageomin aparece como Cr_2O_3 % peso, por lo que se tuvo que transformar su concentración desde % peso a ppm, para ello se tuvo que dividir por 100 cada concentración (para obtener el peso del compuesto relativo a la muestra) y luego se multiplico por 1.000.000 para obtener cuantas partes por millón eran de Cr_2O_3 . Luego de esto, se buscó la concentración ppm de Cr, lo cual se realizó gracias a los pesos molares de Cr y O, con lo que se calculó cuanto peso molar equivalía al Cr dentro de Cr_2O_3 , y esa misma proporción equivaldría a los ppm de Cr en Cr_2O_3 . La formula utilizada y los valores de Cr ppm se muestran en Anexos C.17.

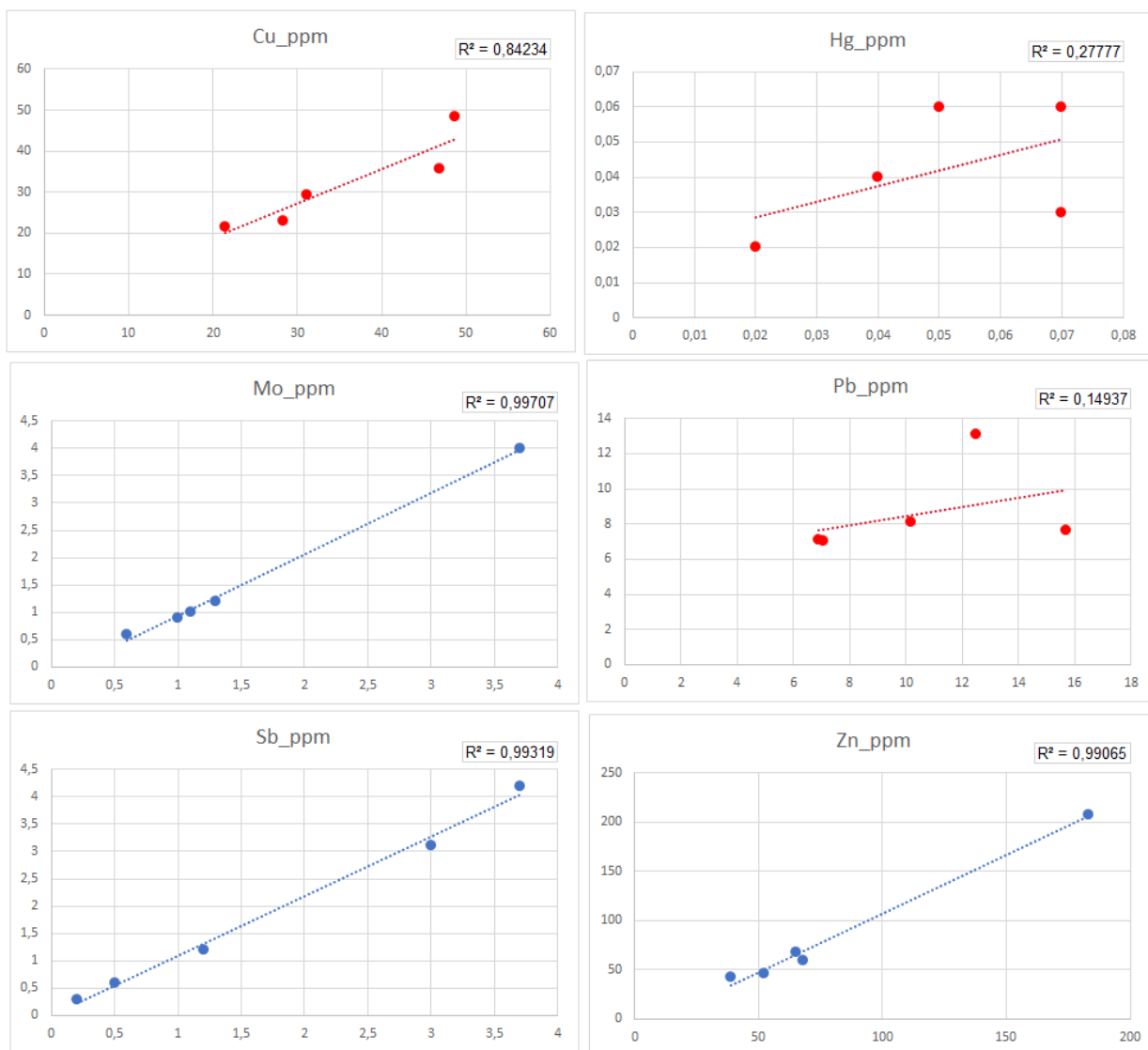


Figura 5.19: Diagramas de dispersión XY de muestras duplicadas. Para los elementos Cu, Hg, Mo, Pb, Sb y Zn

Los resultados del análisis de control de calidad muestran que los elementos químicos Cd, Cu, Hg y Pb presentan una correlación $R^2 < 0,9$, por ello fueron descartados del análisis de distribución espacial.

5.4.2. Líneas de base Geoquímicas

Descartando las 5 muestras duplicadas y dejando solo las muestras originales, quedan 98 muestras. Luego se hizo otro filtro para la consideración de la realización de la línea de base geoquímica y el mapeo de concentraciones, se descartaron las muestras presentes en una misma ubicación espacial XYZ (no confundir con duplicadas porque son de distintos ambientes sedimentarios) pero tienen la misma posición. Esto se detalla en la sección 4.2.2, en que el ambiente fluvial activo se prioriza a la hora que hay muestras con la misma ubicación XYZ. Con estas consideraciones, quedan 84 muestras con las que se trabajo

Para los sedimentos de agua dulce de la zona de estudio se propuso una línea de base calculada a partir de las estadísticas explicadas en la sección 4.5, para As, Co, Cr, Mo, Sb y Zn (Tabla 5.5), ya que Cd, Cu, Hg, y Pb fueron descartados por falta de correlación entre las muestras y duplicados.

Tabla 5.5: Resumen de las estadísticas de las muestras de sedimentos

	As (mg/kg)	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Mo (mg/kg)	Sb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
N° de datos	84	84	84	84	84	84
Línea de base	3,4-23,2	6-38,3	13,4 - 79,14	0,5-1,4	0,12-0,81	29,1- 76,7
N° de anomalías positivas	46	15	14	23	37	15
N° de anomalías negativas	0	1	2	3	1	0
Promedio aritmético de datos dentro de línea de base propuesta	13,28	22,11	46,28	0,98	0,46	52,9
Desviación estándar	4,96	8,07	16,42	0,21	0,17	11,8
Mínimo	4,2	2,8	6,84	0,4	0,1	31
Máximo	10000 ^a	125,8	307,9	12	2000 ^b	303
percentil 25	13,75	16,4	34,21	0,9	0,4	43,25
percentil 75	108,7	34,65	68,42	1,5	2,675	72,5

^a Este valor es marcado como límite de detección superior en la base de datos de Sernageomin, el valor máximo que le sigue es de 1827,2 mg/kg

^b Este valor es marcado como límite de detección superior en la base de datos de Sernageomin, el valor máximo que le sigue es de 91,8 mg/kg

En la tabla 5.5, la línea de base de cada elemento resulta de la metodología explicada en la sección 4.5, es posible que los mínimos o máximos de los 84 datos queden fuera del rango de la aproximación normal, esto resulta por la técnica iterativa mencionada en la sección ya citada.

Para el **As**, la línea de base geoquímica propuesta se encuentra entre 3,4 mg/kg a 23,2 mg/kg (Tabla 5.5), en este rango se encuentra el 45% de las muestras. Sobre este rango, se presentan un 55% de las muestras, representando anomalías positivas, no hay anomalías negativas. Se observa que existe una altísima variabilidad en la concentración, que esta entre 4,2 mg/kg a 10000 mg/kg, sin embargo, este último valor es marcado como límite de detección superior en la base de datos de Sernageomin, el valor que le sigue es de 1827,2 mg/kg. Los percentiles 25 y 75 se encuentran las concentraciones 13,75 y 108,7 respectivamente, lo que dice que gran parte de los datos se escapan positivamente respecto a la distribución normal de la línea de base geoquímica calculada.

Para el **Co**, la línea de base propuesta se encuentra entre 6 mg/kg a 38,3 mg/kg (Tabla 5.5), en este rango se encuentra el 81% de las muestras. Sobre este rango, se hayan el 18% de las muestras que corresponden a concentraciones que están sobre el límite superior de esta línea de base representando anomalías positivas, Bajo este rango, se encuentra el 1% de las muestras, que correspondería a las anomalías negativas. Además, presenta una gran variabilidad en los datos, con concentraciones que van desde los 2,8 mg/kg hasta los 125,8 mg/kg. Los percentiles 25 y 75 se encuentran las concentraciones 16,4 a 34,65 respectivamente, lo que habla de un crecimiento más o menos constante de las concentraciones hasta el percentil 75.

Para el **Cr**, la línea de base propuesta se encuentra entre 13,6 mg/kg a 79,14 mg/kg (Tabla 5.5), en este rango se encuentra el 81% de las muestras. Sobre este rango, el 16% de las muestras representan anomalías positivas y el 2% anomalías negativas. Para este elemento existe una gran variabilidad de los datos, con una fluctuación entre 6,84 mg/kg y 307,9 mg/kg. Los percentiles 25 y 75 se encuentran las concentraciones 34,21 y 68,42 respectivamente, lo que dice que existe un gran aumento en las concentraciones desde el percentil 75 hasta el 100.

Por otra parte, analizando las concentraciones de **Mo**, se propuso una línea de base geoquímica que varía entre 0,5 mg/kg a 1,4 mg/kg (tabla 5.5)), donde se encuentra el 69% de los datos. Encima de ellos el 27% corresponde anomalías positivas y por debajo de ellos, el 4% corresponde a anomalías negativas. Los datos varían de forma regular entre 0,4 mg/kg y 12 mg/kg. Por otro lado, los percentiles 25 y 75 se encuentran las concentraciones 0,9 y 1,5 respectivamente, lo que da gran similitud entre los percentiles y la línea de base propuesta.

Para el **Sb**, la línea de base propuesta se encuentra en un rango de 0,12 mg/kg a 0,81 mg/kg (Tabla 5.5) en el que se encuentran un 55% de los datos. Las anomalías positivas constituyen un 44% de los mismos, mientras que las negativas, un 1%. Los datos presentan una gran variabilidad en un rango de 0,1 mg/kg a 2000 mg/kg. Sin embargo, este último valor es marcado como límite de detección superior en la base de datos de Sernageomin, el valor que le sigue es de 91,8 mg/kg. Los percentiles 25 y 75 se encuentran las concentraciones 0,4 y 2,6 respectivamente, lo que indica un alto incremento sobre el percentil 75 en las concentraciones.

Por último, la línea de base geoquímica calculada para el **Zn** se encuentra entre 29,1 mg/kg a

76,7 mg/kg (Tabla 5.5), en este rango se encuentra el 82% de las muestras. Sobre este rango, el 18% de las muestras representan anomalías positivas. Los datos presentan una variabilidad que va entre 31 mg/kg y 303 mg/k. Los percentiles 25 y 75 se encuentran las concentraciones 43,2 y 72,5 respectivamente, lo que reafirma que la mayoría de los datos se encuentran dentro de la línea de base geoquímica.

5.4.3. Geoquímica y parámetros ambientales vigentes

En Chile no existe legislación que establezca estándares para la calidad de los sedimentos, por lo cual los resultados se han comparado con los estándares recomendados por el Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME), quienes escribieron las Canadian Environmental Quality Guidelines (CEQG'S, 2002). Estas establecen dos tipos de estándares: Interim Sediment Quality Guidelines (ISQG; por debajo de los cuales no se esperan efectos biológicos adversos) y los Probable Effect Level (PEL; sobre las cuales los efectos biológicos adversos se encuentran con frecuencia).

Existe otro parámetro con el que se compara, que consiste en la composición de la corteza continental superior. Este corresponde a promedios y estimados mundiales de concentración tanto de elementos mayoritarios como trazas. estos promedios mundiales fueron definidos por Rudnick et al. (2003)

Tabla 5.6: Resumen parámetros ambientales vigentes y comparación con los datos en estudio

	As (mg/kg)	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Mo (mg/kg)	Sb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
ISQG	5,9	-	37,3	-	-	123
PEL	17	-	90	-	-	315
Nº de datos bajo el ISQG	3	-	23	-	-	78
Nº de datos sobre el PEL	55	-	11	-	-	0
Promedio mundial (Rudnick & Gao, 2003)	4,8	17,3	92	1,1	0,4	67
Nº datos bajo el promedio	2	23	73	37	14	57
Nº datos sobre el promedio	82	61	11	38	61	27

De los elementos As, Cr y Zn analizados que aparecen en la CEQG, el As es el que más presentó un comportamiento anómalo, con 65% de los datos sobre el PEL y apenas 4% bajo el ISQG. Esto se le suma que el 98% de los datos están sobre el promedio mundial de concentraciones en la corteza continental establecido por Rudnick et al. (2003). Al As le sigue el Cr, quien tiene 13% de los datos sobre el PEL, y el mismo 13% esta arriba del promedio mundial. Por último, el Zn no presento ni un dato sobre el PEL, y el 93% está bajo el ISQG.

Los elementos de Co, Mo y Sb no presentan estándares para la calidad de los sedimentos en la guía del CCME, por lo que son comparados en relación a su promedio mundial definido por Rudnick et al. (2003). Dentro de estos 3, el Co y Sb presentan un 73% de los datos encima de sus promedios respectivos, mientras que el Mo 45%.

5.4.4. Concentraciones anormales de elementos en sedimentos y geología presente

Para esta subsección, se buscó dar coherencia a las anomalías positivas de los elementos que aparecen en la línea de base propuesta en la sección 5.4.2 respecto a la geología de donde se obtuvieron las muestras. Para ello se colocaron los datos sobre un mapa geológico (figura 3.3) confeccionado durante la realización de este trabajo para ver de manera directa en que litologías se encuentran las mayores concentraciones de cada elemento o si estas altas concentraciones siguen el lecho de un río.

En esta subsección, se le busco dar explicación a las distintas anomalías presentes en el área de estudio, relacionando la geología con las concentraciones de los elementos estudiados, por lo que son utilizados trabajos previos para su realización. De los elementos, solo el Zinc (Zn) no cuenta con una explicación a sus anomalías, dado que las anomalías no son considerables.

5.4.4.1. Arsénico(As)

En la figura 5.20 se puede apreciar que el As en sedimentos en la zona de estudio se concentra en la zona noreste, sobre los volcanes y secuencias volcánicas del Mioceno Superior (Msv(b) y Msv(c)), Ignimbrita Pumiri (Msp) y la Formación Mauque (Msm), lo que podría explicarse gracias a las observaciones propuestas por los trabajos de Mansilla y Cornejo (2002) y Smedley et al. (2002). Estos autores proponen que el contenido de los minerales que componen las unidades de ignimbritas y otras rocas volcánicas producto de la actividad volcánica de la Cordillera de los Andes, pueden generar altas concentraciones de As. También, Lopez et al. (2012) propuso que generalmente, las concentraciones más altas de As, típicamente de mg/L a decenas de mg/L, se encuentran en los fluidos de reservorios geotérmicos en rocas volcánicas. Lo que ocurre es que el As se lixivia de las rocas anfitrionas del yacimiento geotérmico, donde el alto tiempo de residencia, la temperatura, la presión y las condiciones reductoras (evidenciado por la presencia de As (III)) favorecen la liberación de As de los minerales de las rocas (Webster y Nordstrom, 2003).

Hacia el suroeste, el As se concentra mayoritariamente en los sedimentos fluviales activos, recientes, de planicie de inundación o de terraza fluvial en la quebrada Camiña. También en la Pampa de Tana y hacia al sur de esta, donde predomina la Formación El Diablo (Mimd), hay concentraciones de As más altas que las concentraciones propuestas por la CCME (Figura 5.21) y la línea de base propuesta para la zona de estudio, sin embargo, estas concentraciones son menores a las de los sedimentos fluviales de la quebrada Camiña entre Calatambo y Altusa. Estos sedimentos de la Pampa de Tana y al sur de esta corresponden en su mayoría a sedimentos de drenajes.

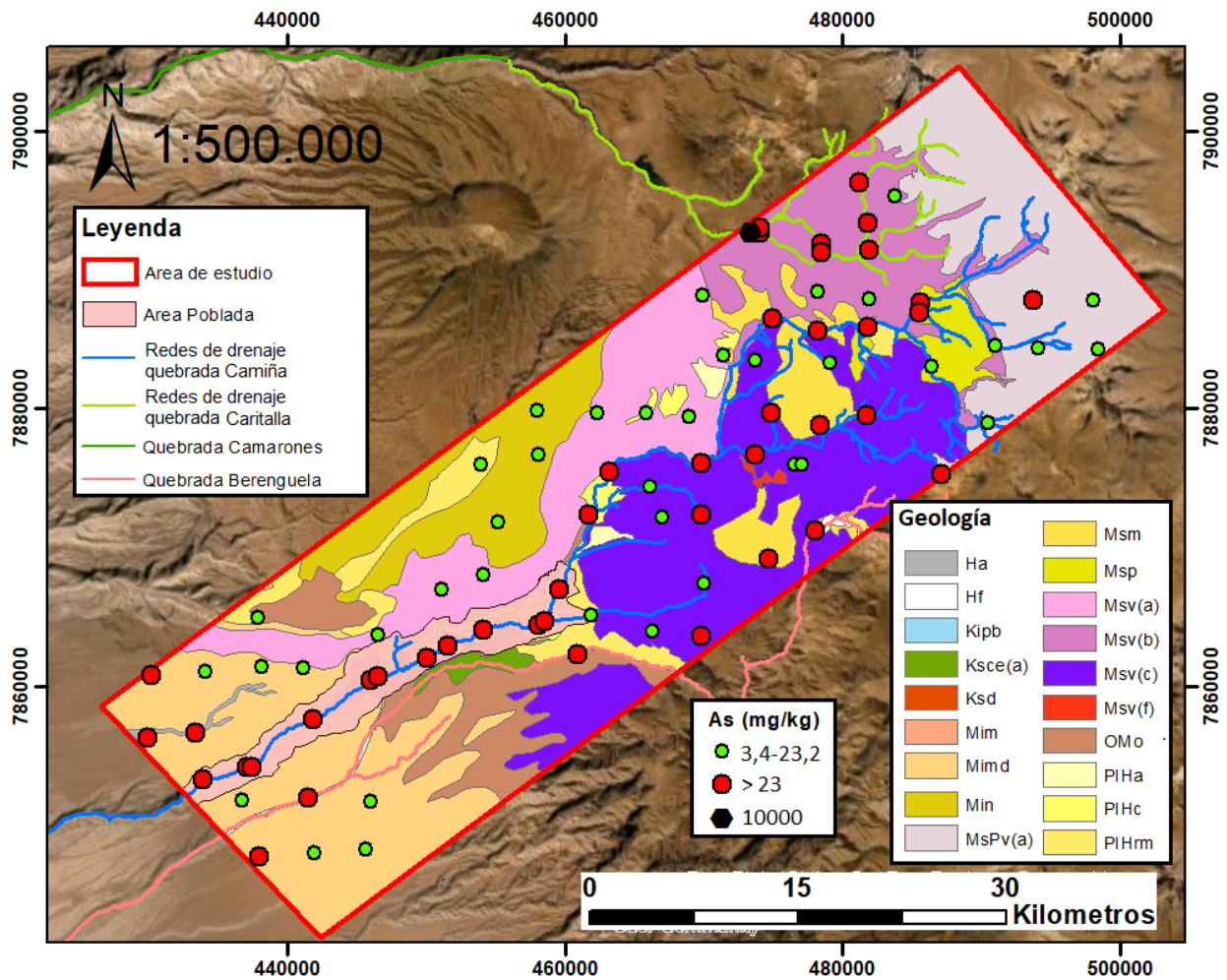


Figura 5.20: Línea de base geoquímica propuesta (verde) y anomalías positivas (rojo) para As. En negro, muestra excepcional de 10000 mg/kg.

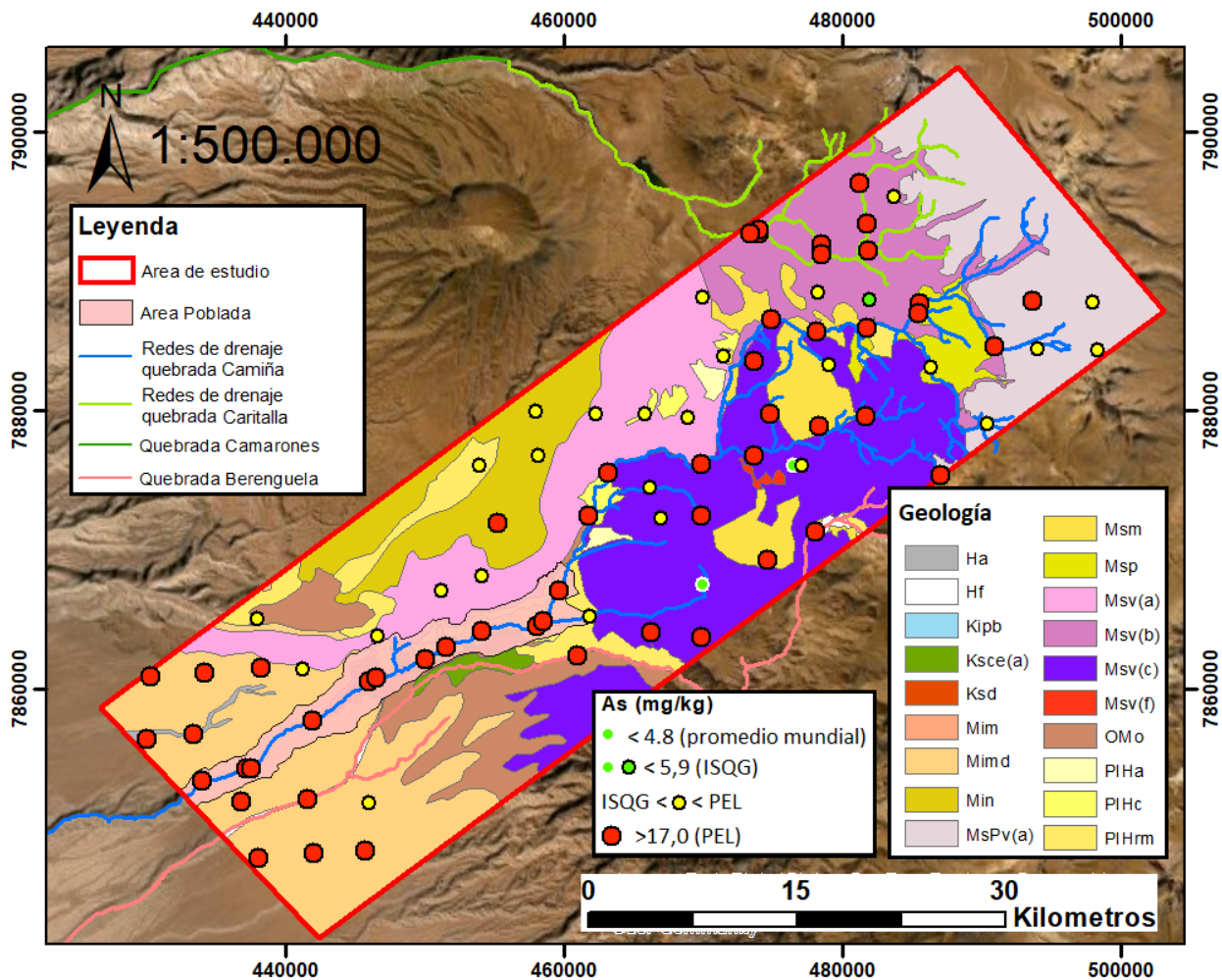


Figura 5.21: Concentraciones de As respecto a normativas CEQG y promedio mundial.

5.4.4.2. Cobalto(Co)

La línea de base propuesta para el Co en este estudio, se encuentra mayormente concentrado en las secuencias volcánicas del Mioceno Superior, específicamente más en Msv(c) (figura 5.22. Para las anomalías positivas arriba del promedio mundial definido por Rudnick et al. (2003), el Co se encuentra sobre este promedio en todas las secuencias volcánicas del Mioceno Superior (Msv), la Ignimbrita Pumiri (Msp), y la Ignimbrita Nama (Min) (figura 5.23. Dada la afinidad de Co por Cu, As y Fe, y basados en la evolución metalogénica de Chile, todos los yacimientos de estos metales podrían tener potencial por sulfuros /arseniuros de Co, en particular aquellos muy ricos en As (Townley et al., 2017)

Anomalías positivas de Co también se encuentran en la Formación El Diablo (Mimd), hacia el sector de la Pampa de Tana y la pampa al sur del río Camiña. Esto podría deberse también a que este elemento se deposita en el suelo en forma de polvo, principalmente a través de erupciones volcánicas (ATSDR, 2004). El Co también aparece sobre el promedio mundial en gran parte de las muestras de sedimentos de cause activo en la quebrada Camiña, lo que ocurre es que el Co suele ser transportado por aguas superficiales por medio de escorrentía producida por precipitaciones e interacciones agua-roca del río sobre rocas que contienen Co (ATSDR, 2004). El Co tendría un origen geogénico en el área de estudio.

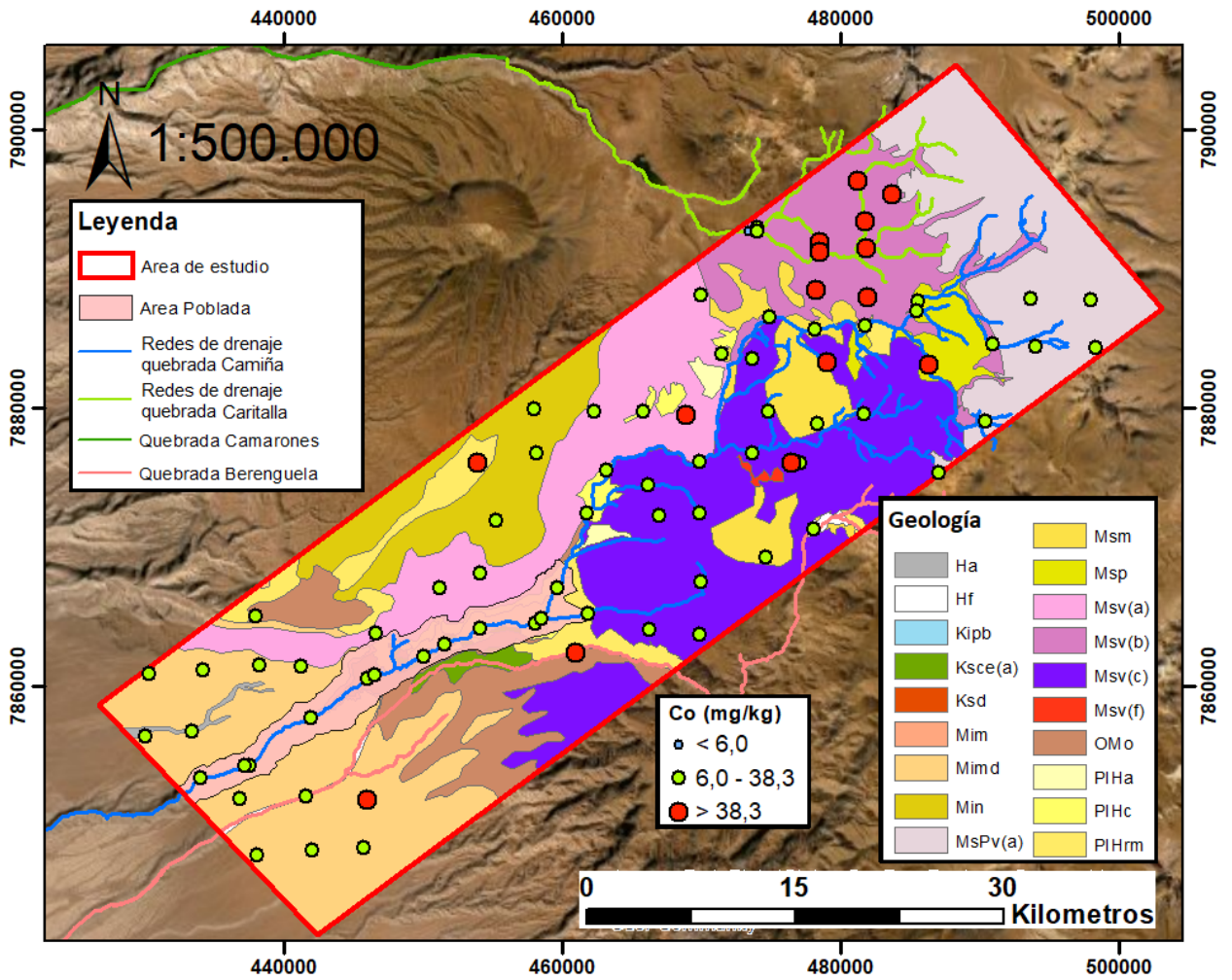


Figura 5.22: Línea de base geoquímica propuesta (verde), anomalías positivas (rojo) y anomalías negativas (azul) para Co.

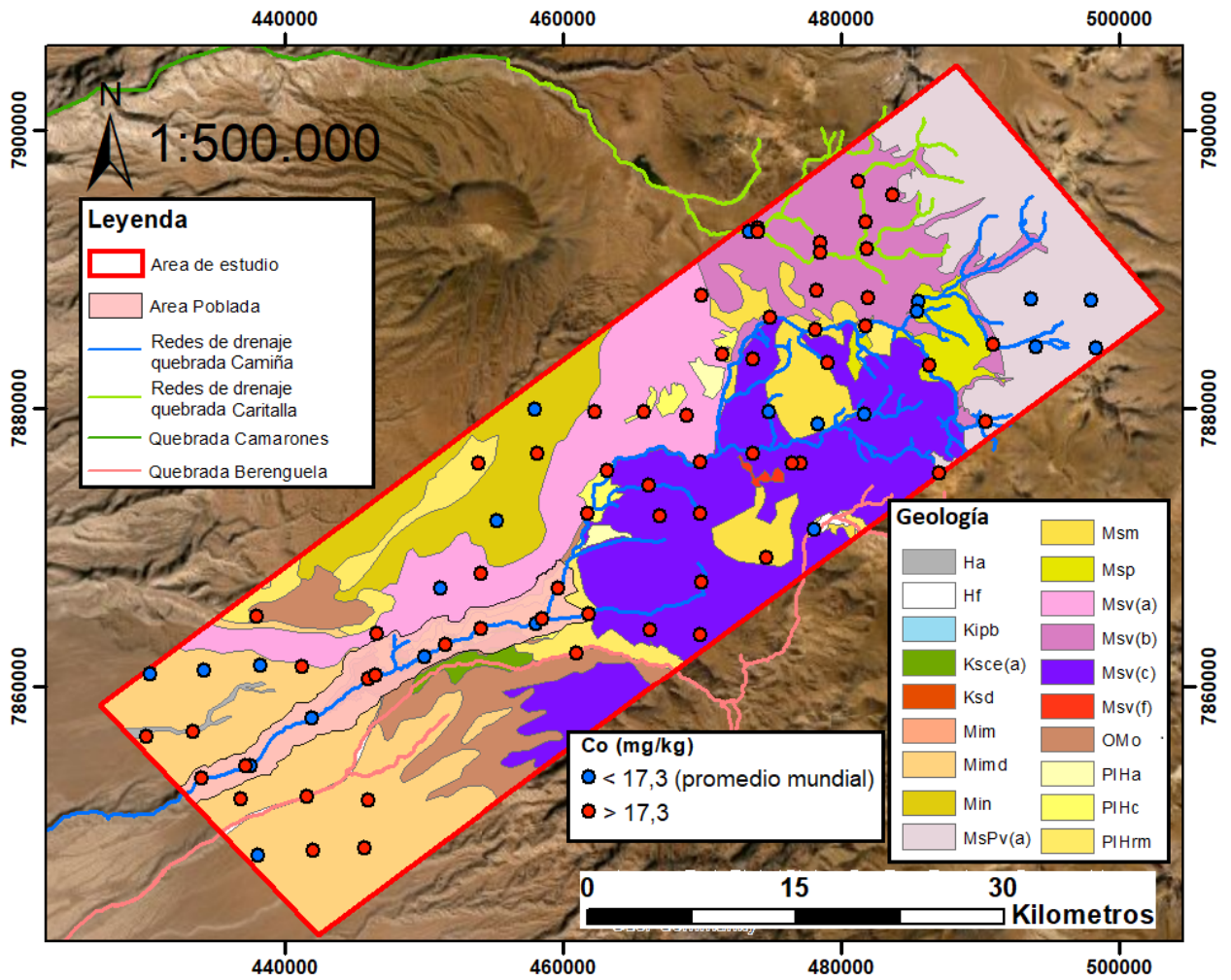


Figura 5.23: Concentraciones de Co respecto a promedio mundial.

5.4.4.3. Cromo(Cr)

El Cr en la línea de base propuesta en este estudio se encuentra mayormente como anomalía positiva en las secuencias volcánicas del Mioceno Superior, específicamente en Msv(c) (figura 5.24). Las anomalías positivas por encima del promedio propuestas por Rudnick et al. (2003) y las que están encima del PEL (figura 5.25) concuerdan con las mismas muestras que superan la línea de base propuesta para Cr.

En general, y dejando de lado las cromitas, el principal reservorio de Cr lo constituyen las rocas ígneas de composición intermedia a máfica en las que su contenido de Cr puede variar desde los 70 a 400 ppm (GERM, 2005). En las rocas volcánicas este se encontrará en la estructura de los minerales máficos, como piroxenos y anfíboles como lo señala Pérez Fodich (2013), y en caso de nuestro estudio, donde más hay anomalías positivas de Cr es en las secuencias volcánicas del Mioceno Superior, específicamente en Msv(c), la que corresponden a andesitas de clinopiroxeno y ortopiroxeno. En las rocas sedimentarias el Cr, se puede encontrar adherido a las superficies de óxidos e hidróxidos de Fe, materia orgánica, entre otros, de manera que es removible más fácilmente (Pérez, 2013).

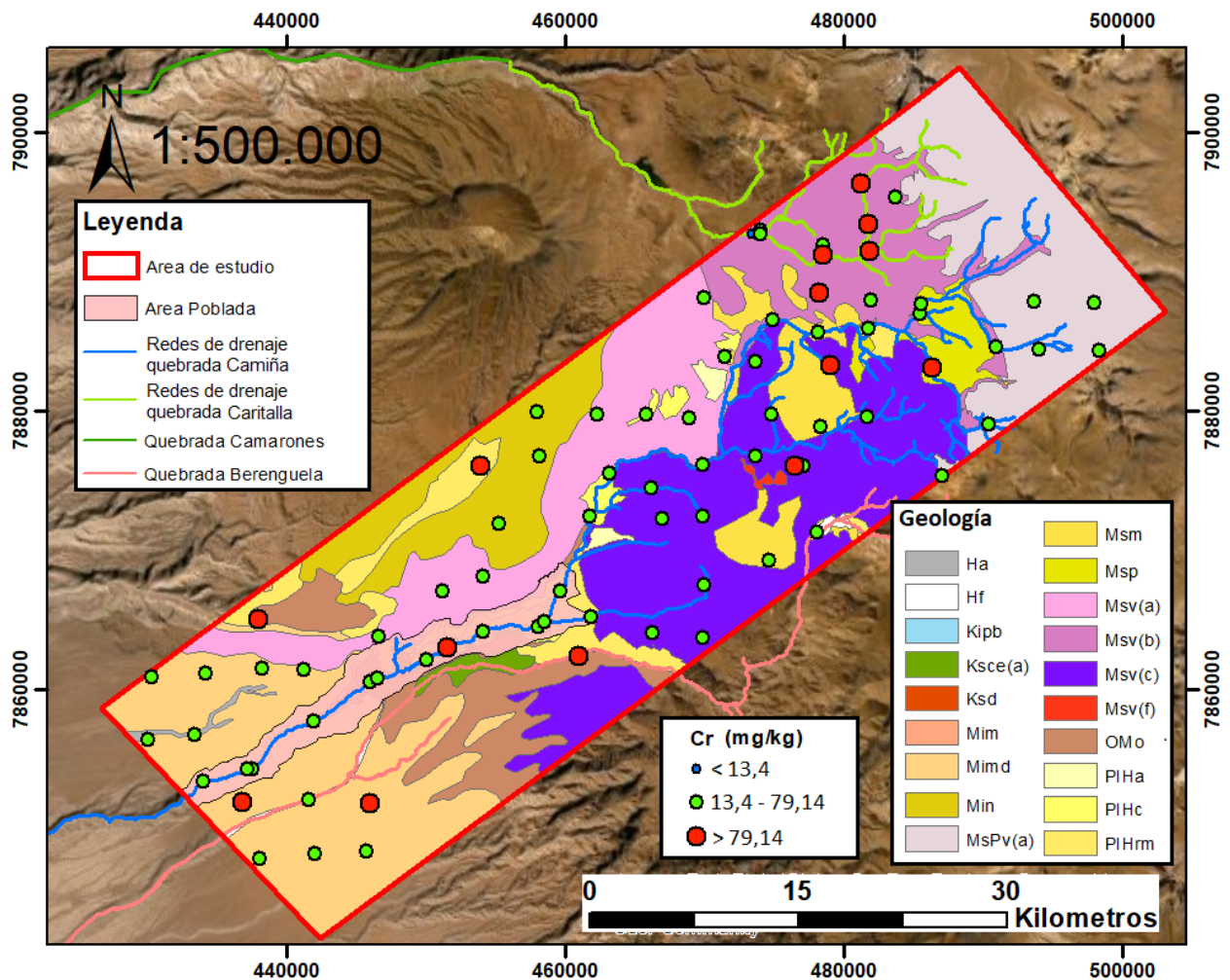


Figura 5.24: Línea de base geoquímica propuesta (verde) y anomalías positivas (rojo) y anomalías negativas (azul) para Cr.

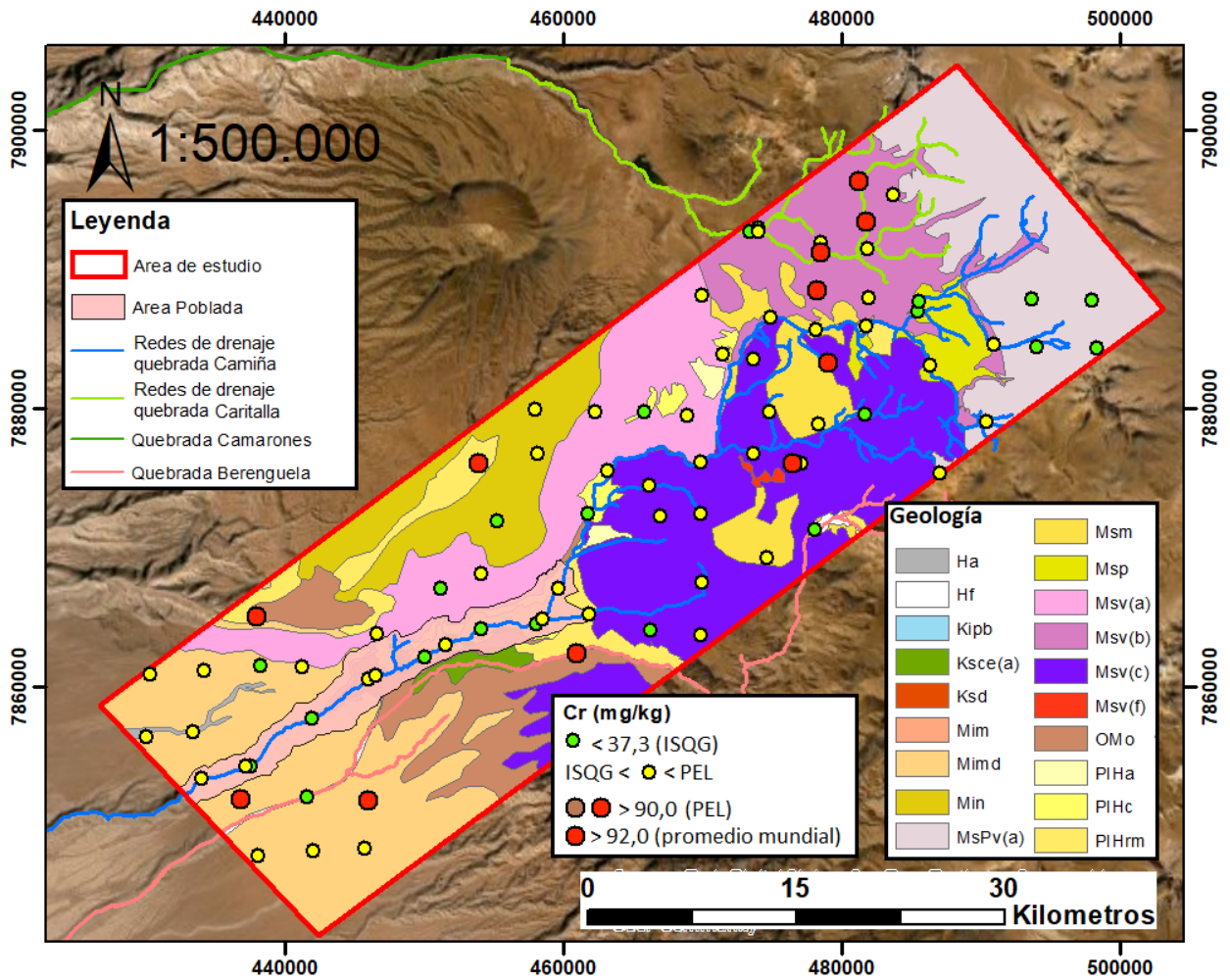


Figura 5.25: Concentraciones de Cr respecto a normativas CEQG y promedio mundial.

5.4.4.4. Molibdeno(Mo)

En la línea de base propuesta en este estudio, el Mo se encuentra mayormente concentrado, osea como anomalía positiva en las secuencias volcánicas del Mioceno Superior, específicamente en Msv(b) y en parte Msv(c) (figura 5.26). Las anomalías por encima del promedio propuestas por Rudnick et al. (2003) se distribuyen también por las mismas secuencias volcánicas del Mioceno Superior ya mencionadas (figura 5.27).

Según Sepulveda Donoso (2020), cuya área de estudio está ubicada inmediatamente al norte del área estudiada en este trabajo, las concentraciones de Mo presentan un comportamiento bastante similar a Cu, esto se podría explicar con las asociaciones geoquímicas que normalmente tienden a formar ambos elementos. El Cu se descarto del estudio por falta de correlación en los duplicados de muestras de sedimentos, lo que hace desconfiar de su calidad de muestreo en la zona de estudio. Sin embargo, las mayores anomalías de Mo están ubicadas en las secuencias volcánicas del Mioceno Superior, Esto podría explicarse, ya que en este sector adyacente al límite con Bolivia y Argentina se encuentra la franja metalogénica del Neógeno (Mioceno y Plioceno), la más oriental de Chile, que se extiende por la Alta Cordillera (Maksaev, 2001), la cual presenta pórfidos de Cu-Mo.

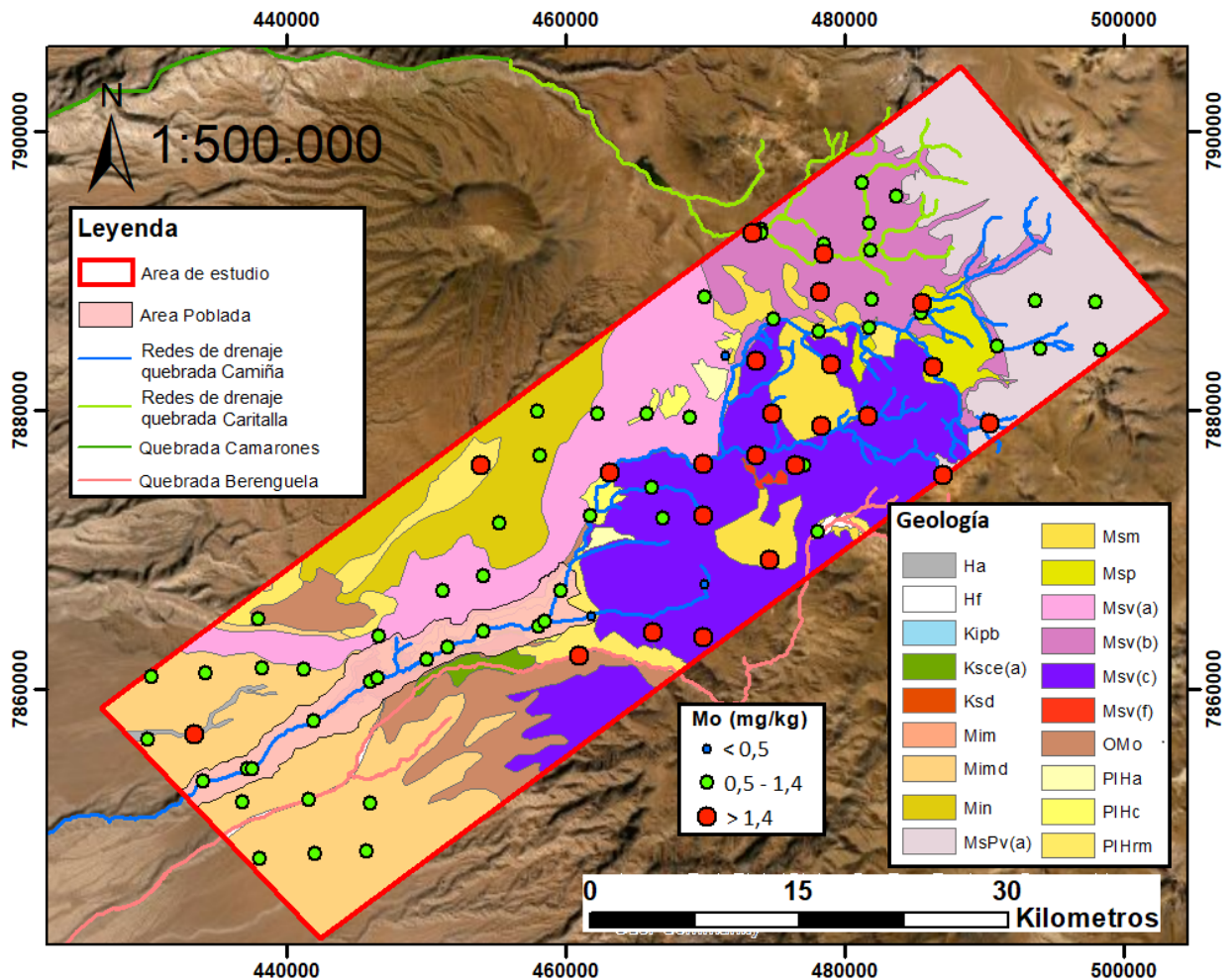


Figura 5.26: Línea de base geoquímica propuesta (verde) y anomalías positivas (rojo) y anomalías negativas (azul) para Mo.

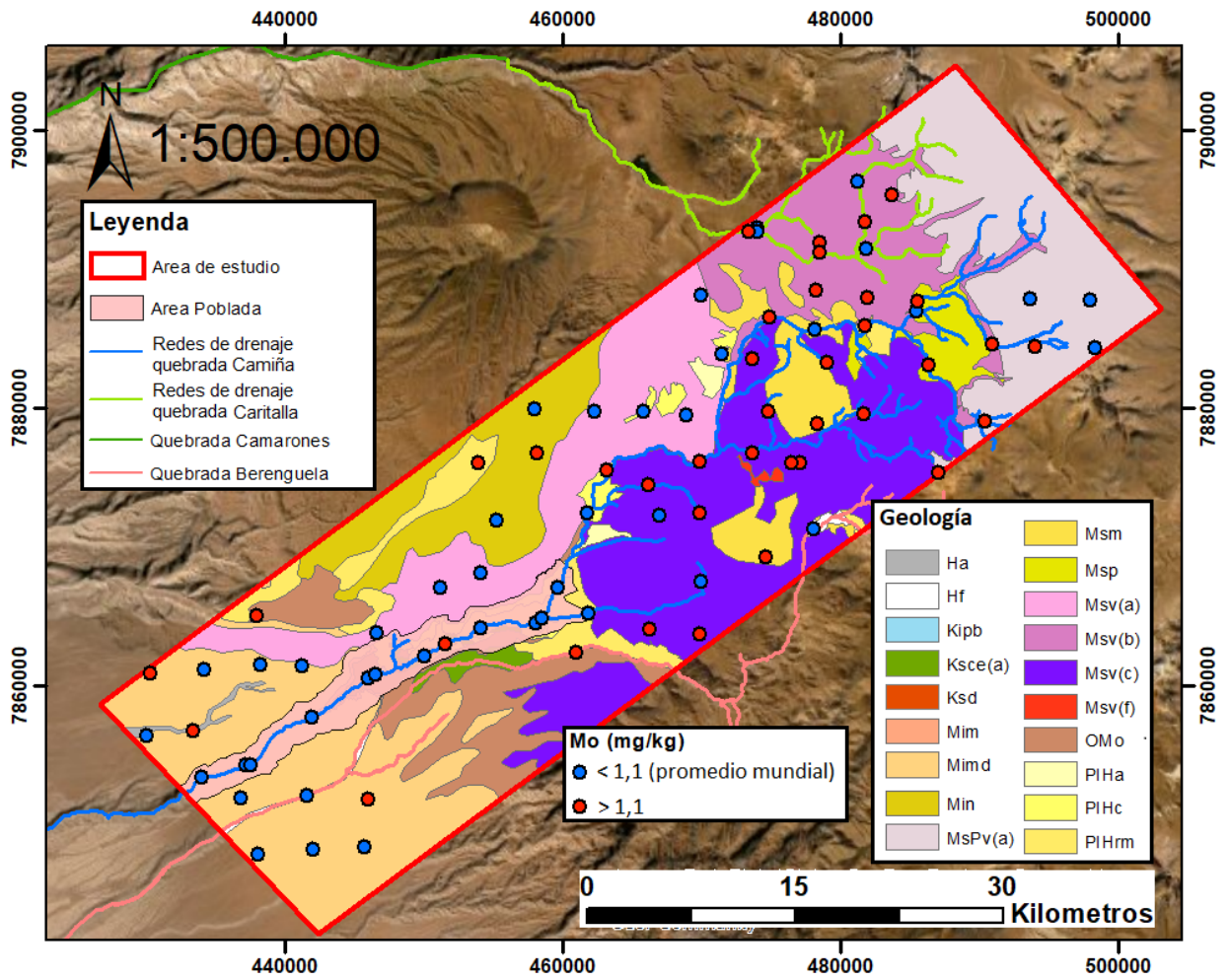


Figura 5.27: Concentraciones de Mo respecto promedio mundial.

5.4.4.5. Antimonio(Sb)

En la línea de base propuesta en este estudio, el Sb se encuentra mayormente concentrado como anomalía positiva en las secuencias volcánicas del Mioceno Superior, específicamente en Msv(b) y en parte Msv(c) (figura 5.28). También se concentra en todo el cause principal de la quebrada Camiña, teniendo anomalía positiva en toda la quebrada dentro del área de estudio. Las anomalías por encima del promedio mundial propuestas por Rudnick et al. (2003) se distribuyen también por las mismas secuencias volcánicas del Mioceno Superior ya mencionadas, sumándole la Formación El Diablo (Mimd) y la Ignimbrita Nama (Min) (figura 5.29).

El Sb se puede encontrar predominantemente en rocas mineralizadas y depósitos relacionados con vetas de cuarzo mesotérmicas en el ambiente natural (Ashley et al., 2003; Craw et al., 2004). Por lo general, sale como estibina (Sb_2S_3), que es la fuente principal de Sb en las vetas de cuarzo mesotérmicas (Craw et al., 2004; Emons et al., 2004). Estas vetas de cuarzo mesotérmicas son probables de encontrar hacia el área noroccidental del área de estudio, donde existe volcanismo e hidrotermalismo activo donde pueden producirse estas vetas.

La meteorización química / física, la oxidación natural y los procesos microbianos son a menudo responsables de convertir las fases minerales primarias de Sb, predominantemente sulfuros y sulfosales, en minerales Sb secundarios que son solubles en agua y más móviles en el medio ambiente (Herath et al., 2017). Esto explicaría porque el Sb esta tan concentrado en la el cause activo de la quebrada Camiña.

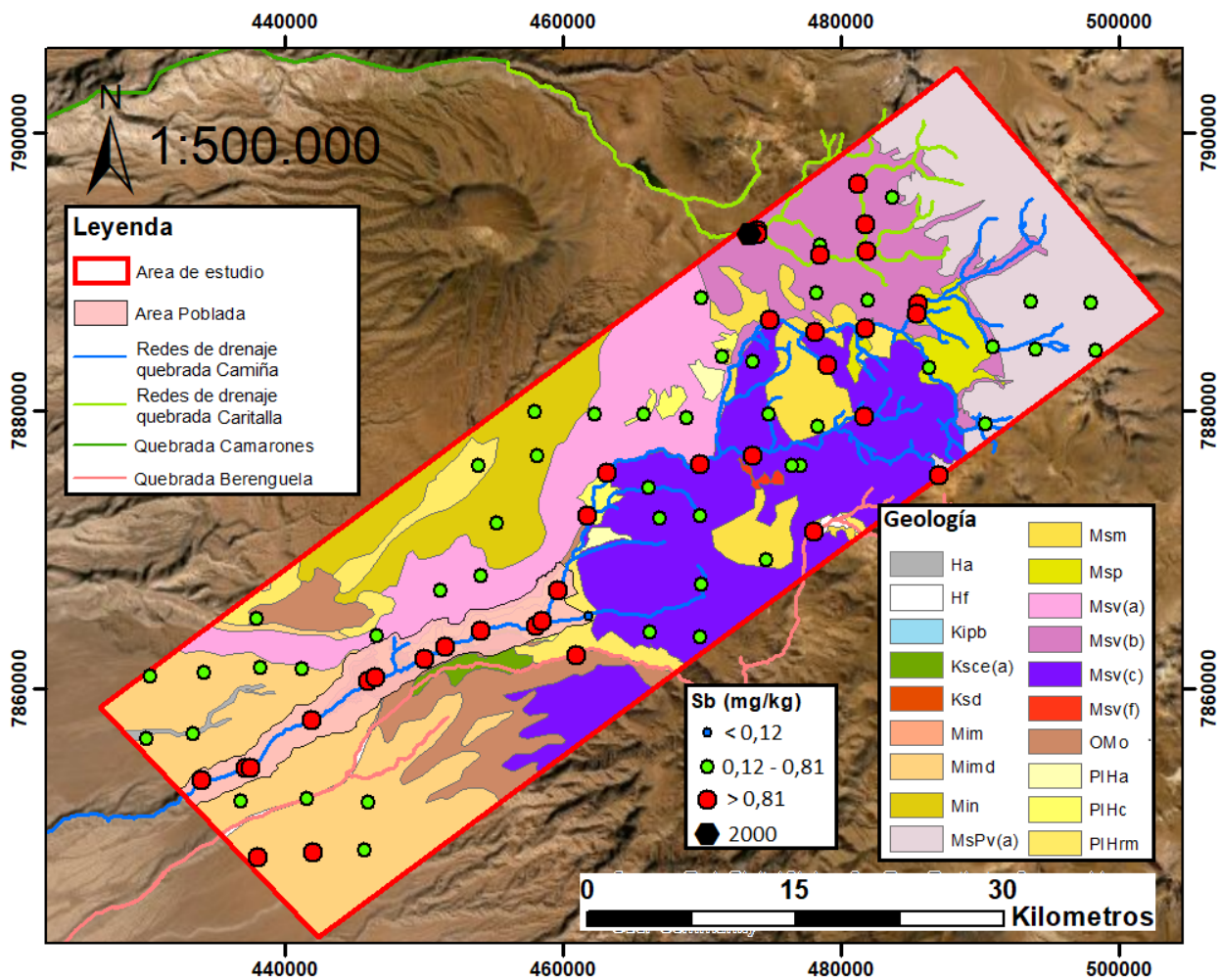


Figura 5.28: Línea de base geoquímica propuesta (verde) y anomalías positivas (rojo) y anomalías negativas (azul) para Sb. En negro, muestra excepcional de 2000 mg/kg.

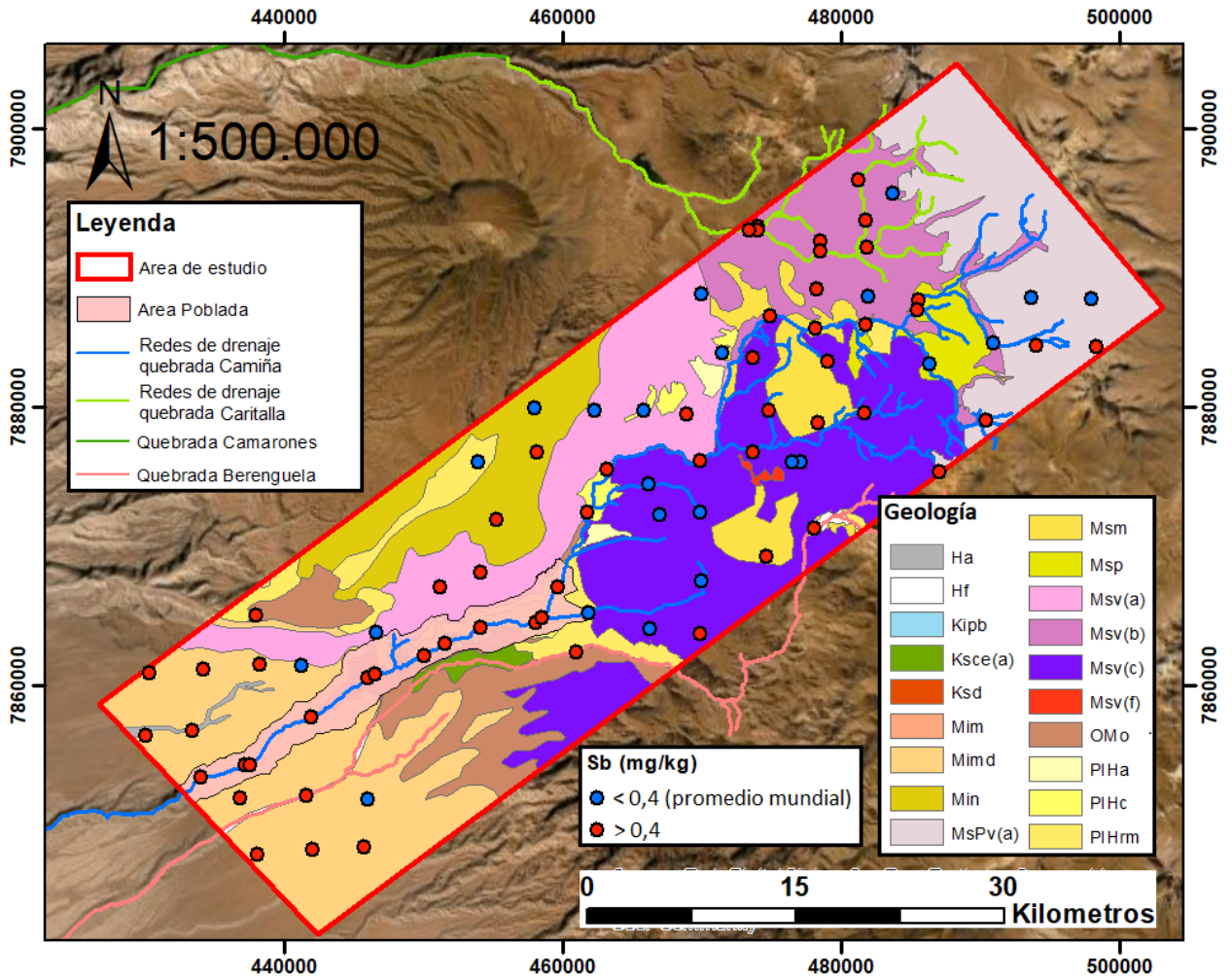


Figura 5.29: Concentraciones de Sb respecto a normativas CEQG y promedio mundial.

5.4.4.6. Zinc(Zn)

Para la línea de base propuesta en este estudio, el Zn se encuentra mayormente concentrado, ósea como anomalía positiva en las las secuencias volcánicas del Mioceno Superior, específicamente en Msv(b) y en parte Msv(c) (figura 5.30). El elemento Zn no presenta ninguna muestra sobre el PEL, pero si muestras sobre el promedio mundial (figura 5.29) establecido por Rudnick et al. (2003), las que son equivalentes a las que están por encima de la línea de base propuesta.

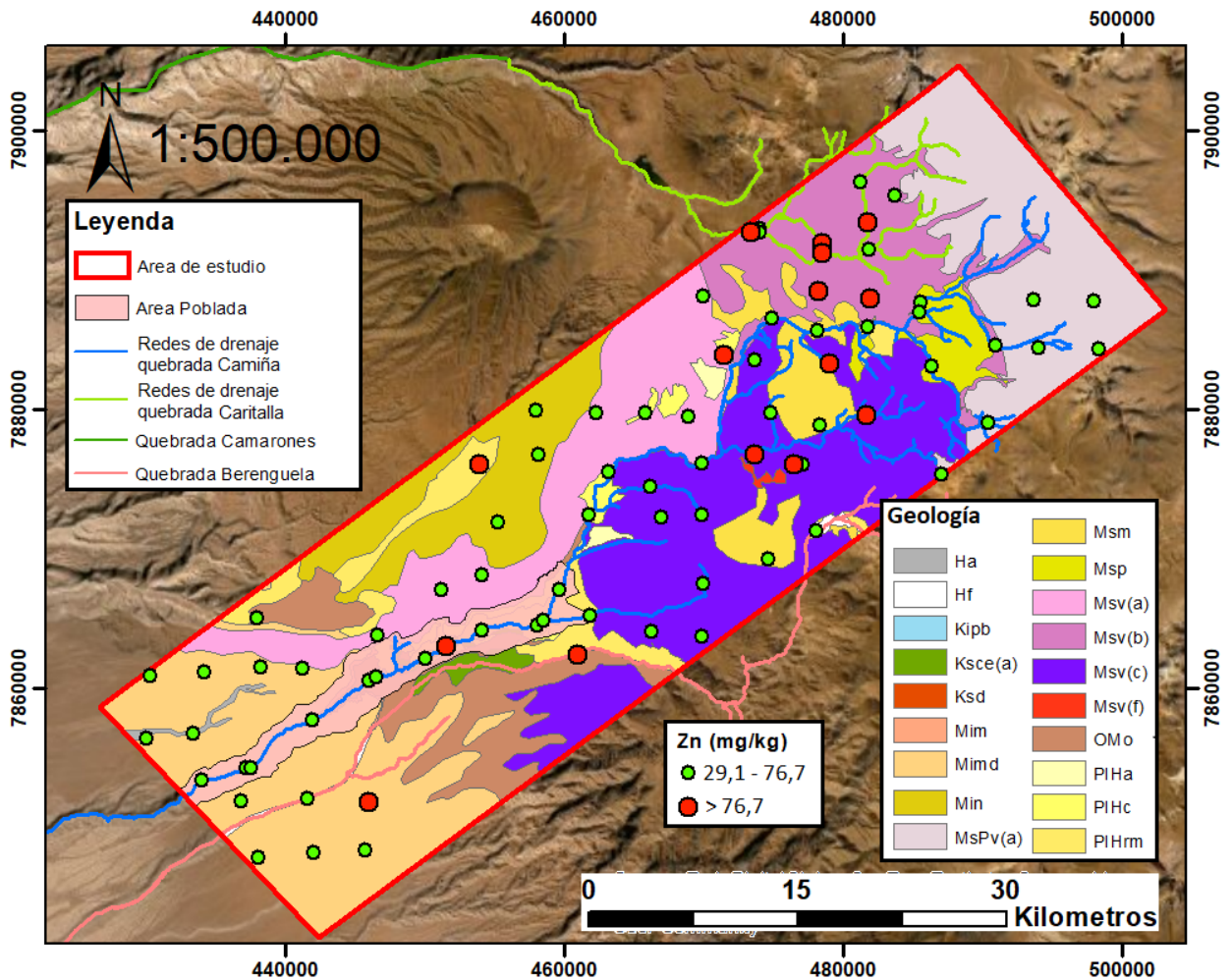


Figura 5.30: Línea de base geoquímica propuesta (verde) y anomalías positivas (rojo) para Zn.

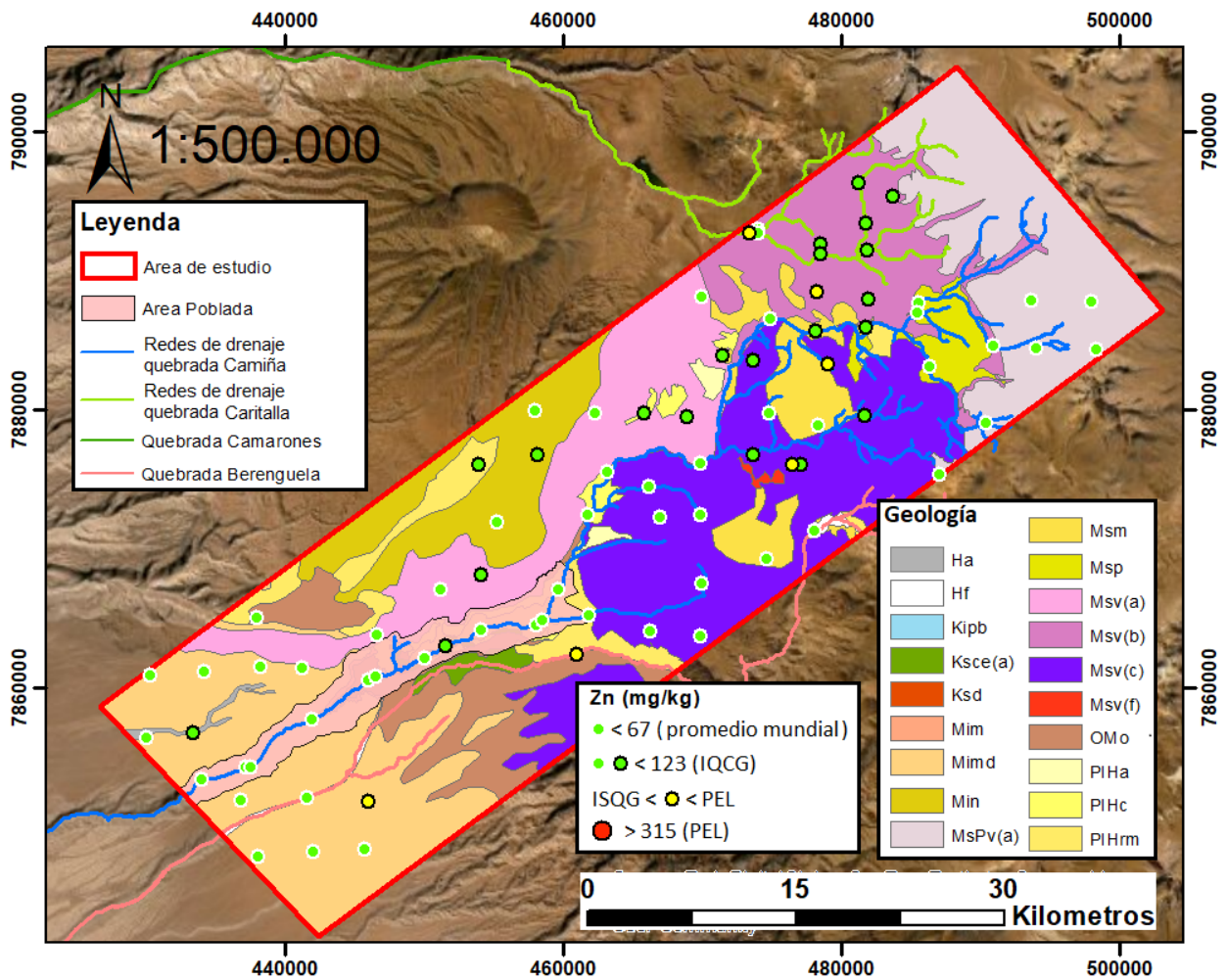


Figura 5.31: Concentraciones de Zn respecto a normativas CEQG y promedio mundial.

Capítulo 6

Discusiones

6.1. Geoquímica de sedimentos y antecedentes mineros

Como subproducto de la minería se encuentran muchos elementos, como As, Sb y Mo. En el área de estudio no hay gran minería desarrollada, solo prospectos y piques artesanales, aun así, estos podrían tener cierta relevancia en la concentración de ciertos elementos en muestras de sedimentos.

Partiendo con los prospectos Camiña y Quistagama (señalados como 1 y 2 respectivamente en la Carta Geológica Camiña (Valenzuela et al., 2014) y en la figura 6.1), se tiene que corresponden a prospectos de minerales de hierro y cobre sulfurados. La presencia de minerales con azufre agrega la posibilidad de que se presenten otros elementos también calcófilos, como los son el Zn, As, Sb.

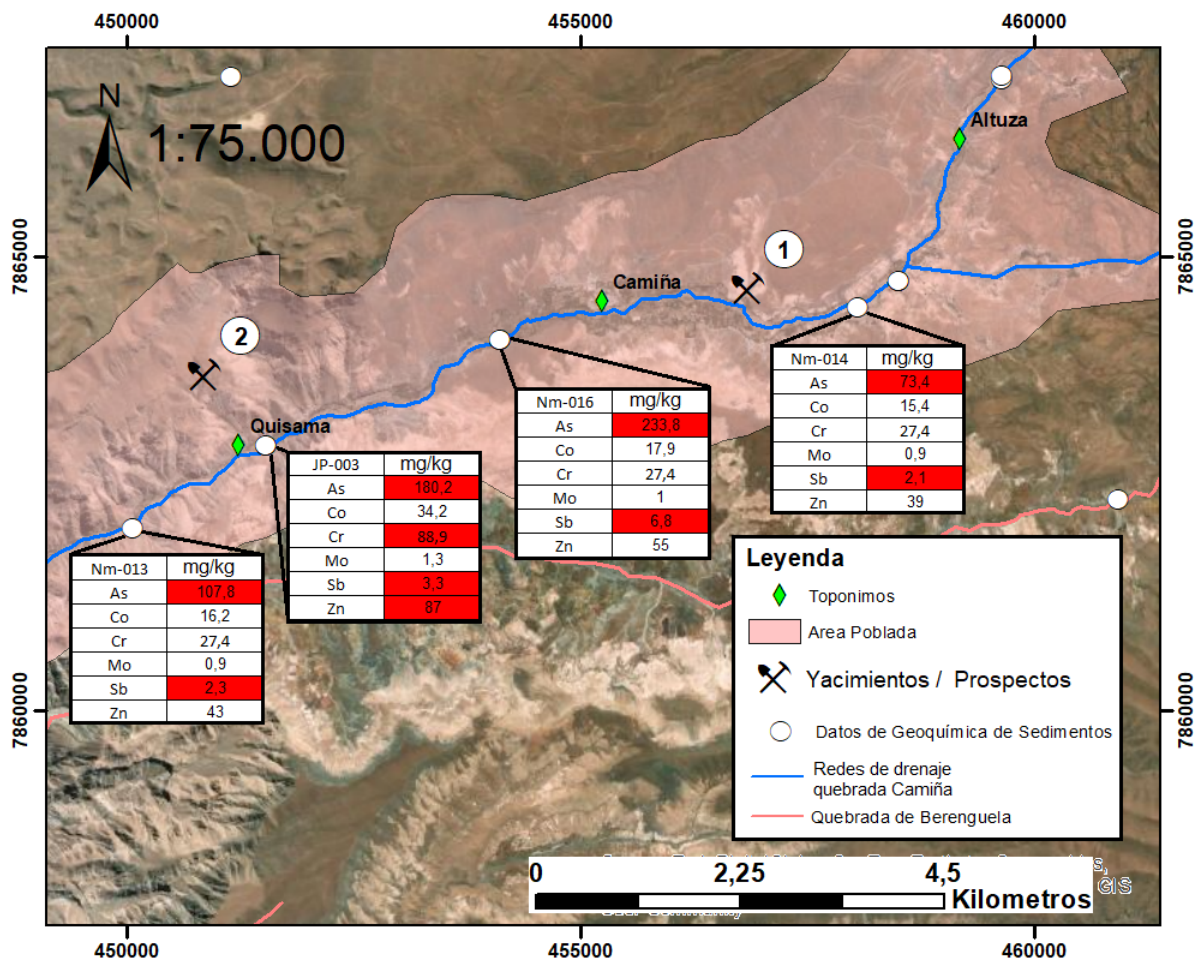


Figura 6.1: Yacimientos N°1 y 2 descritos en la Carta Geológica Camiña y concentraciones de elementos estudiados en sedimentos cercanos a esta. Concentraciones en rojo corresponden a muestras por encima de la línea de base calculada para cada elemento en este estudio.

El punto de muestreo JP-003 inmediatamente debajo del Prospecto Quistagama (2), presenta a diferencia de las otras muestras una mayor concentración de los elementos Zn, Mo, Co y Cr.

En el Prospecto Limpire (4) la mena principal es oro. El oro por lo general se encuentra con piritita y arsenopiritita, quienes actúan como concentradores del elemento; por lo que el prospecto Limpire podría tener altas anomalías de As a su alrededor, aun así, la muestra más cercana señala una concentración de As relativamente normal en lo que es sedimento de río en la quebrada Camiña (que por lo general son altas concentraciones, pero esta muestra no presenta una gran anomalía). Es posible que la explotación de oro en este prospecto no haya sido de un volumen considerable y los desechos mineros no hayan sido vertidos al cauce del río, porque si fuera así, es probable que las concentraciones de As serían más altas en la muestra Fa-228.

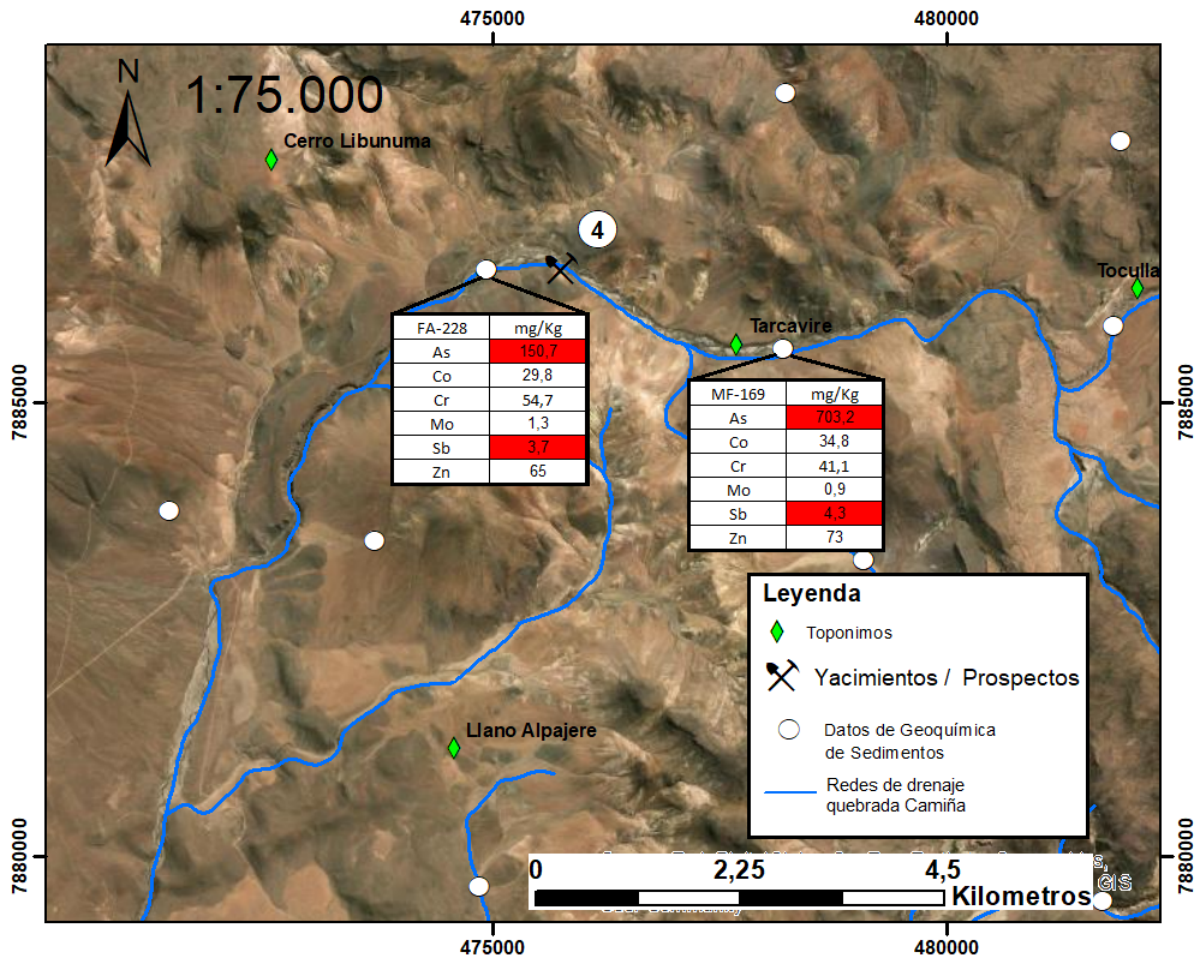


Figura 6.2: Yacimiento N°4 descrito en la carta Camiña y concentraciones de elementos estudiados en sedimentos cercanos a esta. Concentraciones en rojo corresponden a muestras por encima de la línea de base calculada para cada elemento en este estudio.

La mina Pumire (señalada con un 8 en la figura 2.3 en la sección 2.2) está a más de 7 km del punto de muestro de sedimento más cercana, por lo que se descarta su posible influencia en las muestras de río.

Cabe destacar, que ninguna de las muestras de sedimentos en el área de estudio corresponde a un tipo de muestra de “compósito de sedimento de relave” o sedimentos de desechos mineros. Por lo que el hecho de que los sedimentos estén influenciados por estos prospectos o minas es muy baja.

6.2. Geoquímica de aguas y concentración de As en aguas

Dentro de lo que es la hidrogeoquímica, observando los diagramas de stiff (figura 6.3) se puede observar que aquellos diagramas en “forma de T”, (ósea alto Na^+ y Cl^- , como lo indica la Figura 6.4) son a su vez los que tienen las mayores concentraciones de As en toda el área de estudio. Estas muestras corresponden a AVO, AN, AVE, PU1, PU2, PU3, PU4, JU y las muestras MU1 y MU2. Todas estas muestras tienen grandes concentraciones, desde casi los 10mg/L de As, excepto las muestras MU1 MU2, las cuales no presentan su concentración de As en la base de datos.

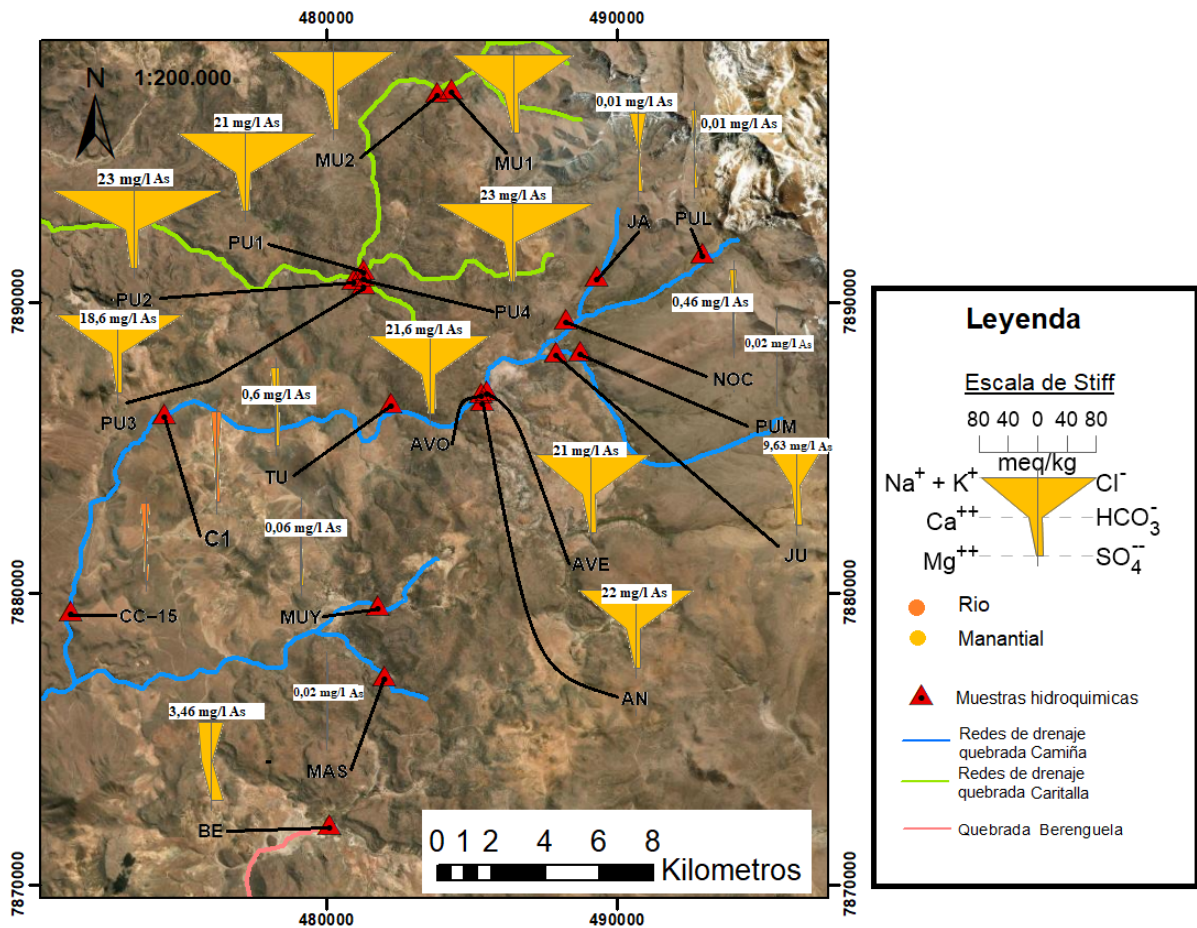


Figura 6.3: Concentración de As en mg/l y diagramas de Stiff muestras de manantiales de la Codillera Occidental.

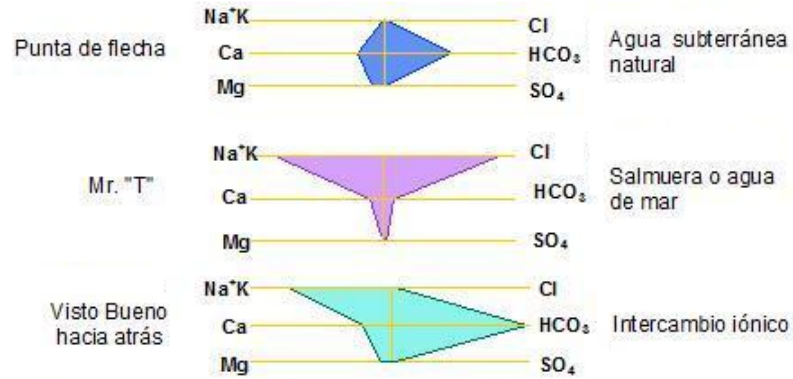


Figura 6.4: Diagramas de Stiff típicos, modificado de De Ferrer (2001)

Cerca del área de estudio no hay depósitos salinos cercanos, el más cercano es el salar de Surire a más de 30km al noreste. Sin embargo, según W. F. Giggenbach (1988) las aguas de Na⁺-Cl⁻ son el resultado de una interacción agua-roca a largo plazo entre el agua subterránea enriquecida en gases volcánicos y calentada cerca de la cámara magmática y la roca huésped que estas aguas encuentran a lo largo de su trayectoria de flujo, por lo que es posible encontrar manantiales altamente salinos. Por su parte, el As se lixivia de las rocas anfitrionas del reservorio geotérmico, donde el alto tiempo de residencia, la temperatura y la presión, y las condiciones reductoras (presencia de As (III)), favorecen la liberación de As de los minerales rocosos (Webster y Nordstrom, 2003).

Los fluidos que ascienden sin pérdida de calor (o pérdida limitada de calor debido al enfriamiento por conducción), emergerán como aguas de Na⁺-Cl⁻. Por lo que aguas de Na⁺-Cl⁻ generalmente muestran las concentraciones más altas de As de varios mg/l (Lopez et al., 2012).

En la figura 6.5 se puede apreciar como a medida que el río Camiña avanza aguas abajo, la concentración de As disminuye, en comparación con la relación $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$, que muestra que la concentración de estos iones va aumentando ligeramente a medida que el río avanza aguas abajo (cabe destacar que en el rectángulo de la derecha, se encuentran las muestras C1 y posterior CC-15, que son las muestras de río más altas de la quebrada Camiña topográficamente hablando). Para efectos de la muestra C1, la cual es la única muestra de agua en que el As está bajo el límite de detección, refutaría la conclusión de que el As disminuye aguas abajo, pero conociendo la posición donde se ubica esta muestra debería ser mayor en concentración de As que todas las anteriores, puesto que está más cerca de las fuentes de aguas de manantiales de las cuales brota una muy elevada concentración de As (cerca de los 20mg/l). Esta muestra (C1) en los diagramas de stiff cumple que posee una menor concentración de Na^+ , Cl^- y Ca^{+2} respecto a las muestras de río abajo como se comprobó en este estudio, por lo que el dato podría estar en lo cierto y el error podría deberse a la hora de medir la concentración del As, sin embargo, al no existir otro dato o estudio que apoye esto, se debe confirmar o descartar más adelante en un estudio posterior.

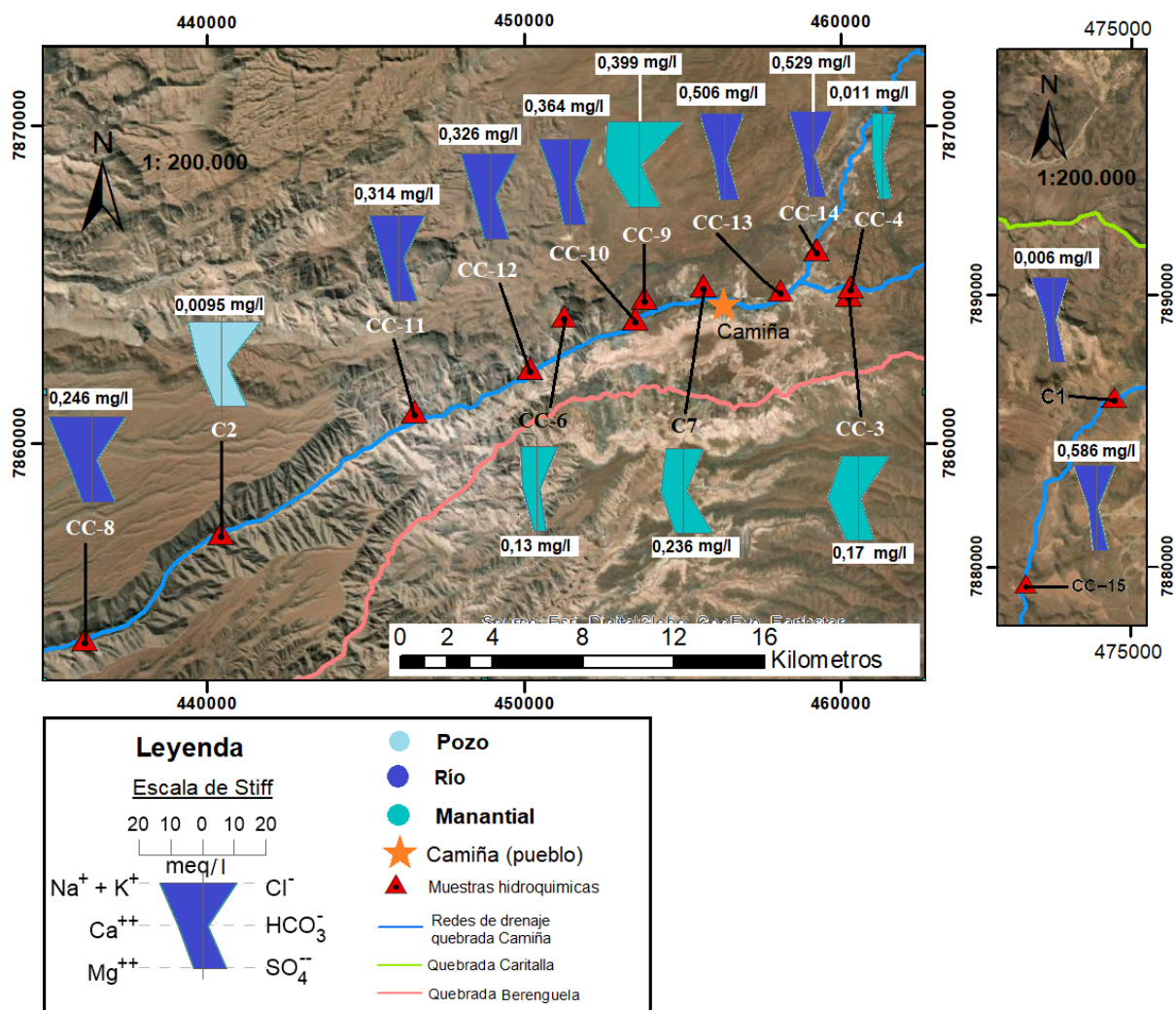


Figura 6.5: Concentración de As en mg/l y diagramas de Stiff de muestras de la Depresión Central y Precordillera

También en la figura 6.5 se puede apreciar tanto concentraciones de aguas de río como agua de manantial en el sector más poblado del área de estudio, los alrededores del pueblo de Camiña. Acá se llevan las actividades tanto agrícolas como crianza de animales. Considerando el límite de As para las aguas de riego según la NCh 1333 es 0,1 mg/l y para el consumo humano/animal 0,01 mg/l según la Nch 409, ninguna de las aguas de los manantiales es apta para alguno de los 2 fines. Si se podría usar la CC-6 para riego por estar cerca del límite para ese uso y CC-4 CC-3 por estar cerca del límite de agua potable y bajo el límite de riego. La única muestra apta para beber es la muestra de pozo C2. A pesar de lo comparado respecto a las normas chilenas de agua potable y riego, en la sección 5.2 y sección 5.3 respectivamente, se determinaron los riesgos de beber de las muestras de agua presentes en el área poblada de la cuenca de la quebrada Camiña y los riesgos de la población por cultivar en los suelos del sector. De los riesgos al beber, se obtuvo que solo de los manantiales CC-4 y CC-3 no existiría un riesgo significativo de consecuencias cacerinas y no cancerígenas con efectos dérmicos. Para los riesgos de usar las aguas y sedimentos de la quebrada Camiña para hacer cultivos, se tiene que a pesar de que se usen el río para regadío, los granos del maíz demostraron no conservar el As que contiene tanto el suelo como las aguas del río.

Respecto a la influencia de los manantiales en la concentración de As en el río, no es posible establecer una relación directa, al menos las aguas de los manantiales CC-4 y CC-3 que tienen una muy baja concentración de As, se puede deducir que ayudarían a que se diluya la concentración de As en el río Camiña. Los manantiales C7 y CC-6 aportarían a que siga disminuyendo la concentración de As en el río y CC-9 la aumentase ligeramente. Pero como se dijo anteriormente, no es posible establecer una relación de este tipo porque no hay datos de caudales del río y de los manantiales para hacer una mezcla exacta de concentraciones.

6.3. Relaciones entre concentraciones de As en sedimentos y aguas

Para tener una mejor visión sobre los datos, se fragmento el área de estudio en 3 para lograr ver con mejor detalle las ubicaciones y concentraciones de As en aguas y sedimentos. Cabe señalar que se teoriza que las mayores concentraciones de As en sedimentos estarían de la mano del aporte continuo de As desde el agua y que las altas concentraciones de As en aguas (principalmente de manantiales) provengan de una lixiviación continua de el sustrato o Formación rocosa presente, la cual sería más rica en As que otras formaciones rocosas.

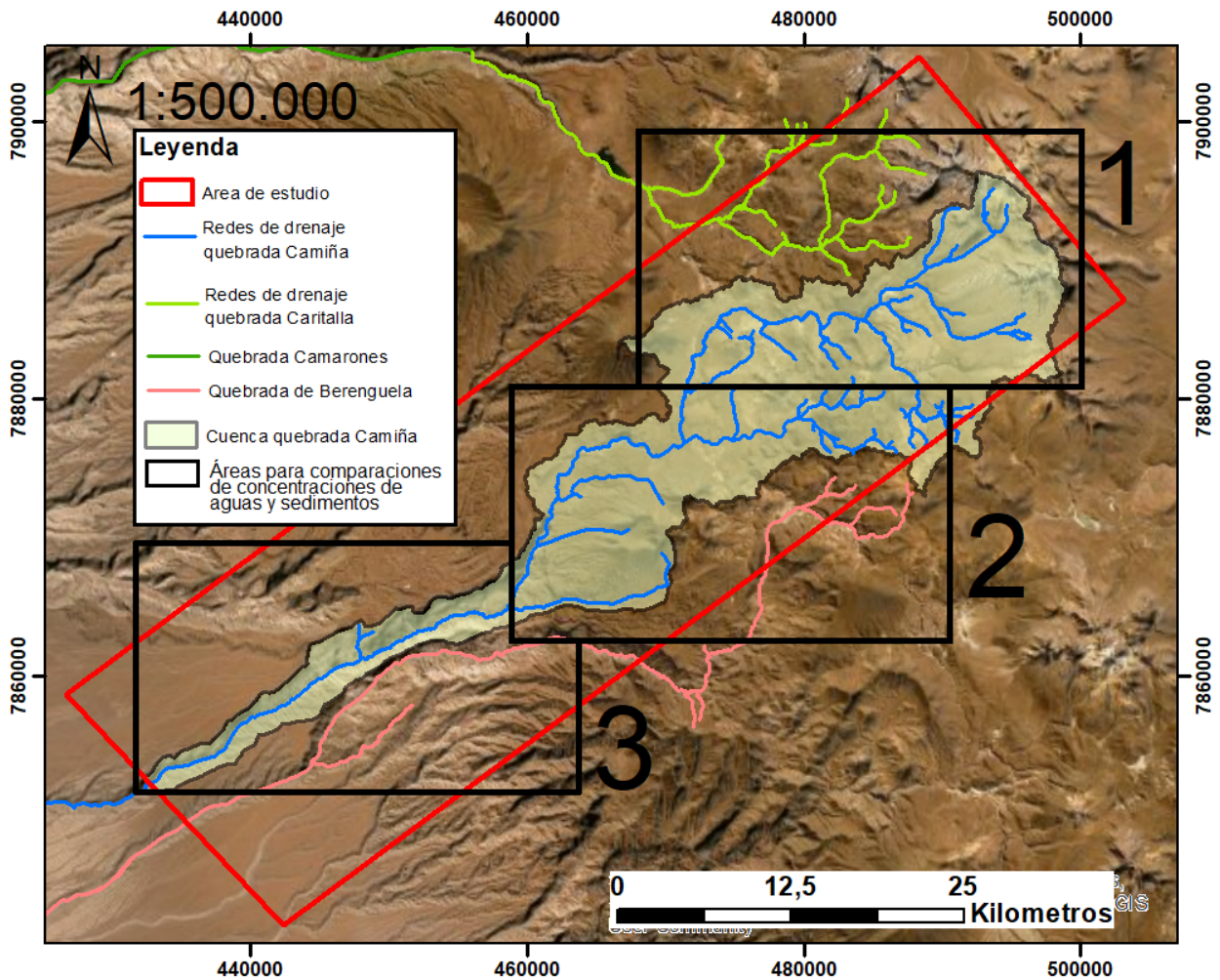


Figura 6.6: Áreas de énfasis para lograr una mejor discusión sobre las relaciones de concentraciones entre aguas y sedimentos en toda el área de estudio.

La presencia de As en la 1ra área (figura 6.7) en la quebrada Camiña comienza a ser significativa en el manantial JU, en el sector de Pumire. La primera muestra de sedimentos aguas debajo de esta muestra de agua de manantial muestra valores mayores a 500mg/kg, lo que sugiere una influencia del manantial y o de arrastres de sedimentos del sector de donde se encuentra el manantial JU a la muestra de sedimento mencionada. Continuando por el río Camiña, en el sector de Surire se suman los manantiales AVE, AVO, AN, quienes presentan las concentraciones más altas de As de aguas de manantial de la quebrada Camiña, arriba de los 20 mg/l. La muestra de sedimento en el río Camiña, alcanza casi los 800 mg/kg de concentración en este punto junto a los manantiales, lo que sugiere que la muestra en ese sector está influenciada directamente por los manantiales.

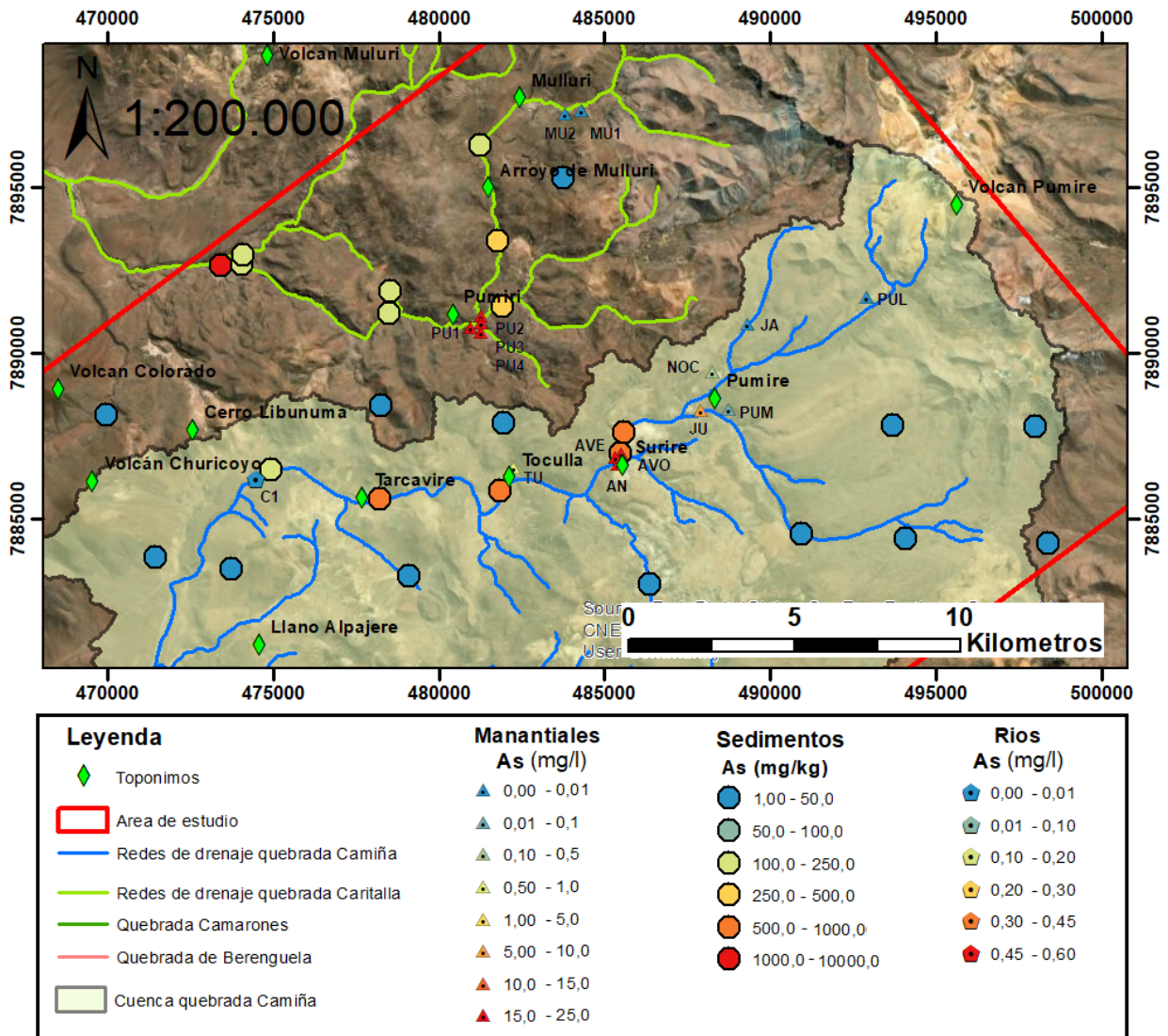


Figura 6.7: Mapa de concentraciones de aguas y sedimentos, área 1

Continuando por el cause principal, en Toculla, el manantial TU no aporta elevadas concentraciones de As al río, pero el enriquecimiento en sedimentos sigue siendo muy alto, al igual que la muestra en Tarcavire. Donde se ubica la muestra de río C1, como se dijo en la

sección anterior de análisis de aguas de ríos, la concentración de As en esta muestra de agua de río no es afín, pero en la muestra de sedimentos aledaños a esta muestra de río, constata ya un descenso respecto a las anteriores mencionadas.

En la quebrada Caritalla, las muestras MU en Mulluri no tienen datos de concentración de As pero se presume que deberían ser altas por lo mencionado anteriormente en la sección de análisis de geoquímica y As en aguas (altos niveles de sales están asociados a altos niveles de As). La concentración en el arroyo aumenta a medida que se baja hasta las muestras PU en Pumiri, que tienen los más altos niveles de As junto a las muestras de Surire en la quebrada Camiña. Estos manantiales en Pumiri deberían aportar gran cantidad de As a la quebrada Caritalla, sin embargo, las muestras posteriores de sedimento de río muestran solo una concentración medianamente alta. La muestra de mayor concentración de As en sedimentos de toda el área de estudio es la muestra roja que se observa al costado de la quebrada Caritalla y rosando el borde del área de estudio, esta muestra corresponde a una muestra de borde de laguna, específicamente la "Laguna Roja".

En la 2da área (figura 6.8), se aprecia que en la zona que esta la muestra de manantial MUY en la quebrada Maimaja, la concentración de As en el agua es muy baja, pero en la muestra de suelo aledaña es medianamente alta. Puede ser que en el manantial de la muestra MUY, haya tenido distintos niveles de emisión de As en otros periodos. Volviendo al cause principal de la quebrada Camiña, la muestra CC-15 cerca de Alpajere, muestra ser el valor más alto de As en aguas a nivel de medición en río. La concentración de As en sedimentos sigue disminuyendo río abajo hasta el sector de Altuza, donde se vuelve a encontrar otra muestra de concentración media alta, la concentración de As en la muestra de río CC-14 es ligeramente menor respecto a CC-15. El aporte de As al cauce principal de la cuenca Camiña la quebrada Chiña no debiese ser muy considerable, pues sus manantiales tienen concentraciones mínimas (cercasas a 0,01mg/l) de As en aguas. En la quebrada Berenguela, la muestra de agua de manantial BE en el sector de Berenguela tiene una concentración media de As, la concentración de As en la muestra de sedimento siguiente es extremadamente alta, por lo que no se descarta que exista un manantial no catalogado que aporte más As a la quebrada Berenguela en ese sector.

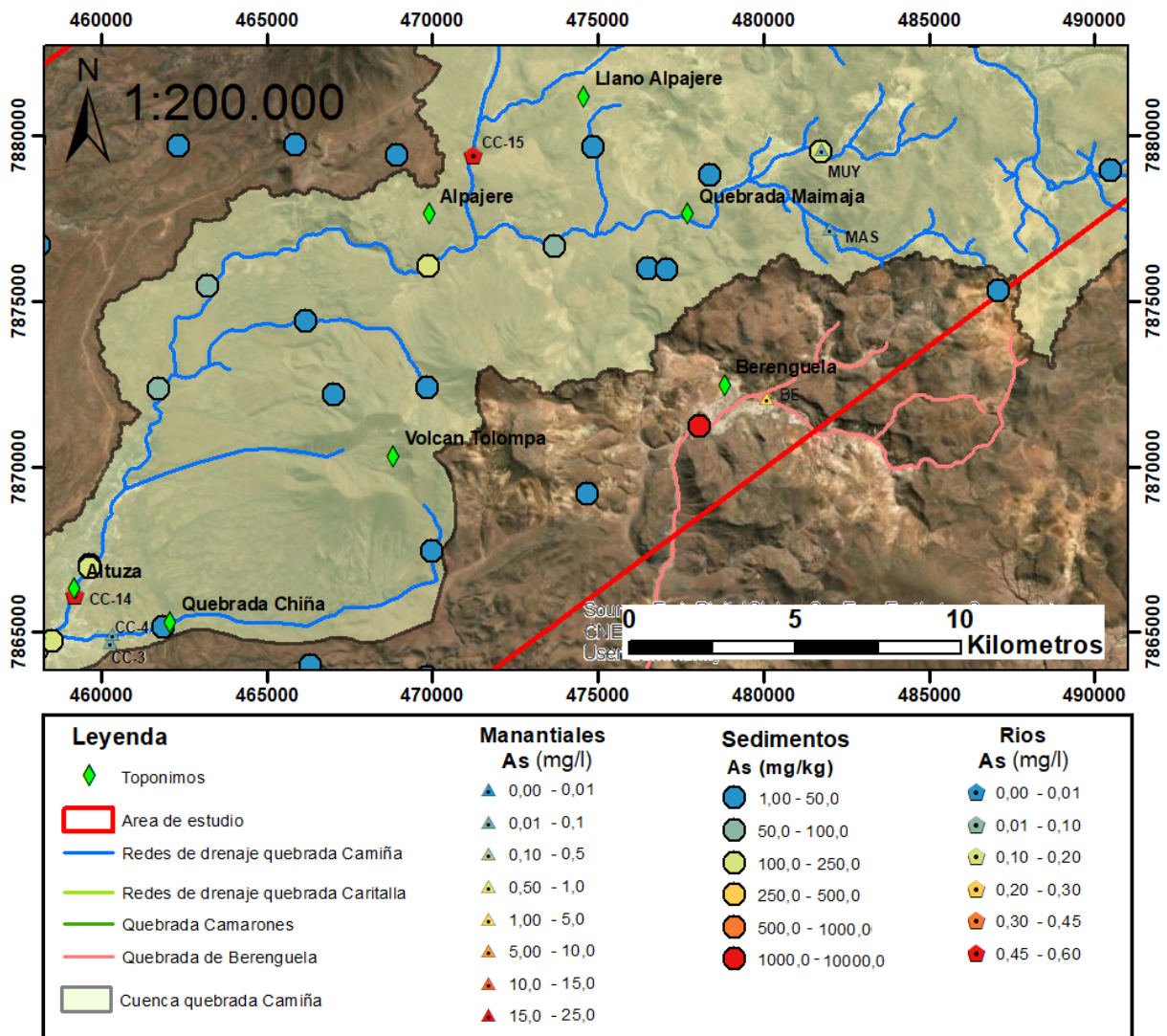


Figura 6.8: Mapa de concentraciones de aguas y sedimentos, área 2

En la 3ra área (figura 6.9), se puede observar como ya todas las muestras de aguas de manantiales son de baja concentración de As y en las muestras de aguas de ríos, el As sigue disminuyendo a medida que seguimos avanzando hacia el oeste. Los sedimentos continúan teniendo concentraciones medias bajas, a excepción de la muestra recogida en las cercanías al oeste de Camiña, puede ser que esta este influenciada un poco por CC-9, que es un manantial de concentración medianamente baja de As.

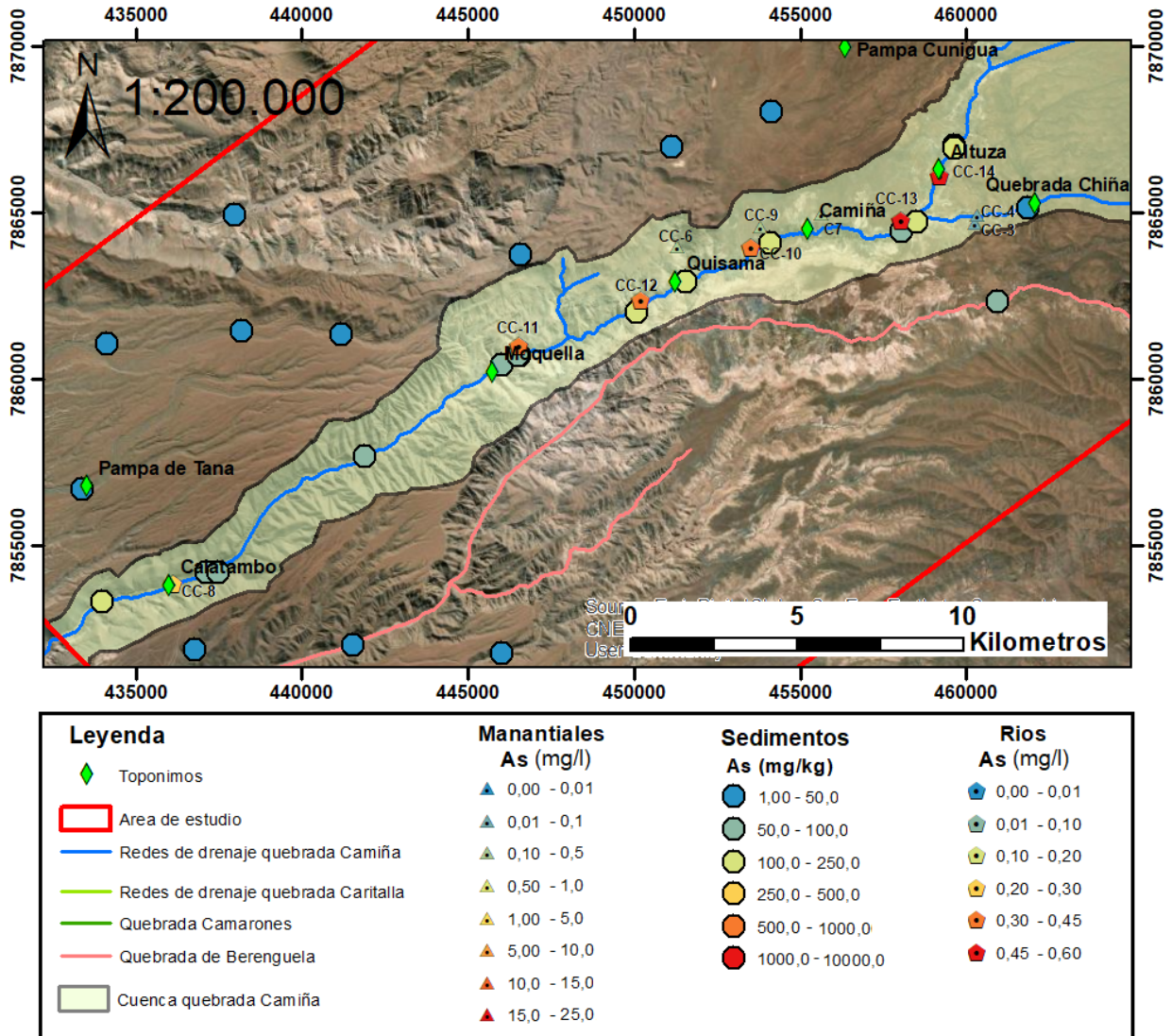


Figura 6.9: Mapa de concentraciones de aguas y sedimentos, área 3

En lo que resta de la quebrada Camiña río abajo, las concentraciones de As en muestras de río siguen disminuyendo al igual que las concentraciones en sedimentos, se observan continuamente más bajas, a excepción de la última.

La hipótesis planteada al inicio de este trabajo, dice que el As en aguas y sedimentos en el área poblada de y en la cuenca Camiña tiene origen en la alta cordillera, a partir de manantiales que liberan alta concentración de As al agua y posteriormente hay transferencias desde el agua a los sedimentos en el transcurso del río. Esto según lo expuesto en los mapas anteriores debería ocurrir, y sería explicado según Lopez et al. (2012), quien plantea que la transferencia significativa de As del agua a los sedimentos puede ocurrir cuando el agua circula a lo largo de un río, donde la relación agua/sedimento es baja y las condiciones son oxigenadas, en este ambiente se favorecen los procesos de sorción en minerales de Fe (la presencia de minerales de hierro férrico es capaz de absorber el As). En el área de estudio, la concentración de óxido férrico en sedimentos es muy alta, ocupando desde 4,5% hasta el 61,5% del peso de las muestras, esto equivalente a decir que las concentraciones de óxido férrico van desde los 45 g/kg hasta los 615 gr/kg, suficiente para lograr que el As se adsorba en grandes cantidades.

El hecho de que el agua mantenga una concentración considerable de As durante su escorrentía en el río, se debe a ciertos procesos muy probables en el área de estudio. Uno de ellos son las altas concentraciones de sílice disuelta muy comunes en la descarga de aguas geotérmicas (Recordar que los manantiales de las muestras AVE, AVO y AN, son manantiales de aguas hipertermales, ósea entre los 45°C y 100°C; sus concentraciones de sílice son 165 mg/l, 202 mg/l y 140 mg/l respectivamente, mucho más altas que otras muestras de manantiales fríos presentes en el área de estudio). Esta sílice disuelta puede inhibir la adsorción de As por parte del hierro férrico (Fe^{+3}), debido a la saturación de sílice en la superficie del río, como se observa en el sitio de El Tatio (Landrum et al., 2009).

Los altos contenidos de As a lo largo del río Camiña también serían explicados un estudio propuesto por Campos et al. (2011) en la quebrada Camarones, quien señala que las bacterias epilíticas naturalmente presentes en las rocas de origen volcánico en la cuenca del río, aumentarían la movilidad del As bajo condiciones de pH circum-neutral (cerca a la neutralidad) jugando un rol fundamental en la especiación del As y en la quebrada Camiña, el pH en las muestras de río varían entre los 6,5 y 8,1 (circum-neutrales).

Además, Según autores como Mansilla y Cornejo (2002) las precipitaciones en la alta cordillera también jugarían un rol fundamental, debido a que son acompañadas por descargas eléctricas de rayos que promueven la formación de gases tipo NOx responsables de la precipitación ácida. La infiltración de agua ácida y la reacción con minerales de As, los lixivian e incrementa la concentración de As en aguas. Esto podría ayudar a explicar las altas concentraciones de As en el río durante los meses de enero-febrero, donde a su vez los caudales son más altos y en esa misma época cae más del 95% de las precipitaciones del año entero.

Capítulo 7

Conclusiones y sugerencias

7.1. Conclusiones

Con el análisis de geoquímica de aguas y concentraciones de As se logró entablar y comprobar una relación sobre el tipo de agua que emana altas concentraciones de As, además de discernir cuales fuentes de aguas son o no potables para el consumo o industria agrícola.

A través del análisis geoquímico de sedimentos fluviales y lacustres de se ha podido generar la línea de base geoquímica para esta zona de estudio (quebrada Camiña desde Calatambo y áreas aledañas) para los elementos As, Co, Cr, Mo, Sb y Zn e identificar fuentes potenciales de estos mismos elementos a través de la geología local y estudios de procesos que justifiquen o no su transporte. Las muestras de sedimentos Cd, Cu, Hg, y Pb fueron descartados por falta de representatividad de los datos a través del análisis de duplicado.

Finalmente, en las discusiones, con la observación dual de concentraciones de As en sedimentos con las aguas de ríos y manantiales, se logró verificar la proveniencia del As en la quebrada Camiña y se le logro dar una explicación a como este sería transportado río abajo. El estudio permite obtener las siguientes conclusiones generales:

El desarrollo de una línea base geoquímica de los sedimentos estudiados, permite conocer las concentraciones y distribución actuales de los elementos de estudio, lo que puede ayudar a discernir cuales han sido los que se presentan en concentraciones mayores y anormales en áreas pobladas al ser transportados por el agua, estos vendrían siendo el As y Sb. También estas líneas de base pueden ayudar a comparar a futuro cambios en las concentraciones de los elementos estudiados en ciertas áreas, debido a procesos antropogénicos o geogenéticos. Todos los elementos estudiados tendrían concentraciones atribuidas a orígenes geogenéticos.

Desde un punto de vista medioambiental, el elemento As sobrepasaría valores por encima de recomendaciones mundiales frente a posibles daños en casi toda el área de estudio, principalmente en la quebrada Camiña y su área poblada. Para el caso de Cr, este nivel sería sobrepasado solo en áreas inhóspitas, por lo que no presentaría riesgo. Respecto a los promedios mundiales de los elementos estudiados, El As, Sb y en menor medida el Co, se presentan superando por creces el promedio mundial en el área poblada de la quebrada Camiña.

En las aguas de río, el elemento As en la quebrada Camiña tendría un origen geogenético,

debido a fuentes de aguas termales en la alta cordillera en el sector de Surire. La constante escorrentía del agua jugaría un papel clave en la concentración del As en los sedimentos fluviales, donde el As se adheriría a los sedimentos gracias a la alta concentración de óxido ferroso en estos. El origen antropogénico del As por minería se descarta por la ausencia de grandes mineras en la cuenca de la quebrada Camiña. Los periodos en que el río Camiña presenta ligeramente mayores concentraciones de As, coinciden cuando este lleva mayor caudal y también cuando es temporada de lluvias en la zona (enero y febrero), donde la lixiviación de parte de las lluvias y nieve caída en los sedimentos de la cuenca Camiña, jugarían un papel clave en las concentraciones de As en el río en esta época.

Ambientalmente, el agua tanto de manantiales como de ríos del área poblada de la quebrada Camiña, superan los límites establecidos de consumo de agua potable. Solo el agua de la muestra de pozo "C2" tiene niveles por bajo de lo establecido para ser apta para consumo. Hablando sobre las aguas de riego, el río Camiña históricamente siempre ha superado el umbral máximo de As para riego, por lo que su uso en agricultura no es apto, sin embargo, el estudio de Herrera Apablaza et al. (2017), evidencia que las aguas del río Camiña han sido utilizadas constantemente para la agricultura y se comprobó que para un ejemplar de cultivo (grano del maíz) se presentan niveles de As no perjudiciales para la salud humana gracias a su capacidad de bioconcentración, en donde el As se concentra en las raíces pero no en el fruto o grano.

A pesar de las altas concentraciones de As en aguas, fue posible calcular que, para las muestras de aguas en el área poblada de la cuenca Camiña, existen riesgos tanto cancerígenos como no cancerígenos de beber de esta a largo plazo. Para los riesgos no cancerígenos, se obtuvo que beber de lugares donde se obtuvieron muestras por encima de 0,017 mg/l por al menos 30 años, es posible desarrollar problemas en el organismo. Para los riesgos cancerígenos se obtuvo que beber por encima de los 0,017 mg/l trae alta probabilidad de riesgos cancerígenos. Por lo que para los habitantes del área poblada de la quebrada Camiña (entre Calatambo y Altuza) que no tengan acceso a los sistemas de Agua Potable Rural (APR), podrían tener a largo plazo problemas tanto no cancerígenos dérmicos como problemas cancerígenos por beber de estos manantiales y sectores donde fueron tomadas muestras de río en el área poblada. Los únicos manantiales que están libres de riesgo tanto cancerígeno como no cancerígeno, son los manantiales estudiados de la quebrada La Chiña (muestras CC-4 y CC-3), y la muestra de pozo C2.

7.2. Sugerencias

Se sugiere que, para un estudio posterior en la zona, se podría tomar una muestra de agua en el mismo punto que C-1 para conocer la concentración de As en ese punto del río, puesto que se propone que su medición en laboratorio fue poco confiable al ser el único elemento en marcar bajo el límite de detección, los demás elementos y compuestos en la muestra denotan ser datos dentro de parámetros normales. En el punto de muestreo C-1, no hay indicios geológicos ni hidrogeoquímicos para indicar que la muestra tenga un valor tan bajo, el problema de que el As este bajo el límite de detección podría deberse a que la muestra no fue obtenida en un punto tan representativo del lecho del río, o que del laboratorio en que este fue medido, ya que solo las muestras C-1 y C-2 fueron enviadas al DICTUC de la Universidad Católica de Chile, en las que no se especificaron que métodos fueron utilizados para medir las concentraciones de los elementos, siendo que todas las demás muestras fueron enviadas al laboratorio Analítico de la Universidad Católica del Norte, en el que se especifican los métodos utilizados.

Ya que no se pudo contar con campaña de terreno, para un estudio más elaborado del mismo tema se podrían tomar nuevas muestras de composito de sedimento de rio en más puntos de la red de drenaje de la cuenca Camiña, además también de más muestras de agua de rio, para obtener datos de la concentración de As en las aguas además de la concentración de las bacterias epilíticas que vendrían a facilitar el transporte del As por el río y de la sílice disuelta que facilitarían el transporte del As mas cerca de los manantiales; todo esto para lograr una mayor asertividad a la hora de definir el origen del As y de su evolución en los distintos brazos de la red de drenaje de la cuenca Camiña.

Para tener más respaldo sobre que el riesgo de practicar agricultura en la quebrada Camiña es bajo a pesar de sus concentraciones elevadas en aguas y sedimentos, se debería evaluar cómo actúa la concentración en otros tipos de cultivos, principalmente en las papas o en las hortalizas de raíz (zanahorias, cebollas o ajos) ya que el maíz actuó como fitorremediador en los terrenos cultivados, concentrando el As en la raíz, y si ocurre lo mismo para las hortalizas, sería un riesgo altísimo cultivar y consumir de estas.

Bibliografía

- Achurra, L. (2010). *Estudio hidrogeoquímico sobre la interacción de aguas subterráneas profundas y someras en pampa lirima, norte de Chile* (Tesis Doctoral no publicada). Tesis de Máster en Hidrología Subterránea, Fundación UPC. Barcelona: 107 pp.
- Ashley, P., Craw, D., Graham, B. P., y Chappell, D. (2003). Environmental mobility of antimony around mesothermal stibnite deposits, New South Wales, Australia and Southern New Zealand. *Journal of Geochemical Exploration*, 77(1), 1–14.
- Astudillo W., F., Baeza B., L., Barrera S., J., Carrasco R., F., Castillo G., P., Espinoza H., F., . . . Ramírez M., C. (2015). Base de datos de geoquímica de sedimentos de la Hoja Pisagua, regiones de Tarapacá y de Arica y Parinacota, Chile. En (p. 1-44).
- ATSDR. (2004). *Reseña toxicológica para el cobalto*.
- Bamuwanye, M., Ogwok, P., y Tumuhairwe, V. (2015). Cancer and non-cancer risks associated with heavy metal exposures from street foods: Evaluation of roasted meats in an urban setting. *Journal of Environment Pollution and Human Health*, 3(2), 24–30.
- Bertrand, G., Guillou-Frottier, L., y Loiselet, C. (2014). Distribution of porphyry copper deposits along the western Tethyan and Andean subduction zones: Insights from a paleotectonic approach. *Ore Geology Reviews*, 60, 174–190.
- Blanco, N., Vásquez, P., Sepúlveda, F., Tomlinson, A., Quezada, A., y Ladino, M. (2012). Levantamiento geológico para el fomento de la exploración de recursos minerales e hídricos de la cordillera de la costa, depresión central y precordillera de la región de Tarapacá (20-21 s). *Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-12-50*, 7.
- Bundschuh, J., Armenta, M. A., Morales-Simfors, N., Alam, M. A., López, D. L., Delgado Quezada, V., . . . others (2020). Arsenic in Latin America: New findings on source, mobilization and mobility in human environments in 20 countries based on decadal research 2010-2020. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1–139.
- Campos, V., León, C., Mondaca, M., Yanez, J., y Zaror, C. (2011). Arsenic mobilization by epithermal bacterial communities associated with volcanic rocks from Camarones River, Atacama Desert, Northern Chile. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 61(2), 185–192.
- Cecioni, G., y García, F. (1960). *Observaciones geológicas en la cordillera de la costa de Tarapacá* (n.º 6). Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Cembrano, J., Lavenu, A., Yañez, G., Riquelme, R., García, M., González, G., y Hérail, G. (2007). Neotectonics. *The geology of Chile*, 231–261.
- CEQG'S. (2002). *Canadian environmental quality guidelines* (Vol. 2). Canadian Council of Ministers of the Environment.
- Charrier, R., Chávez, A. N., Elgueta, S., Hérail, G., Flynn, J. J., Croft, D. A., . . . García, M. (2005). Rapid tectonic and paleogeographic evolution associated with the development of the Chucal anticline and the Chucal-Lauca basin in the Altiplano of Arica, Northern Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 19(1), 35–54.

- Charrier, R., Farías, M., y MaksaeV, V. (2009). Evolución tectónica, paleogeográfica y metalogénica durante el cenozoico en los andes de Chile norte y central e implicaciones para las regiones adyacentes de Bolivia y Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 65(1), 05–35.
- Charrier, R., Hérail, G., Pinto, L., García, M., Riquelme, R., Farías, M., y Muñoz, N. (2013). Cenozoic tectonic evolution in the central andes in northern Chile and west central Bolivia: implications for paleogeographic, magmatic and mountain building evolution. *International Journal of Earth Sciences*, 102(1), 235–264.
- Charrier, R., Pinto, L., y Rodríguez, M. P. (2007). *Tectonostratigraphic evolution of the Andean orogen in Chile*.
- Chou, C.-H., y Harper, C. (2007). Toxicological profile for arsenic.
- Craw, D., Wilson, N., y Ashley, P. (2004). Geochemical controls on the environmental mobility of Sb and As at mesothermal antimony and gold deposits. *Applied Earth Science*, 113(1), 3–10.
- Daniele, L., Cannatelli, C., Buscher, J., y Bonatici, G. (2019). Chemical composition of Chilean bottled waters: Anomalous values and possible effects on human health. *Science of the Total Environment*, 689, 526–533.
- De Ferrer, M. P. (2001). *Inyección de agua y gas en yacimientos petrolíferos*. Ediciones Astro Data SA Maracaibo, Venezuela.
- Digert, F., Hoke, G., Jordan, T., Isacks, B., y Campos, E. (2003). Subsurface stratigraphy of the Neogene Pampa de Tamarugal basin, northern Chile. En *X Congreso Geológico Chileno, Concepción, Chile* (p. 8).
- Emons, H., Sebesvari, Z., Falk, K., y Krachler, M. (2004). Occurrence and speciation of arsenic, antimony and tin in specimens used for environmental biomonitoring of limnic ecosystems. En *Organic metal and metalloïd species in the environment* (pp. 71–95). Springer.
- Farías Sarmiento, V. F. (2012). Análisis geomorfológico de megadeslizamiento entre las quebradas Camarones y Tiliviche, región de Tarapacá.
- Gajardo, A., López, M., Carrasco, R., y Mendoza, J. (2004). Yacimientos de rocas y minerales industriales de la I región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Recursos Minerales y Energéticos, no. 8, 14 p., 1 mapa escala 1:500.000. *Santiago de Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería*.
- Galli, C., y Dingman, R. J. (1962). Cuadrángulo Pica, Alca, Matilla y Chacarilla con un estudio sobre los recursos de agua subterránea, provincia de Tarapacá. Carta Geológica de Chile.
- Gałuszka, A., Migaszewski, Z. M., Dołęgowska, S., Michalik, A., y Duczmal-Czernikiewicz, A. (2015). Geochemical background of potentially toxic trace elements in soils of the historic copper mining area: a case study from Miedzianka Mt., Holy Cross Mountains, south-central Poland. *Environmental Earth Sciences*, 74(6), 4589–4605.
- García, M. (2002). Evolution oligo-neógena de l’altiplano occidental (arc et avantarc du nord du Chili, Arica). *Tectonique, volcanisme, sédimentation, géomorphologie et bilan érosion-sédimentation. These de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble*.
- García, M., Fuentes, G., y Riquelme, F. (2013). Carta Miñimiñi, regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, 157, 49*.
- García, M., Gardeweg, M., Clavero, J., y Hérail, G. (2004). Hoja Arica, región de Tarapacá. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, 84, 150*.
- García, M., Riquelme, R., Farías, M., Hérail, G., y Charrier, R. (2011). Late Miocene–Holocene canyon incision in the western Altiplano, northern Chile: tectonic or climatic forcing? *Journal of the Geological Society*, 168(4), 1047–1060.
- GERM. (2005). Geochemical earth reference model. *Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR)*.

- Giggenbach, W., y Glover, R. (1992). Tectonic regime and major processes governing the chemistry of water and gas discharges from the rotorua geothermal field, new zealand. *Geothermics*, 21(1-2), 121–140.
- Giggenbach, W., Sheppard, D., Robinson, B., Stewart, M., y Lyon, G. (1994). Geochemical structure and position of the waiotapu geothermal field, new zealand. *Geothermics*, 23(5-6), 599–644.
- Giggenbach, W. F. (1988). Geothermal solute equilibria. derivation of na-k-mg-ca geoindicators. *Geochimica et cosmochimica acta*, 52(12), 2749–2765.
- Giggenbach, W. F., y Goguel, R. L. (1989). Collection and analysis of geothermal and volcanic water and gas discharges. *NZ DSIR Chemistry Report*, 2401, 1–82.
- Herath, I., Vithanage, M., y Bundschuh, J. (2017). Antimony as a global dilemma: Geochemistry, mobility, fate and transport. *Environmental pollution*, 223, 545–559.
- Herrera Apablaza, V., Carrasco Farías, C., Sandoval Cárcamo, P., y Cortés Carvajal, C. (2017). Transferencia de arsénico en el sistema aguasuelo-maíz de zea mays l. cultivados en la quebrada de camaña, norte de chile. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 83(1), 52–64.
- Herrera Apablaza, V., Gutiérrez Roa, N., Córdova Molina, S., Luque Marín, J., Idelfonso Carpanchay, M., Flores Riveras, A., y Romero, L. (2018). Calidad del agua subterránea para el riego en el oasis de pica, norte de chile. *Idesia (Arica)*, 36(2), 181–191.
- Herrera Escobar, S. S. (2013). Configuración y evolución estructural post-oligocena de la precordillera de camaña, región de tarapacá, chile (19° 14'-19° 32's/69° 13'-69° 38'w).
- IRIS, A. (2007). Integrated risk information system. *US Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA*.
- Knights, A., y Stenner, R. (1999). The role of ion balances in examining the reliability of analytical data: A case study of mendip streams (somerset). *Proc. Univ. Bristol. Speleol. Soc*, 21(3), 235–241.
- Lahsen, A. (1973). Geología de puchuldiza. *CORFO (Unplubished)*.
- Landrum, J., Bennett, P. C., Engel, A., Alsina, M., Pastén, P., y Milliken, K. (2009). Partitioning geochemistry of arsenic and antimony, el tatio geyser field, chile. *Applied Geochemistry*, 24(4), 664–676.
- Li, S., y Zhang, Q. (2010). Risk assessment and seasonal variations of dissolved trace elements and heavy metals in the upper han river, china. *Journal of Hazardous Materials*, 181(1-3), 1051–1058.
- Liu, X., Song, Q., Tang, Y., Li, W., Xu, J., Wu, J., . . . Brookes, P. C. (2013). Human health risk assessment of heavy metals in soil–vegetable system: a multi-medium analysis. *Science of the Total Environment*, 463, 530–540.
- Lopez, D. L., Bundschuh, J., Birkle, P., Armienta, M. A., Cumbal, L., Sracek, O., . . . Ormachea, M. (2012). Arsenic in volcanic geothermal fluids of latin america. *Science of the total Environment*, 429, 57–75.
- Maksaev, V. (2001). Reseña metalogénica de chile y de los procesos que determinan la metalogénesis andina. *Santiago*, 63.
- Mansilla, H., y Cornejo, L. (2002). Relevamiento de comunidades rurales de américa latina para la aplicación de tecnologías económicas para potabilización de aguas: Chile. *La Plata, Argentina: Digital Grafic*, 43–58.
- Matschullat, J., Ottenstein, R., y Reimann, C. (2000). Geochemical background—can we calculate it? *Environmental geology*, 39(9), 990–1000.
- Maureira M., G. A. (2013). Alteración hidrotermal y geoquímica de las aguas termales en el área de la concesión geotérmica licancura iii, i región de tarapacá, chile.
- Montecinos, F. (1963). *Observaciones de geología en el cuadrángulo campanani, departamento de arica* (Tesis Doctoral no publicada). thesis, Dep. de Geol., 109 pp., Univ. de Chile, Santiago.
- Mortimer, C., y Saric, N. (1975). *Cenozoic studies in northern chile: Geol. Rundschau*.

- Naughton, D. P., y Petróczi, A. (2008). Heavy metal ions in wines: meta-analysis of target hazard quotients reveal health risks. *Chemistry Central Journal*, 2(1), 1–7.
- Ordoñez, A., y Rivera, G. (2004). Mapa metalogénico de la i región de tarapacá. *Servicio Nacional de Geología y Minería*, 5.
- Pacci, D., Cáceres, R., Sayes, J., y Monti, S. (1980). Inventario de yacimientos metálicos y no-metálicos. *Primera Región de*.
- Pepper, I., Gerba, C., y Brusseau, M. (2012). Environmental and pollution science: Pollution science series. *Academic Press*, 212–232.
- Pérez Fodich, A. (2013). Origen del yodo y cromo en los nitratos del desierto de atacama, chile.
- Petróczi, A., Naughton, D. P., Pearce, G., Bailey, R., Bloodworth, A., y McNamee, M. (2008). Nutritional supplement use by elite young uk athletes: fallacies of advice regarding efficacy. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 5(1), 1–8.
- Pinto, L. (1999). Evolución tectónica y geomorfológica de la deformación cenozoica del borde occidental del altiplano y su registro sedimentario entre los 19 08'-19 27's (región de tarapacá, chile). *Memoria de Título y Magíster en Geología (Inédito)*, Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- Pinto, L., Hérail, G., y Charrier, R. (2004). Sedimentación sintectónica asociada a las estructuras neógenas en la precordillera de la zona de moquella, tarapacá (19° 15's, norte de chile). *Revista geológica de Chile*, 31(1), 19–44.
- Quiroz Villanueva, C. (2018). Análisis y comparación de la concentración, distribución y fuentes de as, cd, cu, pb, ni y mo en agua y sedimento fluvial de la zona norte de la región de atacama y la región de los ríos.
- Rudnick, R., Gao, S., Holland, H., Turekian, K., y cols. (2003). Composition of the continental crust. *The crust*, 3, 1–64.
- Rustom Jabbaz, A. (2012). Estadística descriptiva, probabilidad e inferencia. una visión conceptual y aplicada.
- Sepulveda Donoso, B. F. (2020). Caarakterizacion geoquimica de as, cd, cr, co, cu, hg, mo, pb, sb y zn en aguas y sedimentos del río camarones, embalse caritaya y salar de surire, región de arica y parinacota, chile.
- Sierra Gutiérrez, C. (2016). Caracterización hidrogeoquímica e isotópica de las aguas de la quebrada de camiña., i región de tarapacá, chile.
- Smedley, P., Nicolli, H., Macdonald, D., Barros, A., y Tullio, J. (2002). Hydrogeochemistry of arsenic and other inorganic constituents in groundwaters from la pampa, argentina. *Applied geochemistry*, 17(3), 259–284.
- Tassara, A. (2005). Interaction between the nazca and south american plates and formation of the altiplano-puna plateau: Review of a flexural analysis along the andean margin (15–34 s). *Tectonophysics*, 399(1-4), 39–57.
- Thomas, A. (1970). Cuadrángulos iquique y caleta molle. *Inst. Inv. Geol., Cartas*, 21(22), 1–52.
- Tobar, A., Iván, S. Y., y Kast, R. F. (1968). Cuadrángulos camaraca y azapa. provincia de tarapacá. escala 1: 50.000.
- Tomlinson, A., Martin, M., Blanco, N., y Pérez de Arce, C. (2001). U-pb and k-ar geochronology from the cerro empexa formation, 1st and 2nd regions, precordillera, northern chile.
- Toro, M. T. (2015). *Hidrogeología y aplicación del método tem para el reconocimiento de acuíferos en la quebrada de camiña, región de tarapacá, chile* (Tesis Doctoral no publicada). UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL NORTE.

- Townley, B., Díaz, A., y Luca, R. (2017). Recursos minerales por cobalto en Chile potencial de explotación minera. *Comité Minería No Metálica*.
- Tseng, W., Chu, H., How, S., Fong, J., Lin, C., y Yeh, S. (1968). Prevalence of skin cancer in an endemic area of chronic arsenicism in Taiwan. *Journal of the National Cancer Institute*, 40(3), 453–463.
- Tseng, W.-P. (1977). Effects and dose-response relationships of skin cancer and blackfoot disease with arsenic. *Environmental Health Perspectives*, 19, 109–119.
- Valenzuela, J., Herrera, S., Pinto, L., y Del Real, I. (2014). Carta camiña, regiones de Arica-Parinacota y Tarapacá. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, 170*, 97.
- Vásquez, P., y Sepúlveda, F. (2013). Cartas Iquique y Pozo Almonte, región de Tarapacá. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, 1*.
- Vogel, S. (1975). Geología y geomorfología del cuadrángulo Poconchile - provincia de Arica. I región, Tarapacá. memoria de título,.
- Vogel, S., y Vila, T. (1980). Cuadrángulos Arica y Poconchile. región de Tarapacá. escala 1: 100.000.
- Webster, J. G., y Nordstrom, D. K. (2003). Geothermal arsenic. En *Arsenic in ground water* (pp. 101–125). Springer.

Anexo A

Tablas de datos de aguas

Tabla A.1: Ubicaciones muestras de agua

Muestra	Tipo de muestra	Fecha Muestreo	Coord. X	Coord. Y
C1	Río	10-12-2013	474450	7886193
C2	Pozo	10-12-2013	440437	7857151
C3	Manantial	05-02-2014	460105	7864634
C4	Manantial	05-02-2014	460337	7864953
C5	Manantial	06-02-2014	448061,743	7862355,99
C6	Manantial	06-02-2014	451297,458	7863992,14
C7	Manantial	06-02-2014	455662	7864969
C8	Río	03-03-2014	436144,523	7853832,18
C9	Manantial	03-03-2014	453807,46	7864592,49
C10	Río	03-03-2014	453361,104	7863591,81
CC-3	Manantial	09-09-2015	460265	7864689
CC-4	Manantial	09-09-2015	460337	7864953
CC-5	Manantial	08-09-2015	448061,743	7862355,99
CC-6	Manantial	09-09-2015	451297,458	7863992,14
CC-8	Río	08-09-2015	436144,523	7853832,18
CC-9	Manantial	09-09-2015	453807,46	7864592,49
CC-10	Río	08-09-2015	453525	7863943
CC-11	Río	08-09-2015	446551	7860990
CC-12	Río	08-09-2015	450211	7862364
CC-13	Río	09-09-2015	458046	7864758
CC-14	Río	08-09-2015	459233	7866097
CC-15	Río	09-09-2015	471245	7879404
AVO	Manantial termal	Mayo y Octubre 2012	485328,75	7886872,94
AN	Manantial termal	Mayo y Octubre 2012	485391,74	7886637,01
BE	Manantial termal	Mayo y Octubre 2012	480115,92	7872071,28
CO	Manantial termal	Mayo y Octubre 2012	482918,8	7879797,3
JA	Manantial termal	Mayo y Octubre 2012	489314,44	7890893,74
JU	Manantial termal	Mayo y Octubre 2012	487907,59	7888280,13
PUL	Manantial termal	Mayo y Octubre 2012	492934	7891698
PUM	Manantial termal	Mayo y Octubre 2012	488764	7888309
TU	Manantial termal	Mayo y Octubre 2012	482255,95	7886544,52
NOC	Manantial termal	Mayo y Octubre 2012	488272,14	7889427,94
AVE	Manantial termal	Mayo y Octubre 2012	485519,28	7886964,94
MAN	Manantial termal	Mayo y Octubre 2012	482963,81	7880431,12
MAS	Manantial termal	Mayo y Octubre 2012	482022,41	7877180,89
MUY	Manantial termal	Mayo y Octubre 2012	481782,66	7879567,63
PU1	Manantial termal	Mayo y Octubre 2012	480968,04	7890781,25
PU2	Manantial termal	Mayo y Octubre 2012	481282,71	7891144
PU3	Manantial termal	Mayo y Octubre 2012	481284,33	7890636,88
PU4	Manantial termal	Mayo y Octubre 2012	481285,99	7890898,15
MU1	Manantial termal	Mayo y Octubre 2012	484319,7	7897349,53
MU2	Manantial termal	Mayo y Octubre 2012	483829,69	7897221,34

Tabla A.2: Presentación de datos Hidroquímicos

Muestra	T (C°)	pH	CE (µS/cm)	K (mg/l)	Na (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	SO4 (mg/l)	HCO3 (mg/l)	Cl (mg/l)	As (mg/l)	SiO2 (mg/l)	SDT(mg/l)	Tipo
AN	64,1	6,86	-	207	1650	248,0	14,70	352	371	2770	22	149	5615	Manantial
AVE	73,4	7,47	-	228	1639	251,0	13,90	364	354	2842	21	165	5695	Manantial
Avo	37,8	6,57	-	219	1810	242,0	26,60	310	429	2840	21,6	202	5880	Manantial
BE	59,4	6,88	-	35	389	283,0	4,83	822	65	574	3,46	48	2175	Manantial
C1	-	-	892	21,6	142	52,7	11,2	177	36,32	158,9	0,006	-	576	Río
C2	-	-	1867	22,5	239	150	26,8	383	119,68	432,32	0,0095	-	1235	Pozo
C7	20,4	8,28	1032	24	112	145	31	455	54	218	0,236	-	2236	Manantial
CC-10	19,05	8	1390	36	214	102	23	245	86	238	0,364	-	947	Río
CC-11	19,5	7,38	1483	29	201	111	24	275	98	285	0,314	-	960	Río
CC-12	21,2	7,68	1460	32	198	110	23	281	98	300	0,326	-	1012	Río
CC-13	14,8	7,8	1118	27	158	68	14	201	47	215	0,506	-	747	Río
CC-14	12,6	8,18	1111	30	147	69	16	199	37	214	0,529	-	717	Río
CC-15	15	7,56	964	30	143	50	12	173	24	202	0,586	-	623	Río
CC-3	9,9	7,14	1258	32	102	196	46	232	49	345	0,017	-	992	Manantial
CC-4	20,1	7,46	648	16	64	62	12	139	33	146	0,011	-	490	Manantial
CC-6	17,35	7,61	992	22	112	91	12	138	49	227	0,13	-	670	Manantial
CC-8	19,9	6,45	1990	40	286	155	34	372	106	386	0,246	-	1400	Río
CC-9	23	7,4	1968	35	212	217	36	322	37	480	0,399	89	1370	Manantial
JA	45,8	5,36	-	61	238	17,4	10,80	232	11	346	0,01	100	917	Manantial
JU	59,7	6,94	-	83	860	141,0	6,55	369	318	1280	9,63	161	3060	Manantial
MAS	17,4	7,7	-	6	17,8	19,4	5,20	38	74	18	0,02	55	178	Manantial
MU1	58	7,58	-	205	1825	280,0	15,00	393	373	2879	-	160	5972	Manantial
MU2	40	7,61	-	204	1875	275,0	15,00	366	347	2931	-	53	6015	Manantial
MUY	12,4	7,27	-	8	27	38,0	6,80	156	20	5	0,06	83	261	Manantial
NOC	23,2	6,07	-	33	114	12,2	5,12	116	32	151	0,46	59	464	Manantial
PU1	73,6	7,6	-	271	1948	271,0	41,00	218	398	3423	21	187	6571	Manantial
PU2	80	7,5	-	333	2361	231,0	40,00	206	415	4252	23	196	7839	Manantial
PU3	79,7	7,67	-	255	1779	183,0	30,00	265	377	3144	18,6	182	6034	Manantial
PU4	47,5	7,38	-	311	2171	217,0	31,00	208	356	3982	23	189	7277	Manantial
PUL	46,8	3,8	-	25	105	18,2	5,28	215	6	90	0,01	97	465	Manantial
PUM	19,9	7,4	-	3	8	2,5	1,42	9	25	2	0,02	65	51	Manantial
TU	32,4	7,74	-	23	159	49,3	13,50	231	168	134	0,6	96	778	Manantial

Tabla A.3: Error de balance iónico en muestras de ríos, manantiales y pozo.
En rojo están los datos descartados por tener error >10%

Muestra	sum aniones	sum cationes	Error balance ionico:
C1	8,77	10,29	7,98
C2	22,13	20,68	-3,38
C3	14,48	9,39	-21,35
C4	8,93	4,27	-35,34
C5	45,50	16,12	-47,68
C6	11,27	7,29	-21,44
C7	16,54	15,30	-3,92
C8	22,39	15,43	-18,40
C9	21,36	14,39	-19,48
C10	14,10	10,70	-13,70
CC-3	15,42	18,85	10,00
CC-4	7,63	7,28	-2,33
CC-5	21,67	31,78	18,91
CC-6	10,14	10,97	3,97
CC-8	20,38	24,02	8,19
CC-9	20,88	23,94	6,81
CC-10	13,34	17,23	12,73 ^a
CC-11	15,46	17,01	4,79
CC-12	15,98	16,83	2,58
CC-13	11,04	12,12	4,67
CC-14	10,80	11,93	4,98
CC-15	9,71	10,48	3,78
Avo	93,49	98,60	2,66
AN	91,44	90,65	-0,44
BE	34,36	32,36	-3,00
CO	4,75	2,38	-33,22
JA	14,76	13,67	-3,83
JU	48,96	47,11	-1,93
PUL	7,11	6,55	-4,11
PUM	0,65	0,67	1,00
TU	11,34	11,08	-1,16
NOC	7,19	6,83	-2,57
AVE	93,44	90,79	-1,44
MAN	5,56	3,23	-26,57
MAS	2,51	2,33	-3,82
MUY	3,72	3,84	1,61
PU1	107,49	108,57	0,50
PU2	130,87	126,02	-1,89
PU3	100,26	95,50	-2,43
PU4	122,34	115,76	-2,76
MU1	95,40	99,83	2,27
MU2	95,88	101,73	2,96

^a Único valor sobre el 10% aceptado

Tabla A.4: Tabla cálculo THQ para riesgos no cancerígenos

Muestra	As mg/L	DIM (mg/día)	EF (días/año)	FD (años)	RfD(mg/(kg*día))	W (kg)	T (día)	THQ
C2	0,0095	0,0095	365	30	0,0003	70	10950	0,452381
CC-4	0,011	0,011	365	30	0,0003	70	10950	0,52381
CC-3	0,017	0,017	365	30	0,0003	70	10950	0,809524
CC-6	0,13	0,13	365	30	0,0003	70	10950	6,190476
C7	0,236	0,236	365	30	0,0003	70	10950	11,2381
CC-8	0,246	0,246	365	30	0,0003	70	10950	11,71429
CC-11	0,314	0,314	365	30	0,0003	70	10950	14,95238
CC-12	0,326	0,326	365	30	0,0003	70	10950	15,52381
CC-10	0,364	0,364	365	30	0,0003	70	10950	17,33333
CC-9	0,399	0,399	365	30	0,0003	70	10950	19
CC-13	0,506	0,506	365	30	0,0003	70	10950	24,09524
CC-14	0,529	0,529	365	30	0,0003	70	10950	25,19048

Tabla A.5: Tabla cálculo ILCR para riesgos Cancerígenos.

Muestra	As mg/l	CSF (mg/(kg*día))	EDI (mg/día)	DI (L/D)	BW (kg)	CDI	ILCR	Magnitud ILCR
C2	0,0095	1,5	0,0095	1	70	0,00014	0,00020	2,0E-04
CC-4	0,011	1,5	0,011	1	70	0,00016	0,00024	2,4E-04
CC-3	0,017	1,5	0,017	1	70	0,00024	0,00036	3,6E-04
CC-6	0,13	1,5	0,13	1	70	0,00186	0,00279	2,8E-03
C7	0,236	1,5	0,236	1	70	0,00337	0,00506	5,1E-03
CC-8	0,246	1,5	0,246	1	70	0,00351	0,00527	5,3E-03
CC-11	0,314	1,5	0,314	1	70	0,00449	0,00673	6,7E-03
CC-12	0,326	1,5	0,326	1	70	0,00466	0,00699	7,0E-03
CC-10	0,364	1,5	0,364	1	70	0,00520	0,00780	7,8E-03
CC-9	0,399	1,5	0,399	1	70	0,00570	0,00855	8,6E-03
CC-13	0,506	1,5	0,506	1	70	0,00723	0,01084	1,1E-02
CC-14	0,529	1,5	0,529	1	70	0,00756	0,01134	1,1E-02

Tabla A.6: Datos estación de monitoreo calidad de aguas DGA en Altusa

Fecha	As (mg/l)	Fecha	As (mg/l)	Fecha	As (mg/l)
22-03-1983	0,45	17-08-2001	0,4	15-12-2009	0,498
04-07-1983	0,402	12-12-2001	0,47	29-04-2010	0,416
13-12-1984	0,472	16-05-2002	0,38	03-08-2010	0,551
08-01-1985	0,568	14-08-2002	0,38	14-12-2010	0,635
23-05-1985	0,391	26-12-2002	0,5	07-04-2011	0,384
21-11-1985	0,458	13-03-2003	0,5	02-08-2011	0,466
16-02-1986	0,184	28-09-2003	0,5	13-12-2011	0,596
04-06-1986	0,403	29-12-2003	0,5	25-04-2012	0,683
06-02-1987	0,343	12-02-2004	1,1	14-08-2012	0,486
25-06-1987	0,35	04-06-2004	0,35	11-12-2012	0,95
06-11-1987	0,684	22-10-2004	0,36	24-04-2013	0,306
17-02-1989	0,451	06-04-2005	0,36	28-08-2013	0,397
28-11-1989	0,391	09-08-2005	0,32	18-12-2013	0,472
29-11-1989	0,479	27-11-2005	0,34	23-04-2014	0,414
05-03-1991	0,154	14-03-2006	0,24	14-08-2014	0,431
03-03-1992	0,565	10-08-2006	0,3	18-12-2014	0,432
26-03-1998	0,57	30-11-2006	0,62	22-04-2015	0,306
08-09-1998	0,6	30-04-2007	0,28	15-12-2015	0,566
15-05-1999	0,21	25-07-2007	0,36	11-04-2016	0,449
10-08-1999	0,41	27-12-2007	0,33	05-09-2016	0,481
05-11-1999	0,44	24-04-2008	0,38	17-08-2017	0,276
03-05-2000	0,42	28-08-2008	0,43	18-10-2017	0,505
23-08-2000	0,44	12-12-2008	0,685	13-02-2018	0,686
29-12-2000	1,51	14-04-2009	0,28	10-04-2018	0,346
27-05-2001	0,45	04-08-2009	0,4	28-08-2019	0,438

Tabla A.7: Datos estación pluviométrica DGA en Camiña (mm/mes)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1971	2,1	8,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0
1972	9,3	33,6	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
1974	32,0	53,1	84,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1975	-	-	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0
1976	0,0	35,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-
1977	-	-	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1978	0,0	-	-	-	-	0,0	0,0	-	-	-	-	-
1979	-	-	-	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1980	0,0	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1981	0,0	5,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1982	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1983	0,0	-	-	0,0	0,0	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0
1984	63,0	25,0	31,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	4,5	0,0	0,0
1985	0,2	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0
1988	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0	0,0	0,0	-
1989	0,0	18,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1990	0,0	115,0	5,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5
1991	9,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1992	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	10,5
1993	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
1994	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1995	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1996	4,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17,5	0,0	0,0	0,0	0,0
1997	43,5	11,5	5,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1998	-	-	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1999	0,0	43,0	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0
2000	0,0	26,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2001	25,0	62,0	0,0	51,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2002	9,8	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	17,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2003	0,0	0,0	11,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2004	13,0	7,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2005	8,0	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2006	4,0	13,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2007	4,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2008	66,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
2009	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2010	0,0	1,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2011	11,0	83,0	0,0	0,0	0,0	0,0	45,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0
2012	33,5	50,5	72,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3
2013	0,0	21,7	2,9	0,0	0,6	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2014	7,6	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
2015	1,2	20,7	18,4	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2016	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0
2017	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7
2018	0,3	4,2	0,2	0,0	0,0	1,4	0,5	0,2	0,0	0,0	0,1	0,0
2019	35,2	17,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2020	34,0	18,9	3,0	2,9	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
Promedio	10,2	17,4	6,3	1,4	0,1	0,3	1,4	0,4	0,0	0,1	0,0	0,7

Tabla A.8: Caudal estación fluviométrica DGA en Altusa (m^3/s)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1978	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,33	0,38	0,64
1979	-	0,51	0,36	0,37	0,4	0,42	0,42	0,39	0,26	0,21	0,25	0,25
1980	0,38	0,42	0,29	0,28	0,28	0,31	0,29	0,28	0,27	0,19	0,19	0,25
1981	0,26	-	-	-	0,37	0,34	0,4	0,33	0,27	0,27	0,23	0,38
1982	0,63	0,28	0,28	0,3	0,32	0,39	0,29	0,29	0,27	0,22	0,2	0,21
1983	0,4	0,25	0,21	0,24	0,29	0,27	0,25	0,27	0,25	0,1	0,15	0,74
1984	0,25	0,74	-	-	-	0,35	0,36	0,25	0,19	0,25	0,33	0,26
1985	0,86	1,05	0,39	0,33	0,31	0,3	0,32	0,21	0,19	0,22	0,29	0,59
1986	0,85	0,65	0,46	0,37	0,38	0,37	0,37	0,32	0,28	0,27	0,29	1,9
1987	0,79	0,42	0,33	0,24	0,25	0,28	0,24	0,26	0,23	0,2	0,2	0,27
1988	0,72	0,33	0,3	0,29	0,29	0,31	0,29	0,3	0,27	0,24	0,23	0,34
1989	0,41	0,3	0,33	0,26	0,28	0,26	0,25	0,27	0,31	0,23	0,2	0,26
1990	0,41	0,35	0,19	0,2	0,22	0,21	0,2	0,16	0,2	0,18	-	0,68
1991	0,28	0,44	0,24	0,2	0,22	0,25	0,29	0,29	0,23	0,21	0,24	0,31
1992	0,34	0,16	0,16	0,16	0,21	0,21	0,22	0,21	-	-	-	-
1993	0,17	-	0,26	0,24	0,27	0,25	0,34	0,27	0,21	0,16	0,21	0,56
1994	0,63	0,28	0,22	0,25	0,22	0,21	0,25	0,24	0,16	0,1	0,15	0,15
1995	0,17	0,18	0,12	0,12	0,12	0,14	0,13	0,12	0,11	0,11	0,1	0,11
1996	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,12	0,13	0,13	0,26
1997	0,78	2,63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2001	0,86	1,14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Promedio	0,49	0,57	0,26	0,24	0,26	0,27	0,27	0,25	0,22	0,2	0,22	0,45

Anexo B

Tabla “Transferencia de Arsénico en el sistema Agua-Suelo-Maíz”

Tabla B.1: Valores de los FBC y PFT para los sectores en estudio, modificado de Herrera Apablaza et al. (2017).

Puntos de muestreo	FBC	FBC (%)	PFT hoja (%)	PFT grano (%)
S1A	3,27	327	3,96	0,00
S1B	4,77	477	2,98	0,02
S1C	2,99	299	5,90	0,02
S3A	3,45	345	1,57	0,00
S3B	3,18	318	4,24	0,03
S3C	3,24	324	1,78	0,00
S4A	1,29	129	3,59	0,00
S4B	1,32	132	2,64	0,28
S4C	1,65	165	2,96	0,06
S5A	2,39	239	0,54	0,05
S5B	2,13	213	1,68	0,05
S5C	2,21	221	2,47	0,07
S6A	1,05	105	3,91	0,10
S6B	0,90	90	3,37	0,11
S6C	1,51	151	3,76	0,08
EECA	1,75	175	2,02	0,07
EECB	1,75	175	2,01	0,07
EECC	1,62	162	2,01	0,07

Anexo C

Tabla de datos de sedimentos

Tabla C.1: Fecha de muestreo y ubicación

PUNTO	MUESTRA	FECHA DEL MUESTREO	UTM ESTE 19S	UTM NORTE 19S
CM-030	GQ-12-CM-031	Febrero 2012	441170,7904	7861333,099
CM-030	GQ-12-CM-032	Febrero 2012	441170,7904	7861333,099
CR-188	GQ-12-CR-111	Noviembre 2012	486372	7882999
CR-189	GQ-12-CR-112	Noviembre 2012	481916	7891409
CR-190	GQ-12-CR-113	Noviembre 2012	481787	7893376
FA-225	GQ-12-FA-049	Julio 2012	474052	7892676
FA-226	GQ-12-FA-050	Julio 2012	474065	7892959
FA-228	GQ-12-FA-054	Julio 2012	474939	7886470
FA-228	GQ-12-FA-053	Julio 2012	474939	7886470
FA-228	GQ-12-FA-052	Julio 2012	474939	7886470
FA-229	GQ-12-FA-055	Julio 2012	478234	7888421
FA-230	GQ-12-FA-056	Julio 2012	478511	7891856
FA-231	GQ-12-FA-057	Julio 2012	478491	7891200
FA-232	GQ-12-FA-058	Julio 2012	479095	7883262
FA-232	GQ-12-FA-059	Julio 2012	479095	7883262
FA-233	GQ-12-FA-060	Julio 2012	481841	7885847
FA-234	GQ-12-FA-061	Julio 2012	485495	7886960
FA-235	GQ-12-FA-062	Julio 2012	490960	7884511
FA-236	GQ-12-FA-063	Julio 2012	481723	7879510
FA-237	GQ-12-FA-064	Julio 2012	478396	7878823
FA-238	GQ-12-FA-065	Julio 2012	481931	7887883
FA-239	GQ-12-FA-066	Julio 2012	494084	7884394
FA-240	GQ-12-FA-068	Julio 2012	498403	7884260
FA-240	GQ-12-FA-067	Julio 2012	498403	7884260
FA-241	GQ-12-FA-069	Julio 2012	498020	7887763
FA-245	GQ-12-FA-073	Julio 2012	469846	7872386
FA-246	GQ-12-FA-074	Julio 2012	467005	7872180
FA-258	GQ-12-FA-087	Agosto 2012	441545	7851985
FA-266	GQ-12-FA-096	Octubre 2012	481227	7896296
FA-272	GQ-12-FA-103	Octubre 2012	490482	7878944
FA-274	GQ-12-FA-105	Octubre 2012	487108	7875298
FA-275	GQ-12-FA-106	Octubre 2012	493714	7887809
FA-286	GQ-12-FA-117	Noviembre 2012	483756	7895288
FA-338	GQ-13-FA-050	Febrero 2013	437953	7864942

Tabla C.2: Fecha de muestreo y ubicación (continuación)

PUNTO	MUESTRA	FECHA DEL MUESTREO	UTM ESTE 19S	UTM NORTE 19S
FC-017	GQ-12-FC-019	Julio 2012	473390	7892660
FC-017	GQ-12-FC-020	Julio 2012	473390	7892660
FC-017	GQ-12-FC-021	Julio 2012	473390	7892660
FC-018	GQ-12-FC-022	Julio 2012	471437	7883805
FC-019	GQ-12-FC-023	Julio 2012	468939	7879423
FC-020	GQ-12-FC-025	Julio 2012	465866	7879716
FC-020	GQ-12-FC-024	Julio 2012	465866	7879716
FC-021	GQ-12-FC-026	Julio 2012	474684	7869156
FC-022	GQ-12-FC-027	Julio 2012	478075	7871217
FC-023	GQ-12-FC-028	Julio 2012	473703	7876661
FC-024	GQ-12-FC-029	Julio 2012	469879	7876055
FC-025	GQ-12-FC-030	Julio 2012	461738	7872341
FC-026	GQ-12-FC-031	Julio 2012	454128	7868039
FC-027	GQ-12-FC-032	Julio 2012	451149	7866985
FC-028	GQ-12-FC-033	Julio 2012	461856	7865161
FC-029	GQ-12-FC-035	Julio 2012	469992	7867449
FC-030	GQ-12-FC-034	Julio 2012	469850	7863640
FC-031	GQ-12-FC-036	Julio 2012	466298	7863995
FC-032	GQ-12-FC-037	Julio 2012	460929	7862329
FC-033	GQ-12-FC-038	Julio 2012	477078	7875944
FC-034	GQ-12-FC-039	Julio 2012	474852	7879666
FC-035	GQ-12-FC-040	Julio 2012	473712	7883482
FC-066	GQ-13-FC-001	Febrero 2013	462313	7879699
FC-067	GQ-13-FC-002	Febrero 2013	458132	7876685
FC-069	GQ-13-FC-004	Febrero 2013	455200	7871820
FE-031	GQ-12-FE-034	Febrero 2012	446566	7863752
JP-001	GQ-11-JP-002	Enero 2011	458512,7387	7864735,098
JP-001	GQ-11-JP-001	Enero 2011	458512,7387	7864735,098
JP-002	GQ-11-JP-003	Enero 2011	459649,7345	7866959,092
JP-003	GQ-11-JP-005	Enero 2011	451539,7596	7862926,1
JP-003	GQ-11-JP-004	Enero 2011	451539,7596	7862926,1
JP-004	GQ-11-JP-006	Enero 2011	446528,7752	7860692,104
JP-005	GQ-11-JP-008	Enero 2011	446524,7752	7860690,104
JP-005	GQ-11-JP-009	Enero 2011	446524,7752	7860690,104
JP-005	GQ-11-JP-007	Enero 2011	446524,7752	7860690,104
JP-006	GQ-11-JP-010	Enero 2011	437119,8067	7854177,118
JP-006	GQ-11-JP-011	Enero 2011	437119,8067	7854177,118
MF-167	GQ-12-MF-064	Junio 2012	469929,6989	7888114,038
MF-168	GQ-12-MF-065	Junio 2012	463207,7213	7875452,07
MF-169	GQ-12-MF-067	Junio 2012	478200,6777	7885599,046
MF-169	GQ-12-MF-066	Junio 2012	478200,6777	7885599,046
MF-170	GQ-12-MF-068	Junio 2012	485587,6577	7887590,042
MF-171	GQ-12-MF-070	Julio 2012	453950,7466	7876013,064
MF-171	GQ-12-MF-069	Julio 2012	453950,7466	7876013,064
MF-172	GQ-12-MF-071	Julio 2012	457984,7339	7879853,056
MF-173	GQ-12-MF-072	Julio 2012	466168,7135	7874388,074
MF-174	GQ-12-MF-073	Julio 2012	476527	7875984
MF-186	GQ-12-MF-092	Agosto 2012	445999	7851741
MF-186	GQ-12-MF-093	Agosto 2012	445999	7851741
MF-187	GQ-12-MF-094	Agosto 2012	438000	7847753

Tabla C.3: Fecha de muestreo y ubicación (continuación)

PUNTO	MUESTRA	FECHA DEL MUESTREO	UTM ESTE 19S	UTM NORTE 19S
MF-168	GQ-12-MF-065	Junio 2012	463207,7213	7875452,07
MF-169	GQ-12-MF-067	Junio 2012	478200,6777	7885599,046
MF-169	GQ-12-MF-066	Junio 2012	478200,6777	7885599,046
MF-170	GQ-12-MF-068	Junio 2012	485587,6577	7887590,042
MF-171	GQ-12-MF-070	Julio 2012	453950,7466	7876013,064
MF-171	GQ-12-MF-069	Julio 2012	453950,7466	7876013,064
MF-172	GQ-12-MF-071	Julio 2012	457984,7339	7879853,056
MF-173	GQ-12-MF-072	Julio 2012	466168,7135	7874388,074
MF-174	GQ-12-MF-073	Julio 2012	476527	7875984
MF-186	GQ-12-MF-092	Agosto 2012	445999	7851741
MF-186	GQ-12-MF-093	Agosto 2012	445999	7851741
MF-187	GQ-12-MF-094	Agosto 2012	438000	7847753
MF-188	GQ-12-MF-095	Agosto 2012	441976	7848069
MF-189	GQ-12-MF-096	Agosto 2012	436781	7851838
MF-190	GQ-12-MF-097	Agosto 2012	445700	7848305
MF-190	GQ-12-MF-098	Agosto 2012	445700	7848305
NM-009	GQ-11-NM-013	Julio 2011	433985,8166	7853288,119
NM-010	GQ-11-NM-015	Julio 2011	437455,8057	7854176,118
NM-010	GQ-11-NM-014	Julio 2011	437455,8057	7854176,118
NM-011	GQ-11-NM-016	Julio 2011	441874,7905	7857655,111
NM-012	GQ-11-NM-017	Julio 2011	446004,7769	7860433,105
NM-013	GQ-11-NM-018	Julio 2011	450066,7643	7862006,102
NM-014	GQ-11-NM-019	Julio 2011	458065,7401	7864448,099
NM-015	GQ-11-NM-020	Julio 2011	459649,7345	7867004,092
NM-016	GQ-11-NM-022	Julio 2011	454112,7516	7864087,098
NM-016	GQ-11-NM-021	Julio 2011	454112,7516	7864087,098
NM-084	GQ-11-NM-097	Septiembre 2011	438170,7991	7861438,097
NM-085	GQ-11-NM-098	Septiembre 2011	434107,8111	7861070,096
NM-086	GQ-11-NM-099	Septiembre 2011	430265,8224	7860798,094
NM-206	GQ-12-NM-088	Agosto 2012	433380	7856692
NM-213	GQ-12-NM-095	Agosto 2012	429965	7856312

Tabla C.4: Tipo de muestra y muestras Gemelas

PUNTO	MUESTRA	M. GEMELA	TIPO_DE_MUESTRA
CM-030	GQ-12-CM-031	No	Compósito de sedimento fluvial reciente
CM-030	GQ-12-CM-032	No	Compósito de sedimento de terraza fluvial
CR-188	GQ-12-CR-111	No	Compósito de sedimento fluvial activo
CR-189	GQ-12-CR-112	No	Compósito de sedimento fluvial activo
CR-190	GQ-12-CR-113	No	Compósito de sedimento fluvial activo
FA-225	GQ-12-FA-049	No	Compósito de sedimento fluvial activo
FA-226	GQ-12-FA-050	No	Compósito de sedimento fluvial activo
FA-228	GQ-12-FA-054	No	Compósito de sedimento de terraza fluvial
FA-228	GQ-12-FA-053	GQ-12-FA-052	Compósito de sedimento fluvial activo
FA-228	GQ-12-FA-052	GQ-12-FA-053	Compósito de sedimento fluvial activo
FA-229	GQ-12-FA-055	No	Compósito de sedimento fluvial reciente
FA-230	GQ-12-FA-056	No	Compósito de sedimento fluvial activo
FA-231	GQ-12-FA-057	No	Compósito de sedimento fluvial activo
FA-232	GQ-12-FA-058	GQ-12-FA-059	Compósito de sedimento fluvial reciente
FA-232	GQ-12-FA-059	GQ-12-FA-058	Compósito de sedimento fluvial reciente
FA-233	GQ-12-FA-060	No	Compósito de sedimento fluvial activo
FA-234	GQ-12-FA-061	No	Compósito de sedimento fluvial activo
FA-235	GQ-12-FA-062	No	Compósito de sedimento fluvial activo
FA-236	GQ-12-FA-063	No	Compósito de sedimento fluvial activo
FA-237	GQ-12-FA-064	No	Compósito de sedimento fluvial reciente
FA-238	GQ-12-FA-065	No	Compósito de sedimento fluvial reciente
FA-239	GQ-12-FA-066	No	Compósito de sedimento fluvial reciente
FA-240	GQ-12-FA-068	GQ-12-FA-067	Compósito de sedimento fluvial reciente
FA-240	GQ-12-FA-067	GQ-12-FA-068	Compósito de sedimento fluvial reciente
FA-241	GQ-12-FA-069	No	Compósito de sedimento fluvial reciente
FA-245	GQ-12-FA-073	No	Compósito de sedimento fluvial reciente
FA-246	GQ-12-FA-074	No	Compósito de sedimento fluvial reciente
FA-258	GQ-12-FA-087	No	Compósito de sedimento fluvial reciente
FA-266	GQ-12-FA-096	No	Compósito de sedimento fluvial activo
FA-272	GQ-12-FA-103	No	Compósito de sedimento fluvial activo
FA-274	GQ-12-FA-105	No	Compósito de sedimento fluvial reciente
FA-275	GQ-12-FA-106	No	Compósito de sedimento de drenaje
FA-286	GQ-12-FA-117	No	Compósito de sedimento fluvial activo
FA-338	GQ-13-FA-050	No	Compósito de sedimento fluvial activo
FC-017	GQ-12-FC-019	No	Otro. Corresponde a orilla de lago
FC-017	GQ-12-FC-020	No	Otro. Corresponde a orilla de lago
FC-017	GQ-12-FC-021	No	Otro. Corresponde a orilla de lago
FC-018	GQ-12-FC-022	No	Compósito de sedimento de drenaje
FC-019	GQ-12-FC-023	No	Compósito de sedimento de drenaje
FC-020	GQ-12-FC-025	GQ-12-FC-024	Compósito de sedimento de drenaje
FC-020	GQ-12-FC-024	GQ-12-FC-025	Compósito de sedimento de drenaje

Tabla C.5: Tipo de muestra y muestras Gemelas (continuación)

PUNTO	MUESTRA	M. GEMELA	TIPO DE MUESTRA
FC-021	GQ-12-FC-026	No	Compósito de sedimento de drenaje
FC-022	GQ-12-FC-027	No	Compósito de sedimento fluvial activo
FC-023	GQ-12-FC-028	No	Compósito de sedimento de drenaje
FC-024	GQ-12-FC-029	No	Compósito de sedimento fluvial activo
FC-025	GQ-12-FC-030	No	Compósito de sedimento fluvial activo
FC-026	GQ-12-FC-031	No	Compósito de sedimento de drenaje
FC-027	GQ-12-FC-032	No	Compósito de sedimento de drenaje
FC-028	GQ-12-FC-033	No	Compósito de sedimento de drenaje
FC-029	GQ-12-FC-035	No	Compósito de sedimento de drenaje
FC-030	GQ-12-FC-034	No	Compósito de sedimento de drenaje
FC-031	GQ-12-FC-036	No	Compósito de sedimento de drenaje
FC-032	GQ-12-FC-037	No	Compósito de sedimento fluvial activo
FC-033	GQ-12-FC-038	No	Compósito de sedimento de drenaje
FC-034	GQ-12-FC-039	No	Compósito de sedimento de drenaje
FC-035	GQ-12-FC-040	No	Compósito de sedimento de drenaje
FC-066	GQ-13-FC-001	No	Compósito de sedimento de drenaje
FC-067	GQ-13-FC-002	No	Compósito de sedimento de drenaje
FC-069	GQ-13-FC-004	No	Compósito de sedimento de drenaje
FE-031	GQ-12-FE-034	No	Compósito de sedimento fluvial activo
JP-001	GQ-11-JP-002	GQ-11-JP-001	Compósito de sedimento fluvial activo
JP-001	GQ-11-JP-001	GQ-11-JP-002	Compósito de sedimento fluvial activo
JP-002	GQ-11-JP-003	No	Compósito de sedimento fluvial activo
JP-003	GQ-11-JP-005	No	Compósito de sedimento de terraza fluvial
JP-003	GQ-11-JP-004	No	Compósito de sedimento fluvial activo
JP-004	GQ-11-JP-006	No	Compósito de sedimento fluvial activo
JP-005	GQ-11-JP-008	No	Compósito de sedimento de terraza fluvial
JP-005	GQ-11-JP-009	No	Compósito de sedimento de planicie de inundación
JP-005	GQ-11-JP-007	No	Compósito de sedimento fluvial activo
JP-006	GQ-11-JP-010	No	Compósito de sedimento de terraza fluvial
JP-006	GQ-11-JP-011	No	Compósito de sedimento fluvial activo
MF-167	GQ-12-MF-064	No	Compósito de sedimento fluvial reciente
MF-168	GQ-12-MF-065	No	Compósito de sedimento fluvial activo
MF-169	GQ-12-MF-067	No	Compósito de sedimento de terraza fluvial
MF-169	GQ-12-MF-066	No	Compósito de sedimento fluvial activo
MF-170	GQ-12-MF-068	No	Compósito de sedimento fluvial activo
MF-171	GQ-12-MF-070	No	Compósito de sedimento de planicie de inundación
MF-171	GQ-12-MF-069	No	Compósito de sedimento fluvial activo
MF-172	GQ-12-MF-071	No	Compósito de sedimento fluvial reciente
MF-173	GQ-12-MF-072	No	Compósito de sedimento fluvial reciente
MF-174	GQ-12-MF-073	No	Compósito de sedimento fluvial reciente
MF-186	GQ-12-MF-092	No	Compósito de sedimento fluvial reciente
MF-186	GQ-12-MF-093	No	Compósito de sedimento de planicie de inundación
MF-187	GQ-12-MF-094	No	Compósito de sedimento fluvial reciente
MF-188	GQ-12-MF-095	No	Compósito de sedimento fluvial reciente
MF-189	GQ-12-MF-096	No	Compósito de sedimento de drenaje
MF-190	GQ-12-MF-097	No	Compósito de sedimento fluvial reciente
MF-190	GQ-12-MF-098	No	Compósito de sedimento de planicie de inundación

Tabla C.6: Tipo de muestra y muestras Gemelas (continuación)

PUNTO	MUESTRA	M. GEMELA	TIPO DE MUESTRA
NM-009	GQ-11-NM-013	No	Compósito de sedimento fluvial activo
NM-010	GQ-11-NM-015	No	Compósito de sedimento de planicie de inundación
NM-010	GQ-11-NM-014	No	Compósito de sedimento fluvial activo
NM-011	GQ-11-NM-016	No	Compósito de sedimento fluvial activo
NM-012	GQ-11-NM-017	No	Compósito de sedimento fluvial activo
NM-013	GQ-11-NM-018	No	Compósito de sedimento fluvial activo
NM-014	GQ-11-NM-019	No	Compósito de sedimento fluvial activo
NM-015	GQ-11-NM-020	No	Compósito de sedimento fluvial activo
NM-016	GQ-11-NM-022	No	Compósito de sedimento fluvial activo
NM-016	GQ-11-NM-021	No	Compósito de sedimento de terraza fluvial
NM-084	GQ-11-NM-097	No	Compósito de sedimento de drenaje
NM-085	GQ-11-NM-098	No	Compósito de sedimento de drenaje
NM-086	GQ-11-NM-099	No	Compósito de sedimento de drenaje
NM-206	GQ-12-NM-088	No	Compósito de sedimento de drenaje
NM-213	GQ-12-NM-095	No	Compósito de sedimento de drenaje

Tabla C.7: Factores Antropogénicos que podrían afectar la muestra (continuación)

PUNTO	MUESTRA	FACTORES ANTROPOGÉNICOS QUE PODRÍAN AFECTAR A LA MUESTRA
CM-030	GQ-12-CM-031	Al sur del punto de muestreo, y en forma paralela a la quebrada, hay un camino.
CM-030	GQ-12-CM-032	Al sur del punto de muestreo, y en forma paralela a la quebrada, hay un camino.
CR-188	GQ-12-CR-111	No observados.
CR-189	GQ-12-CR-112	No observados.
CR-190	GQ-12-CR-113	No observados.
FA-225	GQ-12-FA-049	No observados.
FA-226	GQ-12-FA-050	No observados.
FA-228	GQ-12-FA-054	No observados.
FA-228	GQ-12-FA-053	No observados.
FA-228	GQ-12-FA-052	No observados.
FA-229	GQ-12-FA-055	No observados.
FA-230	GQ-12-FA-056	No observados.
FA-231	GQ-12-FA-057	No observados.
FA-232	GQ-12-FA-058	No observados.
FA-232	GQ-12-FA-059	No observados.
FA-233	GQ-12-FA-060	Zona agrícola dedicada al pastoreo.
FA-234	GQ-12-FA-061	No observados.
FA-235	GQ-12-FA-062	No observados.
FA-236	GQ-12-FA-063	No observados.
FA-237	GQ-12-FA-064	No observados.
FA-238	GQ-12-FA-065	Huellas troperas de pastoreo.
FA-239	GQ-12-FA-066	No observados.
FA-240	GQ-12-FA-068	No observados.
FA-240	GQ-12-FA-067	No observados.
FA-241	GQ-12-FA-069	No observados.
FA-245	GQ-12-FA-073	No observados.
FA-246	GQ-12-FA-074	No observados.
FA-258	GQ-12-FA-087	No observados.
FA-266	GQ-12-FA-096	Muestra tomada aproximadamente 1,5 km aguas abajo de Mulluri.
FA-272	GQ-12-FA-103	No observados.
FA-274	GQ-12-FA-105	No observados.
FA-275	GQ-12-FA-106	No observados.
FA-286	GQ-12-FA-117	No observados.
FA-338	GQ-13-FA-050	No observados.
FC-017	GQ-12-FC-019	Sector visitado por turistas, sin contaminación aparente.
FC-017	GQ-12-FC-020	Sector visitado por turistas, sin contaminación aparente.
FC-017	GQ-12-FC-021	Sector visitado por turistas, sin contaminación aparente.
FC-018	GQ-12-FC-022	No observados.
FC-019	GQ-12-FC-023	No observados.
FC-020	GQ-12-FC-025	Camino a unos 40 m que aporta algo de basura al lecho del cauce muestreado.
FC-020	GQ-12-FC-024	Camino a unos 40 m que aporta algo de basura al lecho del cauce muestreado.
FC-021	GQ-12-FC-026	Huellas de vehículos muy poco transitadas a unos 20 m sobre la ladera derecha.
FC-022	GQ-12-FC-027	Caserío abandonado 3 km aguas arriba, huellas de vehículos poco transitadas 200 m al este.
FC-023	GQ-12-FC-028	Huellas vehículos muy poco transitadas 300 m al E.
FC-024	GQ-12-FC-029	No observados.
FC-025	GQ-12-FC-030	Huella de vehículo muy antigua 200 m hacia el suroeste.
FC-026	GQ-12-FC-031	No observados.
FC-027	GQ-12-FC-032	No observados.
FC-028	GQ-12-FC-033	No observados.
FC-029	GQ-12-FC-035	No observados.
FC-030	GQ-12-FC-034	No observados.
FC-031	GQ-12-FC-036	No observados.
FC-032	GQ-12-FC-037	Camino recientemente hecho 100 m al N del río, en ladera izquierda suelo fino poco consolidado.
FC-033	GQ-12-FC-038	No observados.
FC-034	GQ-12-FC-039	No observados.
FC-035	GQ-12-FC-040	No observados.
FC-066	GQ-13-FC-001	No observados.
FC-067	GQ-13-FC-002	No observados.
FC-069	GQ-13-FC-004	No observados.
FE-031	GQ-12-FE-034	Hay un antiguo camino de tierra aguas arriba del punto de muestreo.
JP-001	GQ-11-JP-002	Valle agrícola con represas artificiales.
JP-001	GQ-11-JP-001	Valle agrícola con represas artificiales y caminos laterales y en la foto se observa movimientos de tierra a la orilla del río.
JP-002	GQ-11-JP-003	Existe camino lateral al cauce en el lecho del río.
JP-003	GQ-11-JP-005	El nivel superior de la terraza (2 metros superiores) evidencian alteración antrópica por lo que se evitó su muestreo.
JP-003	GQ-11-JP-004	Hay asentamientos humanos y cultivos agrícolas en ambas riberas del cauce, además, existe un camino lateral al cauce del río.
JP-004	GQ-11-JP-006	Aguas abajo de Quistagama. Aguas arriba de puente Saiña (localidad no indicada en mapa base).
JP-005	GQ-11-JP-008	Aguas abajo de Sojaima.
JP-005	GQ-11-JP-009	Aguas abajo de Sojaima.
JP-005	GQ-11-JP-007	Aguas abajo de Quistagama. Aguas arriba de puente Saiña (localidad no indicada en mapa base).
JP-006	GQ-11-JP-010	Aguas abajo de la localidad de Francia y de varias localidades agrícolas de la quebrada Camiña.
JP-006	GQ-11-JP-011	Aguas abajo de la localidad de Francia y de varias localidades agrícolas de la quebrada Camiña.

Tabla C.8: Factores Antropogénicos que podrían afectar la muestra (continuación)

PUNTO	MUESTRA	FACTORES ANTROPOGÉNICOS QUE PODRÍAN AFECTAR A LA MUESTRA
MF-167	GQ-12-MF-064	No observados.
MF-168	GQ-12-MF-065	No observados.
MF-169	GQ-12-MF-067	No observados.
MF-169	GQ-12-MF-066	No observados.
MF-170	GQ-12-MF-068	No observados.
MF-171	GQ-12-MF-070	No observados.
MF-171	GQ-12-MF-069	No observados.
MF-172	GQ-12-MF-071	No observados.
MF-173	GQ-12-MF-072	No observados.
MF-174	GQ-12-MF-073	No observados.
MF-186	GQ-12-MF-092	No observados.
MF-186	GQ-12-MF-093	No observados.
MF-187	GQ-12-MF-094	No observados.
MF-188	GQ-12-MF-095	No observados.
MF-189	GQ-12-MF-096	No observados.
MF-190	GQ-12-MF-097	No observados.
MF-190	GQ-12-MF-098	No observados.
NM-009	GQ-11-NM-013	Existen cultivos, especialmente aguas arriba.
NM-010	GQ-11-NM-015	Hay cultivos aguas arriba.
NM-010	GQ-11-NM-014	Hay cultivos aguas arriba.
NM-011	GQ-11-NM-016	Hay cultivos en las cercanías del cauce principal y huellas de circulación vehicular.
NM-012	GQ-11-NM-017	Hay cultivos aguas arriba del abanico aluvial.
NM-013	GQ-11-NM-018	Hay cultivos de hortalizas.
NM-014	GQ-11-NM-019	Hay cultivos y una tubería para un embalse, remoción de material en una de las riberas del cauce.
NM-015	GQ-11-NM-020	Existe tubería para sacar agua del cauce principal y cultivos en los sectores aledaños a la quebrada.
NM-016	GQ-11-NM-022	Zonas de cultivos en las planicies aledañas al cauce principal.
NM-016	GQ-11-NM-021	No observados.
NM-084	GQ-11-NM-097	Zona de circulación de vehículos.
NM-085	GQ-11-NM-098	No observados.
NM-086	GQ-11-NM-099	Hay residuos antrópicos en drenaje y alrededores.
NM-206	GQ-12-NM-088	No observados.
NM-213	GQ-12-NM-095	No observados.

Tabla C.9: Concentraciones para elementos As, Cd, Co, Cr₂O₃, Cu

PUNTO	MUESTRA	As ppm	Cd ppm	Co ppm	Cr ₂ O ₃ %PESO	Cu ppm
CM-030	GQ-12-CM-031	13,8	0,1	17,6	0,008	29,8
CM-030	GQ-12-CM-032	15,2	0,2	22,2	0,011	43,6
CR-188	GQ-12-CR-111	16,1	<0,1	62,8	0,013	37
CR-189	GQ-12-CR-112	285,2	0,1	43,9	0,013	34,4
CR-190	GQ-12-CR-113	284	<0,1	69,1	0,023	46,5
FA-225	GQ-12-FA-049	165	0,1	33,8	0,011	28,8
FA-226	GQ-12-FA-050	186	0,1	23,6	0,004	40,5
FA-228	GQ-12-FA-054	85	0,1	22,2	0,006	29,2
FA-228	GQ-12-FA-053	150,7	0,1	29,8	0,008	31,2
FA-228	GQ-12-FA-052	174,3	0,1	32,4	0,009	29,4
FA-229	GQ-12-FA-055	11,1	0,2	99,4	0,027	57,7
FA-230	GQ-12-FA-056	125,8	0,3	48,2	0,009	48,8
FA-231	GQ-12-FA-057	217,8	0,2	64,9	0,02	43,7
FA-232	GQ-12-FA-058	20	0,1	76,2	0,027	48,7
FA-232	GQ-12-FA-059	16,7	0,2	91,2	0,033	48,4
FA-233	GQ-12-FA-060	614,9	0,2	36,1	0,007	36,4
FA-234	GQ-12-FA-061	773,1	<0,1	13,9	0,004	22,3
FA-235	GQ-12-FA-062	21,2	0,2	25,8	0,007	57,3
FA-236	GQ-12-FA-063	201,3	0,2	13,6	0,004	43,3
FA-237	GQ-12-FA-064	34	0,1	16,7	0,007	36,4
FA-238	GQ-12-FA-065	5,3	<0,1	44,3	0,01	34,1
FA-239	GQ-12-FA-066	15,3	<0,1	11,9	0,004	27,6
FA-240	GQ-12-FA-068	15,9	<0,1	10,2	0,003	21,4
FA-240	GQ-12-FA-067	16,8	<0,1	10,7	0,003	21,6
FA-241	GQ-12-FA-069	10,6	<0,1	10,4	0,002	24,8
FA-245	GQ-12-FA-073	24,5	0,2	30,4	0,009	48,8
FA-246	GQ-12-FA-074	11,6	0,2	20,5	0,006	37,5
FA-258	GQ-12-FA-087	46,5	<0,1	17,6	0,005	27,3
FA-266	GQ-12-FA-096	109	<0,1	45,9	0,016	31,5
FA-272	GQ-12-FA-103	15,9	<0,1	26	0,006	35,4
FA-274	GQ-12-FA-105	33,7	<0,1	24,8	0,007	43,1
FA-275	GQ-12-FA-106	31,5	<0,1	10,2	0,004	29,5
FA-286	GQ-12-FA-117	6,3	<0,1	40	0,011	33
FA-338	GQ-13-FA-050	8,2	<0,1	30,5	0,041	22,9
FC-017	GQ-12-FC-019	>10000,0	<0,1	2,8	<0,002	5,3
FC-017	GQ-12-FC-020	>10000,0	<0,1	1,8	<0,002	2
FC-017	GQ-12-FC-021	>10000,0	<0,1	1,9	<0,002	2,9
FC-018	GQ-12-FC-022	10,9	<0,1	24,5	0,008	43,1
FC-019	GQ-12-FC-023	13,6	0,2	39,9	0,011	27,6
FC-020	GQ-12-FC-025	10	0,2	22,6	0,004	35,6
FC-020	GQ-12-FC-024	12,4	0,2	25,3	0,004	46,9
FC-021	GQ-12-FC-026	39,8	<0,1	29,1	0,007	44,4
FC-022	GQ-12-FC-027	1827,2	0,2	15	0,003	29
FC-023	GQ-12-FC-028	78,4	0,2	28	0,01	39,3
FC-024	GQ-12-FC-029	177,4	<0,1	35	0,01	26,6
FC-025	GQ-12-FC-030	98,8	<0,1	19,9	0,005	23,4

Tabla C.10: Concentraciones para elementos As, Cd, Co, Cr₂O₃, Cu (continuación)

PUNTO	MUESTRA	As ppm	Cd ppm	Co ppm	Cr ₂ O ₃ %PESO	Cu ppm
FC-026	GQ-12-FC-031	14,2	0,1	23,5	0,008	29,1
FC-027	GQ-12-FC-032	14,7	0,2	15,3	0,005	29
FC-028	GQ-12-FC-033	7,2	<0,1	31,8	0,01	29,6
FC-029	GQ-12-FC-035	4,5	<0,1	32,5	0,009	30,1
FC-030	GQ-12-FC-034	28,3	0,1	36,7	0,011	47,9
FC-031	GQ-12-FC-036	22,2	<0,1	24,7	0,004	38,1
FC-032	GQ-12-FC-037	61,9	0,2	64	0,02	48,6
FC-033	GQ-12-FC-038	13,4	0,1	31,7	0,006	43,5
FC-034	GQ-12-FC-039	38,5	0,1	16,3	0,006	39,8
FC-035	GQ-12-FC-040	18,2	0,1	37	0,011	40,2
FC-066	GQ-13-FC-001	9,1	<0,1	23,2	0,007	32,3
FC-067	GQ-13-FC-002	12,8	<0,1	21,1	0,01	28,1
FC-069	GQ-13-FC-004	17,1	0,2	12,5	0,005	31,7
FE-031	GQ-12-FE-034	12,4	0,2	18,9	0,007	29,4
JP-001	GQ-11-JP-002	118,9	0,1	25,5	0,007	23,1
JP-001	GQ-11-JP-001	138,2	0,1	22,7	0,006	28,3
JP-002	GQ-11-JP-003	169,3	0,1	31,7	0,009	35,2
JP-003	GQ-11-JP-005	59	0,2	15,7	0,004	34,6
JP-003	GQ-11-JP-004	180,2	0,1	34,2	0,013	53,1
JP-004	GQ-11-JP-006	90,6	0,1	21,4	0,008	26,3
JP-005	GQ-11-JP-008	91,7	<0,1	16,3	<0,002	32
JP-005	GQ-11-JP-009	265,1	0,1	20,9	0,007	21,2
JP-005	GQ-11-JP-007	62	<0,1	27,8	0,009	21,9
JP-006	GQ-11-JP-010	72,7	<0,1	19,8	0,008	25,8
JP-006	GQ-11-JP-011	16,4	<0,1	15,4	0,01	27,2
MF-167	GQ-12-MF-064	8,8	<0,1	26,3	0,007	42,6
MF-168	GQ-12-MF-065	80,4	<0,1	36,2	0,01	26,7
MF-169	GQ-12-MF-067	164,4	<0,1	23,7	0,006	26,5
MF-169	GQ-12-MF-066	703,2	<0,1	34,8	0,006	32,2
MF-170	GQ-12-MF-068	696,6	<0,1	12,1	0,005	24,4
MF-171	GQ-12-MF-070	4,9	<0,1	24,1	0,005	14,6
MF-171	GQ-12-MF-069	12,2	<0,1	57,5	0,019	26
MF-172	GQ-12-MF-071	8,8	<0,1	12,6	0,006	22,7
MF-173	GQ-12-MF-072	13,2	0,2	24	0,007	31,7
MF-174	GQ-12-MF-073	4,2	0,2	125,8	0,045	32,3
MF-186	GQ-12-MF-092	9,1	0,1	15,7	0,004	17,2
MF-186	GQ-12-MF-093	6,4	0,2	74,9	0,021	31,4
MF-187	GQ-12-MF-094	25,4	0,2	17,1	0,006	30,1
MF-188	GQ-12-MF-095	22,4	0,4	17,6	0,006	36,7
MF-189	GQ-12-MF-096	18,4	0,2	27,9	0,014	29,6
MF-190	GQ-12-MF-097	14,7	<0,1	18,4	0,006	26
MF-190	GQ-12-MF-098	18,8	0,2	18,1	0,007	31
NM-009	GQ-11-NM-013	126,4	<0,1	22,5	0,008	18,2
NM-010	GQ-11-NM-015	101,4	0,2	15,5	0,006	20,3
NM-010	GQ-11-NM-014	98,8	0,2	12,5	0,002	35,9

Tabla C.11: Concentraciones para elementos As, Cd, Co, Cr₂O₃, Cu (continuación)

PUNTO	MUESTRA	As ppm	Cd ppm	Co ppm	Cr₂O₃ %PESO	Cu ppm
NM-011	GQ-11-NM-016	84,4	<0,1	14,1	0,004	20,1
NM-012	GQ-11-NM-017	90,8	<0,1	19,8	0,008	18
NM-013	GQ-11-NM-018	107,8	<0,1	16,2	0,004	27,9
NM-014	GQ-11-NM-019	73,4	<0,1	15,4	0,004	23,8
NM-015	GQ-11-NM-020	75,7	<0,1	21,9	0,006	24,2
NM-016	GQ-11-NM-022	618,6	0,2	9,8	<0,002	39,2
NM-016	GQ-11-NM-021	233,8	<0,1	17,9	0,004	61,2
NM-084	GQ-11-NM-097	20,1	0,2	13,7	0,005	56,7
NM-085	GQ-11-NM-098	19,5	0,2	14,9	0,007	45,2
NM-086	GQ-11-NM-099	26,1	0,3	13,2	0,006	71,2
NM-206	GQ-12-NM-088	29	0,3	18,3	0,007	84,1
NM-213	GQ-12-NM-095	28,9	0,1	20,7	0,008	32

Tabla C.12: Concentraciones para elementos Hg, Mo, Pb, Sb, Zn

PUNTO	MUESTRA	Hg ppm	Mo ppm	Pb ppm	Sb ppm	Zn ppm
CM-030	GQ-12-CM-031	0,02	0,8	7,7	0,4	42
CM-030	GQ-12-CM-032	0,04	1	9,8	0,3	64
CR-188	GQ-12-CR-111	0,02	2	6,1	0,4	62
CR-189	GQ-12-CR-112	0,14	1	5,8	26	75
CR-190	GQ-12-CR-113	0,29	1,2	5,8	13,8	85
FA-225	GQ-12-FA-049	0,07	1	4,5	6,9	60
FA-226	GQ-12-FA-050	0,05	0,9	7,2	2,2	47
FA-228	GQ-12-FA-054	0,06	1	7,3	2,1	51
FA-228	GQ-12-FA-053	0,07	1,3	7,1	3,7	65
FA-228	GQ-12-FA-052	0,03	1,2	7	4,2	68
FA-229	GQ-12-FA-055	0,1	2,9	9	0,6	195
FA-230	GQ-12-FA-056	0,1	1,3	7,9	0,6	86
FA-231	GQ-12-FA-057	0,06	1,7	5,6	9,7	98
FA-232	GQ-12-FA-058	0,07	3,7	12,5	1,2	183
FA-232	GQ-12-FA-059	0,06	4	13,1	1,2	208
FA-233	GQ-12-FA-060	0,05	1,2	7,6	4,2	75
FA-234	GQ-12-FA-061	0,07	1,1	6,4	91,8	40
FA-235	GQ-12-FA-062	0,01	1,3	6,5	0,4	51
FA-236	GQ-12-FA-063	0,18	1,5	7,7	1,2	78
FA-237	GQ-12-FA-064	0,05	1,9	8,7	0,8	47
FA-238	GQ-12-FA-065	0,01	1,2	5,3	0,2	102
FA-239	GQ-12-FA-066	<0,01	1,2	6,9	0,5	40
FA-240	GQ-12-FA-068	0,02	1,1	6,9	0,5	39
FA-240	GQ-12-FA-067	0,02	1	7,1	0,6	42
FA-241	GQ-12-FA-069	0,01	0,7	6,3	0,4	31
FA-245	GQ-12-FA-073	0,06	2,6	9,3	0,3	50
FA-246	GQ-12-FA-074	0,02	0,6	10,1	0,3	53
FA-258	GQ-12-FA-087	0,03	1,1	9,6	0,7	49
FA-266	GQ-12-FA-096	0,05	1	5	9,3	74
FA-272	GQ-12-FA-103	0,04	1,9	7,4	0,5	54
FA-274	GQ-12-FA-105	0,08	2,1	8,1	1	61
FA-275	GQ-12-FA-106	0,02	1,1	9,8	0,4	48
FA-286	GQ-12-FA-117	0,03	1,2	6,5	0,3	68
FA-338	GQ-13-FA-050	<0,01	1,2	9	0,5	55
FC-017	GQ-12-FC-019	0,01	12	4,3	>2000,0	187
FC-017	GQ-12-FC-020	0,02	8	1,2	>2000,0	276
FC-017	GQ-12-FC-021	0,01	5	1,9	>2000,0	407
FC-018	GQ-12-FC-022	0,03	0,4	10	0,3	94
FC-019	GQ-12-FC-023	0,03	0,6	12,5	0,5	76
FC-020	GQ-12-FC-025	0,04	0,6	8,1	0,3	59
FC-020	GQ-12-FC-024	0,04	0,6	10,2	0,2	68

Tabla C.13: Concentraciones para elementos Hg, Mo, Pb, Sb, Zn (continuación)

PUNTO	MUESTRA	Hg ppm	Mo ppm	Pb ppm	Sb ppm	Zn ppm
FC-021	GQ-12-FC-026	0,11	3,6	14,7	0,7	42
FC-022	GQ-12-FC-027	0,03	1	8,8	4,3	41
FC-023	GQ-12-FC-028	0,14	2,1	9,3	1,3	84
FC-024	GQ-12-FC-029	0,04	1,8	6,4	4,7	62
FC-025	GQ-12-FC-030	0,07	1,1	4,5	2,6	38
FC-026	GQ-12-FC-031	0,03	1	10,8	0,5	71
FC-027	GQ-12-FC-032	0,02	0,7	10,4	0,5	53
FC-028	GQ-12-FC-033	0,02	0,5	8	0,1	51
FC-029	GQ-12-FC-035	0,04	0,5	6,4	0,2	51
FC-030	GQ-12-FC-034	0,05	4,7	11	0,6	59
FC-031	GQ-12-FC-036	0,04	2,8	10,3	0,4	43
FC-032	GQ-12-FC-037	0,06	2	15,5	1,5	174
FC-033	GQ-12-FC-038	0,05	1,2	8,5	0,3	75
FC-034	GQ-12-FC-039	0,08	2,5	11,8	0,7	40
FC-035	GQ-12-FC-040	0,02	2,2	9,3	0,5	70
FC-066	GQ-13-FC-001	0,03	0,6	10,6	0,3	61
FC-067	GQ-13-FC-002	0,02	1,2	10,8	0,5	69
FC-069	GQ-13-FC-004	0,03	1	12	0,7	58
FE-031	GQ-12-FE-034	0,03	0,7	8,7	0,4	42
JP-001	GQ-11-JP-002	0,06	0,9	7,6	3,1	46
JP-001	GQ-11-JP-001	0,05	1	15,7	3	52
JP-002	GQ-11-JP-003	0,05	1,1	6,8	3,8	63
JP-003	GQ-11-JP-005	0,03	0,6	16,7	1	55
JP-003	GQ-11-JP-004	0,03	1,3	8,6	3,3	87
JP-004	GQ-11-JP-006	0,02	0,9	6	2,7	43
JP-005	GQ-11-JP-008	0,04	0,9	6,5	2,3	38
JP-005	GQ-11-JP-009	0,03	0,6	5,4	4,3	42
JP-005	GQ-11-JP-007	0,03	0,7	7,3	3	51
JP-006	GQ-11-JP-010	0,02	0,7	5,4	2,5	37
JP-006	GQ-11-JP-011	<0,01	0,8	6,3	0,5	40
MF-167	GQ-12-MF-064	0,03	0,6	8,2	0,2	57
MF-168	GQ-12-MF-065	0,05	1,5	5,8	3,2	55
MF-169	GQ-12-MF-067	0,07	0,9	7,7	3,5	49
MF-169	GQ-12-MF-066	0,07	0,9	7,7	4,3	73
MF-170	GQ-12-MF-068	0,07	1,8	5,6	4,5	36
MF-171	GQ-12-MF-070	<0,01	0,8	5	0,2	34
MF-171	GQ-12-MF-069	<0,01	1,8	8,3	0,4	97
MF-172	GQ-12-MF-071	0,02	0,8	9,7	0,4	38
MF-173	GQ-12-MF-072	0,08	1,4	7,2	0,3	39
MF-174	GQ-12-MF-073	0,01	2	8,7	0,4	303

Tabla C.14: Concentraciones para elementos Hg, Mo, Pb, Sb, Zn (continuación)

PUNTO	MUESTRA	Hg ppm	Mo ppm	Pb ppm	Sb ppm	Zn ppm
MF-186	GQ-12-MF-092	<0,01	0,5	8,4	0,5	40
MF-186	GQ-12-MF-093	0,02	1,2	15,4	0,3	152
MF-187	GQ-12-MF-094	0,05	0,8	9,1	0,9	49
MF-188	GQ-12-MF-095	0,06	0,8	9,4	0,9	51
MF-189	GQ-12-MF-096	0,02	0,9	6,7	0,7	55
MF-190	GQ-12-MF-097	0,02	0,5	6,3	0,6	34
MF-190	GQ-12-MF-098	0,03	0,7	8,3	0,8	44
NM-009	GQ-11-NM-013	0,03	0,8	4,7	2	44
NM-010	GQ-11-NM-015	0,03	0,6	4,4	2,1	39
NM-010	GQ-11-NM-014	0,08	1,1	10,2	2,7	45
NM-011	GQ-11-NM-016	0,03	0,7	6	1,8	41
NM-012	GQ-11-NM-017	0,04	0,9	6,1	2	42
NM-013	GQ-11-NM-018	0,03	0,9	11	2,3	43
NM-014	GQ-11-NM-019	0,04	0,9	8,6	2,1	39
NM-015	GQ-11-NM-020	0,02	1,1	6	2,7	40
NM-016	GQ-11-NM-022	0,09	2,5	10	28,9	41
NM-016	GQ-11-NM-021	0,04	1	11,4	6,8	55
NM-084	GQ-11-NM-097	0,07	0,9	11,7	0,5	59
NM-085	GQ-11-NM-098	0,07	0,9	10,5	0,5	53
NM-086	GQ-11-NM-099	0,07	1,2	13,5	0,8	61
NM-206	GQ-12-NM-088	0,14	1,5	13,9	0,7	70
NM-213	GQ-12-NM-095	0,03	1,1	7,7	0,6	52

Tabla C.15: Concentraciones para el Óxido férrico (Fe2O3)

PUNTO	MUESTRA	Fe2O3% PESO	PUNTO	MUESTRA	Fe2O3% PESO
CM-030	GQ-12-CM-031	6,43	FC-017	GQ-12-FC-019	29,04
CM-030	GQ-12-CM-032	9,26	FC-017	GQ-12-FC-020	32,85
CR-188	GQ-12-CR-111	28,96	FC-017	GQ-12-FC-021	21,85
CR-189	GQ-12-CR-112	18,31	FC-018	GQ-12-FC-022	12,29
CR-190	GQ-12-CR-113	30,63	FC-019	GQ-12-FC-023	15,5
FA-225	GQ-12-FA-049	16,76	FC-020	GQ-12-FC-024	9,07
FA-226	GQ-12-FA-050	7,07	FC-020	GQ-12-FC-025	8,02
FA-228	GQ-12-FA-052	17,26	FC-021	GQ-12-FC-026	10,74
FA-228	GQ-12-FA-053	14,82	FC-022	GQ-12-FC-027	6,21
FA-228	GQ-12-FA-054	10,31	FC-023	GQ-12-FC-028	14,2
FA-229	GQ-12-FA-055	36	FC-024	GQ-12-FC-029	16,64
FA-230	GQ-12-FA-056	18,85	FC-025	GQ-12-FC-030	6,95
FA-231	GQ-12-FA-057	29,94	FC-026	GQ-12-FC-031	9,3
FA-232	GQ-12-FA-058	35,2	FC-027	GQ-12-FC-032	6,41
FA-232	GQ-12-FA-059	30,57	FC-028	GQ-12-FC-033	10,96
FA-233	GQ-12-FA-060	11,92	FC-029	GQ-12-FC-035	11,26
FA-234	GQ-12-FA-061	6	FC-030	GQ-12-FC-034	13,84
FA-235	GQ-12-FA-062	10,11	FC-031	GQ-12-FC-036	9,16
FA-236	GQ-12-FA-063	8,49	FC-032	GQ-12-FC-037	32,49
FA-237	GQ-12-FA-064	10,26	FC-033	GQ-12-FC-038	13,88
FA-238	GQ-12-FA-065	23,13	FC-034	GQ-12-FC-039	8,61
FA-239	GQ-12-FA-066	5,9	FC-035	GQ-12-FC-040	16,5
FA-240	GQ-12-FA-067	5,09	FC-066	GQ-13-FC-001	10,11
FA-240	GQ-12-FA-068	5,13	FC-067	GQ-13-FC-002	10,26
FA-241	GQ-12-FA-069	4,55	FC-069	GQ-13-FC-004	5,21
FA-245	GQ-12-FA-073	12,14	FE-031	GQ-12-FE-034	6,01
FA-246	GQ-12-FA-074	8,89	JP-001	GQ-11-JP-001	10,7
FA-258	GQ-12-FA-087	7,57	JP-001	GQ-11-JP-002	10,26
FA-266	GQ-12-FA-096	21,3	JP-002	GQ-11-JP-003	13,21
FA-272	GQ-12-FA-103	12,89	JP-003	GQ-11-JP-004	14,26
FA-274	GQ-12-FA-105	14,57	JP-003	GQ-11-JP-005	5,27
FA-275	GQ-12-FA-106	4,84	JP-004	GQ-11-JP-006	9,43
FA-286	GQ-12-FA-117	16,45	JP-005	GQ-11-JP-007	8
FA-338	GQ-13-FA-050	12,64	JP-005	GQ-11-JP-008	12,04

Tabla C.16: Concentraciones para el Óxido férrico (continuación)

PUNTO	MUESTRA	Fe₂O₃ % PESO
JP-005	GQ-11-JP-009	6,67
JP-006	GQ-11-JP-010	6,3
JP-006	GQ-11-JP-011	7,39
MF-167	GQ-12-MF-064	7,71
MF-168	GQ-12-MF-065	15,37
MF-169	GQ-12-MF-066	11,78
MF-169	GQ-12-MF-067	10,84
MF-170	GQ-12-MF-068	6,15
MF-171	GQ-12-MF-069	22,8
MF-171	GQ-12-MF-070	8,06
MF-172	GQ-12-MF-071	5,92
MF-173	GQ-12-MF-072	8,65
MF-174	GQ-12-MF-073	61,54
MF-186	GQ-12-MF-092	39,13
MF-186	GQ-12-MF-093	6,33
MF-187	GQ-12-MF-094	6,82
MF-188	GQ-12-MF-095	7,24
MF-189	GQ-12-MF-096	10,58
MF-190	GQ-12-MF-097	6,73
MF-190	GQ-12-MF-098	7,28
NM-009	GQ-11-NM-013	8,8
NM-010	GQ-11-NM-014	5,38
NM-010	GQ-11-NM-015	4,66
NM-011	GQ-11-NM-016	5,36
NM-012	GQ-11-NM-017	8,47
NM-013	GQ-11-NM-018	6,32
NM-014	GQ-11-NM-019	6,44
NM-015	GQ-11-NM-020	9,53
NM-016	GQ-11-NM-021	5,44
NM-016	GQ-11-NM-022	6,95
NM-084	GQ-11-NM-097	5,21
NM-085	GQ-11-NM-098	5,26
NM-086	GQ-11-NM-099	5,39
NM-206	GQ-12-NM-088	6,66
NM-213	GQ-12-NM-095	7,63

A continuación, se presenta la formula utilizada para la transformación de Cr₂O₃ % peso a Cr ppm, además de los posteriores resultados. Cabe señalar que el peso molar del Cr es 51.99 g/mol y peso molar del O es 15,99 g/mol.

$$Crppm = \frac{Cr2O3\%PESO * 100}{1000000} * \frac{2 * PesoMolarCr}{(2 * PesoMolarCr + 3 * PesoMolarO)}$$

Tabla C.17: Tabla transformación de Cr₂O₃ % peso a Cr ppm

PUNTO	MUESTRA	Cr ₂ O ₃ %PESO	Cr ppm	PUNTO	MUESTRA	Cr ₂ O ₃ %PESO	Cr ppm
CM-030	GQ-12-CM-031	0,008	54,74	FC-017	GQ-12-FC-019	0,002	13,68
CM-030	GQ-12-CM-032	0,011	75,27	FC-017	GQ-12-FC-020	0,002	13,68
CR-188	GQ-12-CR-111	0,013	88,95	FC-017	GQ-12-FC-021	0,002	13,68
CR-189	GQ-12-CR-112	0,013	88,95	FC-018	GQ-12-FC-022	0,008	54,74
CR-190	GQ-12-CR-113	0,023	157,37	FC-019	GQ-12-FC-023	0,011	75,27
FA-225	GQ-12-FA-049	0,011	75,27	FC-020	GQ-12-FC-025	0,004	27,37
FA-226	GQ-12-FA-050	0,004	27,37	FC-020	GQ-12-FC-024	0,004	27,37
FA-228	GQ-12-FA-054	0,006	41,05	FC-021	GQ-12-FC-026	0,007	47,90
FA-228	GQ-12-FA-053	0,008	54,74	FC-022	GQ-12-FC-027	0,003	20,53
FA-228	GQ-12-FA-052	0,009	61,58	FC-023	GQ-12-FC-028	0,01	68,42
FA-229	GQ-12-FA-055	0,027	184,74	FC-024	GQ-12-FC-029	0,01	68,42
FA-230	GQ-12-FA-056	0,009	61,58	FC-025	GQ-12-FC-030	0,005	34,21
FA-231	GQ-12-FA-057	0,02	136,85	FC-026	GQ-12-FC-031	0,008	54,74
FA-232	GQ-12-FA-058	0,027	184,74	FC-027	GQ-12-FC-032	0,005	34,21
FA-232	GQ-12-FA-059	0,033	225,80	FC-028	GQ-12-FC-033	0,01	68,42
FA-233	GQ-12-FA-060	0,007	47,90	FC-029	GQ-12-FC-035	0,009	61,58
FA-234	GQ-12-FA-061	0,004	27,37	FC-030	GQ-12-FC-034	0,011	75,27
FA-235	GQ-12-FA-062	0,007	47,90	FC-031	GQ-12-FC-036	0,004	27,37
FA-236	GQ-12-FA-063	0,004	27,37	FC-032	GQ-12-FC-037	0,02	136,85
FA-237	GQ-12-FA-064	0,007	47,90	FC-033	GQ-12-FC-038	0,006	41,05
FA-238	GQ-12-FA-065	0,01	68,42	FC-034	GQ-12-FC-039	0,006	41,05
FA-239	GQ-12-FA-066	0,004	27,37	FC-035	GQ-12-FC-040	0,011	75,27
FA-240	GQ-12-FA-068	0,003	20,53	FC-066	GQ-13-FC-001	0,007	47,90
FA-240	GQ-12-FA-067	0,003	20,53	FC-067	GQ-13-FC-002	0,01	68,42
FA-241	GQ-12-FA-069	0,002	13,68	FC-069	GQ-13-FC-004	0,005	34,21
FA-245	GQ-12-FA-073	0,009	61,58	FE-031	GQ-12-FE-034	0,007	47,90
FA-246	GQ-12-FA-074	0,006	41,05	JP-001	GQ-11-JP-002	0,007	47,90
FA-258	GQ-12-FA-087	0,005	34,21	JP-001	GQ-11-JP-001	0,006	41,05
FA-266	GQ-12-FA-096	0,016	109,48	JP-002	GQ-11-JP-003	0,009	61,58
FA-272	GQ-12-FA-103	0,006	41,05	JP-003	GQ-11-JP-005	0,004	27,37
FA-274	GQ-12-FA-105	0,007	47,90	JP-003	GQ-11-JP-004	0,013	88,95
FA-275	GQ-12-FA-106	0,004	27,37	JP-004	GQ-11-JP-006	0,008	54,74
FA-286	GQ-12-FA-117	0,011	75,27	JP-005	GQ-11-JP-008	0,002	13,68
FA-338	GQ-13-FA-050	0,041	280,53	JP-005	GQ-11-JP-009	0,007	47,90

Tabla C.18: Tabla transformación de Cr₂O₃%peso a Cr ppm (continuación)

PUNTO	MUESTRA	Cr ₂ O ₃ %PESO	Cr ppm
JP-005	GQ-11-JP-007	0,009	61,58
JP-006	GQ-11-JP-010	0,008	54,74
JP-006	GQ-11-JP-011	0,01	68,42
MF-167	GQ-12-MF-064	0,007	47,90
MF-168	GQ-12-MF-065	0,01	68,42
MF-169	GQ-12-MF-067	0,006	41,05
MF-169	GQ-12-MF-066	0,006	41,05
MF-170	GQ-12-MF-068	0,005	34,21
MF-171	GQ-12-MF-070	0,005	34,21
MF-171	GQ-12-MF-069	0,019	130,00
MF-172	GQ-12-MF-071	0,006	41,05
MF-173	GQ-12-MF-072	0,007	47,90
MF-174	GQ-12-MF-073	0,045	307,90
MF-186	GQ-12-MF-092	0,004	27,37
MF-186	GQ-12-MF-093	0,021	143,69
MF-187	GQ-12-MF-094	0,006	41,05
MF-188	GQ-12-MF-095	0,006	41,05
MF-189	GQ-12-MF-096	0,014	95,79
MF-190	GQ-12-MF-097	0,006	41,05
MF-190	GQ-12-MF-098	0,007	47,90
NM-009	GQ-11-NM-013	0,008	54,74
NM-010	GQ-11-NM-015	0,006	41,05
NM-010	GQ-11-NM-014	0,002	13,68
NM-011	GQ-11-NM-016	0,004	27,37
NM-012	GQ-11-NM-017	0,008	54,74
NM-013	GQ-11-NM-018	0,004	27,37
NM-014	GQ-11-NM-019	0,004	27,37
NM-015	GQ-11-NM-020	0,006	41,05
NM-016	GQ-11-NM-022	0,002	13,68
NM-016	GQ-11-NM-021	0,004	27,37
NM-084	GQ-11-NM-097	0,005	34,21
NM-085	GQ-11-NM-098	0,007	47,90
NM-086	GQ-11-NM-099	0,006	41,05
NM-206	GQ-12-NM-088	0,007	47,90
NM-213	GQ-12-NM-095	0,008	54,74

Anexo D

Imágenes Complementarias del área de estudio

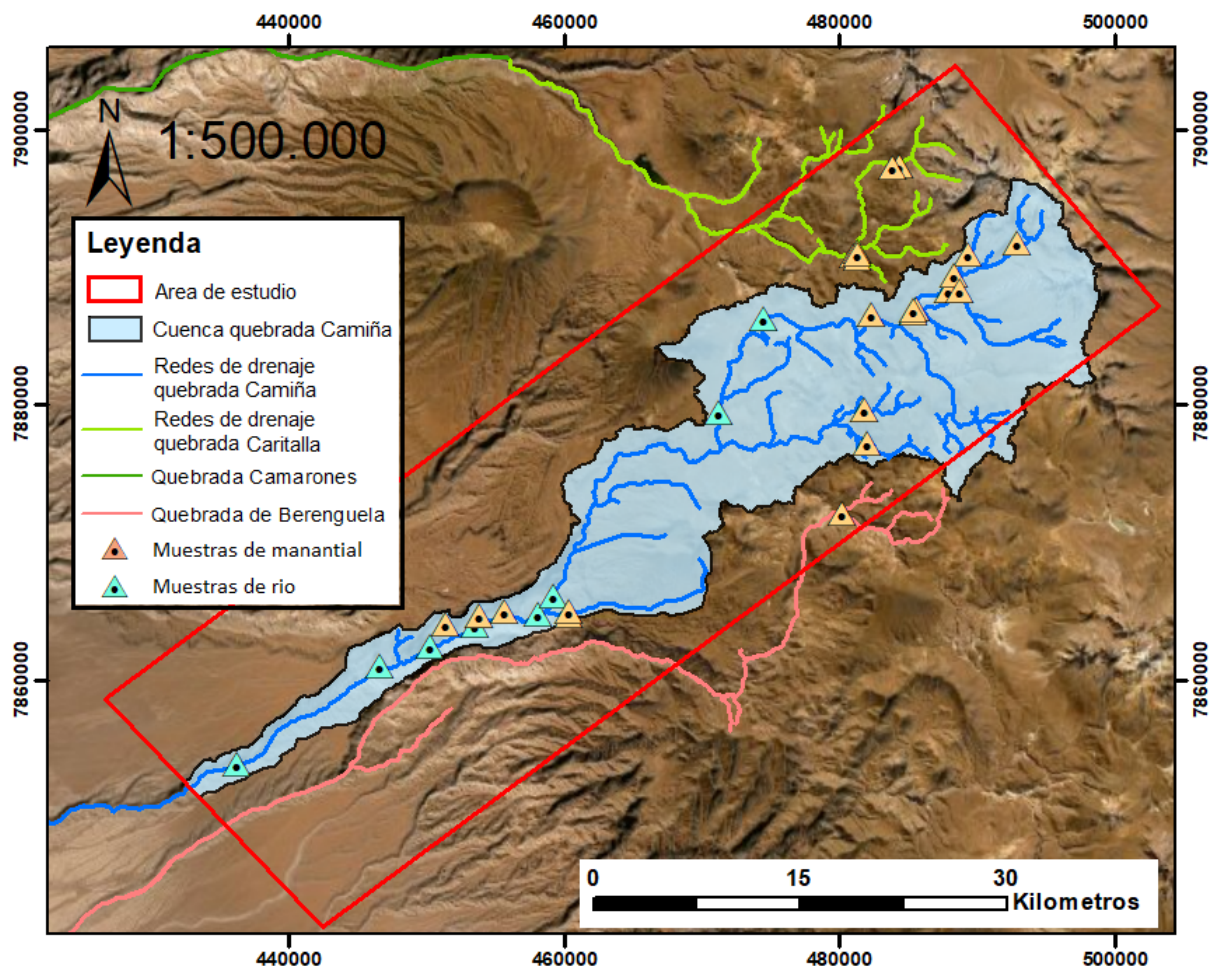


Figura D.1: Imagen cuenca quebrada Camiña

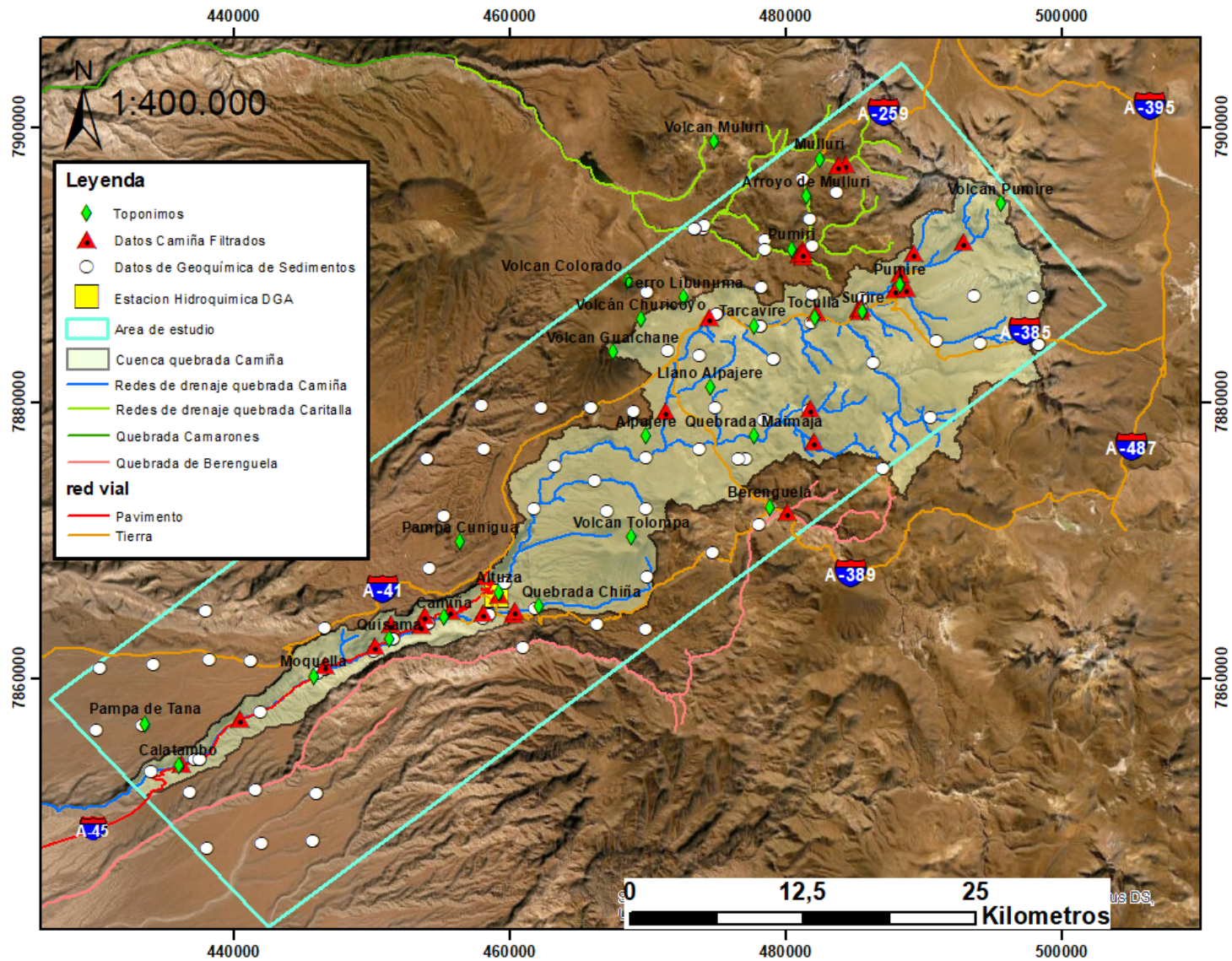


Figura D.2: Cuadro de detalle con lugares, poblados y las rutas que se usan para llegar a los lugares y poblados donde se tomaron muestras dentro del área de estudio