



**ESTUDIO BÁSICO “DIAGNÓSTICO DE LA
SUBCUENCA APORTANTE AL EMBALSE
CARITAYA”**

INFORME FINAL

VOLUMEN I

SANTIAGO, NOVIEMBRE DE 2014

ESTUDIO BÁSICO “DIAGNÓSTICO DE LA SUBCUENCA APORTANTE AL EMBALSE CARITAYA”

INFORME FINAL

ÍNDICE

VOLUMEN I

1	INTRODUCCIÓN	15
1.1	DEFINICIÓN ZONA DE ESTUDIO.....	15
1.2	OBJETIVOS.....	16
2	RECOPIACIÓN Y REVISIÓN DE ANTECEDENTES	17
3	MARCO CONCEPTUAL: ANÁLISIS DE ANTECEDENTES	19
3.1	CLIMA DE LA REGIÓN.....	19
3.2	INFORMACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES Y FOTOS AÉREAS.....	21
3.3	MORFOLOGÍA Y GEOLOGÍA DE LA ZONA.....	22
3.3.1	Geomorfología y Evolución Morfotectónica Regional	22
3.3.2	Geología superficial del Área de Estudio	29
3.3.3	Geología subsuperficial	31
3.4	HIDROLOGÍA	32
3.4.1	Descripción hidrográfica	32
3.4.2	Hidrología (Caracterización de caudales)	34
3.4.3	Embalse Caritaya	36
3.5	HIDROGEOLOGÍA.....	38
3.6	HIDROGEOQUÍMICA	40
3.6.1	Boro	42
3.6.2	Arsénico	45
3.6.3	Efectos del Embalse de Caritaya	51
3.7	DERECHOS DE AGUA Y ORGANIZACIONES DE USUARIOS	53
3.7.1	Derechos de Agua	53
3.7.2	Organizaciones de Usuarios	54
4	INFORMACIÓN LEVANTADA EN TERRENO	57
4.1	CAMPAÑA DE AFORO.....	60
4.2	MUESTREO HIDROQUÍMICO E ISOTÓPICO.....	63

4.3	CAMPAÑA GEOFÍSICA.....	64
4.3.1	Registro de datos NanoTEM	64
4.3.2	Registro de datos Tomografía Eléctrica.....	66
5	CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA.....	68
5.1	DESCRIPCIÓN HIDROGRÁFICA	68
5.2	PRECIPITACIONES	72
5.2.1	Precipitaciones medias	72
5.2.2	Precipitaciones máximas	79
5.3	EVAPORACIÓN POTENCIAL.....	82
5.4	ANÁLISIS DE CAUDALES.....	85
5.4.1	Caudales medios.....	86
5.4.2	Caudales máximos.....	91
5.5	RESULTADOS CAMPAÑA DE AFORO.....	93
5.6	ESTIMACIÓN DE LA MAGNITUD DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO.....	97
6	CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA	98
6.1	GEOLOGÍA SUPERFICIAL.....	103
6.1.1	Secuencias piroclásticas Mioceno Inferior Medio (M3t).....	107
6.1.2	Volcanes y Remanentes de volcanes del Mioceno Medio (Mmv entre 16- 11 Ma).....	107
6.1.3	Volcanes del Mioceno Superior (Msv entre 11-5 Ma).....	107
6.1.4	Volcanes y Centro eruptivos menores del Pleistoceno (Pv).....	108
6.1.5	Depósitos piroclásticos de caída (Qpv)	108
6.1.6	Depósitos aluviales del Holoceno (Qa)	109
6.1.7	Depósitos fluviales del Holoceno (Hf(a y b)).....	109
6.1.8	Depósitos glaciales (Qg)	112
6.1.9	Depósitos coluviales (Qc)	113
6.1.10	Bofedales (Bo en Figura 6-6).....	113
6.1.11	Alteración hidrotermal y depósitos salinos en las lagunas de Amuyo (Ah (a), Ah (r), Ah (v) y Qs)	113
6.2	GEOLOGÍA DE SUB-SUPERFICIE	118
6.2.1	Interpretación de perfiles NanoTEM	118
6.2.2	Interpretación de tomografías eléctricas.....	127
7	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA.....	130
7.1	UNIDADES ACUÍFERAS DE ALTA IMPORTANCIA HIDROGEOLÓGICA EN DEPÓSITOS NO CONSOLIDADOS (AANC)	130

7.2	UNIDADES ACUÍFERAS DE MEDIA A BAJA IMPORTANCIA HIDROGEOLÓGICA EN DEPÓSITOS NO CONSOLIDADOS (AMNC)	131
7.3	UNIDADES ACUÍFERAS DE ALTA IMPORTANCIA HIDROGEOLÓGICA EN ROCAS (AARA)	131
7.4	UNIDADES ACUÍFERAS DE MEDIA A BAJA IMPORTANCIA HIDROGEOLÓGICA EN ROCAS (AMRA)	131
7.5	UNIDADES ACUÍFERAS DE BAJA IMPORTANCIA HIDROGEOLÓGICA EN ROCAS (AMRX)	132
8	CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA	139
8.1	CÁLCULO DE ERROR DE BALANCE	140
8.2	DESCRIPCIÓN PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS (DESCRIPCIÓN RANGOS, TABLAS, PLANTA CE (GENERAL, DETALLE DE LAS LAGUNAS, Y PERFIL DESCARGA)	141
8.3	CLASIFICACIÓN HIDROQUÍMICA Y DESCRIPCIÓN ESPACIAL	148
8.4	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE AS Y B	153
8.5	ESPECIACIÓN ARSÉNICO	159
8.6	RELACIONES Y FILTRADAS VERSUS NO FILTRADAS	160
8.7	ISOTOPÍA	161
9	CARACTERIZACIÓN MEDIOAMBIENTAL	163
9.1	FLORA Y VEGETACIÓN	163
9.2	FAUNA TERRESTRE	166
9.3	FLORA Y VEGETACIÓN ACUÁTICA	171
9.4	IDENTIFICACIÓN DE BOFEDALES	173
9.5	MEDIO SOCIOCULTURAL	178
10	MODELO CONCEPTUAL	181
10.1	FUNCIONAMIENTO CONCEPTUAL DE LAS LAGUNAS DE AMUYO	189
11	ALTERNATIVAS DE MEJORAS EN LA CALIDAD DEL RECURSO	194
11.1	SISTEMA DE CAPTACIÓN Y CONDUCCIÓN DE LAS AGUAS	194
11.1.1	Funcionamiento de sistemas de captación y conducción	196
11.1.2	Obras de Captación y Conducción	197
11.2	ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN 1: PLANTA DE TRATAMIENTO	201
11.3	ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN 2. HUMEDALES ARTIFICIALES Y FITOREMEDIACIÓN	203

11.4	ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN 3. VENTA DEL RECURSO A LA MINERÍA	206
11.5	ESTIMACIÓN DE IMPACTOS EN LA PRODUCCIÓN	210
12	PARTICIPACIÓN CIUDADANA	216
13	CONCLUSIONES	218
14	RECOMENDACIONES	220
15	REFERENCIAS	221

VOLUMEN II

LISTADO DE ANEXOS

ANEXO A	METODOLOGÍA DE TRABAJOS DE TERRENO
ANEXO B	INFORME DEL ESTUDIO GEOFÍSICO
ANEXO C	CURVAS HIPSOMÉTRICAS
ANEXO D	DATOS HIDROQUÍMICOS E ISOTÓPICOS
ANEXO E	MAPA GEOLÓGICO 1:50.000
ANEXO F	MAPA GEOLÓGICO 1:5000
ANEXO G	DIFRACCIÓN RAYOS X DE LA ALTERACIÓN DE LAS LAGUNAS DE AMUYO
ANEXO H	ANÁLISIS QUÍMICOS DE LA ALTERACIÓN DE LAS LAGUNAS DE AMUYO
ANEXO I	LISTA DE ASISTENCIA PARTICIPACIÓN CIUDADANA
ANEXO J	PRESENTACIÓN PARTICIPACIÓN CIUDADANA
ANEXO K	ESTACIÓN FLUVIOMÉTRICA

LISTADO DE TABLAS

Tabla 2-1: Listado de antecedentes encontrados.....	17
Tabla 3-1: Geología Marco Regional SERNAGEOMIN, 2002.	27
Tabla 3-2: Estaciones fluviométricas de la DGA en cuenca de Camarones	34
Tabla 3-3: Caudal medio (m ³ /s) en río Camarones en Conanoxa	35
Tabla 3-4: Aforos realizados en los ríos Camarones, Caritaya, Blanco y otros arroyos.....	35
Tabla 3-5: Características del embalse Caritaya (SMI, 2008)	37
Tabla 3-6: Ensayos de Lugeon	39
Tabla 4-1: Resumen de campañas de terreno	57
Tabla 4-2: Puntos de aforo y muestreo hidroquímico e isotópico durante la primera y segunda campaña en terreno	58
Tabla 4-3: Puntos de aforo en la primera y segunda campaña.	61
Tabla 4-4: Resumen puntos de muestreo hidroquímico	63
Tabla 5-1: Altitud media y área por bandas de altitud	70
Tabla 5-2: Estaciones pluviométricas utilizadas para la caracterización de las precipitaciones medias.....	73
Tabla 5-3: Coeficiente de determinación (R ²) entre series mensuales de precipitación	74
Tabla 5-4: Precipitaciones anuales en las estaciones seleccionadas.....	75
Tabla 5-5: Precipitaciones medias mensuales para cada estación (mm)	75
Tabla 5-6: Precipitación en estación húmeda y seca	76
Tabla 5-7: Estadígrafos de precipitaciones máximas para 24, 48 y 72 horas.....	79
Tabla 5-8: Precipitaciones máximas en 24 horas (mm) para distintos períodos de retorno mediante Valores Extremos Tipo I	80
Tabla 5-9: Estaciones meteorológicas utilizadas para la caracterización de la evaporación potencial	82
Tabla 5-10: Evaporación media mensual neta (mm/día)	84
Tabla 5-11: Estaciones fluviométricas utilizadas para la caracterización de caudales medios	86

Tabla 5-12: Caudal medio anual cuenca Codpa y Camiña	88
Tabla 5-13: Caudal medio anual en cuenca del río Caritaya a partir de registros en cuenca Codpa y Camiña	88
Tabla 5-14: Caudal medio mensual estimado para el río Caritaya (l/s)	89
Tabla 5-15: Estadígrafos de la serie anual de caudales máximos instantáneo (m ³ /s).	91
Tabla 5-16: Caudales máximos instantáneos (m ³ /s) para distintos períodos de retorno mediante Valores Extremos Tipo I	92
Tabla 5-17: Caudales máximos instantáneos (m ³ /s) para distintos períodos de retorno estimados para la cuenca de estudio	93
Tabla 6-1: Análisis químico de alteración sector lagunas de Amuyo (Anexo J)	116
Tabla 9-1: Especies en estado de conservación presentes en la Primera Región del país (SIM, 2008)	168
Tabla 11-1 Parámetros para la estimación del diámetro de las tuberías	199
Tabla 11-2 Cubicación de la Conducción 1	200
Tabla 11-3 Cubicación de la Conducción 2	200
Tabla 11-4 Cubicación de la Conducción 3	200
Tabla 11-5 Costo de Inversión Alternativa 1	203
Tabla 11-6 Costo de Inversión Alternativa 2	206
Tabla 11-7: Cálculo de la concentración de boro en río Camarones en función de la variación de caudales en los ríos Caritaya y Ajatama	211
Tabla 11-8: Cálculo de la concentración de boro en río Camarones en función de la variación de caudales en los ríos Caritaya y Ajatama, para reducción del 80% en el río Caritaya	212
Tabla 11-9: Cálculo de la concentración de boro en río Camarones en función de la variación de caudales en los ríos Caritaya y Ajatama, para reducción del 60% en el río Caritaya	212
Tabla 11-10: Sensibilidad o tolerancia al boro de cultivos agrícolas.....	213
Tabla 11-11: Caudal de riego requerido por cultivos tolerantes al boro.....	215
Tabla 11-12: Análisis de productividad y precios de cultivos tolerantes al boro.....	215
Tabla 12-1: Programa del Taller de Participación Ciudadana	216

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1-1: Subcuenca en zona de estudio delimitada en un modelo digital de elevación (SRTM 90x90 m)	16
Figura 3-1: Distritos agroclimáticos Ayala y Cabrera (2003).....	20
Figura 3-2. Imágenes satelitales de Google Earth	21
Figura 3-3: Principales estructuras.....	23
Figura 3-4: Geomorfología regional	24
Figura 3-5: Geomorfología área de estudio.....	25
Figura 3-6: Geología 1:1.000.000 SERNAGEOMIN 2002	28
Figura 3-7: Fuente de información geológica.	29
Figura 3-8: Extracto del mapa García <i>et al.</i> , 2004.....	30
Figura 3-9: Perfil geológico SMI, 2013	31
Figura 3-10: Red hidrográfica de la cuenca de Camarones.	33
Figura 3-11: Estaciones fluviométricas DGA y Aforos UTA (2010) en la cuenca de Camarones.	36
Figura 3-12: Puntos de muestreo UTA (2010).....	40
Figura 3-13: Esquema de la Cuenca del Río Camarones y lugares relevantes para el estudio de UTA (2010)	41
Figura 3-14: Niveles de Boro en estación Conanoxa en el río Camarones	42
Figura 3-15: Distribución de los contenidos de boro en las aguas de la cuenca de Camarones: < 0,75 mg/l, 0,75-10,00 mg/l, 10,00-30,00 mg/l, >30,00 mg/l	43
Figura 3-16: Relación entre el contenido de materia orgánica y boro.....	44
Figura 3-17: Relación entre el pH y boro en el agua	45
Figura 3-18: Diagramas pE-pH para el sistema arsénico y definición de campos para muestras de UTA (2010).....	46
Figura 3-19: Concentración de arsénico en las aguas del río Camarones en Conanoxa	46

Figura 3-20: Contenidos de arsénico total en aguas del cuenca del río Camarones: <0,05 mg/l, 0,05-0,50 mg/l, 0,50-1,00 mg/l, 1,00-2,00 mg/l, >2,00 mg/l.....	48
Figura 3-21: Variación de la concentración de As del río Caritaya durante su tránsito a través de la zona en que se ubican las Lagunas de Amuyo	49
Figura 3-22: Relación entre los contenidos de arsénico total en aguas y sedimentos de la cuenca de Camarones.....	50
Figura 3-23: Relación entre el contenido de hierro total y pH en las aguas al interior de la cuenca de Camarones.....	51
Figura 3-24: Relación entre el contenido de arsénico total y pH en aguas al interior de la cuenca de Camarones.....	51
Figura 3-25: Diagrama unifilar del río Camarones.....	56
Figura 4-1: Puntos aforados en la primera y segunda campaña en terreno	62
Figura 4-2: Puntos aforados en la primera y segunda campaña en terreno en torno a las lagunas de Amuyo	62
Figura 4-3: Traza de perfiles y perfiles NanoTEM abatidos.....	65
Figura 4-4: Se indica traza perfil L1 NanoTEM y trazas de perfiles de R 1 y R2 de Tomografía Eléctrica.....	67
Figura 5-1: Red hidrográfica de la cuenca de Camarones	69
Figura 5-2: Subcuenca aportante al embalse Caritaya.....	70
Figura 5-3: Áreas hipsográficas de la cuenca	71
Figura 5-4: Curva hipsométrica de la cuenca.....	71
Figura 5-5: Ubicación de las estaciones pluviométricas	73
Figura 5-6: Información disponible en las estaciones pluviométricas	74
Figura 5-7: Distribución medio mensual de las precipitaciones para la zona de estudio	77
Figura 5-8: Gradiente de precipitación media anual para la zona de estudio	77
Figura 5-9: Serie anual de precipitaciones de cada estación pluviométrica utilizada.....	78
Figura 5-10: Información disponible de precipitaciones máximas	79
Figura 5-11: Análisis de frecuencia para precipitaciones máximas en 24 horas. Ajuste para Valores Extremos Tipo I.....	81

Figura 5-12: Ubicación de estaciones meteorológicas utilizadas para el análisis de evaporación potencial.....	83
Figura 5-13: Información disponible de evaporación potencial.....	84
Figura 5-14: Gradiente de evaporación potencial media anual (mm/día) con respecto a la altura.	85
Figura 5-15: Ubicación estaciones fluviométricas	87
Figura 5-16: Información disponible en estaciones fluviométricas.....	88
Figura 5-17: Caudal medio mensual estimado para el río Caritaya	90
Figura 5-18: Curva de variación estacional en río Caritaya, estimada a partir de mediciones en estación Camiña en Altusa	90
Figura 5-19: Curva de variación estacional en río Caritaya, estimada a partir de mediciones en estación Codpa en Cala-Cala	91
Figura 5-20: Disponibilidad de información de caudales máximos instantáneo anual	91
Figura 5-21: Análisis de frecuencia para caudales máximos instantáneo. Ajuste para Valores Extremos Tipo I.....	92
Figura 5-22: Caudales determinados en primera campaña (marzo 2014).....	95
Figura 5-23: Caudales determinados en primera campaña (mayo 2014).....	96
Figura 6-1: Fuente de información geológica.	99
Figura 6-2: Principales unidades geomorfológicas a escala regional	100
Figura 6-3: Elevación y morfología área de estudio.	102
Figura 6-4: Mapa de pendientes	102
Figura 6-5: Mapa de pendientes detalle río Caritaya y lagunas Amuyo.....	103
Figura 6-6: Mapa geológico	105
Figura 6-7: Mapa geológico sector río Caritaya y lagunas Amuyo.....	106
Figura 6-8: Afloramiento Qpv	108
Figura 6-9: Fotografía depósitos fluviales	110
Figura 6-10: Fotografía depósitos fluviales aguas arriba lagunas Amuyo.....	110
Figura 6-11: Fotografía depósitos fluviales en P8	112

Figura 6-12: Fotografía depósitos en P27	112
Figura 6-13: Fotografías depósitos Lagunas de Amuyo y relaciones de contacto.	114
Figura 6-14: Fotografías lagunas de Amuyo	117
Figura 6-15: Interpretación geológica de sección NanoTEM L1	119
Figura 6-16: Interpretación geológica de sección NanoTEM L2	121
Figura 6-17: Interpretación geológica de sección NanoTEM L3	122
Figura 6-18: Interpretación geológica de sección NanoTEM L4	124
Figura 6-19: Interpretación geológica de sección NanoTEM L5	126
Figura 6-20: Interpretación geológica de sección Tomografía Eléctrica R1	128
Figura 6-21: Interpretación geológica de sección Tomografía Eléctrica R2	129
Figura 7-1: Mapa hidrogeológico.....	133
Figura 7-2: Mapa hidrogeológico sector río Caritaya y Lagunas Amuyo.....	134
Figura 7-3: Perfil hidrogeológico L1	135
Figura 7-4: Perfil hidrogeológico L2	135
Figura 7-5: Perfil hidrogeológico L3	136
Figura 7-6: Perfil hidrogeológico L4	136
Figura 7-7: Perfil hidrogeológico L5	137
Figura 7-8: Perfil hidrogeológico R1 y R2.....	138
Figura 8-1: Ubicación de puntos de muestreo hidroquímico.....	139
Figura 8-2: Leyenda de gráficos	140
Figura 8-3: Muestras dentro y fuera del rango de error aceptable.....	141
Figura 8-4: Gráfico relación pH y conductividad eléctrica (El. Cond.).....	142
Figura 8-5: Distribución de la CE en campaña 1	143
Figura 8-6: Distribución de la CE en campaña 2.....	144
Figura 8-7: Perfil de conductividad del río Caritaya durante su paso por las Lagunas de Amuyo	145
Figura 8-8: Perfiles de temperatura y profundidad de las lagunas de Amuyo.....	146

Figura 8-9: Mediciones de pH y Eh in situ.....	147
Figura 8-10: Diagrama de Piper.....	148
Figura 8-11: Diagrama de Schoeller	149
Figura 8-12: Diagramas de Stiff campaña 1.....	151
Figura 8-13: Diagramas de Stiff campaña 2.....	152
Figura 8-14: Distribución de As en campaña 1.....	155
Figura 8-15: Distribución de As en campaña 2.....	156
Figura 8-16: Distribución de B en campaña 1	157
Figura 8-17: Distribución de B en campaña 2	158
Figura 8-18: Diagrama Eh-pH para especiación As	159
Figura 8-19: Metales y metaloides para muestras filtradas y no filtradas	160
Figura 8-20: Distribución espacial muestras isotópicas.....	161
Figura 8-21: Gráficos isotópicos: a. Concentraciones de d2H y d18O para las muestras recolectadas y Línea Meteórica Global (LMGL) teórica.....	162
Figura 9-1: Pisos vegetacionales (Modificado de cobertura Luebert y Pliscoff, 2009)	165
Figura 9-2: Vizcacha.....	167
Figura 9-3: Guanaco.....	167
Figura 9-4: Domo de precipitados en Lagunas de Amuyo.....	171
Figura 9-5: a. Charco con tapete microbiano; b. Tapete microbiano c. Foto de Crustáceo tomada por UNAP (2011)	172
Figura 9-6: Izquierda: Banda 3 (Rojo); Derecha: Banda 4 (Infrarrojo cercano) (Febrero 2001).	174
Figura 9-7: Izquierda: Banda 3 (Rojo); Derecha: Banda 4 (Infrarrojo cercano) (Julio 2001).	174
Figura 9-8: Zonas con alto vigor vegetacional detectado por NDVI (Febrero 2001)	175
Figura 9-9: Zonas con alto vigor vegetacional detectado por NDVI (Julio 2001)	176
Figura 9-10: Zonas de humedales mapeadas.....	177

Figura 9-11: Iglesia de Mulluri.....	178
Figura 9-12: Herramienta lítica posiblemente pre-hispánica.....	179
Figura 9-13: Ruinas embalse Caritaya.....	179
Figura 9-14: Casa de las lagunas de Amuyo	180
Figura 10-1: Subcuenca aportante al embalse Caritaya.....	182
Figura 10-2: Mapa funcionamiento conceptual.....	185
Figura 10-3: Mapa hidrogeológico conceptual.....	188
Figura 10-4: Planta líneas geofísicas área laguna Roja	190
Figura 10-5: Interpretación geológica de sección Tomografía Eléctrica R1 y R2.....	191
Figura 10-6: Componentes considerados para el balance hídrico y de masas.....	192
Figura 11-1: Esquema conceptual de sistema de mitigación.....	195
Figura 11-2: Esquema de planta de la captación y canal de aducción	198
Figura 11-3: Esquema de Corte 1	198
Figura 11-4: Esquema de corte transversal de la tubería.....	199
Figura 12-1: Asistencia primer Taller de Participación Ciudadana	217

RESUMEN EJECUTIVO

El río Camarones posee dos importantes ríos tributarios, los cuales son: el río Ajatama y el río Caritaya. En la cabecera de la cuenca del río Camarones se localiza el embalse Caritaya, el cual fue construido, en el río Caritaya, en la década de los años 30 y reparado el año 2009 por la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). El embalse posee una capacidad de 42.171.000 m³ construidos. La reparación de este embalse, buscó aumentar la seguridad y disponibilidad de los recursos hídricos, no obstante las aguas embalsadas son de mala calidad dada su alta salinidad, altos contenidos de arsénico (As) y boro (B). Eventuales mejoras en la calidad hidroquímica del agua de riego, muy posiblemente permitirían entregar condiciones basales para diversificar el cultivo de hortalizas (ajos, cebollas, espárragos, etc.) y frutos tropicales (mango, guayaba, tangelos, maracuyá, etc). Por lo tanto, mejorar la calidad de las aguas de riego, es una buena oportunidad para incentivar el crecimiento agrícola en el valle.

En este contexto la Comisión Nacional de Riego (CNR) adjudicó a GeoHidrología (GeoH) el estudio denominado: “Diagnóstico de la subcuenca aportante al embalse Caritaya”. Este estudio realizó una investigación, análisis y caracterización hidrológica, hidrogeológica e hidro-geoquímica de la cuenca aportante al embalse Caritaya, con el fin de: establecer las fuentes de contaminación de las aguas aportantes al embalse, la confección de un modelo hidrogeológico conceptual de funcionamiento de la subcuenca, proponer medidas de mitigación/remediación para mejorar la calidad de las aguas embalsadas y la construcción de una estación fluviométrica.

Durante el presente estudio se realizó una nutrida etapa de levantamiento de información en terreno y laboratorio. La información levantada incluyó los siguiente tópicos: la descripción de las unidades y estructuras geológicas, la determinación de caudales (aforos), la caracterización físico-química de las aguas superficiales, perfiles geofísicos (NanoTEM y de tomografías eléctricas) y un levantamiento topográfico en el sector de las lagunas de Amuyo.

Sustentado en el análisis de los datos levantados, los resultados de laboratorio y los antecedentes previos existentes, se realizó el presente estudio básico de investigación y caracterización de la geología, hidrología, geoquímica e hidrogeología de la subcuenca aportante al embalse Caritaya. A continuación se sintetizan los principales resultados de la investigación realizada.

Se determinó con la caracterización hidrogeológica del sector, que la subcuenca está compuesta por rocas volcánicas y relleno por depósitos aluviales y fluviales mal consolidados que se depositan en las quebradas y en una amplia llanura fluvial localizada inmediatamente aguas arriba del embalse Caritaya. Estos depósitos albergan un acuífero con una baja capacidad de almacenamiento, el cual fluye libremente hacia el embalse Caritaya y es recargado fundamentalmente por la infiltración del río Caritaya.

Se puede indicar, según la hidrogeoquímica analizada del sector, que el río Caritaya presenta aguas de mala calidad, con conductividades entre 3.000 y 4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Por su lado, los principales afluentes al río Caritaya provienen de la quebrada Caritaya, el arroyo de Veco, con conductividades entorno a los 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ donde comienza y 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en su confluencia con el río Caritaya, y el arroyo Mulluri con una calidad intermedia de alrededor de 1.435 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

El río Caritaya, principal afluente al embalse Caritaya, presenta altas concentraciones de arsénico y boro, dado los aportes de las quebradas del margen sur, de las lagunas de Amuyo y por la incorporación de elementos químicos provenientes de la lixiviación o disolución de minerales durante su tránsito aguas arriba de las lagunas de Amuyo. Estas fuentes de contaminación presentan conductividades eléctricas entre 15.240 y 21.180 $\mu\text{S}/\text{cm}$, un alto contenido de arsénico (mayor a 15 mg/l) y altas concentraciones de boro (sobre los 100 mg/l).

Según lo anterior, una de las principales conclusiones de este estudio, a diferencia del estudio de la UTA (2010), el cual atribuía como única fuente de contaminación natural a las lagunas de Amuyo, es la identificación de múltiples fuentes de contaminación aportantes al embalse Caritaya. Se identificó, incluso, que aguas arriba de las lagunas de Amuyo el río Caritaya ya tiene una calidad deficiente, y que además el arroyo de Veco aporta con aguas de buena calidad.

Basados en las conclusiones anteriores, se propone como principal medida la captación y desvío de aguas de buena calidad ($< 2.000 \mu\text{S}/\text{cm}$) para evitar que las aguas disuelvan minerales que incorporen contaminantes y que se mezclen con aportes de mala calidad.

En forma complementaria se propuso la captación, desvío y manejo del agua de mala calidad de manera que no se incorporado al embalse. En la descarga del agua de mala calidad se propusieron tres alternativas de solución, una que contempla utilizar una planta de tratamiento para el abatimiento de arsénico, boro y conductividad eléctrica, otra que consiste en utilizar un sistema de fitoremediación, para tratar en forma natural esta agua, y por último se propuso vender o arrendar esta agua a terceros.

Se consideró además, una estación fluviométrica la cual tiene como objetivo generar información base para potenciales medidas de remediación, mitigación y/o separación de las aguas de buena y mala calidad. En este sentido, la construcción de esta estación busca poder registrar y transmitir los caudales que ocurren el 90% del tiempo del río Caritaya, y así comprender de mejor manera el aporte de la contaminación natural de arsénico y boro, junto con el aporte de aguas frescas del arroyo de Veco.

1 INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Camarones cuenta con una obra de regulación, el embalse Caritaya (capacidad de 42.171.000 m³) construido en la década del 30 y reparado el año 2009 por la DOH. El río Camarones recibe aporte, desde la parte superior de la cuenca, fundamentalmente de los tributarios Ajatama y Caritaya. El embalse Caritaya, aumenta la seguridad y disponibilidad de los recursos hídricos, no obstante las aguas son de mala calidad dados sus altos contenidos de arsénico (As) y boro (B). El estudio DGA-UTA (2010) detectó que uno de los principales focos de contaminación de As y B del río Caritaya, corresponden a las lagunas de Amuyo, ubicada en una de las subcuencas aportante al embalse Caritaya.

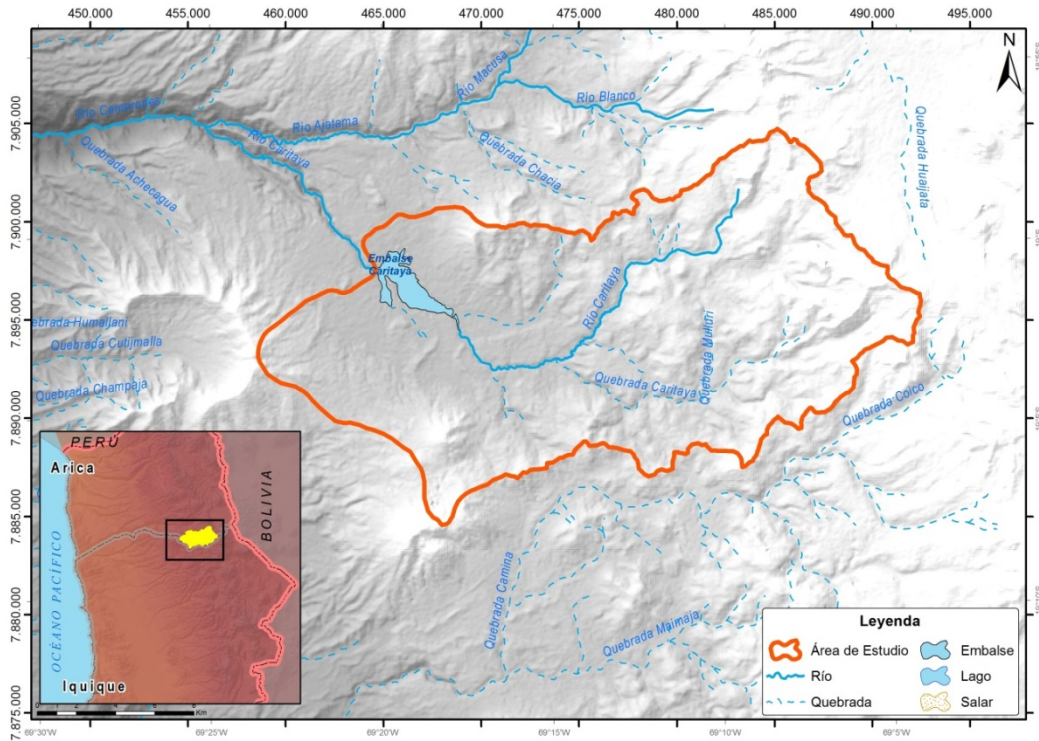
El proyecto tiene como finalidad disponer de una caracterización de la subcuenca aportante al embalse Caritaya (Zona de estudio en Figura 1-1), en los ámbitos hidrológicos, geoquímicos e hidrogeológico para proponer al menos tres alternativas de solución asociado al problema de contaminación existente.

1.1 DEFINICIÓN ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio comprende la subcuenca localizada inmediatamente aguas arriba del embalse Caritaya. La subcuenca de estudio tiene un largo W-E de 22 km y un ancho N-S de 12 km aproximadamente, con un área de 362 km² (estimada a partir de Modelo Digital de Elevación SRTM 90x90, UTM 19° S, WGS 84). Especial foco tienen el entorno de las lagunas de Amuyo y el tramo del río entre las lagunas y el embalse. La subcuenca en estudio es parte de los terrenos de la Comunidad Indígena de Mulluri.

La subcuenca se ubica en la comuna de Camarones en la I región de Tarapacá, cerca del límite con la región de Arica y Parinacota. Esta cuenca cuenta con una obra de regulación, el embalse Caritaya (capacidad de 42.171.000 m³) construido en la década del 30 y reparado el año 2009 por la DOH. El río Camarones recibe aportes, desde la parte superior de la cuenca, fundamentalmente de los tributarios Ajatama y Caritaya.

Figura 1-1: Subcuenca en zona de estudio delimitada en un modelo digital de elevación (SRTM 90x90 m)



1.2 OBJETIVOS

El objetivo general del proyecto en su totalidad es caracterizar la hidrología, hidrogeología y geoquímica de la subcuenca aportante al embalse Caritaya, siempre considerando que el objetivo es comprender el funcionamiento de las fuentes de contaminación natural de las aguas.

Los objetivos específicos del estudio son:

- Caracterizar hidrológica e hidroquímicamente la subcuenca.
- Caracterizar geológicamente la cuenca y la subcuenca.
- Caracterizar los aspectos geoquímicos de la subcuenca.
- Identificar fuentes y procesos que aportan elementos químicos a las aguas.
- Caracterizar hidrogeológicamente la subcuenca para identificar los flujos subterráneos que se producen en la cuenca.
- Generar un modelo conceptual, hidrológico, hidrogeológico y geoquímico de la subcuenca.
- Plantear a nivel conceptual tres alternativas de remediación.

2 RECOPIACIÓN Y REVISIÓN DE ANTECEDENTES

Se realizó una exhaustiva recopilación y revisión de antecedentes y bases de datos asociados al área del proyecto, con énfasis en los estudios que anteceden al presente diagnóstico. Las fuentes de información fueron estudios, proyectos, informes técnicos, base de datos, mapas y tesis, entre otros, que se encuentran en los centros documentales y páginas web de organismos públicos (DGA, DOH, CIREN, INIA, CNR, MINAGRI, etc.), Universidades y Centros de Investigación y entidades privadas (Organizaciones de usuarios, ONG, etc.).

La búsqueda se centró principalmente en obtener información sobre los aspectos relevantes de la zona y que permiten caracterizarla con miras a comprender el funcionamiento de las fuentes de contaminación de las aguas, es decir, información referente a:

- Hidrología (caudales, precipitaciones, etc.).
- Morfología (red drenaje, pendientes, tipo suelos, etc.).
- Geología e hidrogeología (formaciones geológicas, acuíferos, estratos, niveles de aguas subterráneas, etc.).
- Calidad de aguas y geoquímica (análisis de calidad de aguas, química de los suelos y calidad de aguas subterráneas, etc.).
- Fluvial (secciones, pendientes, granulometría, dinámica, etc.).
- Imágenes satelitales y fotografías aéreas.
- Situación técnica y legal de los derechos de aprovechamientos de aguas (DAA) y de las organizaciones existentes ligadas a la distribución del recurso hídrico (OUAs).

Como resultado, se identificaron 26 antecedentes (ver Tabla 2-1), cuya información fue revisada, analizada y sistematizada en fichas que contienen los siguientes campos: fuente, autor principal, coautores, resumen del contenido, lugar físico donde están los antecedentes, año de publicación, palabras claves y otros datos de interés. Las fichas se presentan en el Anexo A, y se encuentran numeradas en el mismo orden que se presentan los antecedentes en este capítulo.

Tabla 2-1: Listado de antecedentes encontrados

Nº	Nombre	Autor	Año
1	Carta Geológica de Chile. Hoja Arica. 1:250.000	García <i>et al.</i>	2004
2	Diagnóstico Actual del Riego y Drenaje en Chile y su proyección_2003	Ayala, Cabrera y asociados	2003
3	Cuenca de Camarones: identificación y caracterización de fuentes que condicionan la calidad de las aguas superficiales: rol del embalse Caritaya	UTA	2010
4	Diagnóstico y diseño definitivo reparación embalse Caritaya provincia de Arica, I región	SMI	2008
5	Distribución del arsénico en las regiones ibérica e iberoamericana	Bundschuh <i>et al</i>	2008
6	One century of arsenic exposure in Latin America: a review of history and occurrence from 14 countries	Bundschuh <i>et al</i>	2012

Tabla 2-1: Listado de antecedentes encontrados

Nº	Nombre	Autor	Año
7	Arsenic in volcanic geothermal fluids of Latino America	Lope <i>et al</i>	2012
8	Mapa geológico de Chile	SERNAGEOMIN	2002
9	Influencia de los factores naturales y antropogénicos en la geoquímica de sedimentos fluviales de las cuencas vítor y san José de Azapa; XV región de Arica y Parinacota, Chile	ESPINOZA, F.	2013
10	Análisis uso actual y futuro de los recursos hídricos de Chile	Gómez, R. <i>et Al</i>	1996
11	NCh 1333. Of 78 con mod 1987	INN	1978-1987
12	Hoyas hidrográficas de Chile : Primera región	Hans Niemeyer F.	1980
13	Remoción de arsénico en aguas del río Camarones, Arica, Chile, utilizando la tecnología RAOS modificada	Cornejo, L. <i>et al</i>	2004
14	Plan regional de desarrollo urbano región de Arica y Parinacota	Habiterra SA	2011
15	Recursos hídricos altoandinos, estrategias de desarrollo económico y proyectos de riego: Tarapacá, 1880-1930	Luis Castro C.*	2004
16	Estudio Básico: Investigación silvoagropecuaria de innovación en la I región	INIA	2009
17	Banco de aguas y Registro Público de derechos de aguas de la DGA	DGA	2012
18	Plan de acción estratégico para el desarrollo hídrico de la región de Arica y Parinacota	División de estudios y planificación	2010
19	Visita técnica a embalses en la Primera Región	DOH	2005
20	Geología y recursos minerales del departamento de Arica	Salas <i>et al.</i>	1966
21	The Geology of Chile, Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile (Capítulo 3)	Charrier, R. <i>et al.</i>	2007
22	Estudio Básico Diagnostico de Obras Hidráulicas y Fluviales en la Quebrada de Camarones	Sin información	2013
23	Estudio del Mapa Hidrogeológico Nacional	IPLA ingenieros	1986
24	Mapa Hidrogeológico Nacional	IPLA ingenieros	1986
25	Hoja Pisagua 1:250.000	SERNAGEOMIN	1983

Fuente: Elaboración propia

3 MARCO CONCEPTUAL: ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

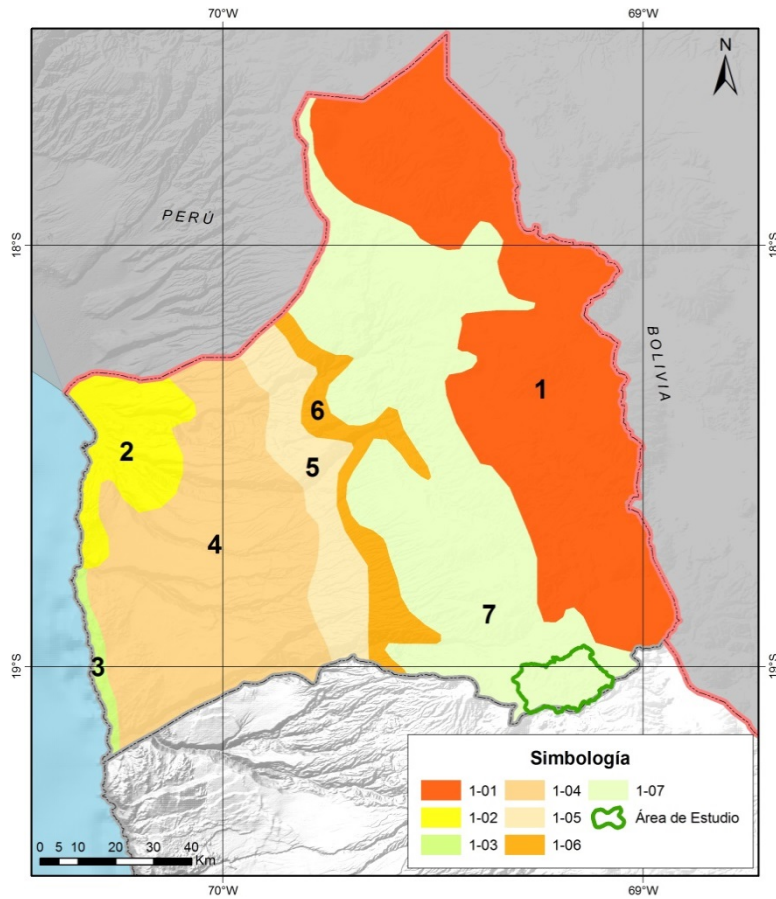
En base a la recopilación de antecedentes y base de datos, se presenta de manera preliminar el marco conceptual, en el que se emplazan las lagunas de Amuyo y la subcuenca de estudio.

3.1 CLIMA DE LA REGIÓN

De acuerdo al estudio de Ayala y Cabrera (2003), la región de Arica y Parinacota presenta un clima atípico para la latitud, con ausencia casi total de precipitaciones en gran parte de su territorio. Estas sólo se registran en la zona alta, referentemente en época estival, fenómeno denominado invierno altiplánico. Ayala y Cabrera (2003), definen 7 distritos agroclimáticos para la XV región. La ubicación espacial de ellos en la región se muestra en la Figura 3-1.

La zona de estudio se encuentra en el séptimo distrito, que corresponde a la zona altiplánica norte, centro y sur de la XV y I región, ocupando la parte baja de las comunas de Putre y Colchane y entre esta última y la de Pica por el sur, comprendiendo a los salares de Huasco y Coposa. En él se presenta una pluviosidad media anual de 256 mm. La evapotranspiración media anual es aproximadamente 1.747 mm. El déficit hídrico es algo mayor a 1.500 mm.

Figura 3-1: Distritos agroclimáticos Ayala y Cabrera (2003)



Fuente: Elaboración a partir del Diagnóstico actual del riego y drenaje en Chile y su proyección. Diagnóstico del Riego y Drenaje en la I región. Ayala y Cabrera. 2003

3.2 INFORMACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES Y FOTOS AÉREAS

En relación a observar la variación geomorfológica temporal, se han colectado diversas imágenes satelitales y fotos aéreas, cuyas fuentes han sido: Google Earth, Servicio Aerofotogramétrico (SAF) y Nasa.

En este contexto, no se han encontrado grandes diferencias en el sector de las lagunas de Amuyo, sólo pequeñas diferencias en lo que se refiere al cauce principal del río Caritaya y el sector del embalse. A continuación se lista la información recolectada y analizada. Se detalla la fecha de captura satelital o aérea de la imagen.

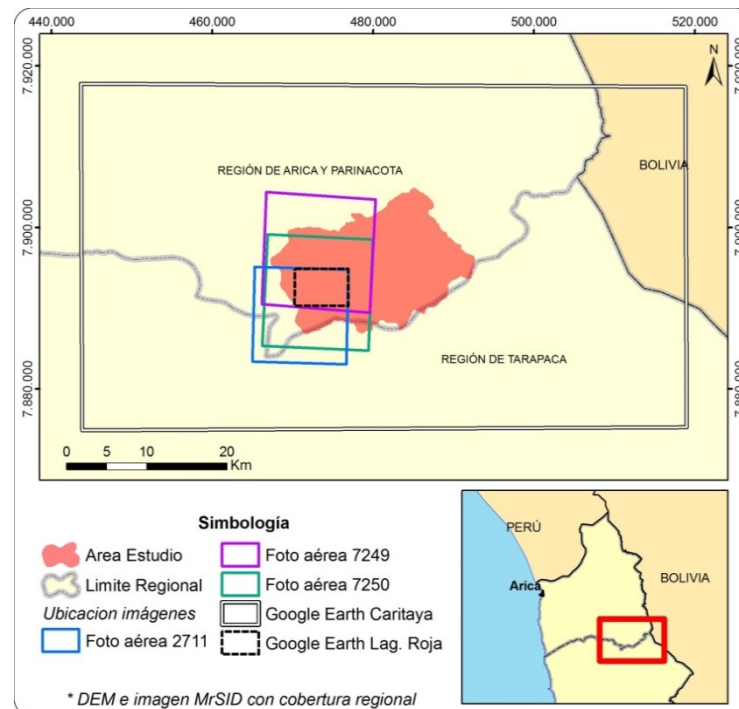
Imágenes satelitales:

- 29 de abril de 2007 (Google Earth)
- 15 de Octubre de 2009 (Google Earth)

Foto Aérea:

- Zona de las lagunas: Vuelo Abril del año 1978. Geotec 1:50.000 (SAF)
- Zona del embalse: Vuelo Abril del año 1997. Geotec 1:50.000 (SAF)
- Zona de las lagunas: Vuelo Abril del año 1997. Geotec 1:50.000 (SAF)

Figura 3-2. Imágenes satelitales de Google Earth



Fuente: Elaboración Propia

3.3 MORFOLOGÍA Y GEOLOGÍA DE LA ZONA

En esta sección se describe la morfología y la geología. En primer lugar se realiza una descripción regional, abarcando las unidades morfológicas presentes en el sector Norte de Chile e incluyendo la geología del área de estudio y sus alrededores. En segundo lugar, se realiza una descripción de detalle de la geología del área de estudio, poniendo énfasis en el sector de las lagunas de Amuyo.

En los siguientes puntos, se realiza una descripción de la geomorfología y evolución morfotectónica y posteriormente una descripción geológica regional.

3.3.1 Geomorfología y Evolución Morfotectónica Regional

En el área regional del estudio, las principales unidades morfoestructurales de oeste a este son: Cordillera de la Costa, Depresión Central, Precordillera de Antearco y Cordillera Occidental (García *et al.*, 2004, Charrier *et al.*, 2007). Las principales unidades se presentan en las Figura 3-4 y Figura 6-2.

La cordillera de la costa es un cordón de cerros de hasta 15 km de ancho y de altitudes máximas de 1.200 m.s.n.m.. La cordillera es disectada por valles de profundidades máximas de 1.000 m. La cordillera de la costa se presenta con pendientes suaves y poco accidentada. Su altitud disminuye progresivamente hasta la depresión intermedia ubicada al este. Mientras que al oeste de la Cordillera de la costa el límite con el océano pacifico se presenta abrupto debido al “escarpe costero”, formado por acantilados con un desnivel promedio de hasta 1.000 m.

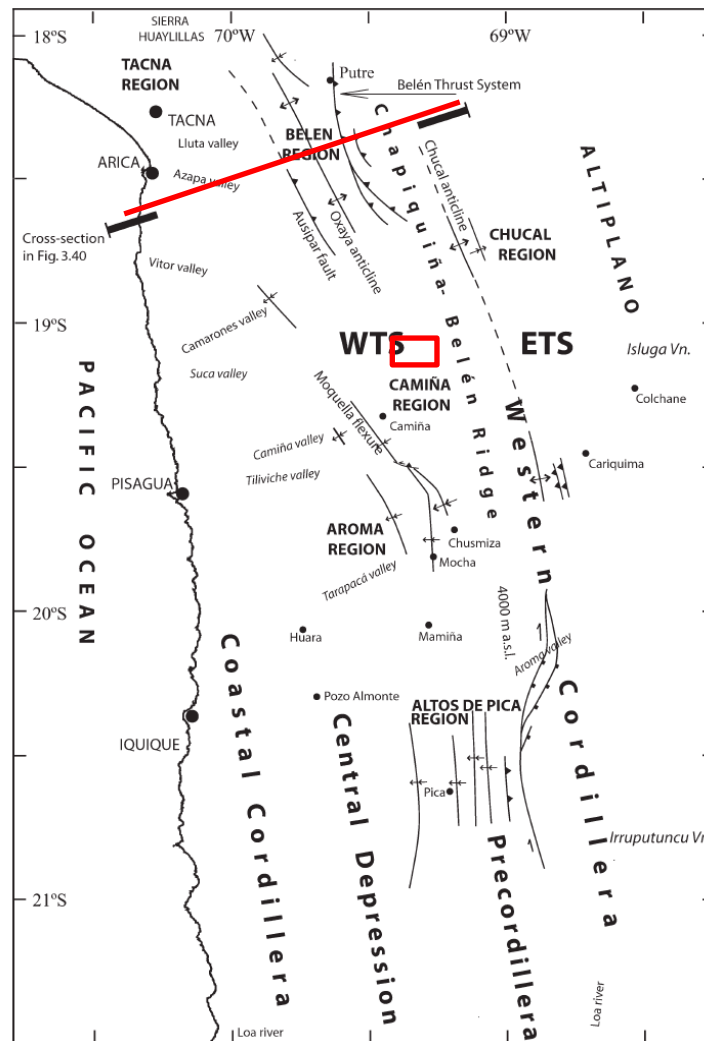
La depresión central tiene un ancho de 40 - 55 km. Es una región de topografía plana donde la altitud aumenta de oeste a este con pendientes de 1°-2°. Esta depresión es limitada al este por una estructura recta de origen tectónico. La superficie de la depresión central es un plano de pedimentación regional Mioceno. La zona está localmente disectada por los valles de Lluta, Azapa, Victor y Camarones.

La precordillera corresponde a una meseta alargada de ancho variable entre 20 a 35 km cuya altitud aumenta de oeste a este de 1.900 a 3.800 m. La cordillera Occidental presenta una topografía irregular con altitudes que aumentan de oeste a este de 3.200 – 3.500 a 5.000 – 6.350. Las mayores elevaciones corresponden a los volcanes Parinacota (6350 m) y al cordón Belén (5.100 m). El límite de la alta cordillera con la precordillera es de forma irregular y de origen tectónico (García *et al.*, 2004).

Las principales estructuras en esta región corresponde a un sistema orientado norte-sur a NNW-SSE, con alto ángulo, de propagación oeste, de vergencia oeste (WTS) desarrollado a través de la precordillera y un sistema de vergencia este desarrollado al este del WTS en la cordillera Occidental. La precordillera de antearco en esta región el WTS sistema de fallas oeste, corresponde a dos sets de fallas inversas. Una formada por la falla Ausipar, que define el borde entre la depresión central y la precordillera de antearco, y el sistema de

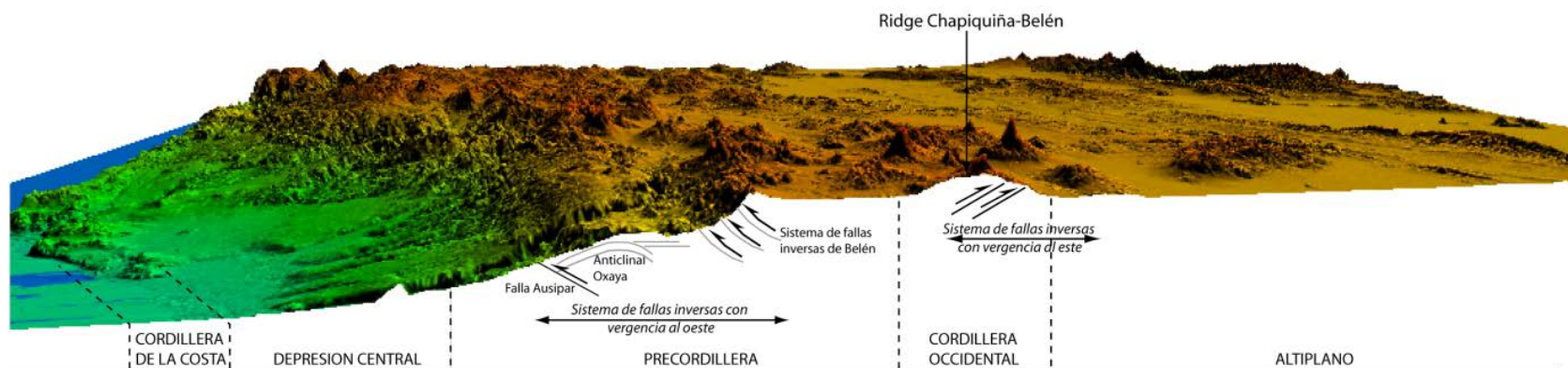
Fallas Belén en la precordillera oriental. Como los dos sistemas tienen vergencias opuestas, la actividad tectónica crea un bloque alzado que corresponde a Chapiquiña-Belen Ridge (Charrier *et al.*, 2007). En la Figura 3-3, se presenta un mapa de las principales estructuras donde se muestra el perfil en planta de la Figura 3-4.

Figura 3-3: Principales estructuras



Fuente: Modificado de Charrier *et al.*, 2007

Figura 3-4: Geomorfología regional

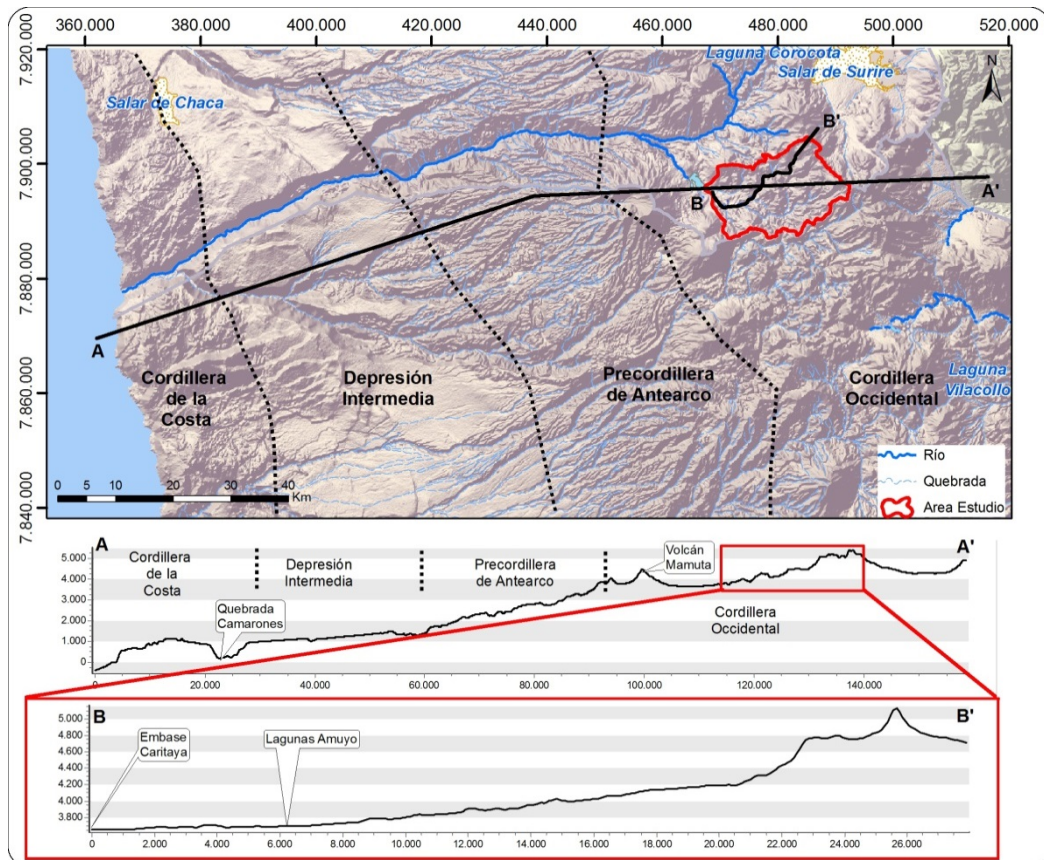


Fuente: Modificado de Charrier *et al.* 2007

El área de estudio, corresponde a la subcuenca del río Caritaya aguas arriba del embalse con el mismo nombre, está localizada entre la Precordillera y la Cordillera Occidental. La subcuenca de estudio tiene un largo W-E de 22 km y un ancho N-S de 12 km aproximadamente, con un área de 280 km². Las alturas más bajas se ubican en la base del Río Caritaya a 3650 msnm al oeste del área de estudio y las máximas elevaciones superan los 5.000 msnm en el escarpe que se extiende hacia el sur de los volcanes Chuquinanta y Mulluri, ubicados al norte del área de estudio. Hacia el oeste dominan pendientes suaves de 1° a 2°, en el relleno aluvial y fluvial. Mientras que en el límite este de la cuenca los cerros presentan pendientes cercanas a los 25°.

La deformación de la Fm. Oxaya (Oxaya Anticlinal, Figura 3-4), en la Precordillera, causó modificaciones de la red de drenaje paralela preexistente la cual comienza a concentrarse en unos pocos valles profundamente incisivos, que presentan una incisión total de 1600 m. La tasa de incisión de los valles fue de 56 a 58 m/Ma (García y Herail 2005). El acortamiento durante el Neógeno de la cuña oeste de los Andes es de solo 7,5 km debido al alto ángulo de las fallas inversas (García *et al.*, 2004).

Figura 3-5: Geomorfología área de estudio.



Fuente: Elaboración propia

La configuración actual del área de estudio se desarrolla principalmente durante la tercera etapa del ciclo tectónico andino (Paleógeno Superior – Presente).

Esta etapa corresponde a la última etapa del desarrollo orogénico Andino, durante el cual los Andes de Bolivia, Argentina y Chile adoptan su actual configuración. Durante esta etapa el alzamiento de los Andes tuvo lugar, las unidades morfoestructurales actuales se desarrollaron, el volcanismo migra hasta alcanzar su actual posición y se emplazan los depósitos minerales de cobre post- incaicos (Eoceno Medio). También, en el Mioceno Inferior, los segmentos de la dorsal Juan Fernández, de orientación casi este-oeste, comienzan a colisionar con el margen continental del sur de Perú y norte de Chile, migrando hacia el sur a una velocidad de 200 km/Ma (Yáñez *et al.* 2002). El Istmo de Panamá comenzó a formarse en el Mioceno Inferior y concluyó en el Plioceno, favoreciendo el Gran Intercambio Biótico Americano, causando el término del gran aislamiento biótico de Sudamérica, comenzado después de la separación de África durante el desmembramiento de Gondwana (Charrier *et al.*, 2007).

Durante esta etapa, la evolución tectónica al norte de los 47°S está controlada por el movimiento relativo entre las placas de Nazca y Sudamérica. Deformación de los depósitos de las etapas anteriores ocurren en el Eoceno Medio en la Fase Incaica Principal posiblemente producto de altas tasas de convergencia de la placa oceánica de Nazca. Después de este episodio de altas tasas de convergencia el desplazamiento relativo entre la placa continental y oceánica fue casi paralelo y la convergencia disminuyó hasta los 26 Ma (Somoza 1998). En este momento, un nuevo reajuste de las placas ocurrió y la placa oceánica adopta un movimiento casi perpendicular al margen continental y la tasa de convergencia fue en aumento hasta los 12 Ma. Estas modificaciones de la cinemática y tasas de convergencia de las placas causaron importantes variaciones en el régimen tectónico en el margen continental, expresado en el antearco por alzamiento y extensión sincrónica, transcurrancia y deformación compresional (Hartley *et al.* 2000).

La paleogeografía al comienzo de esta etapa estuvo caracterizada por la Cordillera Incaica (Ej.: alzamiento de la Precordillera), el cual estuvo caracterizado por la inversión del arco magmático o dominio del trasarco existente durante el Paleógeno Inferior (Fase Incaica Principal). La inversión y alzamiento de la Cordillera Incaica durante el Eoceno Medio - Superior fue controlada por varias fallas de rumbo NNE-SSW convergencia tanto al este como al oeste. La erosión de los bloques desplazados y alzados por las fallas antes mencionadas entregó aportes de sedimentos a las cuencas existentes al este y oeste de la cordillera en alzamiento.

3.3.1.1 Geología Regional

Se presenta el mapa geológico realizado por SERNAGEOMIN, 2002, escala 1:1.000.000. De acuerdo a SERNAGEOMIN 2002, en el área de estudio afloran tres unidades descritas como: Centros y secuencias volcánicas del Mioceno (M3i), depósitos volcánicos del cuaternario (Q3i) y depósitos aluviales del cuaternario (Qa), sin embargo en una descripción regional de este informe, se presentan siete unidades que afloran en el área de estudio

Figura 3-6) y en los alrededores en la Tabla 3-1. Estas unidades fueron relacionadas con las del trabajo de García *et al.*, 2004 y se presentan más adelante en el presente informe.

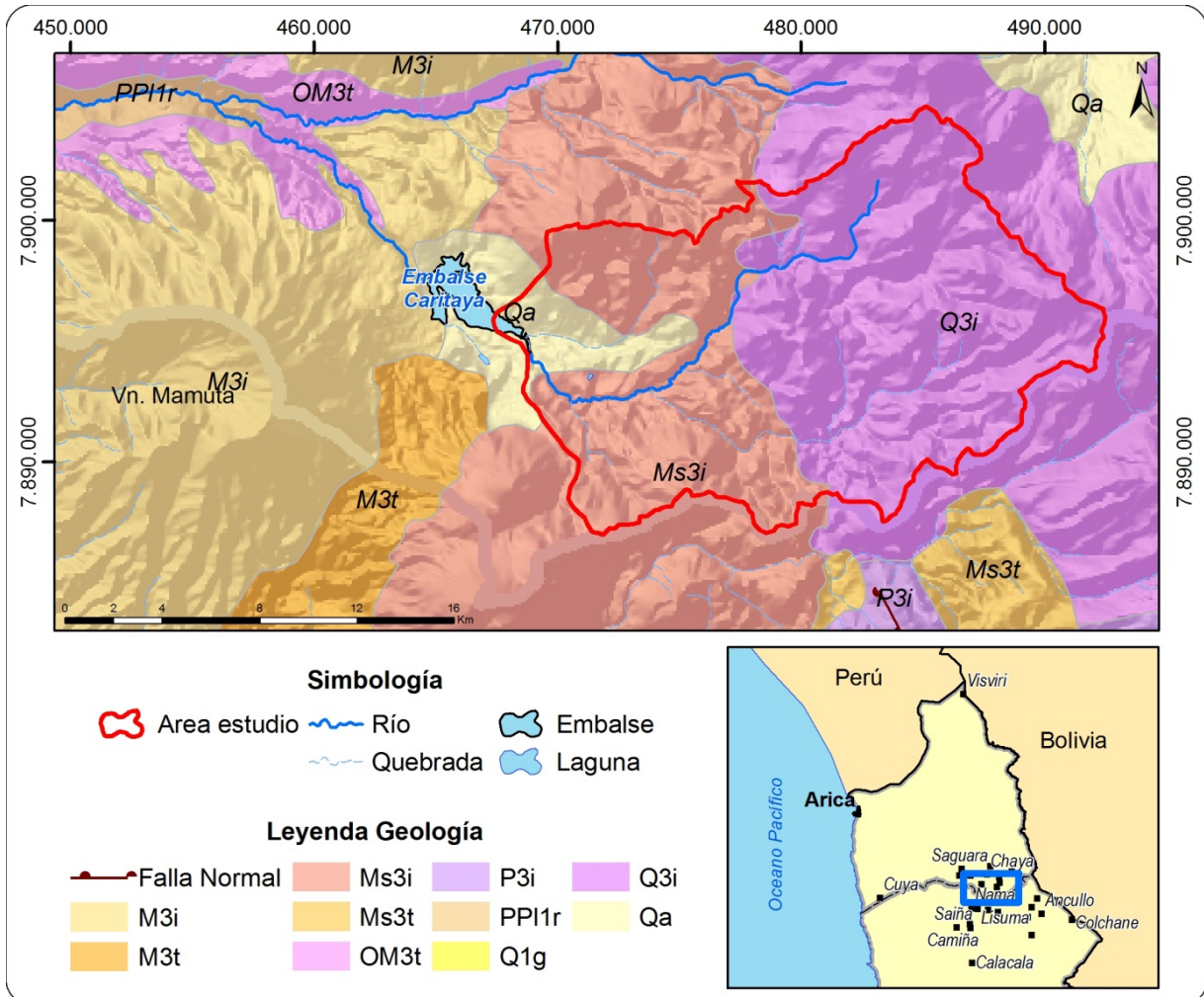
Importante es destacar que la actividad volcánica en la Precordillera oriental y el Altiplano occidental produce secuencias Miocenas Medias y Cuaternarias de lavas basálticas y andesíticas, depósitos de lahares, y ignimbritas que dan origen a la mayoría de los depósitos del área de estudio y que se describen a continuación. Estos depósitos incluyen los depósitos de los volcanes El Márquez, Mamuta y otros volcanes del arco, presentes al norte y al oeste del área de estudio respectivamente. Asociados con la actividad volcánica existen depósitos de oro exhalativos, los cuales han sido incluidos en la franja metalogénica del Altiplano-Cordillera Occidental de los Andes Centrales.

Tabla 3-1: Geología Marco Regional SERNAGEOMIN, 2002.

Código	Edad	Descripción
OM3t	Oligoceno-Mioceno	Secuencias piroclásticas dacíticas a riolíticas asociadas a calderas de colapso. En la Cordillera Principal: Formación Oxaya.
M3i	Mioceno Inferior-Medio	Complejos volcánicos parcialmente erosionados y secuencias volcánicas: lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesítico-basálticas a dacíticas.
M3t	Mioceno Inferior-Medio	Secuencias piroclásticas dacíticas a riolíticas asociadas a calderas de colapso.
Ms3i	Mioceno Superior	Centros y secuencias volcánicas: lavas, domos y depósitos piroclásticos, andesíticos a dacíticos, con intercalaciones aluviales, asociados a depósitos epitermales de Au-Ag. Se ubican en la Cordillera Principal.
Ms3t	Mioceno Superior	Ignimbritas dacíticas a riolíticas y depósitos piroclásticos asociados a estratovolcanes.
MQs	Mioceno-Cuaternario	Depósitos evaporíticos: sulfatos, cloruros, carbonatos y niveles detríticos finos, localmente con bórax y/o litio. Salar Surire.
P3i	Plioceno	Centros volcánicos: lavas, domos y depósitos piroclásticos andesíticos a dacíticos, conos de piroclastos y lavas basálticas a andesítico-basálticas.
PPI1r	Plioceno-Pleistoceno	Conglomerados, areniscas, limolitas y arcillolitas, generalmente consolidados, de facies principalmente aluviales, subordinadamente lacustres y eólicas. Forman abanicos aluviales inactivos.
Q1g	Pleistoceno-Holoceno	Depósitos morrénicos, fluvioglaciales y glacialacustres: diamictos de bloques y matriz de limo/arcilla, gravas, arenas y limos.
Q3i	Cuaternario	Estratovolcanes y complejos volcánicos: lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesítico-basálticos a dacíticos; principalmente calcoalcalinos.
Qa	Pleistoceno-Holoceno	Depósitos aluviales, subordinadamente coluviales o lacustres: gravas, arenas y limos. En la Depresión Central, regiones I a III: abanicos aluviales.

Fuente: SERNAGEOMIN, 2002

Figura 3-6: Geología 1:1.000.000 SERNAGEOMIN 2002



Fuente: SERNAGEOMIN, 2002

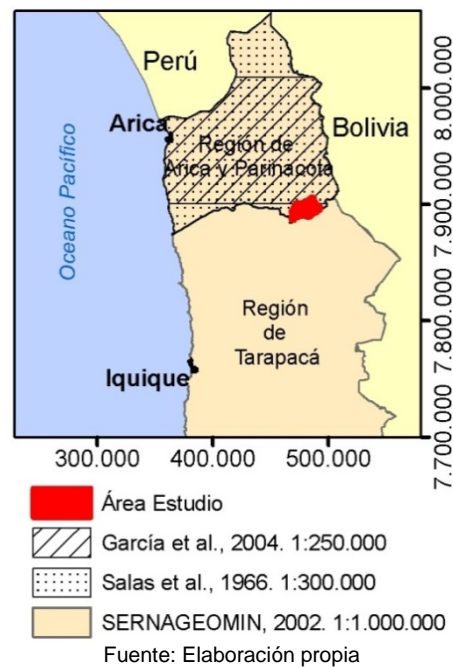
3.3.2 Geología superficial del Área de Estudio

A continuación se describen las principales unidades y formaciones que afloran en el área de estudio. La descripción se realizó basado en los siguientes antecedentes:

- SERNAGEOMIN 2002, escala 1:1.000.000.
- Salas *et al.*, 1966 Boletín N° 21 Arica 1:300.000.
- García *et al.*, 2004 Hoja Arica 1:250.000.

La Figura 6-1, muestra la ubicación en planta de los trabajos realizados mencionados anteriormente.

Figura 3-7: Fuente de información geológica.

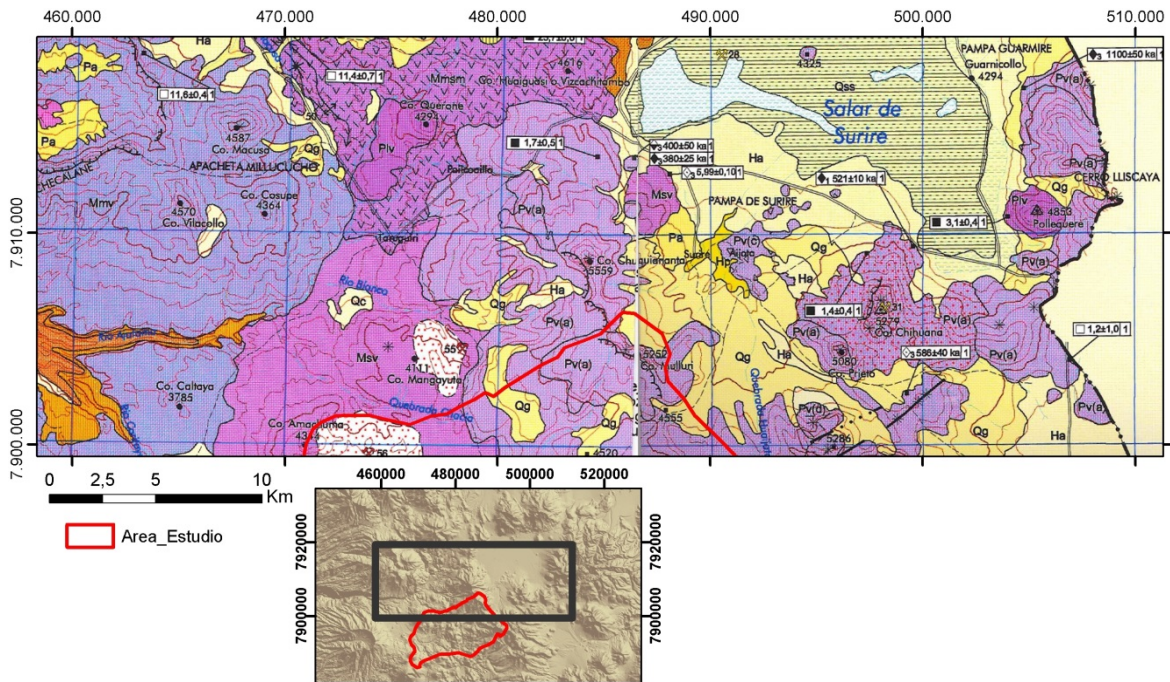


En primer lugar, se presenta el mapa realizado por García *et al.*, 2004 (Figura 3-8). El mapa fue realizado a escala 1:250.000 y abarca la zona norte del área de estudio. Dado que el mapa de García *et al.*, 2004 presenta una escala menor, es decir, con mayor detalle, es posible diferenciar más unidades que en el trabajo de SERNAGEOMIN 2002. Por otro lado, el trabajo realizado por Salas *et al.*, 1966, fue revisado y se determinó que la información presente está completamente incluida en los trabajos de SERNAGEOMIN 2002 y García *et al.*, 2004.

Se realizó una inspección preliminar vía imágenes satelitales para extender el trabajo de García *et al.*, 2004 abarcando toda el área de estudio, determinando preliminarmente las unidades y formaciones que afloran en el área de estudio. Por último es importante

mencionar que existe un trabajo del SERNAGEOMIN en vías de publicación correspondiente a la hoja de Pisagua ubicada inmediatamente al sur del trabajo de García *et al.*, 2004, antecedente que será incluido cuando se disponga de él.

Figura 3-8: Extracto del mapa García *et al.*, 2004



Fuente: Modificado de García *et al.*, 2004

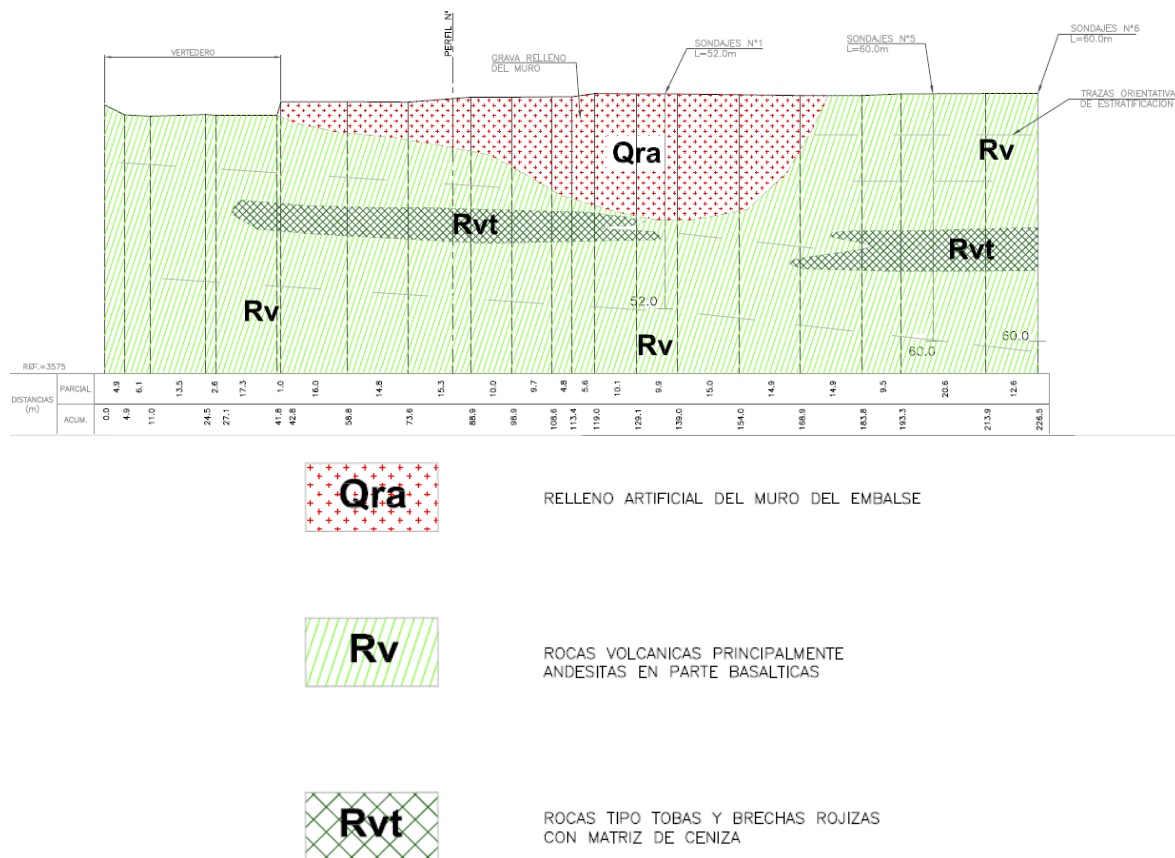
3.3.3 Geología subsuperficial

La zona de estudio no cuenta con antecedentes que provean información subsuperficial del área de estudio.

No obstante, el estudio realizado por el SMI, estudia la geología superficial y subsuperficial en las inmediaciones al embalse Caritaya. El estudio realiza cinco sondajes de hasta 60 m de profundidad, con los cuales describen la geología y levantan tres perfiles geológicos. Por otro lado se cuenta con información geológica proveniente del túnel de evacuador del embalse.

En la Figura 3-9, se muestra un perfil ubicado sobre el embalse. El depósito Qra corresponde al material de muro del embalse depositado artificialmente. El muro se emplaza en hasta 66 m de roca volcánica andesitas y basaltos (Rv) con intercalaciones de tobas y brechas (Rvt).

Figura 3-9: Perfil geológico SMI, 2013



Fuente: SMI, ,2013

3.4 HIDROLOGÍA

A continuación se presenta una descripción de la red hidrográfica de la hoya del río Camarones, los caudales asociados a esta red y la calidad de sus aguas.

3.4.1 Descripción hidrográfica

La cuenca del río Camarones se encuentra en su mayor parte en la XV región de Arica y Parinacota, situándose al sur de ésta y al norte de la I región. Esta hoya hidrográfica drena un área total de 4.681 km² y limita con las siguientes cuencas: Al norte con quebrada Vitor o Codpa y Costeras entre quebradas Vitor y Camarones; al sur limita con la quebrada de Tana o Camiña y al oriente limita con el salar de Surire (Ver Figura 5-1).

De acuerdo a Niemeyer (1980), la hoya del río Camarones tiene un régimen permanente, sin embargo, en seguías prolongadas suelen sumirse sus aguas en las arenas en su curso inferior.

Su principal curso de agua corresponde al río Camarones, el que nace en Arepunta de la reunión de los ríos Ajatama y Caritaya, por el norte y sur, respectivamente. El río Camarones desarrolla su curso en dirección Suroeste, en el que recibe los aportes intermitentes de las quebradas Saguara y Umayani, ambas por el norte, y de la quebrada de Chiza por el sur. Finalmente después de recorrer aproximadamente 97 km en un valle estrecho aluvional con un ancho variable entre 25 y 700 m, desemboca en el océano pacífico en el sector denominado Caleta Camarones.

Tal como señaló, los únicos aportes que recibe de manera permanente el río Camarones son sus ríos formadores Ajatama y Caritaya. Los otros tributarios son ocasionales, los que generalmente hacen su aporte en épocas de lluvias, principalmente en el fenómeno denominado como Invierno Altiplánico.

El río Ajatama, se forma de la unión del río Macusa y de la quebrada Chacia, los que a su vez se generan de diferentes arroyos y ríos al pie del cordón montañoso cordillerano. Este río tiene un recorrido de aproximadamente 14 Km hasta su junta con el río Caritaya.

Por su parte, el río Caritaya nace aguas arriba de la confluencia del arroyo Veco con la quebrada Guaiguasi, en su recorrido en su sector medio se encuentra regulado desde el año 1936 por el embalse que lleva el mismo nombre, el que se ubica donde antiguamente estaba la laguna Pareacota. Este embalse tiene una capacidad reguladora de 42 millones de m³ para su hoya de 450 km². Posteriormente, el río sigue su rumbo con dirección Noroeste hasta su confluencia con el río Ajatama.

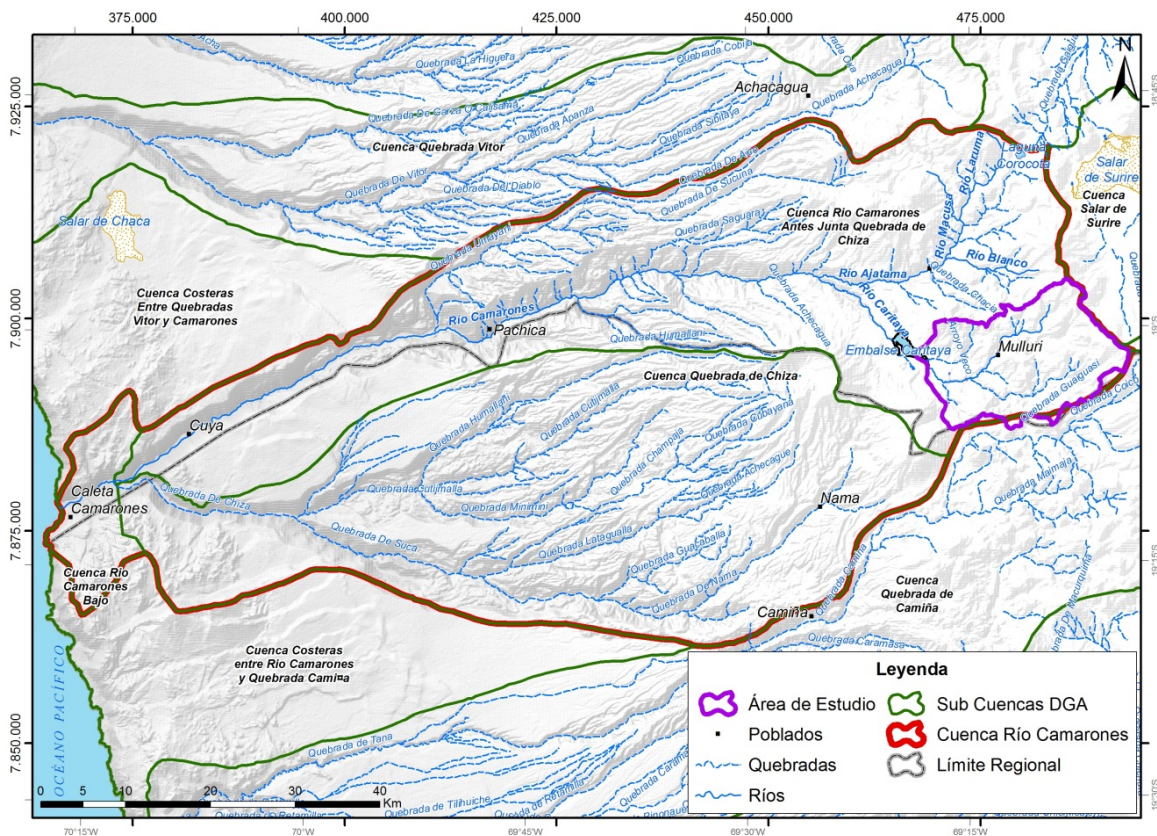
En la cuenca aportante al embalse de Caritaya, existen afloramiento hidrotermales, los que forman las lagunas de Amuyo, denominadas laguna roja, amarilla y verde, cuyas aguas se encuentran teñida de color rojo, amarillo y verde, respectivamente. Las lagunas poseen

agua a temperatura de aproximadamente 40 – 50 °C. Estas aguas ricas en Arsénico, boro y sales disueltas, se unen al curso principal del río Caritaya, afectando la calidad de él.

La quebrada de Saguara nace en una vertiente, regando cultivos en la localidad de Saguara y Pachica, donde en ésta última descarga al río Camarones. Se caracteriza por ser de buena calidad. A su vez, la quebrada de Umayani se genera de las quebradas de Aico y Sucuña, en su recorrido la tributan algunas vertientes de poca importancia con aguas salobres, finalmente se une al río Camarones aguas abajo de la angostura de Altape.

La hoya hidrográfica de Chiza tiene cabeceras en la precordillera y un profundo cauce en forma de cañón como el de Camarones. La quebrada de Chiza no presenta un escurrimiento tipo permanente a lo largo de todo el año, sino más bien es en épocas de lluvias estivales altioplánicas donde suele tener crecidas de importancia. En algunas de sus ramificaciones existen vertientes, las que han dado origen a asentamientos agrícolas menores.

Figura 3-10: Red hidrográfica de la cuenca de Camarones.



Fuente: Elaboración propia

3.4.2 Hidrología (Caracterización de caudales)

Tal como se señaló en la descripción de la hidrografía de la cuenca del río Camarones, la hoya se caracteriza por presentar flujos permanentes a lo largo de todo el año, en el río Camarones y sus dos formadores: ríos Ajatama y Caritaya. En los otros tributarios del río principal el flujo es ocasional y se acentúa en épocas de lluvias, es decir, en entre los meses de diciembre y marzo.

De acuerdo a lo presentado en el informe de la Universidad de Tarapacá (2009), las fuertes lluvias que caen durante la temporada de verano provocan violentas crecidas lo que significa que en Conanoxa escurra el 50% del volumen anual en los meses de Enero a Abril, repartiéndose en forma pareja el resto del caudal en el año. Esto se debe a que el área que recibe las mayores precipitaciones (cuenca alta) posee un efecto de regulación originado en los siguientes factores:

- En la zona más alta de la cuenca, que posee clima de hielo por efecto de altura, se produce una fusión lenta y distribuida a lo largo del año.
- La cuenca, en general está caracterizada por suelos de textura gruesa y con pendiente medias a bajas, por lo que se constituye en un sector favorable a la infiltración. Se produce así una regulación del agua que pasa por el valle, que se caracteriza por un flujo más o menos plano, sin acusar la fuerte variabilidad de las cuencas más bajas.

En la hoya hidrográfica del río Camarones, la DGA cuenta con 3 estaciones fluviométricas, las que se presentan en la Tabla 3-2 y Figura 3-11.

Tabla 3-2: Estaciones fluviométricas de la DGA en cuenca de Camarones

Código BNA	NOMBRE	UTM Norte	UTM Este	Altitud	Vigencia	Inicio	Suspensión
01502001-6	Río Camarones en Taltape	7900801	422538	0	Suspendida	01/01/1969	24/07/2002
01502002-4	Río Camarones en Conanoxa	7893578	396231	710	Vigente	01/01/1968	No suspendida
01502008-3	Río Camarones en Chilpe	7904972	434543	1565	Vigente	01/12/2005	No suspendida

Fuente: Elaboración propia

Cabe señalar, que de acuerdo al estudio de Ayala y Cabera (2003), el caudal medio mensual en el río Camarones en Conanoxa (2003) para un periodo de excedencia del 50% es de 0,4 m³/s, el detalle del caudal para los distintos meses y para un periodo de excedencia del 80% se presenta en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3: Caudal medio (m³/s) en río Camarones en Conanoxa

P. exc.	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT-MAR	ABR-SEP	ANUAL
85%	0,10	0,06	0,08	0,12	0,12	0,19	0,11	0,22	0,26	0,29	0,20	0,13	0,21	0,24	0,25
50%	0,19	0,14	0,18	0,37	0,50	0,57	0,32	0,36	0,39	0,39	0,30	0,23	0,41	0,35	0,40

Fuente: Ayala y Cabrera 2003

Por otra parte, en el estudio de la Universidad de Tarapacá se realizaron aforos puntuales en distintas secciones del río Caritaya, Camarones y otros arroyos de interés. Las mediciones se realizaron entre los meses de enero y mayo del año 2009. En la Tabla 3-4 se muestran los caudales medidos en el estudio señalado. En general, de acuerdo a la distribución de caudales presentada en la Tabla 3-3, las mediciones fueron realizadas en épocas donde afluye una cantidad mayor de caudal por los ríos.

Tabla 3-4: Aforos realizados en los ríos Camarones, Caritaya, Blanco y otros arroyos

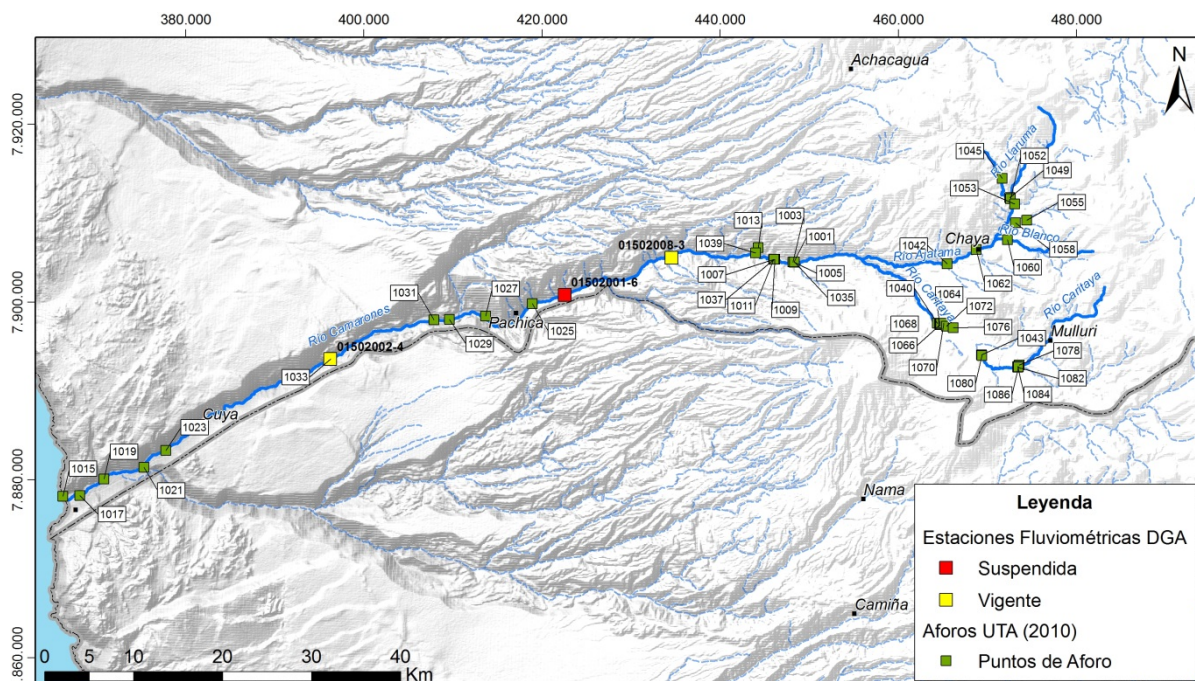
Sección	Fecha	Hora	Caudal (l/s)
Challamanta, entrada a embalse Caritaya	07/05/2009	11:02	373
Río Caritaya, aguas arriba del sector Lagunas de Amuyo	07/05/2009	12:51	286
Río Caritaya, aguas abajo del sector Lagunas de Amuyo	07/05/2009	13:31	333
Qda. Macuza	03/02/2009	10:35	6,5
Estero Parcohaylla antes junta Qda. Anocarire	03/02/2009	12:39	16,5
Qda. Anocarire antes junta Qda. Macusa	03/02/2009	11:25	40,2
Qda. Anocarire despues junta Qda. Macusa	03/02/2009	12:05	45,1
Qda. Taruquire antes junta	03/02/2009	13:00	28,6
Río Blanco	03/02/2009	13:30	157
Río Ajatama en Challa	03/02/2009	13:55	241,8
R. Ajatama	27/01/2009	13:20	238,8
R. Entrada Embalse Caritaya	27/01/2009	16:20	395,6
R. Salida Embalse Caritaya	27/01/2009	10:45	89
R. Camarones en Condumaya	21/01/2009	11:30	375,3
R. Camarones aguas abajo Illapata	21/01/2009	12:50	392,4
R. Camarones aguas abajo Esquiña	21/01/2009	13:50	527,9
R. Camarones en Huancarrane	20/01/2009	12:10	417,9
R. Camarones en Taltape	20/01/2009	14:05	159,1
R. Camarones en Camarones	20/01/2009	15:30	97,4
R. Camarones frente a Parcela 16(O. García)	20/01/2009	16:05	103,2
R. Camarones en Conanoxa	20/01/2009	17:25	111,3
Río Camarones frente a Planta Tratamiento	09/01/2009	13:15	81,8
Río Camarones 100 aguas arriba puente Camarones	09/01/2009	12:26	77,4
Río Camarones frente a km. 8,870	09/01/2009	11:43	74

Tabla 3-4: Aforos realizados en los ríos Camarones, Caritaya, Blanco y otros arroyos

Sección	Fecha	Hora	Caudal (l/s)
Río Camarones frente a km. 5,44	09/01/2009	11:07	85
Río Camarones en desembocadura	09/01/2009	10:30	1,5

Fuente: Universidad de Tarapacá. 2009

Figura 3-11: Estaciones fluviométricas DGA y Aforos UTA (2010) en la cuenca de Camarones.



Fuente: Elaboración propia a partir de información UTA (2010) y DGA

3.4.3 Embalse Caritaya

El embalse se construyó en el río Caritaya a unos 10 km aguas arriba de su confluencia con el río Ajatama, a una altura de 3600 m.s.n.m, entre los años 1932 y 1935, para fines de regadío. Su diseño del tipo escollera o rock fill tiene una capacidad máxima para almacenar 42.171.000 m³ de agua (SMI, 2008).

Las características del embalse, según información original se presenta en Tabla 3-5.

Tabla 3-5: Características del embalse Caritaya (SMI, 2008)

Características	Dimensión	Unidad
Altura sobre el nivel del mar 3.600 msnm	3.600	msnm
Superficie hoya hidrográfica 453 km ²	453	km ²
Capacidad de almacenamiento 42.171.000 m ³	42.171.000	m ³
Longitud de coronamiento del muro 156 m	156	m
Ancho del coronamiento 5 m	5	m
Altura máxima del muro sobre el plano de válvulas 38,50 m	38,5	m
Revancha del coronamiento sobre el vertedero 4 m	4	m
Altura útil del agua 34,50 m	34,5	m
Capacidad vertedero de rebalse	180	m ³ /s

Fuente: Diagnóstico y diseño definitivo
Reparación embalse Caritaya. SMI, 2008

La Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) se hizo cargo del embalse en el año 2000 y con el fin de volver a regular el riego en la zona, debido a los deterioros sufridos por el embalse a lo largo de los años, se realizaron obras de reparaciones en el año 2009. Estas obras consistieron en:

- Retiro de sedimentos del fondo del embalse. Se retiró aproximadamente 22.000 m³ de material fino, el que fue depositado en un sector a 400 m al oeste del muro de presa.
- Reconstrucción del tapón. Se demolió el tapón antiguo y se construyó uno nuevo.
- Se impermeabilizó el muro. Para ello, se repararon las losetas y se instalaron 3.600 m² de membrana HDPE.
- Se construyó una torre de toma.

3.5 HIDROGEOLOGÍA

El área de estudio presenta escasos antecedentes de la hidrogeología. El estudio Mapa Hidrogeológico de Chile escala 1:2.500.000 del año 1986 realizado por la empresa IPLA, presenta en general las características hidrogeológicas regionales. El estudio describe que la potencialidad hidrogeológica en el sector de la provincia altiplánica está ligada al clima y a la litología.

El hecho de existir precipitaciones estivales, unido con una cubierta en su mayoría volcánica terciaria-cuaternaria, con permeabilidad secundaria debido al fracturamiento permite la infiltración del recurso y transmisión a sectores más bajos. Estos sectores generalmente provistos de relleno cuaternario no consolidado volcanoclástico de tipo aluvial o fluvial almacenan el recurso y permiten el acceso a él a través de pozos. Frecuentemente se detecta la presencia de arsénico (aparentemente ligado a la actividad volcánica) y el boro, en aguas superficiales como subterráneas. Sistemas de escurrimiento superficial cerrado, subterráneamente estarían interconectadas a través de acuíferos. Se estima que el recurso renovable de estos sistemas cerrados está limitado a la descarga por evaporación que se produce desde los salares.

El sistema regional corresponde a cauces transversales con respaldo altiplánico y salida al mar. Los acuíferos están constituidos por relleno cuaternario fluviales en los lechos de los ríos. Estos acuíferos no confinados tienen espesores no superiores a 200 m. La alimentación está directamente relacionada con los ríos (IPLA, 1986).

Actualmente no se dispone de información de pozos en el área de estudio. No obstante el trabajo realizado por SMI, 2008 realiza una descripción hidrogeológica en las inmediaciones del embalse Caritaya, con el objetivo de caracterizar las propiedades hidrogeológicas de las rocas del entorno del embalse.

El estudio afirma que al tratarse de un embalse ya construido y antiguo, no hay antecedentes de los aspectos hidrogeológicos iniciales que existían en el sector de la presa. Debe indicarse que existen bofedales en la zona previa al área de inundación lo que indica niveles freáticos altos, cercanos o en superficie.

La empresa SMI realiza cinco sondajes donde se realizaron pruebas de permeabilidad del tipo Lugeon. El análisis de estas pruebas ha permitido establecer la permeabilidad del macizo rocoso y estimar la potencialidad de pérdidas de agua y eventualmente establecer la necesidad de inyecciones.

Cabe destacar que el pique que se encuentra excavado en roca, hacia aguas abajo del muro y que se presenta revestido totalmente, presenta un nivel de humedad en su desarrollo el cual se localiza a unos 15 m de profundidad. Este nivel va asociado a leves goteos. Esto estaría indicando que existiría un nivel freático en este sector a la profundidad indicada.

Los resultados de las pruebas de Lugeon en los sondajes efectuados se presentan en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6: Ensayos de Lugeon

Sondaje N°	Ubicación	Profundidad (m)	Lugeon (lt/m/min)
S- 1	Centro de la presa	37,00- 41,70	0,2
		41,50- 46,50	0,2
			0,1
S- 3	Ladera izquierda	5,10- 10,10	0,1
		10,00- 15,00	1
		15,80- 19,80	0,75
			0
S- 4	Ladera izquierda	5,10- 10,10	Mayor 20
		10,00- 15,00	10,3
S- 5	Ladera derecha	5,70- 10,70	Mayor 20
		10,40- 15,40	1,4
		15,90- 20,90	1
		20,70- 25,70	0
		50,20- 55,20	1,5
		55,00- 60,00	0,1
S- 6	Ladera derecha	5,30- 10,30	Mayor 20
		11,90- 16,90	1,3
		16,90- 21,90	1,4
		24,80- 29,80	0
		47,40- 52,40	0
		55,00-60,00	0

Fuente: SMI, 2008

De acuerdo a los datos que se muestran se puede deducir que solamente se presentan permeabilidades altas, en el rango sobre 20 unidades lugeones, en tres sondajes. Estas altas permeabilidades se presentan en el rango de los 5,0 a 10,0 m de profundidad de los sondajes S- 4, S- 5 y S- 6. Debe indicarse que las pruebas de Lugeon se iniciaron, por razones técnicas a la profundidad de 5 m por lo cual puede esperarse que en el tramo de 0,0 a 5,0 m se deban presentar valores altos semejantes a los indicados. Bajo los 10 m de profundidad prácticamente la permeabilidad del macizo es nula a extremadamente baja. Esta situación explicaría la presencia de humedad y filtraciones leves en la zona del pique y el nivel de 10 m a 15 m de profundidad sería el nivel entre la zona permeable superior y la zona impermeable.

Destaca el sondaje S- 1, efectuado en el centro de la presa en donde las primeras pruebas se efectuaron entre los 37,0 y 41,0 m de profundidad. Esta prueba y la siguiente, entre los 41,5 y 46,5 m de profundidad muestran valores de permeabilidad extremadamente bajos. Debe hacerse notar el hecho que el contacto roca/ sobrecarga se encuentra a los 36,2 m de profundidad, es decir solamente 0,8 m sobre el nivel superior de la primera prueba de

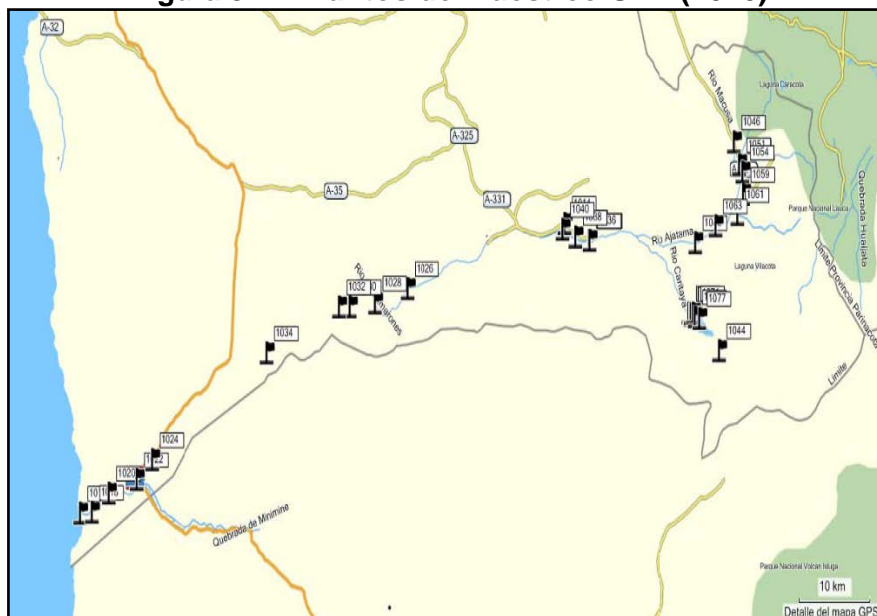
lugeon. Este resultado junto al de los otros sondajes muestra claramente que el macizo rocoso es prácticamente impermeable a excepción de la zona superior de 10m de espesor en donde puntualmente se presentan sectores de alta permeabilidad.

3.6 HIDROGEOQUÍMICA

El marco hidrogeoquímico que se describe a continuación se basa una síntesis realizada al estudio denominado: “Cuenca de Camarones: Identificación y caracterización de fuentes que condicionan la calidad de las aguas superficiales: rol del embalse Caritaya” (UTA 2010). El estudio tuvo como objetivo caracterizar espacialmente la variabilidad en la composición fisicoquímica de las aguas y sedimentos a lo largo del cauce del río Camarones y de sus principales afluentes, identificando a aquellos que representen entradas importantes de elementos o especies químicas críticas al río Camarones. Estableciendo las lagunas de Amuyo como la principal fuente natural de contaminación al río Camarones. La campaña número 6 fue efectuada en mayo del 2009 y esta campaña consideró el muestreo de aguas y sedimentos al sur del embalse Caritaya, específicamente: río sector Challamanta (entrada al embalse Caritaya), lagunas de Amuyo y río arriba anterior al sector lagunas de Amuyo (Mullure/Vistrure).

El análisis de este estudio se basó en antecedentes y la caracterización fisicoquímica de aguas y sedimentos. Se realizaron 6 campañas a terreno durante el periodo octubre 2008-abril 2009, en las cuales se realizaron las siguientes actividades: aforos, parámetros in-situ de las aguas (pH, CE, OD, turbiedad y color verdadero) y muestreo de sedimentos y aguas para análisis químicos. Los puntos de muestreo estuvieron distribuidos ampliamente en la cuenca como se muestra en la Figura 3-12.

Figura 3-12: Puntos de muestreo UTA (2010)

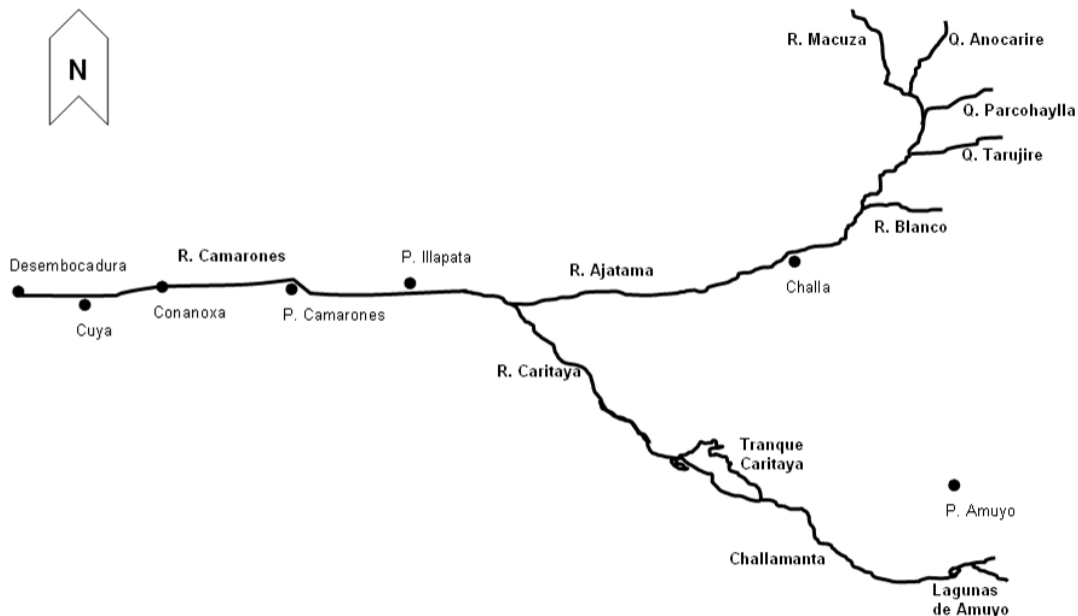


Fuente: UTA, 2010

Los cursos de agua con los niveles más bajos de arsénico boro y sales disueltas fueron localizados en el río Ajatama y corresponden a los afluentes: Macuza, Anocarire y río Blanco (Figura 3-13). En contraposición, los niveles más altos de arsénico, boro y sales disueltas en la cuenca fueron asociados al río Caritaya y sus afluentes. Los puntos de más conflicto se ubican en el área de las lagunas de Amuyo, lugar en que se encuentran las denominadas: laguna Roja, Verde y Amarilla (lagunas de Amuyo), que representan una fuente puntual importante de ingreso de elementos al río Caritaya. Estas lagunas corresponden a afloramientos hidrotermales con niveles elevados de arsénico, boro y sales disueltas. Las aguas de estas lagunas son incorporadas al curso principal del río Caritaya incrementando sus niveles de elementos disueltos y por consiguiente disminuyendo su calidad. En términos generales las aguas superficiales muestreadas son aguas Na-Cl-SO₄, son frescas en el Río Ajatama y salobres en los ríos Camarones y Caritaya. Las aguas saladas de las lagunas de Amuyo son del tipo Na-Cl-SO₄.

Se han identificado quebradas de calidad superior a los cursos principales: baja conductividad, bajo arsénico y menos boro que desembocan al río Ajatama: Macuza, Anocarire y río blanco que aparecen como recursos de buena calidad.

Figura 3-13: Esquema de la Cuenca del Río Camarones y lugares relevantes para el estudio de UTA (2010)

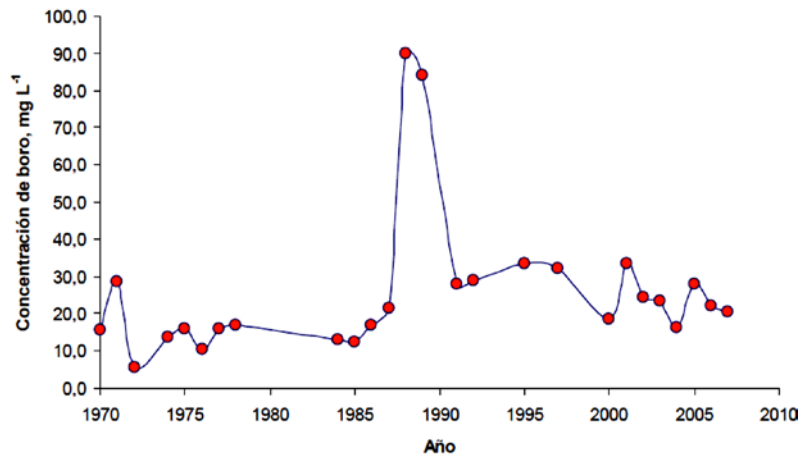


Fuente: UTA, 2010

3.6.1 Boro

Se observa que la calidad química de las aguas del río Camarones es deficiente para el riego por el alto contenido salino total y por el elevado contenido de boro. Los niveles de boro en sus aguas son extraordinariamente altos (Figura 3-14), tanto para normativas internacionales como para la norma chilena de riego NCh 1.333 acepta 0,75 mg/l.

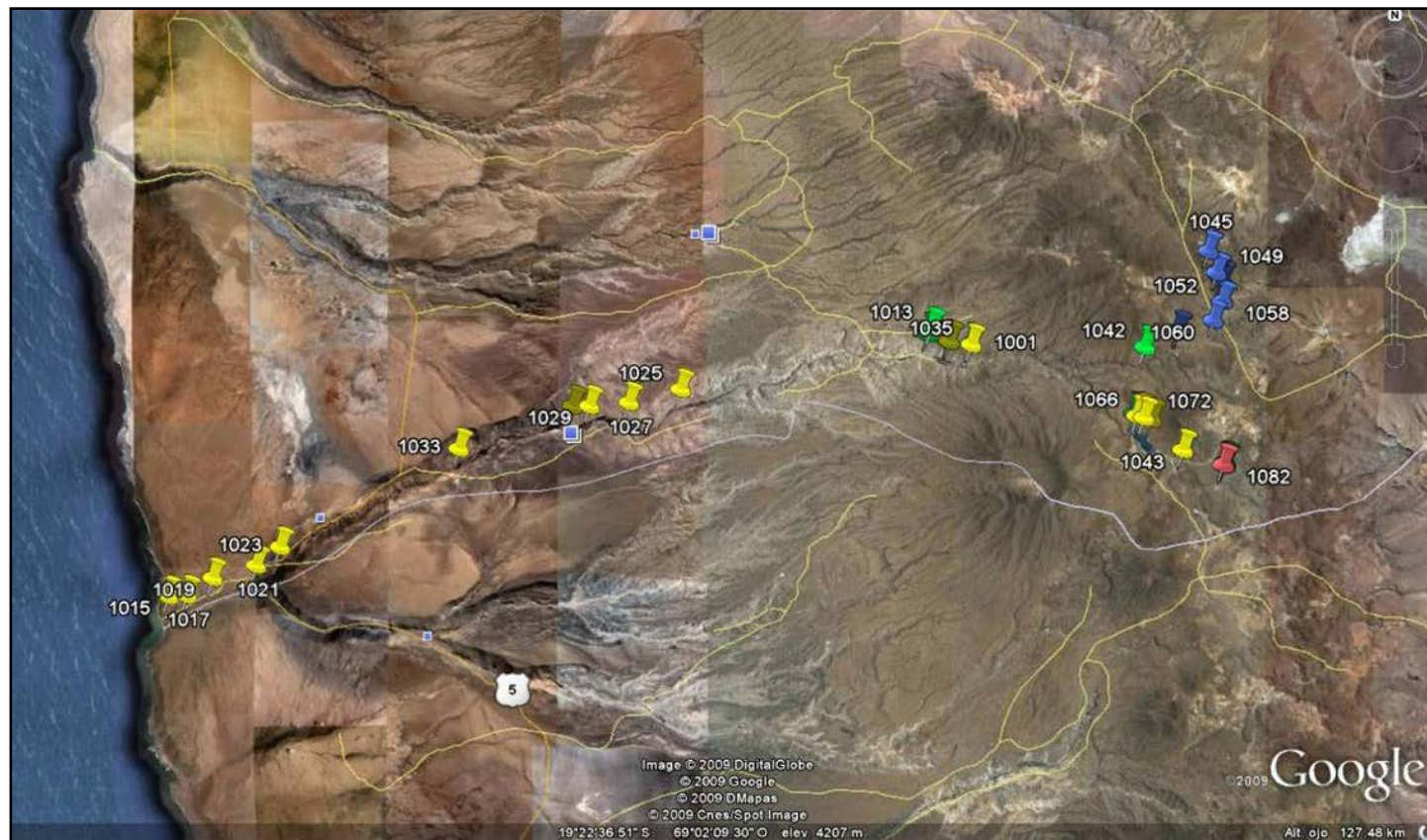
Figura 3-14: Niveles de Boro en estación Conanoxa en el río Camarones



Fuente: UTA, 2010

Los niveles de boro que presentan las aguas de la cuenca de Camarones son variables (Figura 3-15). Sólo las aguas correspondientes a los afluentes del río Ajatama (Macuza, Anocarire, Tarujire y Blanco) presentan niveles de boro menores a 0,75 mg/l, mientras que el propio Río Ajatama presenta una concentración de 1,50 mg/l, apenas por sobre el valor de referencia. Por otro lado los niveles más altos de boro en aguas corresponden a las lagunas de Amuyo con concentraciones que llegan a un máximo de 35 mg/l. Las concentraciones de boro en las aguas del río Camarones en los sectores bajo y medio fueron acordes a los datos históricos determinados en la estación Conanoxa.

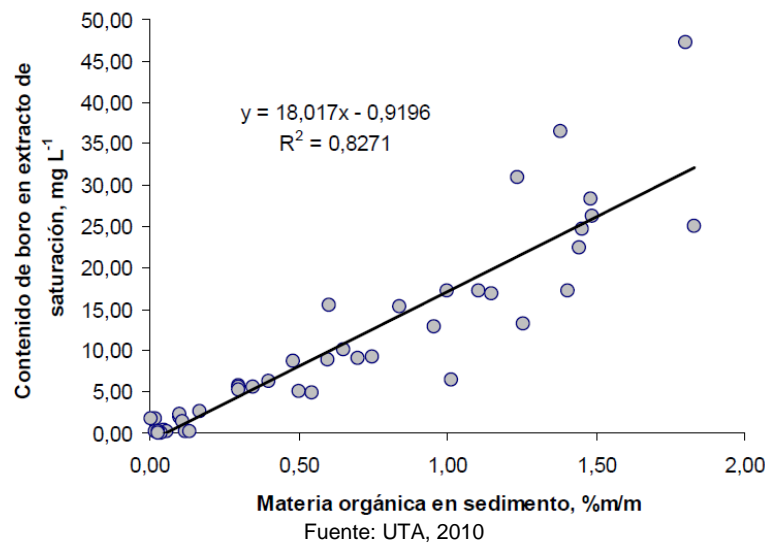
Figura 3-15: Distribución de los contenidos de boro en las aguas de la cuenca de Camarones: < 0,75 mg/l, 0,75-10,00 mg/l, 10,00-30,00 mg/l, >30,00 mg/l



Fuente: UTA, 2010

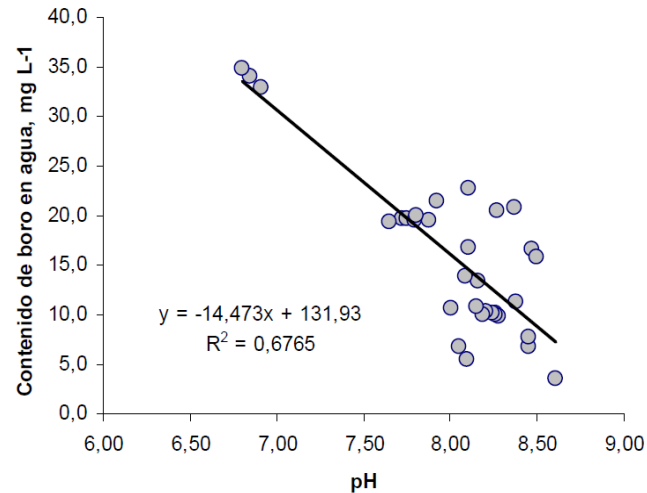
Basado en los análisis realizados a los sedimentos recolectados en distintos puntos al interior de la cuenca de camarones se estableció la existencia de una relación directa entre los contenidos de materia orgánica (MO) y boro en el extracto de saturación. Esto se explica dado que la materia orgánica produce complejos con boro para facilitar su extracción de la solución del suelo o sedimentos. De esta manera representa una fuente de boratos fácilmente disponibles para su transferencia a la solución (extracto) del suelo/sedimento.

Figura 3-16: Relación entre el contenido de materia orgánica y boro



En la relación entre el contenido de boro en las aguas estudiadas y el pH de las mismas, se observa que a medida que el pH se incrementa (desplazamiento hacia valores alcalinos) la concentración de boro en solución disminuye. Se interpreta que este fenómeno guarda relación con el hecho de que por sobre ciertos valores de pH, comienza a disminuir la disponibilidad del boro como resultado de procesos de adsorción lo cual induce a una “escasez temporal” del elemento en solución. Estos procesos de fijación sobre fases sólidas incluyen la adsorción sobre minerales arcillosos (con un máximo de absorción hacia pH 8,5-9); adsorción sobre hidróxidos de hierro y aluminio (con un máximo de absorción entre pH 8-9 para hidróxidos de hierro y hacia pH 7 para hidróxido de aluminio); y ligado a la materia orgánica (provocando un aumento del contenido en boro en las plantas). En general al aumentar el pH del suelo, la adsorción del boro por parte de éste es mayor y, en consecuencia, la disponibilidad para las plantas (boro en solución) es menor.

Figura 3-17: Relación entre el pH y boro en el agua



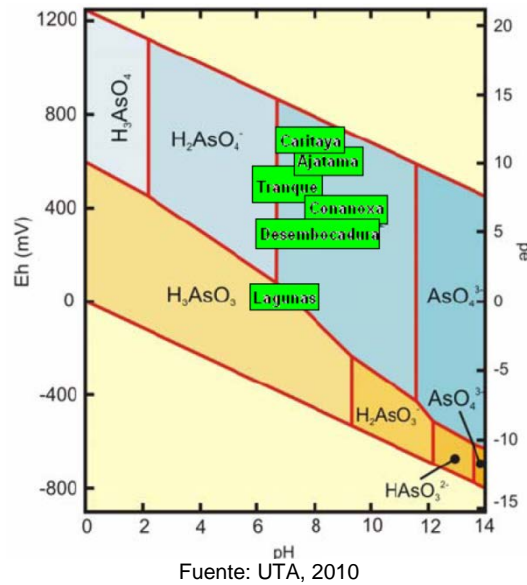
Fuente: UTA, 2010

3.6.2 Arsénico

A partir de los datos entregados por la Dirección General de Aguas de Arica y Parinacota desde el año 1970 hasta la actualidad, se puede observar que el valor promedio de arsénico varía entorno a los 0,86 mg/l y el contenido de boro promedio con un valor de 25,8 mg/l (en Conanoxa). En el caso del arsénico este valor promedio se encuentra más de 80 veces por sobre el valor recomendado por la NCh 409.2005 que establece un contenido máximo de arsénico total de 0,01 mg/l para el agua destinada para consumo humano.

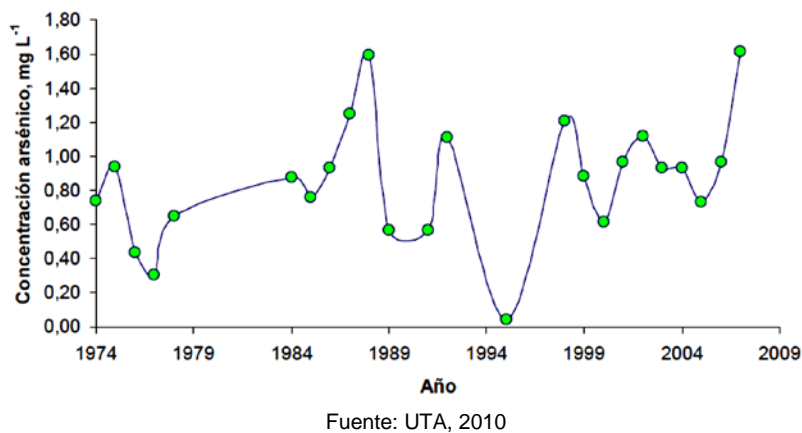
UTA (2010) al graficar las condiciones generales de pH y Eh características de los cursos de agua principales, se observa que en general, bajo condiciones de equilibrio, en la cuenca de Camarones debería predominar el As(+5), con excepción de las aguas pertenecientes a las lagunas de Amuyo en donde las condiciones de afloramiento termal impondría condiciones reductoras favoreciendo la presencia de fracciones de As (III).

Figura 3-18: Diagramas pE-pH para el sistema arsénico y definición de campos para muestras de UTA (2010)



En la Figura 3-19 se pueden observar los datos históricos correspondientes a la concentración de arsénico en la estación Conanoxa. Es posible observar un comportamiento estable a través de los años con un promedio de $0,86 \pm 0,36$ mg/l (desviación estándar), a excepción del año 2007 que presentó un valor atípicamente alto de 1,62 mg/l. Este valor de arsénico podría ser atribuido a la remoción de sedimentos en el embalse Caritaya producto de las labores de reparación realizadas entre noviembre del 2006 y 2007. Con respecto al alto valor de arsénico correspondiente al año 1998, no se detectó información adicional para explicar esa alza.

Figura 3-19: Concentración de arsénico en las aguas del río Camarones en Conanoxa



La Figura 3-20 muestra que el río Camarones a lo largo de su cuenca posee niveles de arsénico variables, pero siempre por sobre lo establecido por la normativa nacional (NCh 409.2005) o internacionales (WHO, USEPA) como niveles máximos para aguas destinadas para consumo humano.

En el sector Camarones bajo, desde la desembocadura del río Camarones hasta la localidad de Huancaranes fueron determinadas concentraciones de arsénico total en el rango de 0,50 a 1,00 mg/l (entre 50 a 100 veces por sobre la normativa anunciada anteriormente).

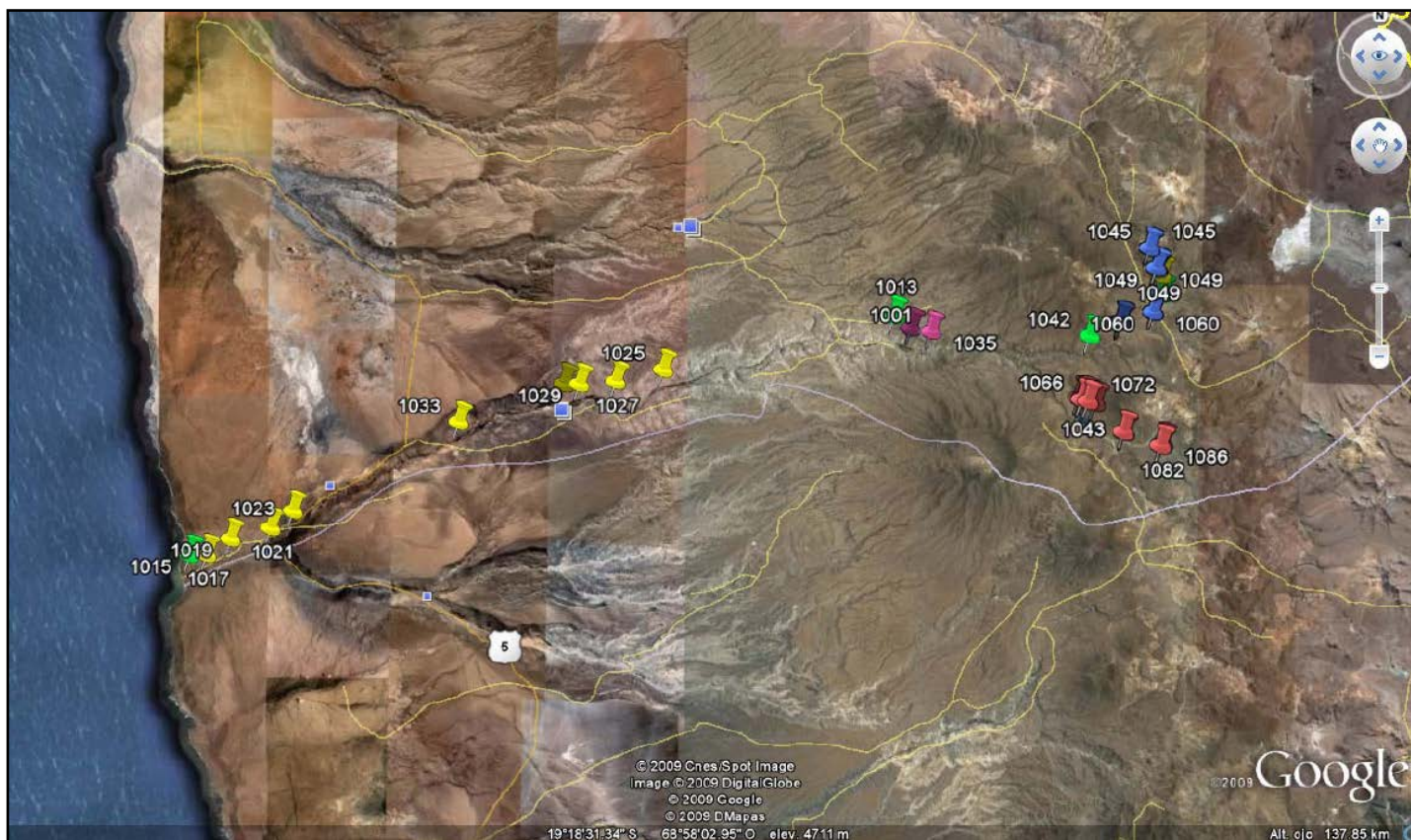
En el sector Camarones medio, poblado de Illapata las aguas del río presentaron un incremento en la concentración de arsénico entre los 1,00 a 2,00 mg/l.

En el sector Camarones alto se pudo observar una gran variabilidad en los contenidos de arsénico total entre los ríos Ajatama y Caritaya, junto a sus respectivos afluentes. El río Ajatama (en alto Ajatama, 0,39 mg/l As) presentó niveles de arsénico tres veces por debajo del contenido de arsénico en las aguas del río Caritaya (salida embalse, 2,52 mg/l As).

Entre los cursos de agua asociados a la cuenca del Ajatama los ríos Macuza y Blanco, junto al flujo de agua proveniente de la quebrada de Anocarire presentaron los niveles de arsénico total más bajos (menores a 0,05 mg/l). Los flujos de agua provenientes de las quebradas de Tarujire y Palcohallya presentaron niveles de arsénico entre 0,05 y 0,50 mg/l.

A modo de comparación se debe mencionar que los niveles de arsénico de acuerdo a la norma NCh 1.333 (agua para riego) es de 0,10 mg/l, concentración que es superada en todos los sectores en estudio a excepción de algunas zonas asociadas al río Ajatama y sus tributarios.

Figura 3-20: Contenidos de arsénico total en aguas del cuenca del río Camarones: <0,05 mg/l, 0,05-0,50 mg/l, 0,50-1,00 mg/l, 1,00-2,00 mg/l, >2,00 mg/l.

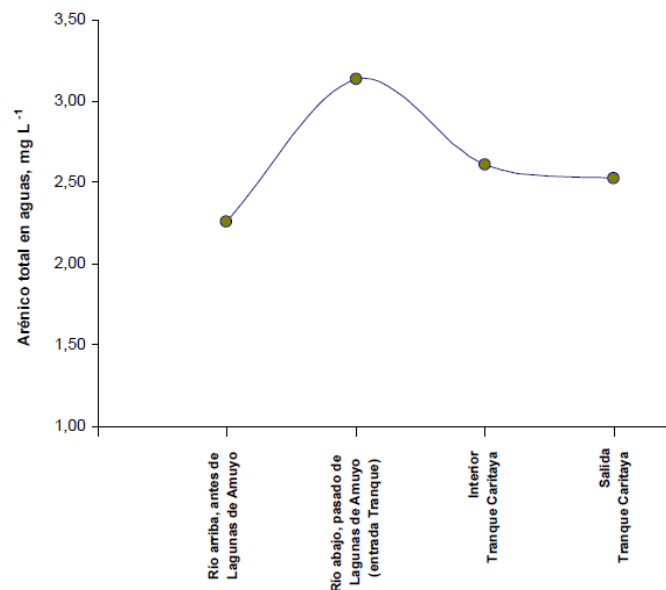


Fuente: UTA, 2010

En el sector del río Caritaya, embalse Caritaya y sector lagunas de Amuyo fueron determinados los mayores contenidos de arsénico en aguas (>2,00 mg/l). Las lagunas de Amuyo corresponden a afloramientos hidrotermales con altos niveles de arsénico, en torno a los 10.000 mg/l de arsénico, presenta también una gran cantidad de sales disueltas lo cual se refleja en valores de conductividad eléctricas entre 16-17 mS/cm comparados con Azapa(1,83 mS/cm) y Lluta (3,22 mS/cm). Debido a la geografía en la cual se encuentran localizadas las llamadas lagunas Roja, Verde y Amarilla, el agua que surge de estos afloramientos escurre en dirección al río Caritaya Quebrada Abajo incorporando esta agua al curso del río principal (89 L/s).

De acuerdo a la información proveniente del presente estudio se pudo establecer que las aguas de las lagunas de Amuyo evidentemente provocan un aumento en los niveles de arsénico del río Caritaya de acuerdo a lo observado en la Figura 3-21. Considerando el contenido de arsénico en las aguas del río antes y después del sector Lagunas, el incremento es de un 39%.

Figura 3-21: Variación de la concentración de As del río Caritaya durante su tránsito a través de la zona en que se ubican las Lagunas de Amuyo

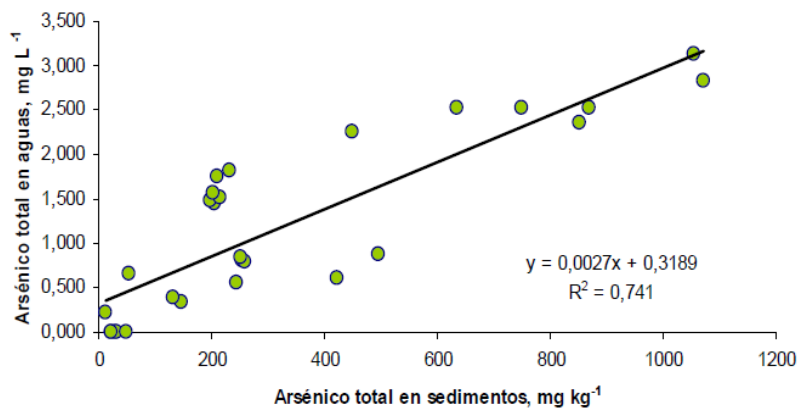


Fuente: UTA, 2010

Estudiando la relación arsénico-agua/arsénico-sedimento al interior de la cuenca de Camarones (Figura 3-22) es clara la fuerte interacción existente entre el arsénico/fase sólida, lo cual transforma al material particulado y en definitiva a los sedimentos en un virtual reservorio de este elemento al interior del río. Los resultados obtenidos indican que los sedimentos contienen alrededor del 99,73% del arsénico total en el sistema río,

permaneciendo en estado disuelto sólo un 0,27%. De esta forma los sedimentos cumplen la importante función de regular la disponibilidad del arsénico en el sistema hídrico, limitando su contenido en solución, siempre en vista a su contenido variable de oxihidróxidos de hierro y aluminio o arcillas minerales. Se debe considerar que cualquier variación del pH hacia el rango ácido provocaría un aumento en la solubilización de estos oxihidróxidos, provocando a su vez un aumento del contenido de arsénico en las aguas.

Figura 3-22: Relación entre los contenidos de arsénico total en aguas y sedimentos de la cuenca de Camarones



Fuente: UTA, 2010

En general, y partiendo de la información suministrada por el actual estudio se pudo establecer la relación en todos los sectores (Figura 3-23), la dependencia entre la concentración de hierro con respecto al pH. A medida que el valor del pH disminuye la concentración de hierro en solución aumentó, con el subsiguiente aumento en la concentración de arsénico (Figura 3-24).

Sin embargo resulta interesante analizar el fenómeno que fue observado para las muestras provenientes de la quebrada Anocarire y en la junta Anocarire/Macuza, con pH en torno a 4,0. En este sector los niveles de arsénico total en sedimentos son muy bajos (<30 mg/kg), por lo cual aun cuando el pH de sus aguas se encuentra en el rango ácido no existen las condiciones para generar un incremento significativo en el contenido de arsénico en las aguas.

En el otro extremo se encuentra lo observado en las aguas de las lagunas de Amuyo. En estas lagunas el pH de las aguas es levemente ácido (6,80) sin embargo el contenido de arsénico en sus sedimentos es tan alto (58.000-100.000 mg/kg) que aún a este valor de pH es posible la disolución de pequeñas fracciones de hierro que liberan importantes cantidades de arsénico a la solución.

Figura 3-23: Relación entre el contenido de hierro total y pH en las aguas al interior de la cuenca de Camarones

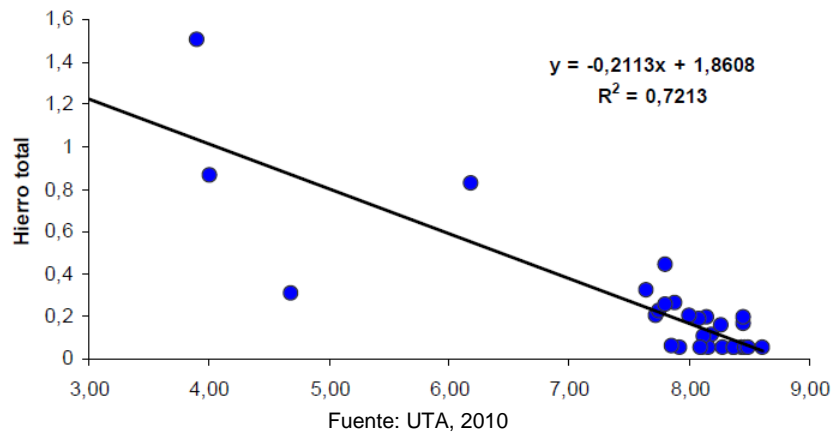
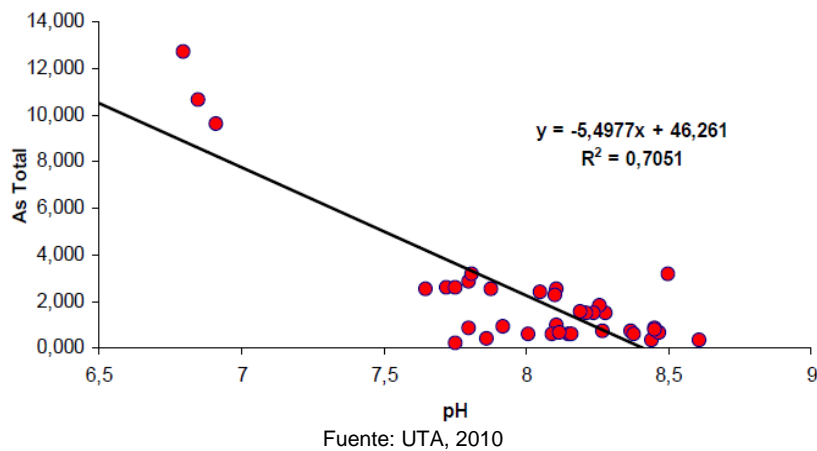


Figura 3-24: Relación entre el contenido de arsénico total y pH en aguas al interior de la cuenca de Camarones



3.6.3 Efectos del Embalse de Caritaya

Se pudo establecer que las aguas del río Caritaya a través de su paso por el embalse Caritaya, mantienen intactos sus niveles de sales y algunos elementos/especies importantes desde el punto de vista agronómico, como es el caso del boro, por lo que en la práctica el agua que se embalsaría tendría una calidad equivalente a la que posee el río en la actualidad.

La operación del embalse, además de acumular agua, permite el depósito de sedimentos arsenicados, siendo necesario el establecimiento de procesos de gestión relacionados al manejo de estos materiales.

Lo que ocurre con el embalse Caritaya, en donde mediante un proceso de remoción pasiva el arsénico es abatido con una eficiencia en torno al 24%. De acuerdo al agua que ingresa al embalse Caritaya (Challamanta), ésta posee una concentración de 3,13 mg/l As (con un caudal 395,6 l/s) y en la salida presentan una concentración de 2,52 mg/l As. Este proceso de remoción es atribuible al mayor tiempo de residencia, bajo condiciones de baja turbulencia, con que dispone el agua que ingresa durante su tránsito a través del embalse. Este hecho permite que el embalse se comporte como un sedimentador del material en suspensión presente en las aguas del río. Los principales elementos/especies removidos por este proceso de sedimentación son el arsénico y la sílice, junto a una disminución en el parámetro turbiedad (directamente relacionada con el material en suspensión).

No fue posible observar un efecto de abatimiento similar al experimentado por el arsénico en aquellos elementos altamente solubles y no asociados fuertemente al material en suspensión como es el caso del sodio, sulfatos y cloruros, reflejándose esto en un comportamiento prácticamente constante en la conductividad eléctrica del agua tanto al ingreso (3,30 mS/cm) como a la salida (3,38 mS/cm) del embalse.

Las especies de arsénico presentes en el agua son dependientes de algunos parámetros que son indicadores de la calidad de esta. Cambios en la calidad del agua que ingresa al embalse, así como cambios en el agua, afectarán la especiación del arsénico. Entre los principales factores responsables de controlar la especiación de arsénico se encuentran los siguientes:

1. **pH:** El pH es el principal parámetro regulador de la especiación del arsénico. A pH bajo, el arsénico se encuentra disuelto en el agua; mientras que a pH alto éste se encuentra mayormente unido al material particulado. Si el pH del agua que ingresa al embalse disminuye, el arsénico pasaría de la fase sólida a la fase acuosa, incrementando su concentración en dirección río abajo.
2. **Hierro:** El hierro en el sistema río se encuentra mayormente como oxihidróxidos que asocian el arsénico. Si disminuye el hierro particulado, ya sea por disminución del hierro total y/o una disminución en el pH, la disolución de estas partículas conlleva a la liberación del arsénico a la fase acuosa. Los parámetros pH, Fe y As están altamente relacionados; por lo que se debe ser cuidadoso en cuanto a las condiciones que afecten la variación de ellos.
3. **Condiciones anóxicas:** Es probable que durante su operación, en el fondo del embalse se generen condiciones anóxicas bajo condiciones naturales de carga orgánica o eventualmente por causas antrópicas. Esto favorecería el establecimiento de un ambiente reductor y carente de oxígeno, causando que el hierro presente como oxihidróxidos (fase sólida), que tiene inmovilizado el arsénico sobre sus superficies, se

reduzca a hierro soluble, liberando el arsénico a la fase acuosa, y generando una descarga de arsénico hacia aguas abajo.

3.7 DERECHOS DE AGUA Y ORGANIZACIONES DE USUARIOS

A continuación se presentan los derechos de aguas y organizaciones de usuarios que se encuentran en la cuenca del río Camarones, los que se presentan específicamente en las subcuencas “Río Camarones Antes Junta Quebrada de Chiza” y “Río Camarones Bajo”, es decir, a lo largo de todo el desarrollo del río Camarones y sus formadores, con excepción de la quebrada Chiza, en la que no se presentan ningún derecho constituido.

3.7.1 Derechos de Agua

En el estudio Diagnóstico y diseño definitivo Reparación embalse Caritaya realizado por SMI Ltda. en el año 2009, se realizó una exhaustiva revisión de los derechos en la zona, la que se presenta a continuación.

Debido a la configuración del valle y sus características climáticas, el sector alto de él presenta una alta tasa de captación en desmedro de la parte baja del valle, a la cual en muchas ocasiones prácticamente no le llega el agua. Por ello, en el año 1980 la DGA intervino el Río, llegando a un acuerdo entre las diferentes zonas, en el cual la sección alta y media del valle captaría el recurso desde las 6 de la mañana hasta las 7 de la tarde, todos los días. El resto del tiempo el recurso debe dejarse pasar hacia la sección baja del valle.

Por otra parte, el sistema de entrega de agua, desde el embalse Caritaya, se encuentra regulada por el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) mediante la resolución N° 594 del 24 de abril de 1990, en el que se establece:

- Las aguas embalsadas por el embalse Caritaya se dividen en 850 acciones o partes alícuotas.
- 244,72 (28,79%) corresponden a la Hacienda Camarones que a su vez se dividen en:
 - 204,52 acciones al sector de Camarones (canales Taltape, Humallane, O’Higgins, Del Pueblo, Las Casas, San Juan, Parcela y Maquita).
 - 10 acciones a los canales Porto Carrero y Chupisilca.
 - 30,2 acciones al sector de Conanoxa.
- 254,2 acciones (29,91%) a la Hacienda Cuya cuyo traspaso no se realizó, quedando en poder de la Sociedad Agrícola de Camarones.
- 351,08 acciones (41,30%) distribuidas entre pequeños propietarios ubicados en la sección alta y media del valle.

Sin embargo, se señala que los regantes captan desde el río Camarones sin distinguir entre recursos provenientes del río Ajatama o del río Caritaya, ni tampoco cuentan con una obra de medición ni obra de descarga, situación que hace imposible mantener un control sobre las tomas.

En cuanto a fuentes subterráneas, en los registros de BNA de la DGA, sólo se identificó un derecho de ejercicio *permanente y continuo* otorgado Agrícola Tarapacá Limitada por un caudal de 38 l/s.

Cabe señalar que en la parte baja de la cuenca del río Camarones, existe un total de 43,5 l/s de derechos otorgados de ejercicio *permanente y continuo*, a nombre de la comunidad indígena de Pachica. Las fuentes corresponden a las vertientes: Javire I, Huarachi grande y Caquena; y manatales: Javire II, Huarachi medio, Huarachi intermedio y Huarachi chico.

3.7.2 Organizaciones de Usuarios

El sector de estudio, cuenta con una Junta de Vigilancia del río Camarones y sus tributarios, la que se formó en el año 2011 y es presidida por el señor Solón Chávez Mujica (jvriocamarones@hotmail.com). Esta junta está integrada por 129 agricultores, los que conforman 24 comunidades de agua y 7 canales individuales.

De acuerdo a información dispuesta en el estudio Diagnóstico y diseño definitivo “Reparación embalse Caritaya” (SMI Ltda, 2009), a nivel de organización de canales, a fecha del informe habían constituidas 36 comunidades de aguas, de los 60 canales que componen el sistema. El valle se encuentra dividido en 3 secciones de acuerdo con el siguiente detalle:

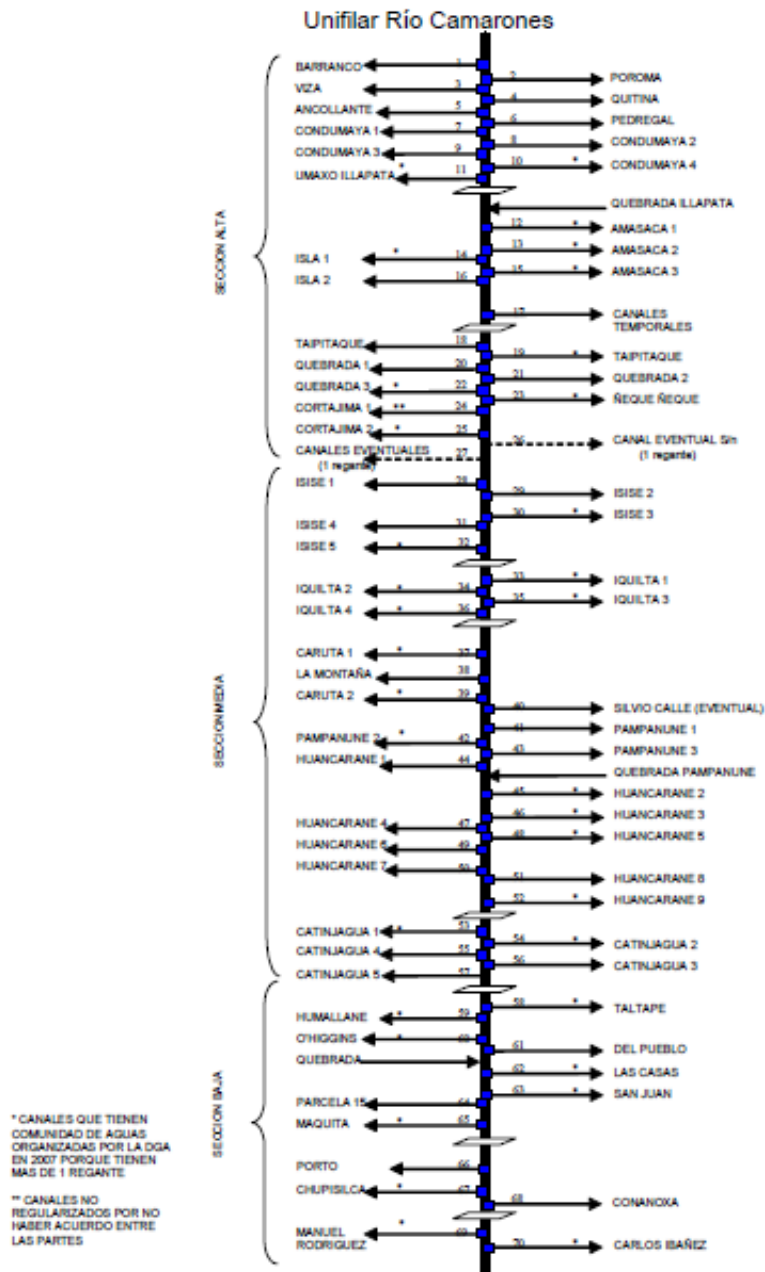
- Sección Alta. La sección alta se encuentra totalmente regada y los regantes se comprometieron a captar agua únicamente entre las 06:00 y las 19:00 horas. Cuenta con 27 canales, 8.994 acciones con 450 l/s aproximadamente, entre los que destaca Umaxo-Illapata con 52 regantes. Incluye los sectores:
 - Condumaya (10 canales),
 - Illapata- Esquiña (7 canales),
 - Quebradas (10 canales).

- Sección Media. La parte alta de la sección media se encuentra totalmente regada y posee las mismas condiciones de la sección alta. Sin embargo, la parte baja de la sección media no posee condiciones y debido a que se trata de predios pequeños con abastecimiento de agua suficiente no están interesados en organizarse. Por otra parte los canales se están redibujando continuamente debido a los cambios en el curso del estero. La sección media cuenta con 30 canales, 9.942 acciones con aproximadamente 450 l/s en los sectores:

- Isise (5 canales),
 - Iquilta (4 canales),
 - Caruta (4 canales),
 - Pampanune (3 canales),
 - Huancarane (9 canales),
 - Catinjagua (5 canales),
 - Camarones (8 canales)
- Sección Baja. Los sectores de Chupisilca y Portocarrero poseen pocos regantes, por lo que se someten a las mismas condiciones de captación de la sección alta. En cuanto a los sectores bajos, existen dos grandes regantes, Cooperativa Camarones y Sociedad Agrícola Camarones, la primera debe cerrar sus captaciones los días viernes a las 18 horas y reanudarlas los días lunes a las 6 para asegurar el abastecimiento a la Sociedad Agrícola Camarones. La sección baja cuenta con 13 canales, 18.016 acciones y 520 L/s. en los sectores:
 - Chupisilca y Portocarrero (2 canales),
 - Conanoxa (1 canal),
 - Cuya (2 canales).

En la figura siguiente se presenta un diagrama unifilar de los canales en el río Camarones.

Figura 3-25: Diagrama unifilar del río Camarones.



Fuente: estudio Diagnóstico y diseño definitivo Reparación embalse Caritaya. SMI Ltda. 2009.

4 INFORMACIÓN LEVANTADA EN TERRENO

Para la confección de un modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca de estudio se programaron distintas campañas en terreno para levantar información que complemente la existente.

Primero se realizó una campaña en diciembre de 2013 cuyos objetivos fueron conocer el terreno para planificar los trabajos futuros y complementar los antecedentes geológicos recopilados con una inspección de campo.

Se planificaron además tres campañas durante los meses de enero, marzo y mayo de 2014, para la medición de aforos en distintos puntos de la cuenca de estudio, y muestreo hidroquímico e isotópico. Por efectos del invierno altiplánico, la campaña fallida del mes de enero no se pudo realizar debido a los cortes de caminos provocados por las lluvias. En la Tabla 4-2 se presentan los puntos aforados y muestreados durante ambas campañas.

En paralelo, durante el mes de marzo se realizó la campaña geofísica a cargo de la empresa Geodatos S.A.I.C.

A fines de abril la empresa Teknoriego realizó una visita de terreno para levantar la información topográfica del eje hidráulico aguas arriba y debajo de la localización presupuestada para la estación fluviométrica.

Tabla 4-1: Resumen de campañas de terreno

Nombre en el texto	Objetivo	Mes de realización
Campaña Geológica	Descripción geológica	Diciembre 2013
Campaña fallida	Aforos y muestreo hidroquímico	Enero 2014
Primera Campaña	Aforos y muestreo hidroquímico	Marzo 2014
Segunda Campaña	Aforos y muestreo hidroquímico	Mayo
Campaña Geofísica	NanoTEM y Tomografía	Marzo y Abril 2014
Campaña Estación fluviométrica	Topografía eje hidráulico	Abril 2014

Tabla 4-2: Puntos de aforo y muestreo hidroquímico e isotópico durante la primera y segunda campaña en terreno

Punto	Ubicación	Fecha	Aforo	Hidroquímica	Isotopos	Muestra Filtrada	UTM Este WGS84 (m)	UTM Norte WGS84 (m)
1	Río Caritaya (R.C). aguas arriba confluencia con Qda. Asintoveco	25/03/2014	AF-1	RC-1	-	-	468.788	7.895.133
	R. C. aguas abajo confluencia con Qda. Asintoveco	28/05/2014					468.511	7.895.309
2	R.C. entre Qda. sin nombre y Qda. Asintoveco	25/03/2014	AF-2	-	-	-	468.933	7.894.390
		28/05/2014		RC-18			468.934	7.894.398
3	R.C. entre lag. de Amuyo y Qda. sin nombre	25/03/2014	AF-3	-			471.033	7.892.484
		28/05/2014		RC-17			471.253	7.892.515
4	R.C. aguas abajo Qda. sin nombre	25/03/2014	AF-4	RC-3			470.496	7.892.667
		28/05/2014					470.501	7.892.675
5	R.C. entre Qda. sin nombre y Qda. Asintoveco	25/03/2014	AF-5	RC-4			469.553	7.893.640
		28/05/2014					469.416	7.893.818
6	Arroyo (A) Veco antes de confluencia con R.C	26/03/2014	AF-6	RC-5	RC-5	RC-6*	473.925	7.893.023
		27/05/2014					473.923	7.893.019
7	R.C antes de confluencia con a. Veco	26/03/2014	AF-7	RC-7	-		473.864	7.892.955
		27/05/2014			RC-7		473.870	7.892.851
8	R.C después de confluencia con a. Veco	26/03/2014	AF-8	RC-8			473.643	7.892.953
		27/05/2014					473.643	7.892.954
9	R.C. entre lag. de Amuyo y Qda. sin nombre	26/03/2014	AF-9	RC-9	RC-9	RC-10	472.454	7.892.592
		27/05/2014			-	-	472.643	7.892.568
10	R.C. aguas debajo de lag. de Amuyo	26/03/2014	AF-10	RC-12			472.978	7.892.681
		27/05/2014		-			473.141	7.892.742
11	Cabecera a. Mulliri	27/03/2014	AF-11	RC-14			482.450	7.897.538
12	Cabecera a. Veco	28/03/2014	AF-12	RC-15			482.212	7.898.886
13	Afluente menor a R.C. aguas abajo lag. De Amuyo	26/03/2014	-	RC-11			472.979	7.892.561
		27/05/2014	AF-13*				472.804	7.892.557

Tabla 4-2: Puntos de aforo y muestreo hidroquímico e isotópico durante la primera y segunda campaña en terreno

Punto	Ubicación	Fecha	Aforo	Hidroquímica	Isotopos	Muestra Filtrada	UTM Este WGS84 (m)	UTM Norte WGS84 (m)
14	Qda. Sin nombre antes de confluencia con R.C.	25/03/2014	-	RC-2			470.563	7.892.378
		28/05/2014	AF-14*				470.551	7.892.341
15	Aguas abajo salida de embalse Caritaya	29/05/2014	AF-15	RC-20	-	-	464.323	7.897.679
16	R.C. aguas abajo confluencia de a. Mulluri y Qda. Caritaya	27/03/2014	-	RC-18	-	-	477.436	7.890.512
17	Laguna de Amuyo Roja	26/03/2014	-	LAG-1	LAG-1	LAG-2	473.393	7.892.780
		27/05/2014				-	473.352	7.892.755
18	Laguna de Amuyo Verde	26/03/2014	-	LAG-3	-	-	473.390	7.892.649
		27/05/2014					473.373	7.892.656
19	Laguna de Amuyo Amarilla	26/03/2014	-	LAG-4	-	-	473.325	7.892.827
		27/05/2014					473.336	7.892.827

*R.C.: Río Caritaya

4.1 CAMPAÑA DE AFORO

La estimación de los caudales pasantes se realizó por medio de la metodología denominada “área-velocidad”. El caudal de una sección de aforo se calcula por medio de la sumatoria del producto entre el área de un conjunto de subsecciones (1 a N) y la velocidad promedio de escurrimiento en la subsección correspondiente. La sección a aforar debe cumplir, en lo posible, con los siguientes aspectos según las Normas Hidrométricas de la DGA (1978): Para mayor detalle de la metodología aplicada ver Anexo C.

En la Tabla 4-3 y las Figura 4-1 y Figura 4-2 se presenta la ubicación de los puntos aforados en la primera y segunda campaña en terreno. Para cada punto aforado se estimó además un error en la medición de caudal debido a la precisión del instrumento utilizado ($\pm 0,1$ m/s), multiplicado por el área de cada sección.

Con el objetivo de evaluar la variabilidad espacial y temporal dentro del período que dura el estudio, entre ambas campañas se repitieron puntos (10), otros se midieron sólo en la primera campaña (AF-11 y AF-12) y algunos se agregaron para la segunda (AF-13, AF-14 y AF-15). Los aforos AF-13 y AF-14 no son escurrimiento permanentes y para la primera campaña no fue posible aforar por no contar con suficiente caudal; para la segunda campaña tampoco fluía con un caudal suficiente para aforar con precisión. Pese a esto, la estimación de caudal sirve para efecto del análisis hidroquímico de la cuenca.

El aforo AF-15 corresponde a la medición de caudal aproximadamente 150 m aguas abajo de la salida del embalse Caritaya. La importancia de este cálculo radica en la válvula de salida del embalse no está operativa por lo que hasta ahora no se tenía una estimación del caudal de salida del embalse (365 ± 109 l/s).

Para cada punto aforado se estimó además un error en la medición de caudal debido a la precisión del instrumento utilizado ($\pm 0,1$ m/s), multiplicado por el área de cada sección.

Tabla 4-3: Puntos de aforo en la primera y segunda campaña.

Aforo	Fecha	UTM Este WGS84 (m)	UTM Norte WGS84 (m)	Área (m ²)	Velocidad media (m/s)	Caudal (l/s)	Error (l/s)
AF-1	25/03/14	468.788	7.895.133	1,13	0,55	624	113
	28/05/14	468.511	7.895.309	0,65	0,54	353	65
AF-2	25/03/14	468.933	7.894.390	0,74	0,63	471	74
	28/05/14	468.934	7.894.398	0,81	0,54	435	81
AF-3	25/03/14	471.033	7.892.484	0,62	0,91	564	62
	28/05/14	471.253	7.892.515	0,91	0,50	453	91
AF-4	25/03/14	470.496	7.892.667	0,70	0,71	493	70
	28/05/14	470.501	7.892.675	0,66	0,66	438	66
AF-5	25/03/14	469.553	7.893.640	0,73	0,78	569	73
	28/05/14	469.416	7.893.818	0,64	0,66	424	64
AF-6	26/03/14	473.925	7.893.023	0,57	0,21	118	57
	27/05/14	473.923	7.893.019	0,55	0,23	126	55
AF-7	26/03/14	473.864	7.892.955	0,72	0,54	389	72
	27/05/14	473.870	7.892.851	0,54	0,57	308	54
AF-8	26/03/14	473.643	7.892.953	0,84	0,63	525	84
	27/05/14	473.643	7.892.954	0,82	0,60	494	82
AF-9	26/03/14	472.454	7.892.592	0,80	0,52	412	80
	27/05/14	472.643	7.892.568	1,22	0,48	589	122
AF-10	26/03/14	472.978	7.892.681	1,02	0,50	505	102
	27/05/14	473.141	7.892.742	1,04	0,64	664	104
AF-11	27/03/14	482.450	7.897.538	0,19	0,60	114	19
AF-12	28/03/14	482.212	7.898.886	0,16	0,56	90	16
AF-13*	27/05/14	472.804	7.892.557	0,03	0,05	2	3
AF-14*	28/05/14	470.551	7.892.341	0,04	0,58	23	4
AF-15	29/05/14	464.323	7.897.679	1,09	0,34	365	109

Figura 4-1: Puntos aforados en la primera y segunda campaña en terreno

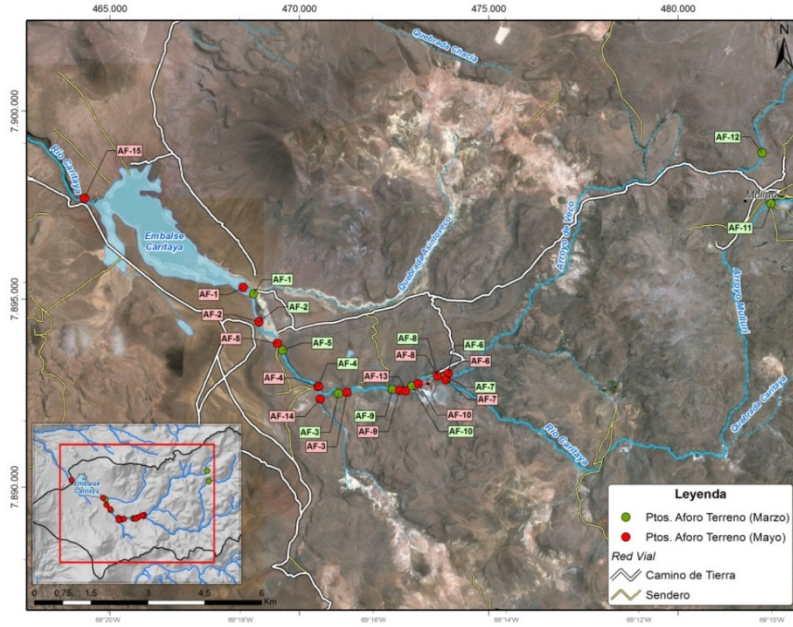
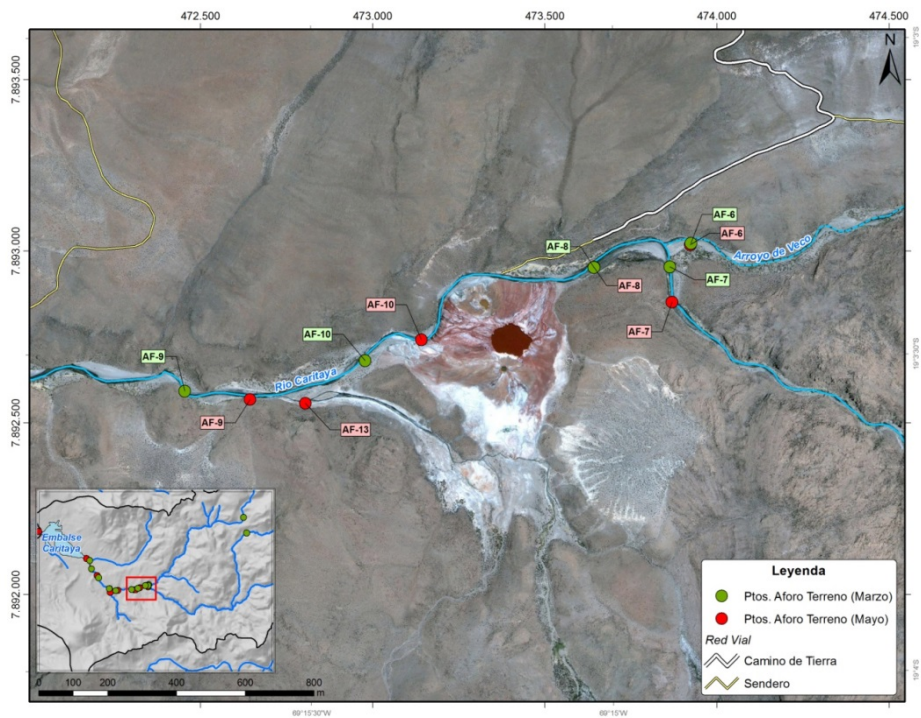


Figura 4-2: Puntos aforados en la primera y segunda campaña en terreno en torno a las lagunas de Amuyo



4.2 MUESTREO HIDROQUÍMICO E ISOTÓPICO

Durante las campañas de muestreo se tuvo cuidado de eliminar o minimizar cualquier cambio en la concentración de los parámetros a determinar, que pueda ser producido por el proceso mismo de muestreo. Además, se minimizaron los cambios durante el intervalo entre el muestreo y el análisis para que estos sean mínimos. El procedimiento utilizado se detalla en el Anexo C.

Los datos hidroquímicos corresponden a muestras obtenidas mayoritariamente aguas arriba del embalse Caritaya en dos campañas de terreno. En la primera campaña se tomaron 19 muestras y en la segunda 16 de cursos de aguas superficiales, lagunas y el embalse, las cuales fueron analizadas por el laboratorio ALS. Además, se recolectaron 6 muestras para análisis de isótopos estables de $\delta \text{‰}^2\text{H}$ y $\delta \text{‰}^18\text{O}$, focalizadas entorno a las lagunas de Amuyo las cuales fueron enviadas al laboratorio de Isótopos Medio Ambientales de la CCHEN. En términos generales las muestras no fueron filtradas *in situ*, con excepción de los puntos RC-5, Lag-1 y RC-9 para los cuales en la primera campaña se recolectó una muestra filtrada y otra sin filtrar para análisis hidroquímico. El objetivo de la duplicidad de muestras fue investigar la capacidad de transportar metales y metaloides en disolución entorno a la descarga de las lagunas de Amuyo.

Durante las campañas de terreno, en cada uno de los puntos de muestreo, se registró la fecha y hora de muestreo en la cual se midieron los siguientes parámetros físico químicos básicos: temperatura en grados Celsius, pH, Potencial de Oxido-Reducción (ORP en mV), y Conductividad Eléctrica (EC) en mS/cm.

En la Tabla 4-4 se presenta un resumen de los puntos de muestreo hidroquímico detallando sus coordenadas, muestras analizadas y ubicación referencial.

Tabla 4-4: Resumen puntos de muestreo hidroquímico

Puntos de muestreo	X	Y	Campaña 1	Campaña 2	Isotopía	Ubicación
RC-1	468.788	7.895.133	x	x		Río Caritaya llegando al embalse
RC-2	470.563	7.892.378	x	x		Quebrada secundaria
RC-3	470.496	7.892.667	x	x		Río Caritaya (curso inferior)
RC-4	469.553	7.893.640	x	x	x	Río Caritaya (curso inferior)
RC-5 (RC-6 filtrada)	473.925	7.893.023	x			Arroyo de Veco (cerca de río Caritaya)
RC-6	473.925	7.893.023	x	x	x	Arroyo de Veco (cerca de río Caritaya)
RC-7	473.864	7.892.955	x	x	x	Río Caritaya (curso superior)
RC-8	473.643	7.892.953	x	x		Río Caritaya (justo antes de lagunas)
RC-9	472.454	7.892.592	x	x	x	Río Caritaya (después de lagunas)
RC-10 (RC-9 filtrada)	472.454	7.892.592	x			Río Caritaya (después de lagunas)
RC-11	472.979	7.892.561	x	x		Río Caritaya (después de lagunas)
RC-12	472.978	7.892.681	x			Río Caritaya (después de lagunas)
RC-13	477.436	7.890.512	x			Río Caritaya (curso superior)
RC-14	482.450	7.897.538	x			Arroyo Mulluri

Tabla 4-4: Resumen puntos de muestreo hidroquímico

Puntos de muestreo	X	Y	Campaña 1	Campaña 2	Isotopía	Ubicación
RC-15	482.212	7.898.886	x			Arroyo de Veco (curso superior)
RC-16	473.141	7.892.742		x		Río Caritaya (después de lagunas)
RC-17	471.253	7.892.515		x		Río Caritaya (curso inferior)
RC-18	468.934	7.894.398		Solo in situ		Río Caritaya (curso inferior)
RC-19	464.617	7.897.585		x		Desagüe embalse Caritaya
RC-20	464.323	7.897.679		x		Desagüe embalse Caritaya
LAG-1	473.393	7.892.780	x	x	2 x	Lagunas de Amuyo (roja)
LAG-2 (LAG-1 filtrada)	473.393	7.892.780	x			Lagunas de Amuyo (roja)
LAG-3	473.390	7.892.649	x	x		Lagunas de Amuyo (verde)
LAG-4	473.325	7.892.827	x	x		Lagunas de Amuyo (amarilla)

* muestras filtradas in situ

4.3 CAMPAÑA GEOFÍSICA

A petición de Geohidrología Consultores Ltda. Geodatos S.A.I.C. realizó un estudio de resistividad mediante las técnicas de Transiente Electromagnético (TEM), en el modo NanoTEM, y Tomografía Eléctrica. Las estaciones se distribuyen en 5 perfiles de NanoTEM y 2 perfiles de Tomografía, situados en el sector de las lagunas de Amuyo, región de Arica y Parinacota, comuna de Camarones, Chile.

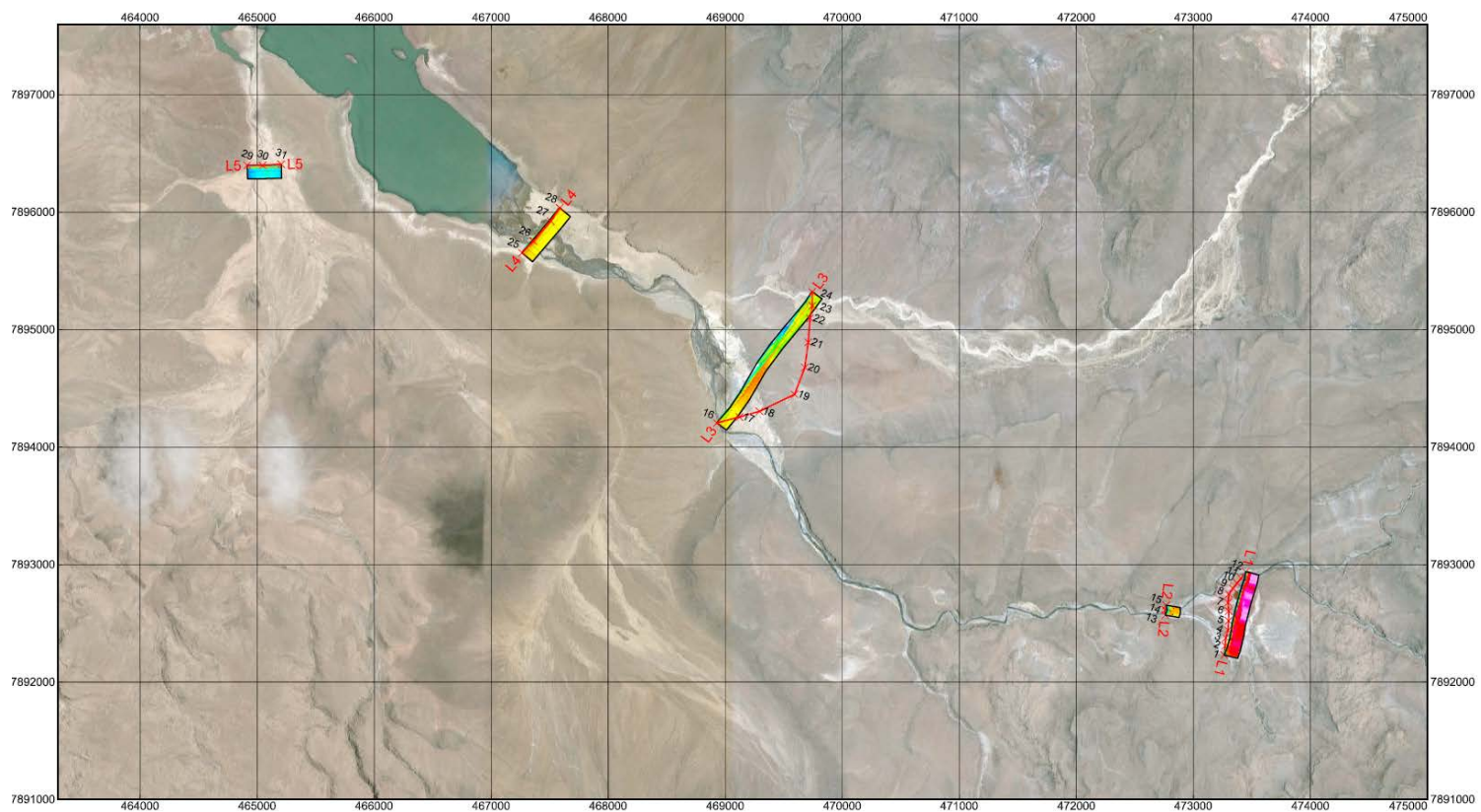
El objetivo del estudio es determinar las características geoelectricas de la sub-superficie que permitan obtener información de la estratigrafía, del nivel freático y principalmente de estructuras geológicas que pudieran condicionar la dinámica de aguas subterráneas.

4.3.1 Registro de datos NanoTEM

Se registró un total de 31 estaciones NanoTEM, distribuidos en 5 perfiles, con espaciamentos irregulares que varían entre los 50 y los 300 metros de separación entre sondeos que conforman un mismo perfil. El trabajo de terreno se ejecutó durante los días 25 y 26 de Marzo del 2014.

Las coordenadas y cotas se presentan en Sistema Coordinado Proyectado, DATUM WGS 84, método de proyección UTM Zona 19 Sur. La topografía fue medida en terreno mediante GPS no diferencial, la que no presenta gran diferencia con las cotas obtenidas del modelo digital de elevación del terreno SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), misma cota que es empleada por el software Google Earth en estas latitudes. Esta última referencia topográfica, será la que se empleará para las 5 secciones resultantes de la modelación de resistividad versus profundidad para cada una de las 31 estaciones NanoTEM.

Figura 4-3: Trazas de perfiles y perfiles NanoTEM abatidos



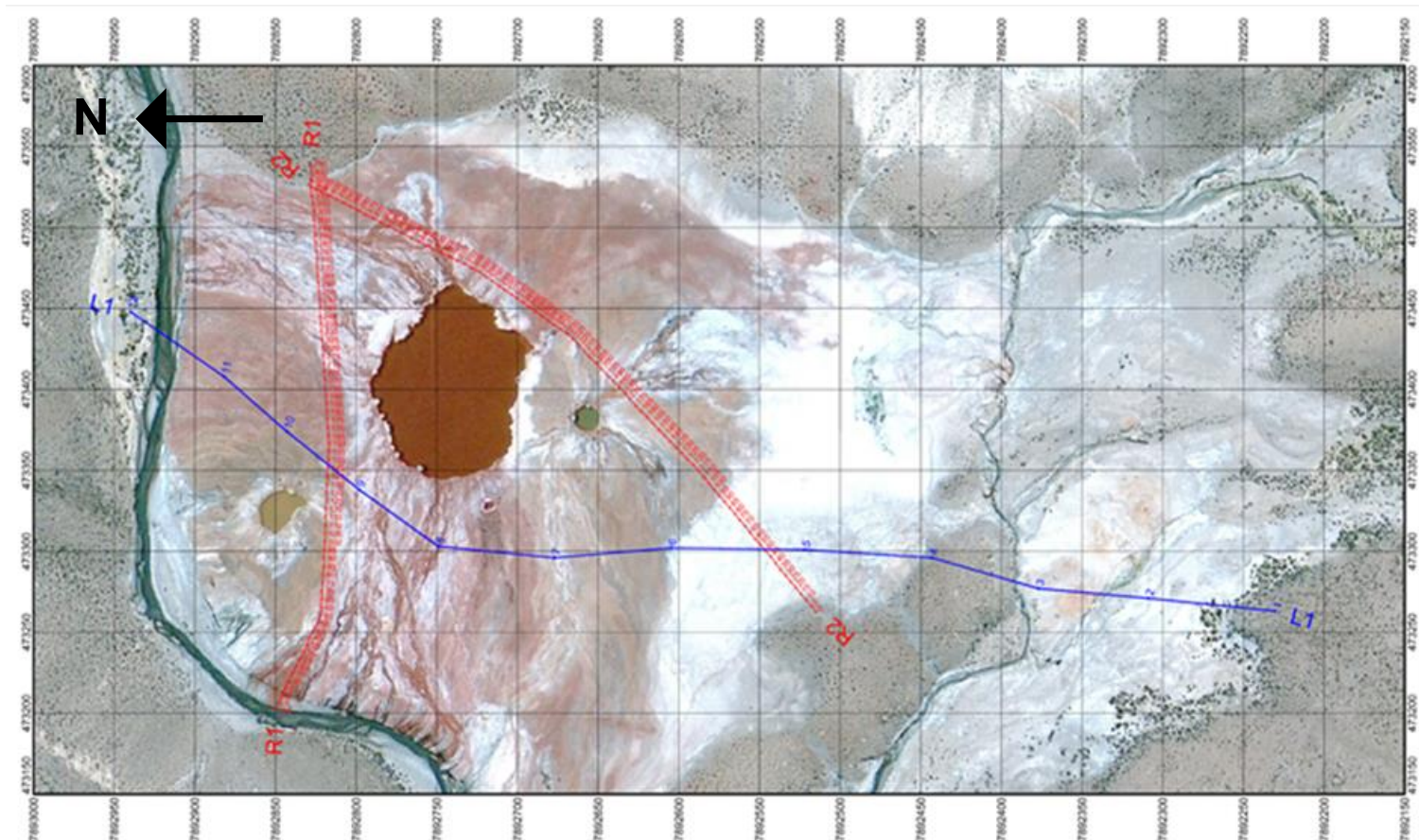
4.3.2 Registro de datos Tomografía Eléctrica

A raíz del terremoto acontecido el 1 de Abril de 2014 en el norte de Chile, las mediciones de Tomografía Eléctrica debieron postergarse debido a la imposibilidad de acceder a la zona de las lagunas de Amuyo.

Por dichas razones, y atendiendo al plazo del estudio, se logró terminar la campaña de terreno geofísica pendiente en un único día, el 5 de Mayo del 2014, por dos Operadores Geofísicos, a cargo de grupos de trabajo de 3 personas cada uno, movilizados en 2 vehículos 4x4 doble cabina y provistos de radios de intercomunicación, sistemas GPS, teléfonos satelitales, y equipo de apoyo general.

Se midió 760 m (nominales) en dos líneas de Resistividad, con los arreglos Dipolo-Dipolo y Gradiente, con longitud dipolar mínima de 5 m y 8 niveles de profundidad. Las coordenadas del perfil fueron tomadas con GPS diferencial (con cotas posteriormente ajustadas al promedio SRTM de la zona), y se presentan en el sistema UTM DATUM WGS84, Zona 19 S. El Anexo D presenta las coordenadas de las líneas de Tomografía Eléctrica ejecutadas en el sector de laguna Roja.

Figura 4-4: Se indica traza perfil L1 NanoTEM y trazas de perfiles de R 1 y R2 de Tomografía Eléctrica.



5 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

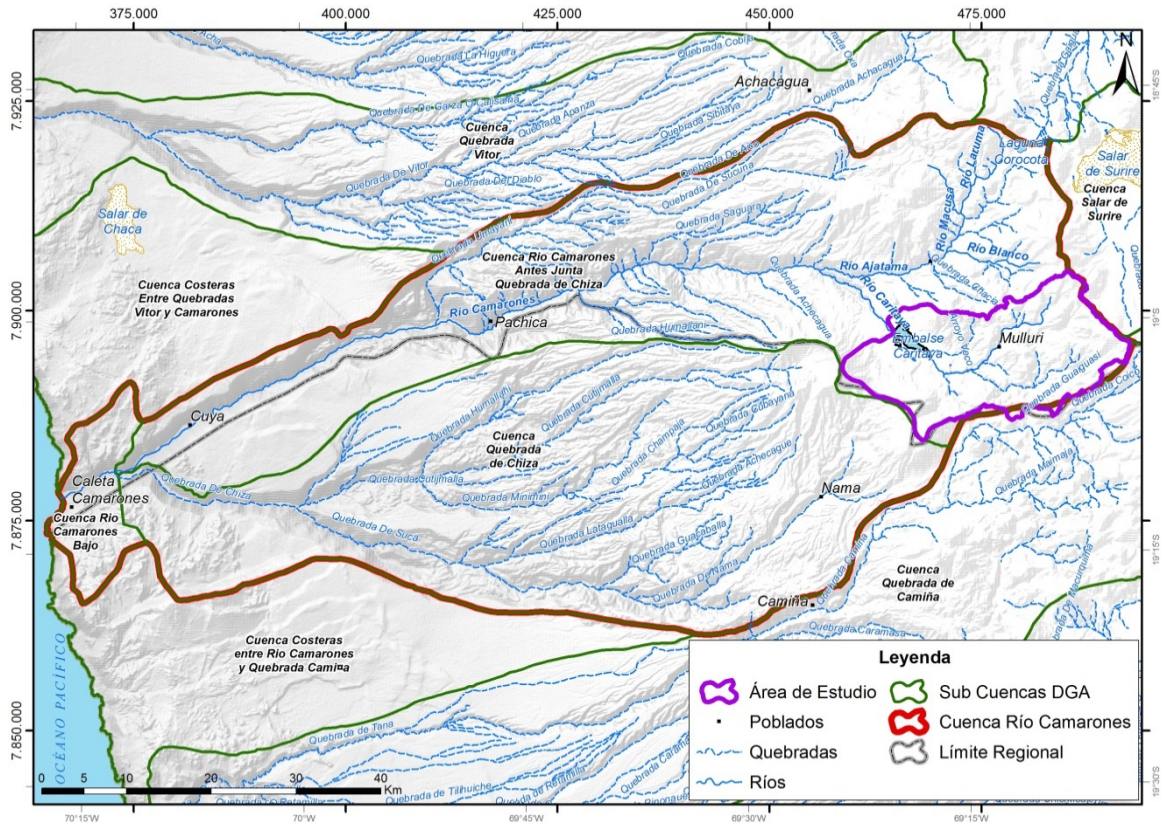
5.1 DESCRIPCIÓN HIDROGRÁFICA

Como se mencionó anteriormente, la zona de estudio corresponde a la subcuenca aportante al embalse Caritaya y se localiza en la cabecera de la cuenca del río Camarones. A continuación se describe brevemente las características de la cuenca del río Camarones y posteriormente se entrega un detalle de la zona de estudio.

La cuenca del Río Camarones drena un área total de 4.681 km² y limita con las siguientes cuencas: Al norte con quebrada Vítor o Codpa y Costeras entre quebradas Vítor y Camarones; al sur limita con la quebrada de Tana o Camiña y al oriente limita con el salar de Surire (Ver Figura 5-1).

De acuerdo a Niemeyer (1980), la hoya del río Camarones tiene un régimen permanente, sin embargo, en sequías prolongadas suelen sumirse sus aguas en las arenas en su curso inferior. Su principal curso de agua corresponde al río Camarones, el que nace en Arepunta de la confluencia de los ríos Ajatama y Caritaya. El río Camarones desarrolla su curso en dirección suroeste, en el que recibe los aportes intermitentes de las quebradas Saguara y Umayani, ambas por el norte, y de la quebrada de Chiza por el sur. Finalmente después de recorrer aproximadamente 97 km en un valle estrecho aluvional con un ancho variable entre 25 y 700 m, desemboca en el océano pacífico en el sector denominado caleta Camarones.

Figura 5-1: Red hidrográfica de la cuenca de Camarones



Fuente: Elaboración propia

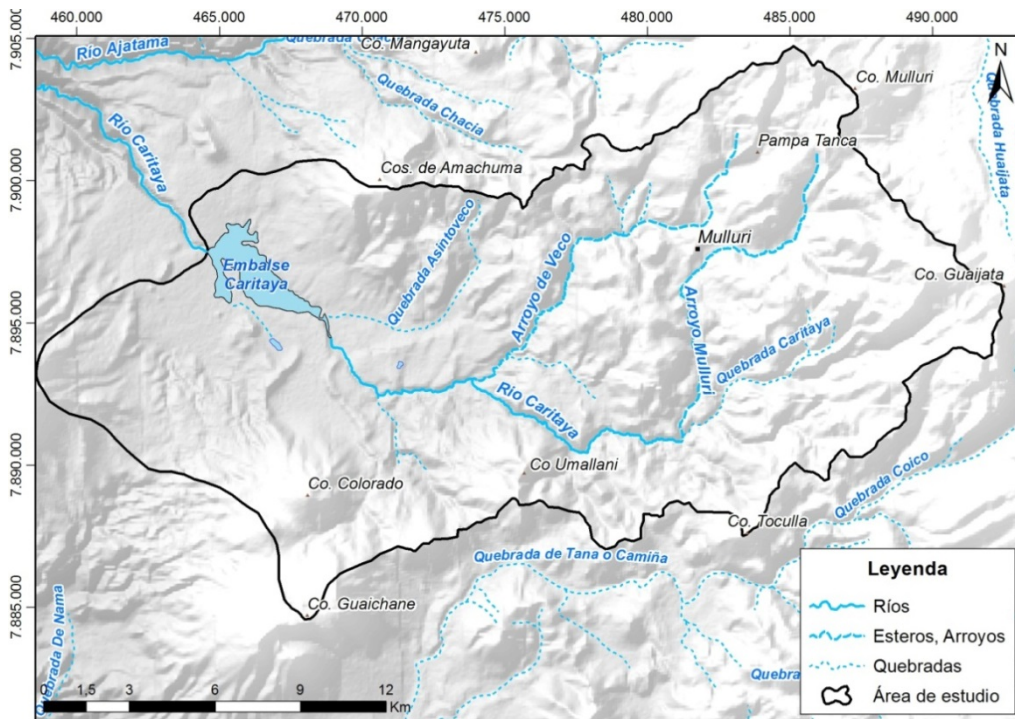
La cuenca aportante al embalse Caritaya corresponde a una subcuenca del río Camarones ubicada en la comuna de Camarones, en el límite sur de la región de Arica y Parinacota. Tienen una superficie de 362 km² y se ubica entre los paralelos 18°55' y 19°7' de latitud sur.

Cuenta con una obra de regulación, el embalse Caritaya (capacidad de 42.171.000 m³) construido en la década del 30 y reparado el año 2009 por la Dirección Obras Hidráulicas (DOH).

El embalse es recargado por el río Caritaya, el cual corresponde al cauce principal de la subcuenca que drena de oriente a poniente y sus nacientes se localizan en el margen oeste de los volcanes Mulluri y Guaijata (Figura 5-2). El río Caritaya nace en la unión de los cauces permanentes de la quebrada Caritaya con el arroyo Mulluri. Su principal tributario corresponde al arroyo Veco (Yustacaba), el cual confluye a 350 m aguas arribas del paso del río Caritaya por las lagunas de Amuyo. Las lagunas de Amuyo es una fuente de recarga de aguas hidrotermales al río. Un tributario de menor importancia corresponde a la quebrada Asintoveco la cual presenta un régimen esporádico. Otros afluentes permanentes, los cuales

no presentan nombres, se localizan en el margen sur de la subcuenca y cuyas nacientes se encuentran en los cerros Colorado, Umallani y Toculla (Figura 5-2). El arroyo Veco y Mulluri nacen desde el volcán Mulluri en la Pampa de Tana (Figura 5-2). Las nacientes de la quebrada de Caritaya se localizan en el volcán Guaijata (Figura 5-2).

Figura 5-2: Subcuenca aportante al embalse Caritaya



Fuente: Elaboración propia

Las alturas en la subcuenca están comprendidas entre 3.642 msnm, en la desembocadura del embalse Caritaya, y sobre los 5.200 msnm al este de la cuenca, en los cerros Mulluri (5.247 msnm) y Guaijata (5.341 msnm), con una altura media de 4.066 msnm (Tabla 5-1 y Figura 5-3). De la curva hipsométrica estimada para la cuenca (Figura 5-4), se obtiene que la altura media es igual a 4066 msnm.

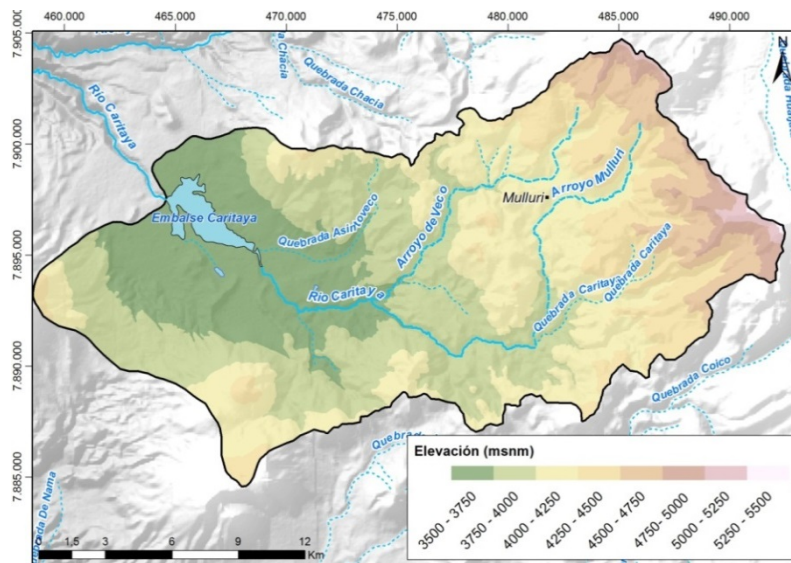
Tabla 5-1: Altitud media y área por bandas de altitud

Altitud msnm	Altitud media msnm	Área km ²	Área Acumulada	
			km ²	%
3.642-3.750	3694	77,0	77,0	21
3.750-4.000	3900	105,7	182,8	51
4.000-4.250	4141	93,8	276,6	76
4.250-4.500	4378	48,6	325,1	90
4.500-4.750	4631	24,1	349,3	97

Tabla 5-1: Altitud media y área por bandas de altitud

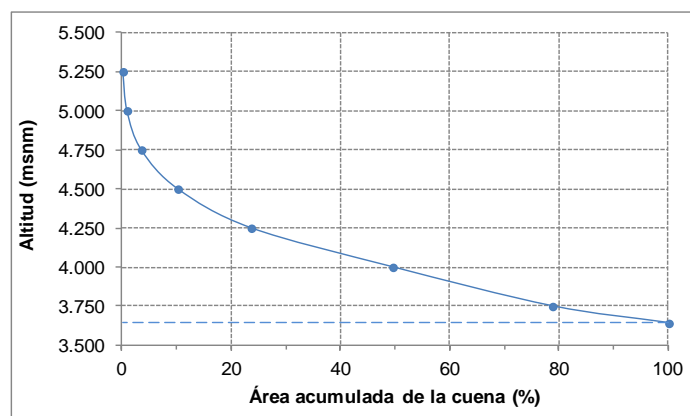
Altitud msnm	Altitud media msnm	Área km ²	Área Acumulada	
			km ²	%
4.750-5.000	4847	9,5	358,7	99
5.000-5.250	5068	2,8	361,5	100
5.250-5.341	5263	0,2	361,7	100
Cuenca	4066	361,7		

Figura 5-3: Áreas hipsográficas de la cuenca



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-4: Curva hipsométrica de la cuenca



Fuente: Elaboración propia

5.2 PRECIPITACIONES

Para la caracterización de las precipitaciones en la cuenca aportante al embalse Caritaya, se utilizaron seis estaciones pluviométricas dependientes de la Dirección General de Aguas (DGA). Estas seis estaciones se encuentran fuera de la cuenca de estudio pero su análisis permite comprender el régimen de precipitaciones en el largo plazo en la cuenca. En la cuenca existe una estación con registro de precipitaciones, Caritaya Embalse con información entre los años 1932 a 1936 y los años 1964 y 1965, pero su corta data no es suficiente para aportar en la caracterización.

El análisis de las precipitaciones medias (mensual y anual) se realizó con el objeto de comprender el comportamiento temporal y espacial de ellas, y determinar la ocurrencia de períodos secos y húmedos analizando la serie de precipitaciones de largo plazo. Además se caracterizaron las precipitaciones máximas lo cual incluyó análisis de frecuencia en las estaciones seleccionadas para determinar precipitaciones para distintos períodos de retorno.

5.2.1 Precipitaciones medias

Como se mencionó, la caracterización de las precipitaciones medias se realizó utilizando registros de precipitación mensual de seis estaciones meteorológicas y pluviométricas ubicadas fuera de la cuenca de estudio (fuente DGA). La Tabla 5-2 presenta el listado de estaciones pluviométricas utilizadas, donde se incluye código BNA, coordenadas UTM, altitud y período con registro de información. La ubicación de las estaciones se presenta en la (Figura 5-5). La Figura 5-6 presenta un gráfico de barras con la disponibilidad de información histórica de precipitaciones mensuales en las estaciones meteorológicas seleccionadas. Todas las estaciones seleccionadas tienen estadísticas suficientemente extensas lo que permite caracterizar de buena manera las precipitaciones en el largo plazo. Salvo la estación Pumire suspendida el año 1991, todas las estaciones se encuentran vigentes.

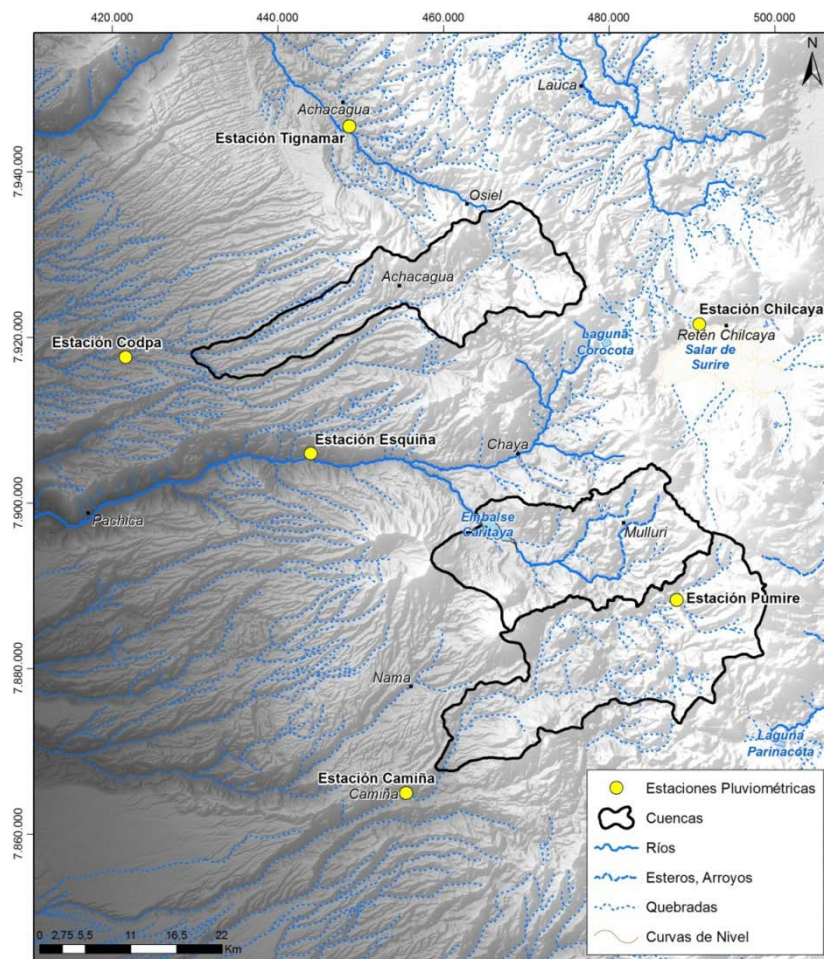
Para aquellos meses sin registros de precipitaciones se intentó realizar un relleno de información a partir de una o dos estaciones con información disponible. Para esto se calculó el coeficiente de determinación (R^2) entre estaciones considerando sólo aquellos meses con registros de agua caída en el mes; cuando el coeficiente es mayor a 0,7, se considera que la variable precipitación está bien representado por la estación utilizada para rellenar. Dada la variabilidad espacial de las precipitaciones debido al carácter convectivo de éstas en la región altiplánica (Aceituno, 1996), no se encontró una buena correlación entre las estaciones analizadas (Tabla 5-3) por lo que no se realizó el relleno de información.

Tabla 5-2: Estaciones pluviométricas utilizadas para la caracterización de las precipitaciones medias

Estación	Código BNA	UTM Norte (WGS84) m	UTM Este (WGS84) m	Altitud msnm	Información
Ticnamar	01300008-5	7.945.479	448.622	3.230	1968–2013
Chilcaya	01030003-7	7.921.595	490.906	4.270	1971–2013
Codpa	01410012-1	7.917.611	421.619	1.870	1961–2013
Esquiña	01502007-5	7.905.973	443.983	2.170	1975–2013
Pumire	01610003-K	7.888.269	488.142	4.150	1962–1991
Camíña	01611001-9	7.864.961	455.471	2.500	1971–2013

Fuente: Elaboración propia

Figura 5-5: Ubicación de las estaciones pluviométricas



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-6: Información disponible en las estaciones pluviométricas

Nº	ESTACIÓN	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2010	11-'13
1	Ticnamar	[Blue]	[Blue]	[Blue]	[Blue]	[Blue]	[Blue]
2	Chilcaya	[Blue]	[Blue]	[Blue]	[Blue]	[Blue]	[Blue]
3	Codpa	[Blue]	[Blue]	[Blue]	[Blue]	[Blue]	[Blue]
4	Esquiña	[Blue]	[Blue]	[Blue]	[Blue]	[Blue]	[Blue]
5	Pumire	[Blue]	[Blue]	[Blue]	[Blue]	[Blue]	[Blue]
6	Camiña	[Blue]	[Blue]	[Blue]	[Blue]	[Blue]	[Blue]

■ : Año con menos de 7 meses de información ■ : Año con 10 a 11 meses con información
■ : Año con 7 a 9 meses con información ■ : Año con información completa

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-3: Coeficiente de determinación (R^2) entre series mensuales de precipitación

	Ticnamar	Chilcaya	Codpa	Esquiña	Pumire	Camiña
Ticnamar	-	0,51	0,18	0,27	0,27	0,12
Chilcaya	0,51	-	0,02	0,14	0,14	0,06
Codpa	0,18	0,02	-	0,42	0,14	0,19
Esquiña	0,27	0,14	0,42	-	0,38	0,27
Pumire	0,27	0,14	0,14	0,38	-	0,37
Camiña	0,12	0,06	0,19	0,27	0,37	-

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5-4 se presentan los estadígrafos principales que caracteriza la precipitación anual en cada una de las estaciones. Para la estimación de estos parámetros se consideraron aquellos años que cuentan con al menos nueve meses con información. Se observa un alto rango en las precipitaciones medias anuales (entre 15,2 mm y 279,8 mm) principalmente debido a la influencia que tiene la altura en la ocurrencia de éstas. También de la Tabla 5-4 se deduce una alta variabilidad interanual en cada estación, representada en la desviación estándar, posiblemente debido a la influencia del fenómeno Oscilación del Sur El Niño (ENOS) y a la actividad e influencia de los vientos en la zona altiplánica (Garreaud y Aceituno, 2001).

Tabla 5-4: Precipitaciones anuales en las estaciones seleccionadas

Estación	Años de registro	Pp media mm	Desv. Estándar mm	Pp máxima mm	Pp mínima mm
Ticnamar	41	125,9	99,3	537,9	0,0
Chilcaya	28	279,8	164,8	747,4	69,0
Codpa	51	15,2	15,9	69,5	0,0
Esquiña	38	43,5	40,3	172,5	0,0
Pumire	28	240,8	198,5	671,1	4,5
Camiña	36	37,7	50,8	169,1	0,0

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 5-5 presenta los valores de las precipitaciones medias mensuales para cada una de las estaciones. Las precipitaciones medias mensuales se calcularon considerando el promedio de precipitaciones para cada mes incluyendo sólo los meses que contaran con más de 20 días con registros.

La Tabla 5-6 presenta un resumen de la precipitación estacional, en la cual se observa que durante el período de diciembre a marzo ocurren sobre el 79% de las precipitaciones anuales. El comportamiento estacional de la precipitación responde al fenómeno climático de Invierno Altiplánico, registrándose fuertes precipitaciones a grandes alturas durante los meses más cálidos.

Tabla 5-5: Precipitaciones medias mensuales para cada estación (mm)

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Ticnamar	47,2	40,2	22,3	1,1	0,4	0,5	0,9	1,6	1,2	0,2	0,5	13,0	125,9
Chilcaya	91,8	82,4	54,5	9,1	1,1	1,3	2,5	1,8	1,9	2,2	6,0	32,9	279,8
Codpa	5,3	7,3	1,5	0,1	0,0	0,0	0,6	0,3	0,1	0,0	0,0	0,5	15,2
Esquiña	13,0	18,8	7,6	0,7	0,0	0,0	0,6	0,9	0,3	0,1	0,0	1,8	43,5
Pumire	75,1	88,3	33,2	5,5	1,4	1,0	0,9	1,5	5,4	1,1	1,8	18,2	240,8
Camiña	9,8	19,3	6,9	1,6	0,0	0,3	1,6	0,5	0,0	0,1	0,0	0,8	37,7

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-6: Precipitación en estación húmeda y seca

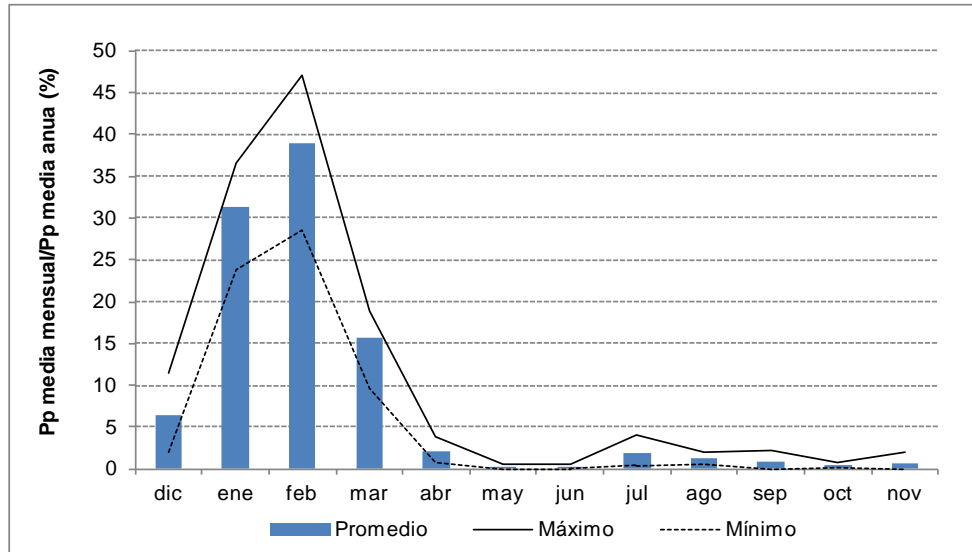
Estación	Pp anual mm	Pp dic-mar (Estación húmeda)		Pp dic-mar (Estación seca)	
		mm	%	mm	%
Ticnamar	125,9	107,0	85,0	18,9	15,0
Chilcaya	279,8	221,3	79,1	58,6	20,9
Codpa	15,2	13,4	88,4	1,8	11,6
Esquiña	43,5	39,0	89,8	4,5	10,2
Pumire	240,8	204,3	84,8	36,5	15,2
Camiña	37,7	32,5	86,4	5,1	13,6

Fuente: Elaboración propia

La Figura 5-7 muestra la distribución de la precipitación mensuales para la subcuenca del embalse Caritaya como porcentaje medio de agua caída en cada mes con respecto al total anual. Se observa una fuerte estacionalidad, representada en los meses de diciembre a marzo que concentran el mayor porcentaje de lluvias respecto del resto del año, siendo el mes de febrero el que registra la mayor precipitación.

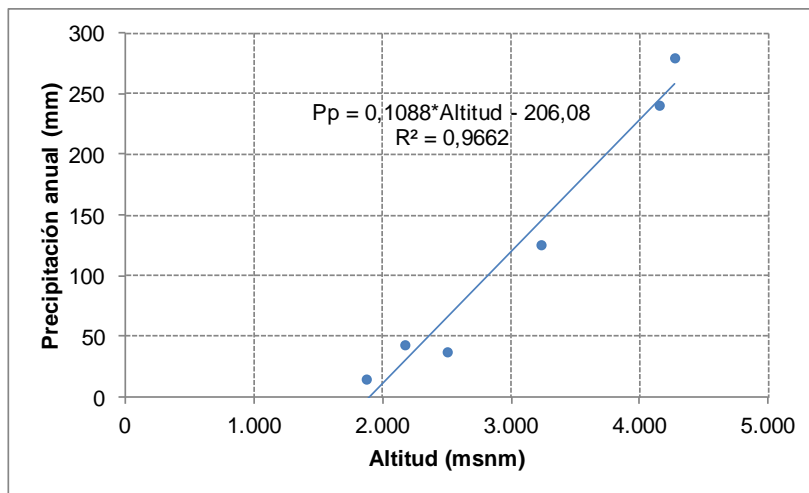
Con el objetivo de representar la variación que experimenta la precipitación con la altitud se determinó un gradiente de precipitaciones representativo del área de estudio por medio de una regresión lineal (Figura 5-8). Para esto se utilizaron las precipitaciones anuales estimadas en cada una de las seis estaciones. Se calculó que el incremento de precipitaciones es de 13,9 mm por cada 100 m de altitud con un coeficiente de correlación igual a 0,97. A partir de este gradiente, y considerando que la altura promedio de la cuenca es igual en 4.066 msnm, se estima que la precipitación media anual para la cuenca aportante al embalse Caritaya es de 236,3 mm.

Figura 5-7: Distribución medio mensual de las precipitaciones para la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia

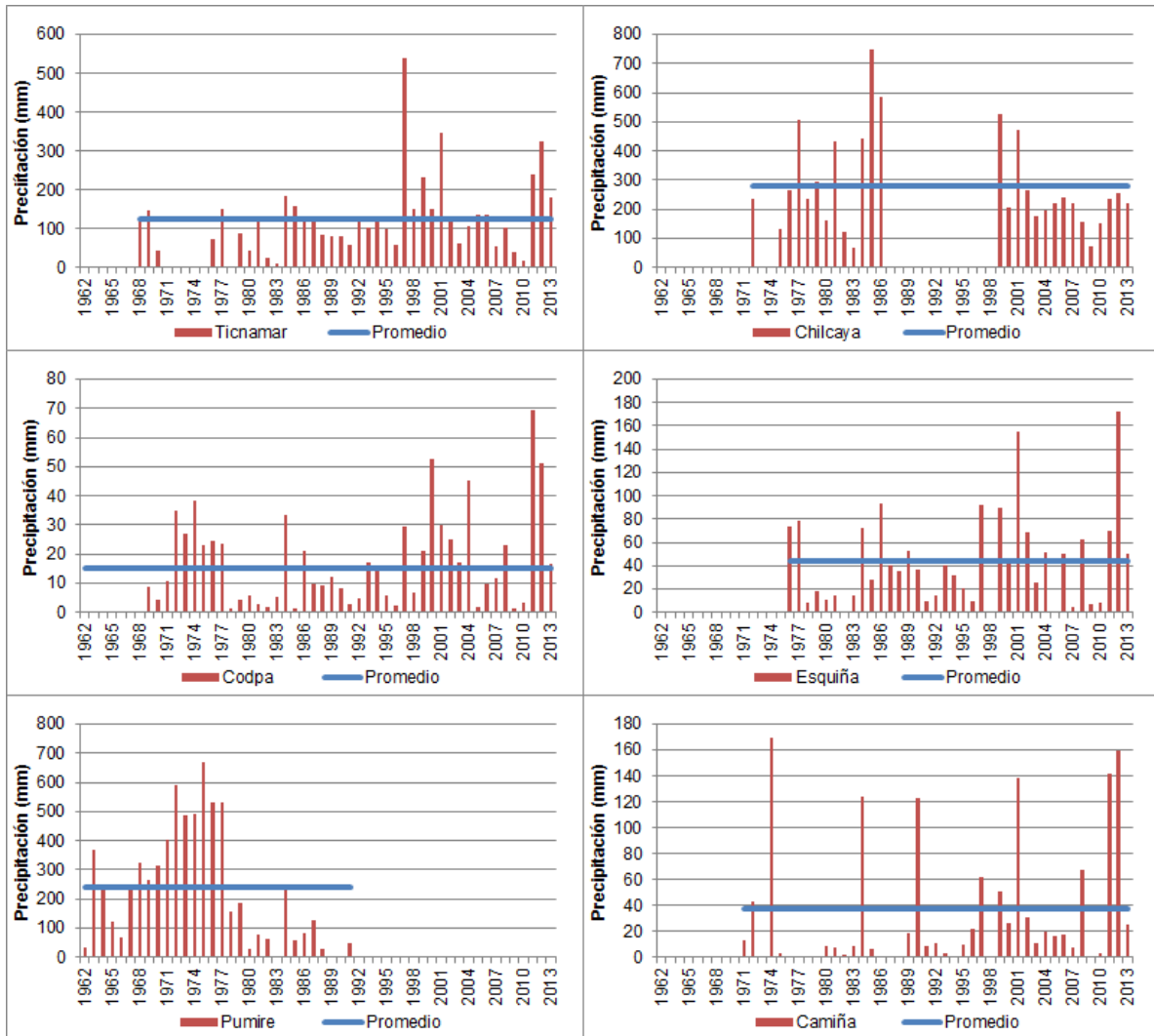
Figura 5-8: Gradiente de precipitación media anual para la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia

Dada la alta variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones no es posible definir con certeza periodos húmedos y secos para la cuenca aportante al embalse Caritaya. Pese a esto, de las series anuales de precipitación de cada estación (Figura 5-9) es posible reconocer algunas tendencias. Por ejemplo se observan periodos húmedos (o con precipitaciones sobre la media) entre los años 1971-1977, 1997-2001, y 2011-2013. En cambio se observan periodos secos (o con precipitaciones bajo la media) entre los años 1978-1983, 1988-1996 y 2004-2010.

Figura 5-9: Serie anual de precipitaciones de cada estación pluviométrica utilizada



Fuente: Elaboración propia

5.2.2 Precipitaciones máximas

Para el análisis de las precipitaciones máximas en la cuenca de estudio se recopilaron, graficaron y determinaron estadígrafos principales para los registros disponibles de precipitaciones máximas en 24, 48 y 72 horas en las mismas seis estaciones utilizadas para la caracterización de precipitaciones medias (Tabla 5-2). En la Figura 5-10 se presentan un gráfico de barras con la disponibilidad de información en las estaciones seleccionadas. En la Tabla 5-7 se presentan los estadígrafos principales para estas series: precipitación máxima, promedio y la desviación estándar de las series históricas de precipitaciones máximas para cada tormenta.

Figura 5-10: Información disponible de precipitaciones máximas

Nº	ESTACIÓN	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2012
1	Ticnamar	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████
2	Chilcaya	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████
3	Codpa	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████
4	Esquiña	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████
5	Pumire	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████
6	Camiña	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-7: Estadígrafos de precipitaciones máximas para 24, 48 y 72 horas

Estación	Altitud msnm	24 hrs			48 hrs			72 hrs		
		Máx. mm	Prom. mm	DS mm	Máx. mm	Prom. mm	DS mm	Máx. mm	Prom. mm	DS mm
Ticnamar	3.230	67,0	18,8	12,2	104,0	25,9	18,3	154,0	31,5	25,3
Chilcaya	4.270	77,0	24,4	12,9	87,0	34,8	16,1	92,0	42,0	18,0
Codpa	1.870	29,5	5,9	6,4	35,0	7,5	7,8	39,0	8,2	8,6
Esquiña	2.170	31,0	9,6	6,7	38,0	13,4	9,8	46,0	15,7	11,6
Pumire	4.150	48,0	19,9	11,9	88,0	29,9	19,3	127,5	38,4	26,9
Camiña	2.500	95,5	11,6	18,2	115,0	14,9	22,7	115,0	16,2	22,9

Fuente: Elaboración propia

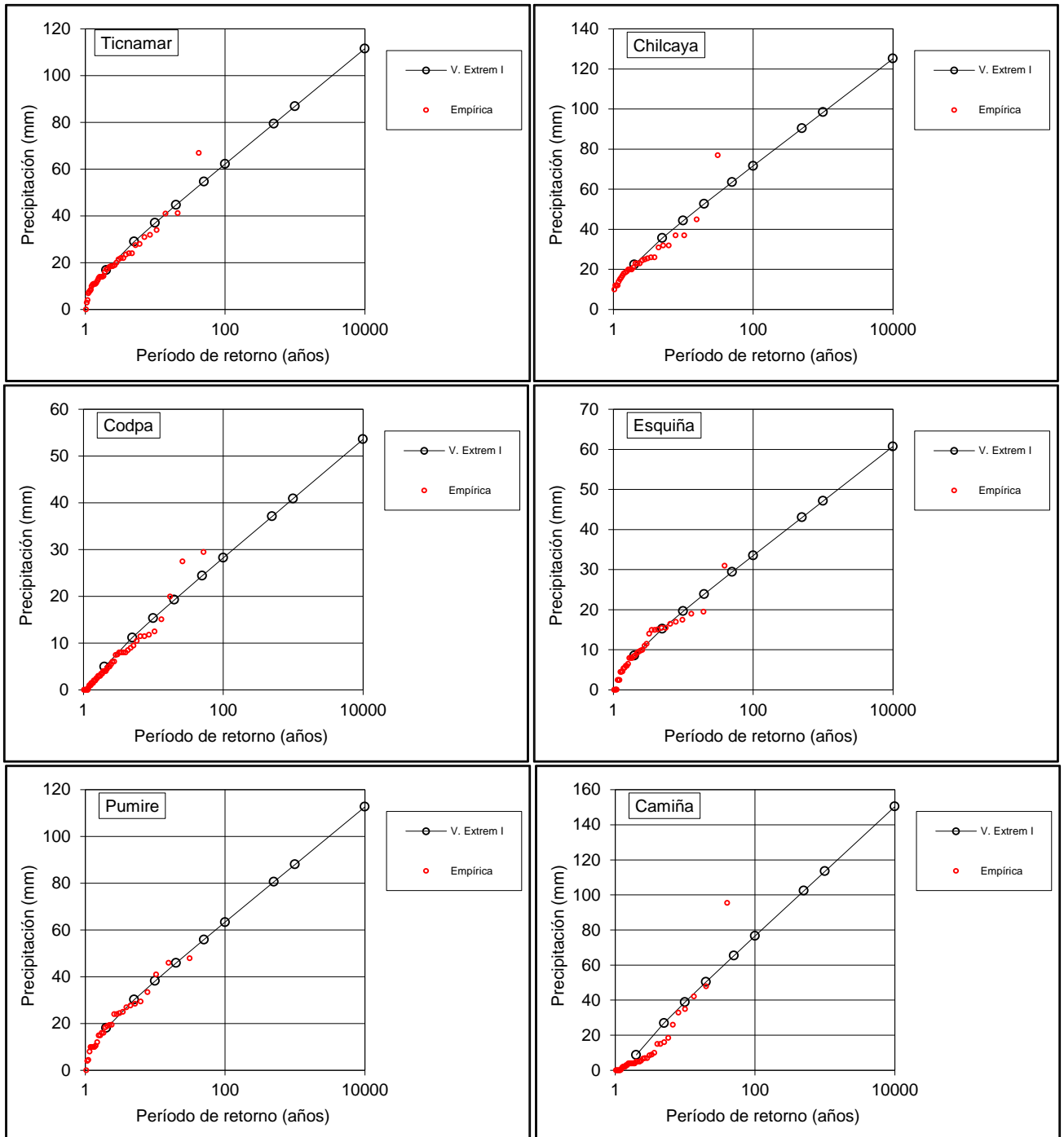
Para estimar las precipitaciones máximas en 24 horas asociadas a distintos períodos de retorno se realizó un análisis de frecuencia en cada una de las estaciones. Por simplicidad de aplicación y buena representación de eventos extremos, se seleccionó el modelo de Valores Extremos Tipo I para el análisis. Se estimaron los parámetros mediante el método de momentos. En la Tabla 5-8 y la Figura 5-11 se presentan los resultados de este análisis.

Tabla 5-8: Precipitaciones máximas en 24 horas (mm) para distintos períodos de retorno mediante Valores Extremos Tipo I

T (años)	Ticnamar	Chilcaya	Codpa	Esquiña	Pumire	Camiña
2	17	22	5	9	18	9
5	29	36	11	15	30	27
10	37	44	15	20	38	39
20	45	53	19	24	46	50
50	55	63	24	29	56	65
100	62	72	28	34	63	77
500	79	90	37	43	81	102
1000	87	98	41	47	88	114
10000	112	125	54	61	113	150

Fuente: Elaboración propia

Figura 5-11: Análisis de frecuencia para precipitaciones máximas en 24 horas. Ajuste para Valores Extremos Tipo I



Fuente: Elaboración propia

Para verificar la hipótesis de distribución, se aplicó el test de bondad de Kolmogorov-Smirnov para un nivel de significancia del 95%. Para todas las estaciones, salvo en Camiña, no se rechaza la hipótesis de distribución, por lo que no entrega evidencia suficiente como para decir que la muestra no se ajusta a una distribución de Valores Extremos Tipo I.

A partir de los resultados, las precipitaciones máximas en 24 horas más representativas de la cuenca de estudio serían las registradas en la estación Pumire. Pese a que sus registros fueron suspendidos el año 1991, la serie tiene una extensión de 30 años lo que permite caracterizar las precipitaciones máximas en el largo plazo. Además su cercanía a la cuenca y la similitud entre su altitud (4.150 msnm) con la altitud media de la cuenca aportante al embalse Caritaya (4.066 msnm), permiten suponer una buena representatividad de esta variable.

5.3 EVAPORACIÓN POTENCIAL

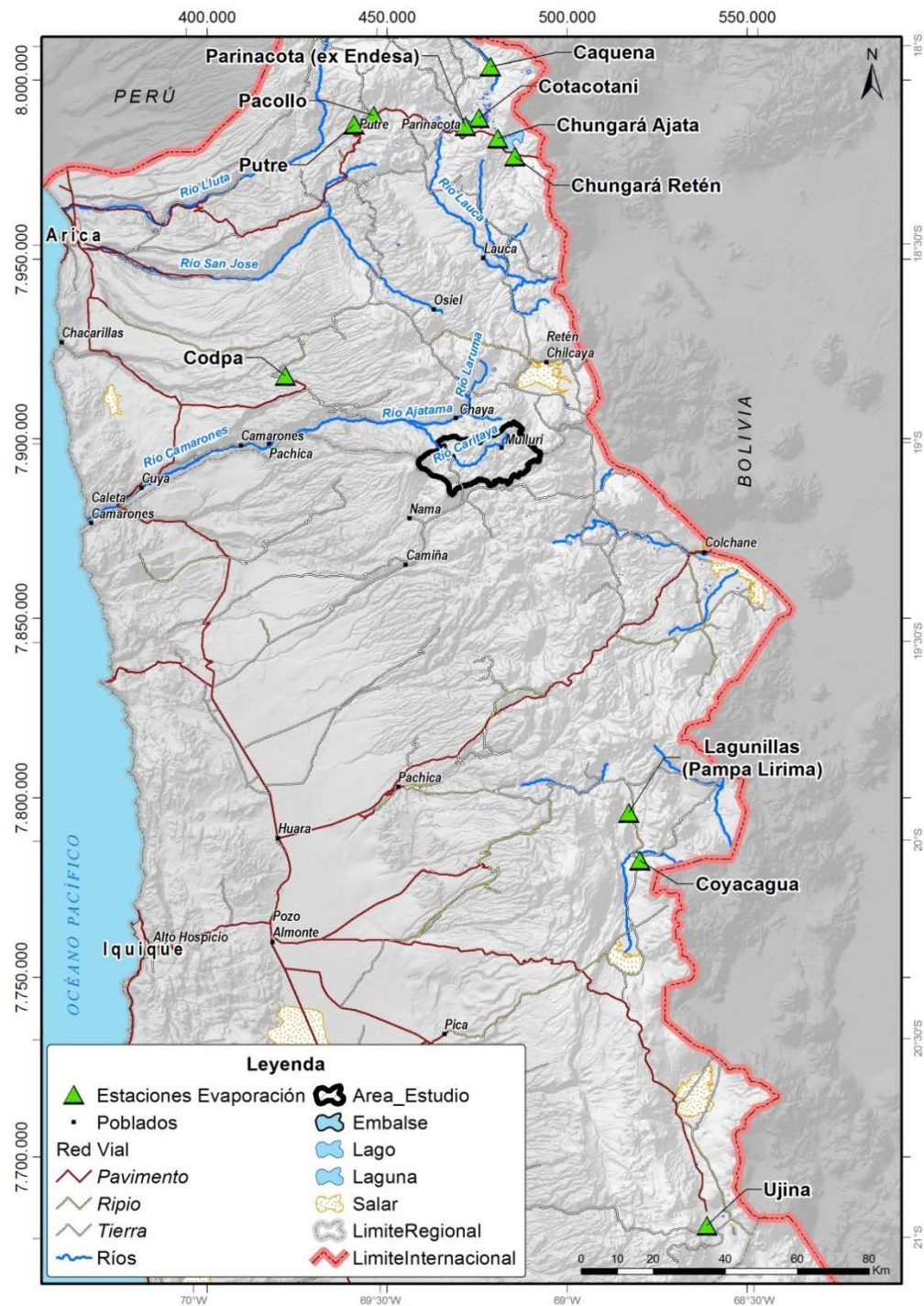
Debido a los escasos registros de evaporación en la zona, para la caracterización de la evaporación potencial en la cuenca aportante al embalse Caritaya, se consideraron 11 estaciones pertenecientes a la DGA a nivel regional, que incluyen estaciones de la región de Arica y Parinacota y Tarapacá. En la Tabla 5-9 se presenta el listado de estaciones meteorológicas utilizadas, donde se incluye código BNA, coordenadas UTM, altitud y período con registro de información, y en la Figura 5-12 se presenta su ubicación. Para el análisis se consideró la evaporación mensual de aquellos meses con al menos 11 días de registro. La Figura 5-13 presenta la disponibilidad de información en las estaciones seleccionadas.

Tabla 5-9: Estaciones meteorológicas utilizadas para la caracterización de la evaporación potencial

Estación	Código BNA	UTM Norte (WGS84) m	UTM Este (WGS84) m	Altitud msnm	Información
Caquena	01001005-5	8.003.785	478.656	4.400	1978-1990
Pacollo	01202009-0	7.990.138	446.149	4.185	1984-1993
Cotacotani	01020014-8	7.989.459	475.382	4.550	1960-1989
Putre	01202010-4	7.987.664	440.751	3.545	1982-2009
Parinacota (ex Endesa)	01020017-2	7.987.180	471.625	4.420	1960-1997
Chungará Ajata	01010010-0	7.983.749	480.616	4.585	1984-2011
Chungará Retén	01010007-0	7.978.713	485.378	4.570	1963-1972
Codpa	01410012-1	7.917.546	421.622	1.870	1968-2012
Lagunillas (Pampa Lirima)	01730018-0	7.795.860	517.064	4.020	1982-2011
Coyacagua	01050007-9	7.782.608	520.130	4.013	1964-2012
Ujina	01080001-3	7.680.944	538.722	4.300	1973-1978

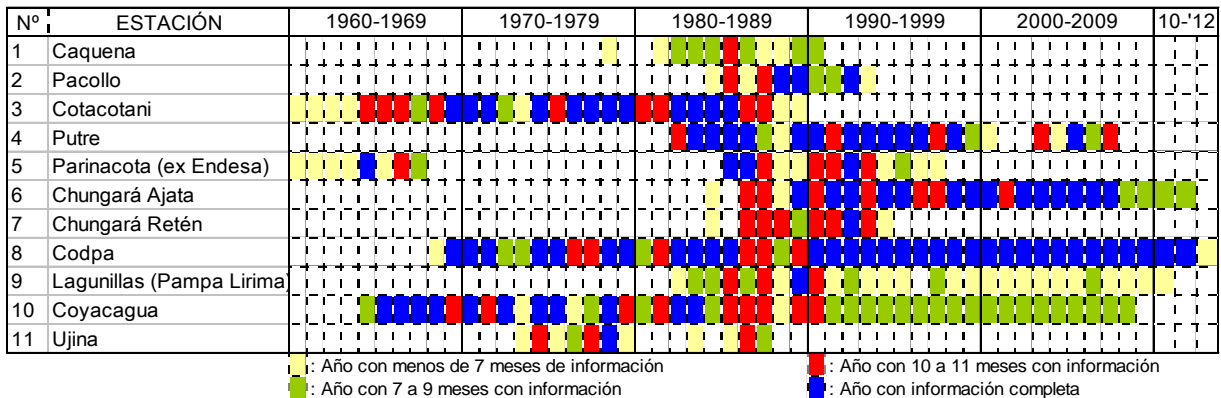
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-12: Ubicación de estaciones meteorológicas utilizadas para el análisis de evaporación potencial



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-13: Información disponible de evaporación potencial



En la Tabla 5-10 se presenta la evaporación potencial media mensual estimada en las estaciones seleccionadas. A escala regional se estima una evaporación potencial media anual de 5,4 mm/día, con un rango entre 4,3 mm/día y 6,4 mm/día. Como promedio regional, la mayor tasa de evaporación se presenta entre octubre y diciembre y la menor evaporación entre mayo y julio.

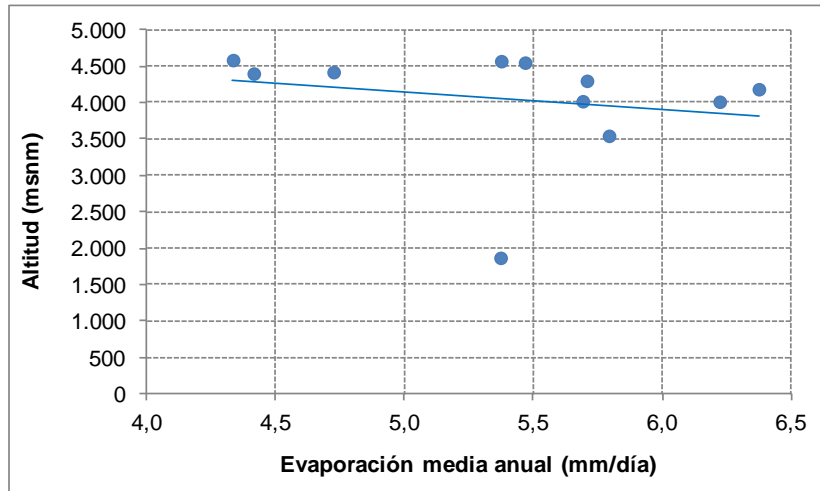
Tabla 5-10: Evaporación media mensual neta (mm/día)

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
Caquena	4,2	4,6	3,9	4,0	4,1	2,9	3,3	3,8	4,9	5,2	6,0	5,8	4,4
Pacollo	5,6	5,6	7,2	5,5	5,9	5,7	6,2	6,4	7,3	7,1	6,8	7,3	6,4
Cotacotani	4,4	4,1	4,2	5,3	5,3	4,9	5,0	5,5	6,3	7,1	7,4	6,1	5,5
Putre	5,3	5,0	5,2	6,0	5,5	5,3	5,3	5,8	6,1	6,5	6,6	6,6	5,8
Parinacota	4,6	4,7	4,3	4,6	4,2	4,0	3,9	4,7	5,0	5,8	5,8	5,1	4,7
Chungará Ajata	3,8	4,1	4,2	4,6	4,1	3,9	3,5	3,9	4,7	5,1	5,4	4,8	4,3
Chungará Retén	4,6	4,0	4,5	5,5	5,6	5,4	5,4	5,1	5,4	6,5	6,7	5,8	5,4
Codpa	6,3	5,6	5,5	4,6	4,0	3,6	3,9	4,6	5,7	6,7	6,9	6,9	5,4
Lagunillas	6,5	5,9	6,0	5,4	4,5	3,5	3,4	5,1	5,4	7,6	7,6	7,4	5,7
Coyacagua	6,5	6,3	6,6	6,2	5,1	4,6	4,5	5,3	6,2	7,4	8,0	8,1	6,2
Ujina	4,9	3,5	5,0	5,5	5,6	5,9	5,9	5,8	6,3	6,2	7,0	6,9	5,7
Prom	5,1	4,9	5,2	5,2	4,9	4,5	4,6	5,1	5,8	6,5	6,7	6,4	5,4

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5-14 se muestra el comportamiento de la evaporación media anual (mm/día) con la altura a nivel regional. Aunque no existe una correlación clara entre las estaciones seleccionadas, se observa una pequeña reducción de la evaporación con la altura, de manera que en promedio se puede estimar una disminución de 4,1 mm/día por cada 1.000 metros de altitud (gradiente de - 0,41 mm/día cada 100 metros).

Figura 5-14: Gradiente de evaporación potencial media anual (mm/día) con respecto a la altura.



Fuente: Elaboración propia

A partir de la estimación del gradiente de evaporación potencial y la altura media de la cuenca presentada en la Tabla 5-1, se estima que la evaporación potencial media anual para la cuenca aportante al embalse Caritaya es de 5,3 mm/día, equivalente a 1.937 mm/año.

5.4 ANÁLISIS DE CAUDALES

Dado que en la subcuenca aportante al embalse Caritaya no existen registros fluviométricos, el análisis de caudales para la subcuenca de estudio se realizó a partir de dos cuencas cercanas y de características similares, las cuales son las cuencas de Codpa y Camiña. El análisis se realizó por medio de la trasposición de la información fluviométrica a la subcuenca de estudio a partir de la ecuación 2, donde Q representa los caudales, P precipitación, A área, e i las cuencas Camiña o Codpa. Se escogieron estas dos estaciones debido a que son las que registran mayor extensión en sus series, lo que permite caracterizar los caudales en la cuenca el largo plazo.

$$Q_{Caritaya} = Q_i \cdot \frac{A_{Caritaya} \cdot P_{Caritaya}}{A_i \cdot P_i} \quad \text{Ecuación 1}$$

En el río Camarones, ubicado aguas debajo de la desembocadura del embalse Caritaya, existen dos estaciones fluviométricas, Río Camarones en Chilpe y Río Camarones en Conanoxa, pero dado el carácter regulatorio del embalse en los caudales de este río, estos registros no permiten comprender el régimen de caudales del río Caritaya por lo que no serán utilizadas para el análisis.

5.4.1 Caudales medios

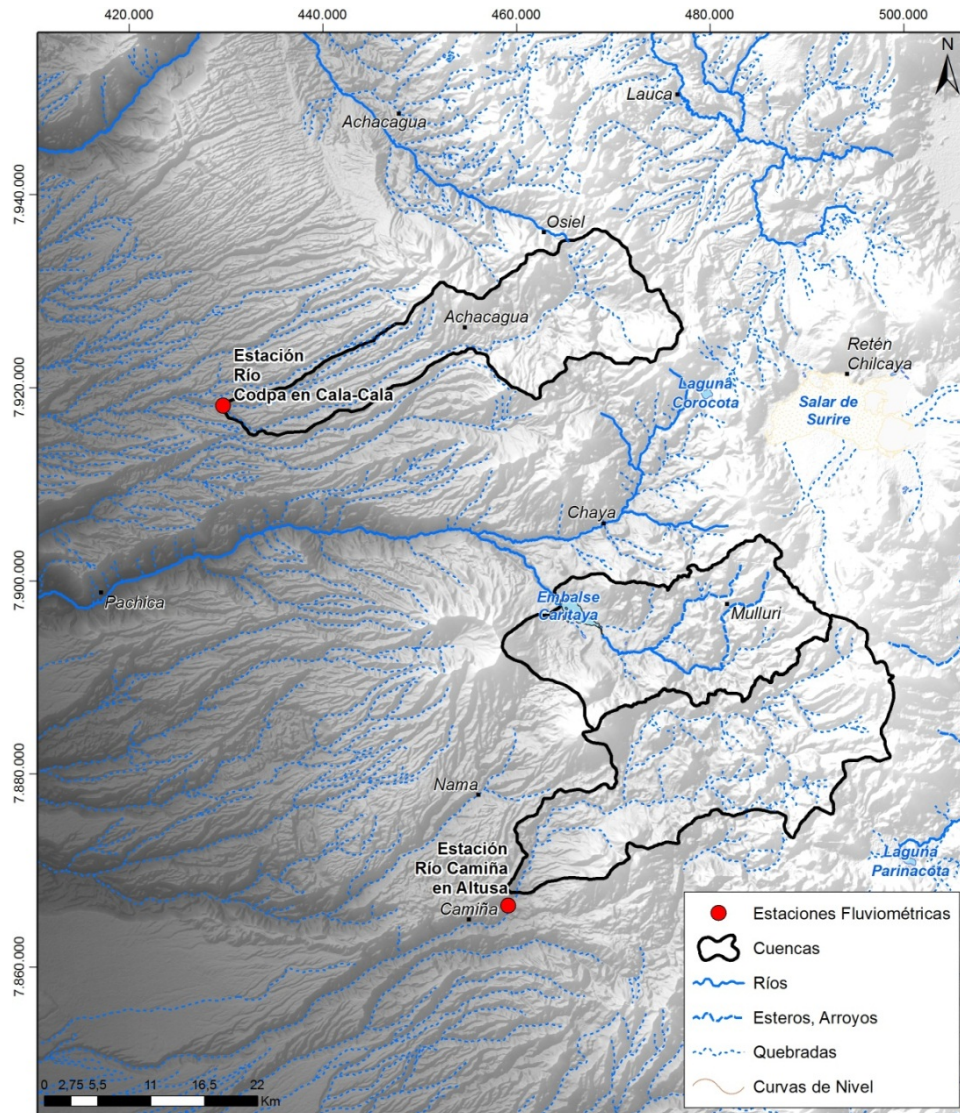
Para el análisis de los caudales medios en la cuenca de estudio, se utilizaron dos estaciones fluviométricas pertenecientes a la DGA, Río Codpa en Cala-Cala y Río Camiña en Altusa. La Tabla 5-11 presenta el listado de estaciones fluviométricas utilizadas, donde se incluye código BNA, coordenadas UTM, altitud, área de drenaje y período con registro de información. La ubicación de las estaciones se presenta en la Figura 5-15.

Tabla 5-11: Estaciones fluviométricas utilizadas para la caracterización de caudales medios

Estación	Código BNA	UTM Norte (WGS84) m	UTM Este (WGS84) m	Altitud msnm	Área drenaje km ²	Información
Río Codpa en Cala-Cala	01410004-0	7.918.163	429.727	1.745	371	1982–2013
Río Camiña en Altusa	01610002-1	7.866.366	459.169	2.280	503	1978–2001

Fuente: Elaboración propia

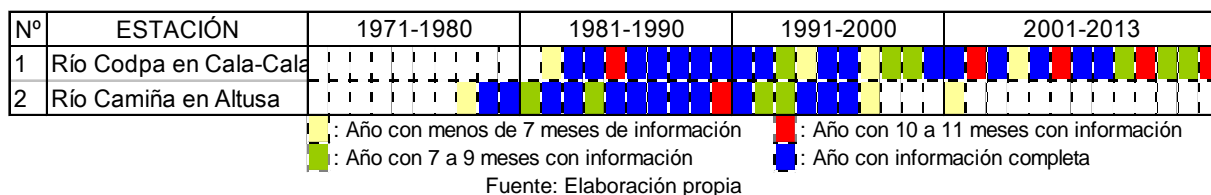
Figura 5-15: Ubicación estaciones fluviométricas



Fuente: Elaboración propia

Aunque para ambas estaciones la serie de registro es extensa, existen muchos meses sin información registrada (Figura 5-16). Por ello se intentó rellenar la información faltante a partir de la correlación entre las estaciones fluviométricas y entre los caudales medidos y las precipitaciones registradas en las estaciones pluviométricas de cada cuenca (Copda y Camiña). No se encontraron correlaciones suficientes por lo que el análisis se realizó a partir de las series originales.

Figura 5-16: Información disponible en estaciones fluviométricas



En la Tabla 5-12 se presentan los estadígrafos principales que caracteriza el caudal medio anual en cada una de las estaciones; se incluyen los caudales mínimos y máximos de toda la serie, el promedio, desviación estándar y una estimación del caudal específico en cada una de las cuencas. Para la estimación de estos parámetros se consideraron aquellos años que cuentan con al menos nueve meses con información.

Tabla 5-12: Caudal medio anual cuenca Codpa y Camiña

Estación	Mín. l/s	Máx. l/s	Prom l/s	DS l/s	Q específico l/s/km ²
Río Codpa en Cala-Cala	41,0	280,0	144,7	82,5	0,39
Río Camiña en Altusa	122,5	460,0	296,8	98,5	0,59

Fuente: Elaboración propia

Con la estimación del caudal medio anual para cada estación, el gradiente de precipitación estimada en la sección 5.2.1 (Figura 5-8), la curva hipsométricas de la cuenca aportante al embalse Caritaya (Figura 5-4) y las curvas hipsométricas de las cuencas que drenan hacia las estaciones fluviométricas seleccionadas (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), se definieron dos series de caudales mensuales para la cuenca de estudio a partir de ambas series. A partir de estas series se estimaron los estadígrafos principales que caracterizan el caudal medio anual para la cuenca de estudio (Tabla 5-13).

Tabla 5-13: Caudal medio anual en cuenca del río Caritaya a partir de registros en cuenca Codpa y Camiña

Estación	Mín. l/s	Máx. l/s	Prom l/s	DS l/s	Q específico l/s/km ²
Río Codpa en Cala-Cala	43,1	294,4	152,1	86,7	0,42
Río Camiña en Altusa	86,3	323,9	209,0	69,3	0,58

Fuente: Elaboración propia

A nivel estacional, en la Tabla 5-14 y Figura 5-17 se presentan los caudales medios mensuales estimados a la salida de la cuenca aportante al embalse Caritaya transpuestos desde las cuencas de los ríos Codpa y Camiña. Si bien la estimación de los caudales a partir de ambas cuencas se encuentran dentro del mismo rango y en ambos casos se distingue la influencia del invierno altiplánico en el aumento del caudal en épocas estivales,

el régimen fluvial se comporta diferente. Para la estimación a partir de los caudales registrados en el río Camiña se observa un caudal base (entre abril y diciembre) mayor que el estimado a partir de las mediciones en el río Codpa; por el contrario, en épocas de lluvia los caudales estimados al transponer las mediciones en Codpa son mayores. Esto podría estar explicado por la influencia de un área nival en la cuenca de Camiña que amortiguaría los caudales de crecidas, pero que sería un aporte para el caudal base del río (SMI, 2008).

Esta zona en altura también se encuentra en la cuenca estudiada, y sumado a la cercanía de la cuenca por lo que podrían afectadas por los mismos frentes de precipitación, sumado una distribución de alturas similar, se esperaría que el comportamiento fluvial del río Caritaya sea más cercano al estimado a partir de los registros en Camiña.

A partir de la serie mensual estimada para el río Caritaya, se realizó un análisis de frecuencia por mes para determinar la curva de variación estacional del río utilizando distintos modelos de probabilidad (Log-Normal, Valores Extremos Tipo I, Pearson III y Log-Pearson III). Por los resultados observados, para cada mes se ajustó a través de la distribución Log-Normal, salvo para los meses febrero y marzo donde el mejor ajuste corresponde a la distribución de Valores Extremos Tipo I.

En las Figura 5-18 y Figura 5-19 se presentan las curvas de variación estacional del río Caritaya estimadas a partir de las mediciones registradas en las estaciones Camiña en Altusa y Codpa en Cala-Cala, respectivamente.

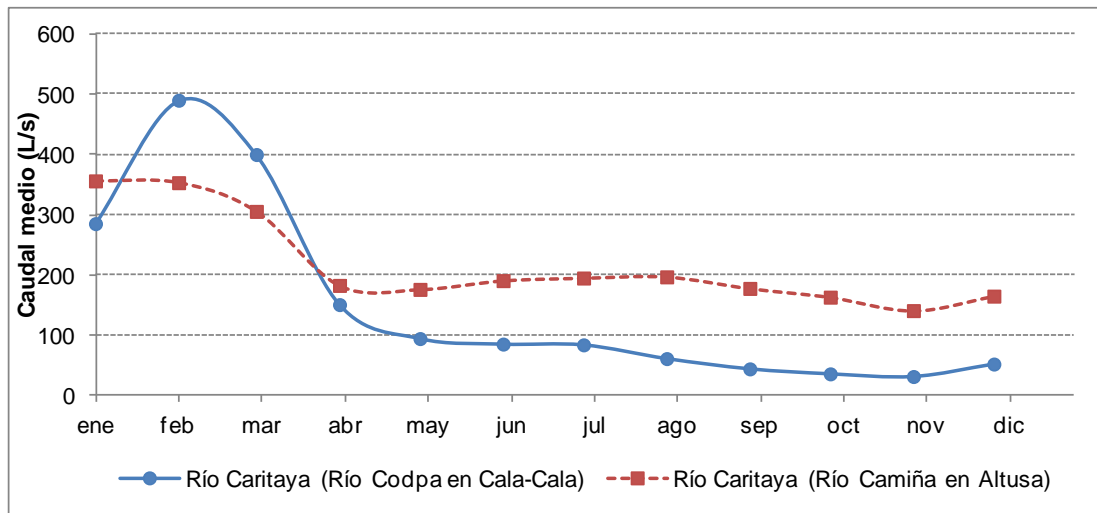
A partir del análisis, se estima que entre abril y diciembre (estación seca), el 90% de los caudales se encontraría bajo los 300 l/s; para el período de lluvias (invierno altiplánico) se estima a partir de la estación ubicada en Camiña que un 10% excede o iguala caudales de 720 l/s, mientras que a partir de la estación de Codpa, en 10% excede o iguala caudales de 1.200 l/s durante el mes de febrero y 950 l/s durante el mes de marzo.

Tabla 5-14: Caudal medio mensual estimado para el río Caritaya (l/s)

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Río Caritaya (Codpa)	285	489	399	150	94	85	84	61	44	36	31	52
Río Caritaya (Camiña)	355	352	305	182	176	190	194	196	177	163	140	164

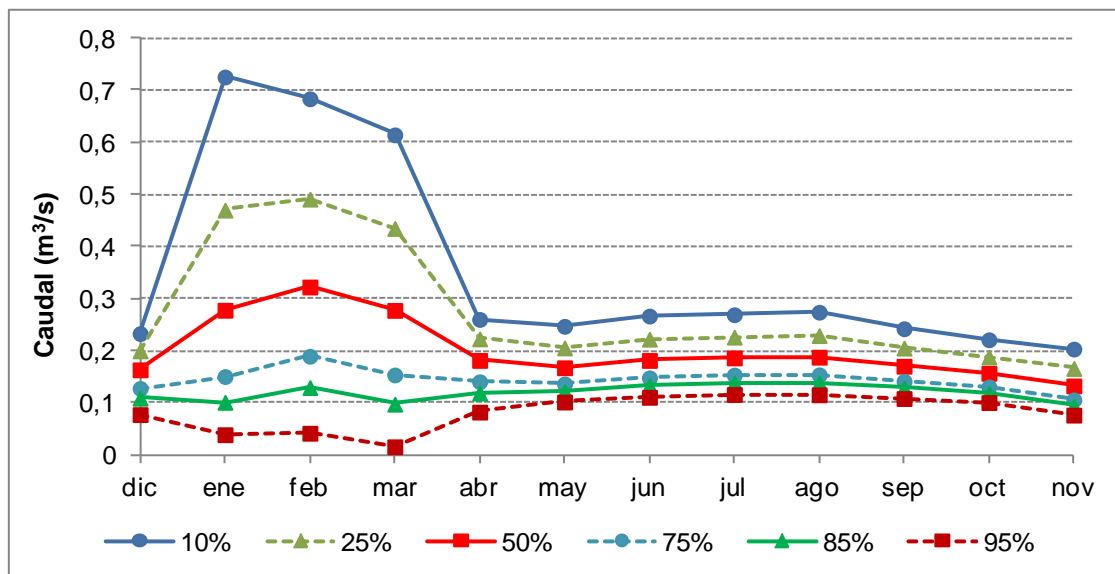
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-17: Caudal medio mensual estimado para el río Caritaya



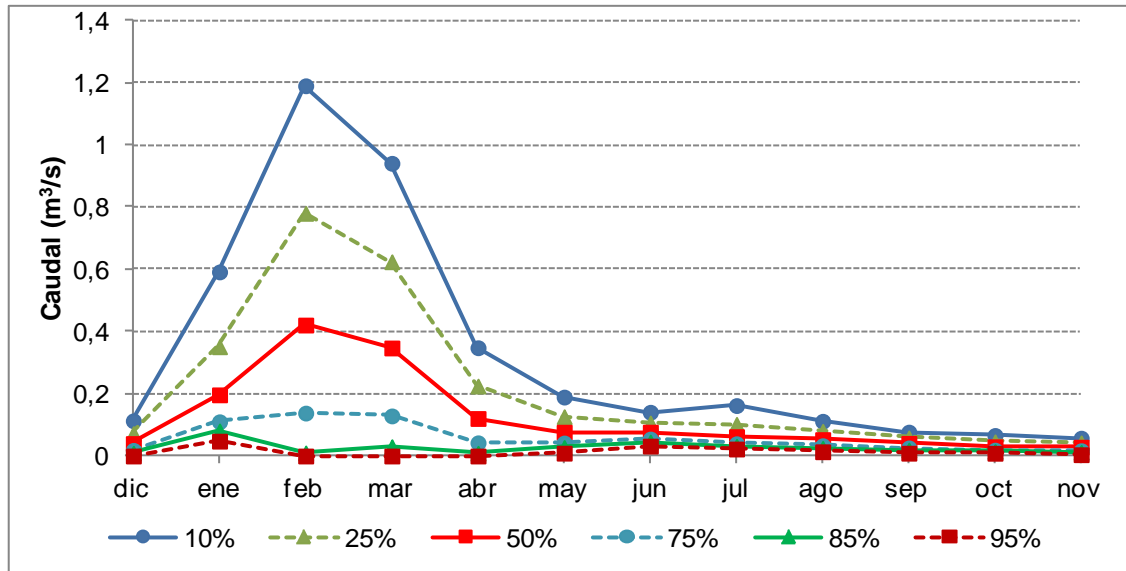
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-18: Curva de variación estacional en río Caritaya, estimada a partir de mediciones en estación Camiña en Altusa



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-19: Curva de variación estacional en río Caritaya, estimada a partir de mediciones en estación Codpa en Cala-Cala



Fuente: Elaboración propia

5.4.2 Caudales máximos

Para el análisis de crecidas en la cuenca de estudio se recopilaron los registros disponibles de caudales máximos instantáneos en las estaciones utilizadas para la caracterización de caudales medios (Tabla 5-11). Se realizó un análisis de frecuencia para estimar caudales máximos para distintos períodos de retorno en las cuencas los ríos Codpa y Camiña, y a partir de éstos se estimaron caudales máximos para la cuenca de estudio (ecuación 2). En la Figura 5-20 se presentan un gráfico de barras con la disponibilidad de información. En la Tabla 5-7 se presentan los estadígrafos principales que representan la serie: mínimo y máximo caudal instantáneo máximo anual, promedio, y desviación estándar.

Figura 5-20: Disponibilidad de información de caudales máximos instantáneo anual

Nº	ESTACIÓN	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2013
1	Río Codpa en Cala-Cala	██████████	██████████	██████████	██████████
2	Río Camiña en Altusa		██████████	██████████	██████████

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-15: Estadígrafos de la serie anual de caudales máximos instantáneo (m³/s).

Estación	Mín.	Máx.	Prom	DS
Río Codpa en Cala Cala	0,090	14,9	3,7	3,5
Río Camiña en Altusa	0,340	10,9	4,9	3,6

Fuente: Elaboración propia

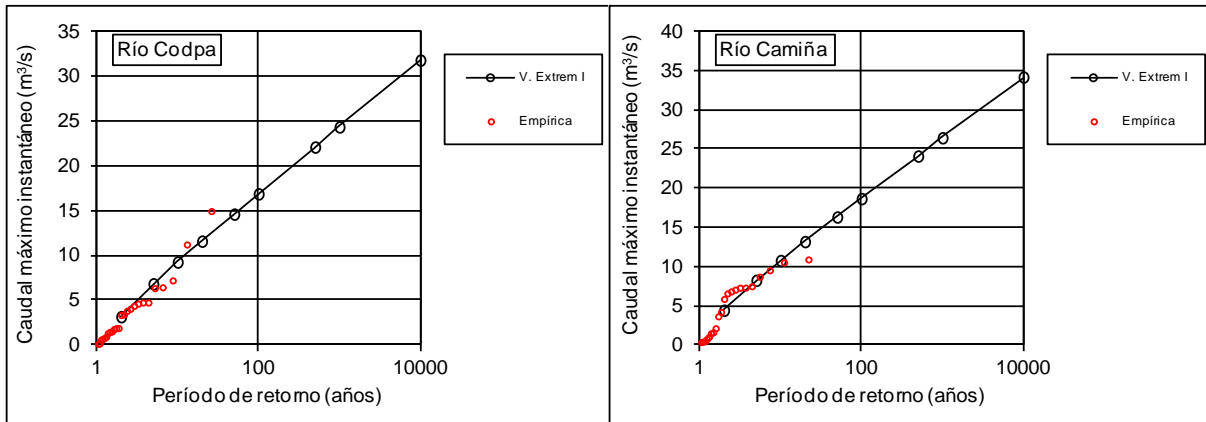
Por simplicidad de aplicación y buena representación de eventos extremos, se seleccionó el modelo de Valores Extremos Tipo I para el análisis de frecuencia. Se estimaron los parámetros mediante el método de momentos. En la Tabla 5-16 y la Figura 5-21 se presentan los resultados de este análisis.

Tabla 5-16: Caudales máximos instantáneos (m³/s) para distintos períodos de retorno mediante Valores Extremos Tipo I

T (años)	Río Codpa	Río Camiña
2	3,1	4,4
5	6,8	8,2
10	9,2	10,7
20	11,6	13,2
50	14,6	16,3
100	16,8	18,6
500	22,1	24,1
1000	24,3	26,4
10000	31,8	34,1

Fuente: Elaboración propia

Figura 5-21: Análisis de frecuencia para caudales máximos instantáneos. Ajuste para Valores Extremos Tipo I



Fuente: Elaboración propia

Para verificar la hipótesis de distribución, se aplicó el test de bondad de Kolmogorov-Smirnov para un nivel de significancia del 95%. Para ambas estaciones no se rechaza la hipótesis de distribución, por lo que no entrega evidencia suficiente como para decir que la muestra no se ajusta a una distribución de Valores Extremos Tipo I.

A partir de caudales máximos estimados se transpusieron los caudales a la cuenca de estudio utilizando la ecuación 2. Estos resultados se presentan en la Tabla 5-17.

Tabla 5-17: Caudales máximos instantáneos (m^3/s) para distintos períodos de retorno estimados para la cuenca de estudio

T (años)	Río Codpa	Río Camiña
2	3,3	3,1
5	7,1	5,8
10	9,7	7,6
20	12,1	9,3
50	15,3	11,5
100	17,7	13,1
500	23,2	16,9
1000	25,6	18,6
10000	33,4	24,0

Fuente: Elaboración propia

5.5 RESULTADOS CAMPAÑA DE AFORO

A partir de las campañas de aforo realizadas en la cuenca de estudio, es posible comprender parte del comportamiento hidrográfico de la cuenca.

De los aforos obtenidos en la cabecera de la cuenca (AF-11 y AF-12) se observa que el principal aporte proviene de la parte sur de la cuenca. Si bien ambas ramas comienzan con caudales en rangos similares (114 l/s y 90 l/s), la subcuenca que drena hacia el arroyo Mulluri y al nacimiento del río Caritaya va recibiendo aportes a lo largo de su curso, el cual antes de la confluencia con el arroyo Veco llega a un caudal de 389 l/s (considerado la primera campaña al igual que la medición de AF-11). En cambio para el arroyo Veco, que en su nacimiento se midió un caudal de 90 l/s durante la primera campaña, antes de la confluencia con el río Caritaya su caudal aforado es igual a 118 l/s, por lo que a lo largo de curso no recibe aportes significativos.

El río Caritaya aguas abajo de la confluencia con el arroyo Veco fluye con un caudal en torno a los 500 l/s estable entre ambas campañas. Pero aguas abajo de las lagunas de Amuyo se observa un fuerte aumento del caudal en el río registrado en la campaña de mayo, condición que no fue registrada durante la primera campaña (AF-10). Si bien ambos aforos no fueron medidos exactamente en el mismo punto (distancia aproximada entre ambos de 200 m), no se observan cambios considerables en el río que pudiesen explicar este aumento importante del flujo.

Durante la segunda campaña de aforo, realizada después del terremoto que afectó a la zona norte del país (1° de abril de 2014), se observó que el cota del nivel de una de las lagunas se encontraba considerablemente más baja, por lo que el fuerte sismo podría haber provocado una fisura en esta laguna, que estaría drenando hacia el río Caritaya y que podría explicar este aumento de caudal.

Tras la confluencia del río con una quebrada sin nombre, se registran caudales menores en el río asociado a un aumento del escurrimiento subsuperficial coincidente con una mayor sedimentación de depósitos aluviales en esta parte del río (AF-9).

Siguiendo aguas abajo, se observa que el río tiene un comportamiento distinto en cada campaña de aforo. Mientras en la primera se observa un aumento del caudal superficial del río, en la segunda campaña se registra una disminución del caudal. Pese a esto, en esta parte del río se observa un tramo con un caudal estable (para la primera campaña en torno a los 520 L/s y para la segunda, 440 L/s).

Antes de la desembocadura del río en el embalse Caritaya, se forma un abanico aluvial aguas debajo de la confluencia del río Caritaya con la quebrada Asintoveco, aportando a un escurrimiento subsuperficial que explica las diferencias de caudal registradas en el aforo AF-

Figura 5-22: Caudales determinados en primera campaña (marzo 2014)

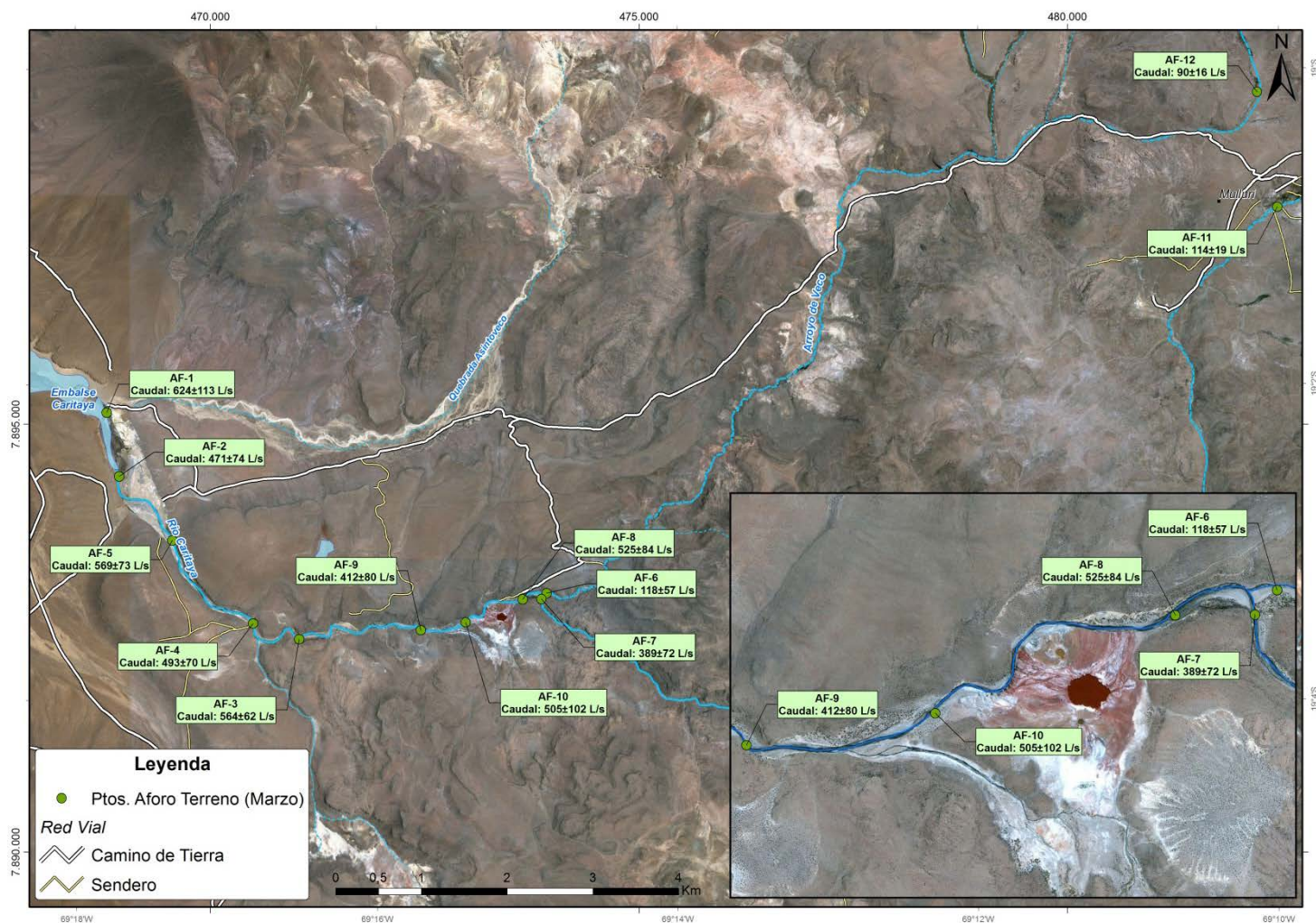
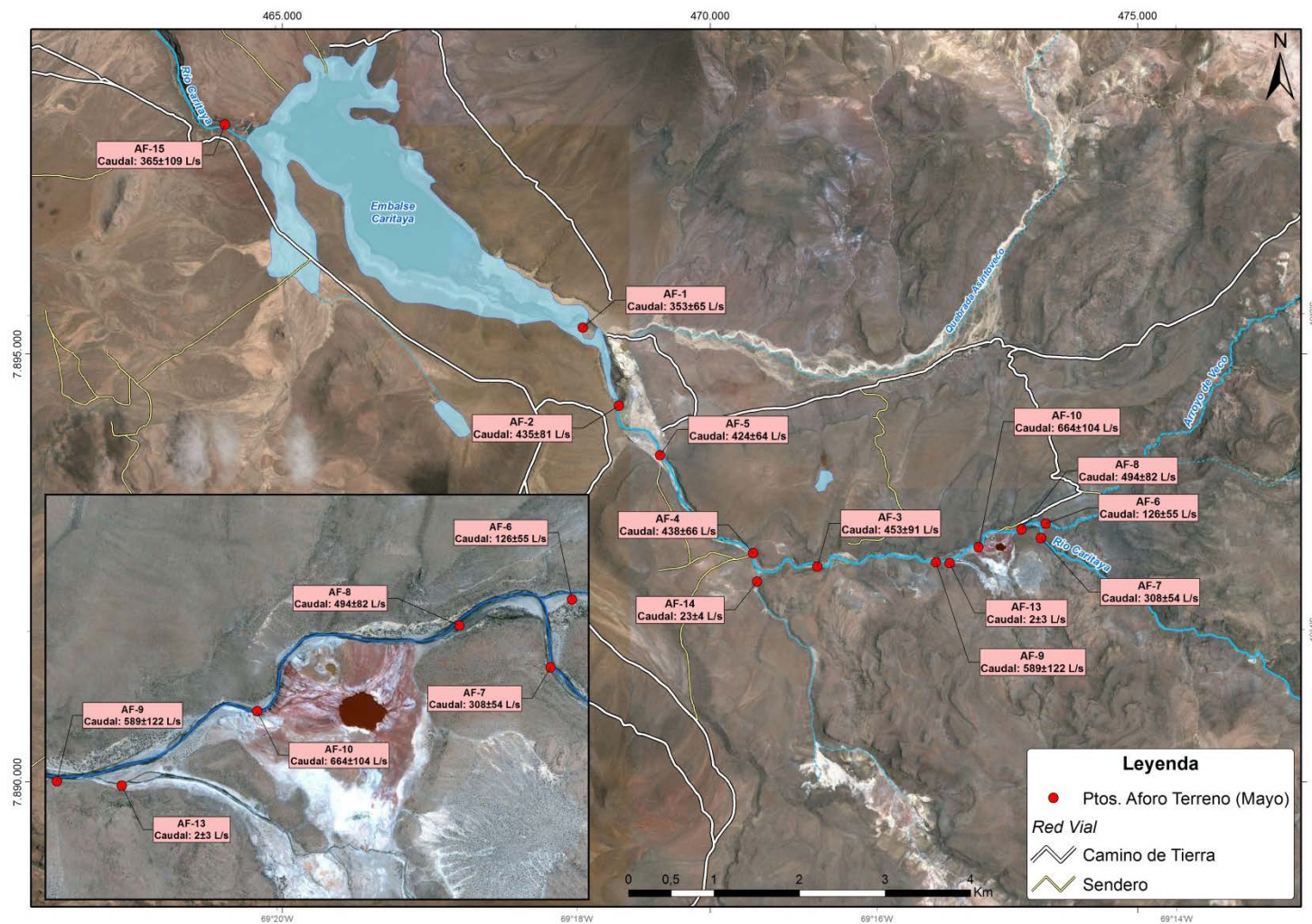


Figura 5-23: Caudales determinados en primera campaña (mayo 2014)



5.6 ESTIMACIÓN DE LA MAGNITUD DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO

Para la subcuenca del embalse Caritaya no se pudo realizar un balance hídrico debido a la escasa información que se dispone. Tanto la precipitación como los caudales medios se estimaron a partir de un análisis hidrológico regional, y aunque permiten comprender las componentes hidrológicas del sistema, para la determinación del balance es incierto. Además se desconocen variables importantes para la definición del balance como la variación del almacenamiento del acuífero y del embalse Caritaya, y la evapotranspiración real del sistema. Pese a esto, en esta sección se presenta una estimación del balance hídrico en la cuenca con el objetivo de tener una primera aproximación a la disponibilidad hídrica y no para la generación de planes de gestión y administración del recurso.

Para la subcuenca del embalse Caritaya se ha estimado un ingreso de agua por precipitaciones igual a 236,3 mm/año (equivalente a 2.711 l/s). A partir de la trasposición de caudales, se estimó un caudal de salida de la cuenca entre 152 l/s (Codpa) y 209 l/s (Camiña), equivalente a un caudal entre 13,2 mm/año y 18,2 mm/año.

Con la información disponible no es posible estimar de manera directa la evaporación real ni la infiltración al acuífero. Estudios realizados por Chadwick *et al.* (2012) y Uribe (2012) en el Salar del Huasco, cuenca altiplánica ubicada en la región de Tarapacá, con un comportamiento hidrológico similar, estimaron que la evaporación real es cercana al 85% de la precipitación. Si bien es menor a los 95% estimados por Pilgrim *et al.* (1988) para las zonas áridas como la cuenca de estudio, esta diferencia se explica por las condiciones de las tormentas en la cuenca, donde en períodos cortos precipita intensamente favoreciendo la infiltración de las precipitaciones al acuífero. De esta manera se estima una evaporación real desde la cuenca igual a 200,9 mm/año (equivalente a 2.304 l/s).

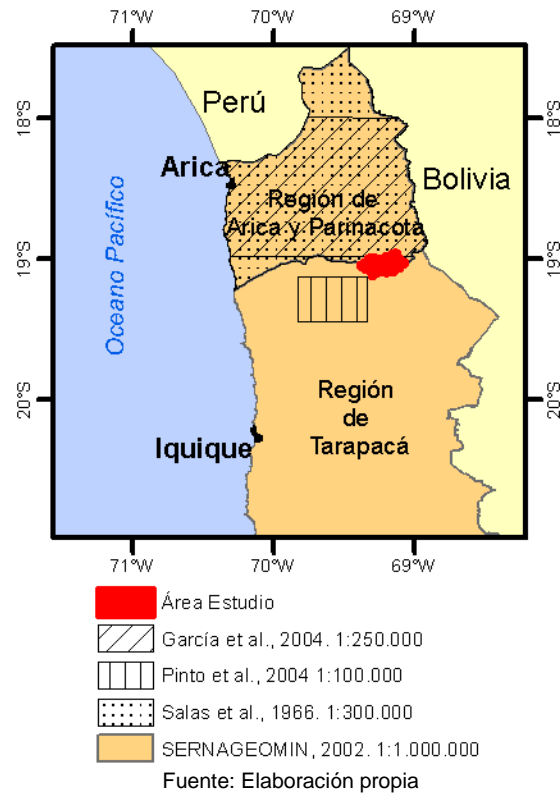
Los datos presentados, son estimaciones para diagnosticar la magnitud de los componentes del balance y no deben ser consideradas para determinar la oferta hídrica de la subcuenca del embalse Caritaya.

6 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA

La metodología utilizada para el estudio geológico del área, y la elaboración de los mapas geológicos a escala 1:25000 y 1:5000 consideró fundamentalmente los siguientes aspectos:

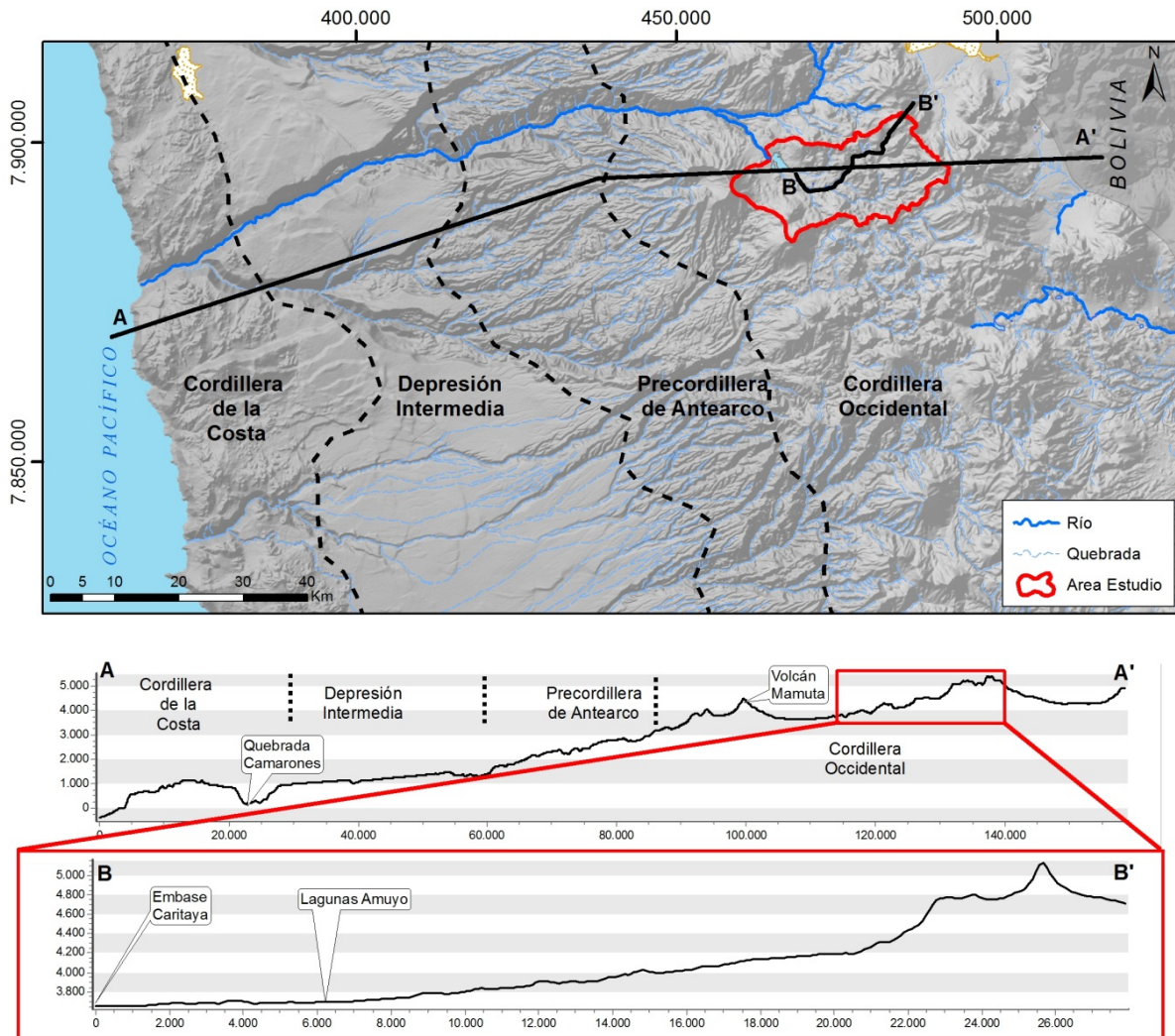
1. Se realizó una revisión y análisis de antecedentes, donde se incluyeron mapas geológicos de años anteriores y publicaciones referentes al área de estudio (García *et al.*, 2004, SERNAGEOMIN 2002, Pinto *et al.*, 2004., Salas *et al.*, 1966 ver cobertura del estudio en Figura 6-1). La revisión y análisis de antecedentes fue expuesta en el Informe N°1 del presente proyecto.
2. Se realizó un trabajo de mapeo preliminar del área de estudio, utilizando los antecedentes recolectados y apoyado por imágenes satelitales. A partir de ese trabajo fue posible delimitar preliminarmente las unidades geológicas que fueron presentadas en el Informe de Avance N°1.
3. Se realizó una campaña de terreno geológica durante los días 13 de Diciembre 2013 al 21 de Diciembre 2013. En la campaña de terreno se recorrió el área de estudio realizando observaciones geológicas y se recolectaron muestras de roca con el fin validar y modificar cuando fue necesario los trabajos realizados anteriormente. A partir de lo anterior se construyeron los mapas geológicos del área de estudio (Figura 6-6 y Figura 6-7)
4. Con el objetivo de interpretar la geología de sub-superficie se subcontrató una campaña geofísica con la empresa Geodatos S.A.I.C para determinar las características geoelectricas de la sub-superficie que permitan obtener información de la estratigrafía, del nivel freático y principalmente de estructuras geológicas que pudieran condicionar la dinámica de aguas subterráneas. El levantamiento de datos geofísicos, se planificó considerando que las estaciones se distribuyeran en 5 perfiles NanoTEM y 2 perfiles de Tomografía.
5. En base a la descripción las unidades geológicas, su disposición observada en superficie la interpretaron de las variaciones de resistividad eléctrica observadas en las secciones de NanoTEM y Tomografías Eléctrica se construyeron perfiles geológicos.

Figura 6-1: Fuente de información geológica.



La subcuenca del río Caritaya se ubica aguas arriba del embalse con el mismo nombre. Fisiográficamente, el área se ubica dentro de la cordillera Occidental, inmediatamente al oeste del eje volcánico actual y al este de la precordillera. La precordillera corresponde a una meseta alargada de ancho variable entre 20 a 35 km cuya altitud aumenta de oeste a este de 1.900 a 3.800 m (Figura 6-2). La cordillera Occidental presenta una topografía irregular con altitudes que aumentan de oeste a este de 3.200 – 3.500 m a 5.000 – 6.350 m (Figura 6-2).

Figura 6-2: Principales unidades geomorfológicas a escala regional



Fuente: Elaboración propia

El margen este de la subcuenca está delimitado por edificios volcánicos y depósitos cuaternarios de más de 5.000 msnm. El margen oeste de la cuenca está delimitado por edificios y depósitos volcánicos Miocenos, que alcanzan una altura de 4.585 msnm en el Volcán Mamuta

La subcuenca de estudio tiene un largo W-E de 22 km y un ancho N-S de 12 km aproximadamente, con un área de 360 km². Las alturas más bajas se ubican en la base del Río Caritaya a 3.650 msnm al oeste del área de estudio y las máximas elevaciones superan los 5.000 msnm en el escarpe que se extiende hacia el sur de los volcanes Chuquinanta (5.579 msnm) y Mulluri (5.247 msnm) ubicados al norte del área de estudio (Figura 6-3). Hacia el oeste dominan pendientes suaves de 1° a 2°, en el relleno aluvial y fluvial, mientras que en el límite este de la cuenca los cerros presentan pendientes cercanas a los 25° (Figura 6-4 y Figura 6-5).

En la Figura 6-5, se presenta el mapa de pendientes de la zona de las lagunas. Se observa que las lagunas se encuentran en una meseta de forma semicircular, localizada cerca de 15 metro sobre el río. La meseta corresponde a una zona de baja pendiente (0°-3°) rodeada por una zona de pendientes de 6°-10°. El margen norte frente a las lagunas es escarpado con pendientes mayores a 15°. Al oeste de la figura mencionada es posible observar que el río Caritaya fluye encajonado por escarpes de los afloramientos de rocas volcánicas. Notar que la clasificación de los colores de las pendientes de la Figura 6-5 es distinto al de la Figura 6-4.

En esta sección se describe la morfología y la geología. En primer lugar se realiza una descripción regional, abarcando las unidades morfológicas presentes en el sector Norte de Chile e incluyendo la geología del área de estudio y sus alrededores. En segundo lugar, se realiza una descripción de detalle de la geología del área de estudio, poniendo énfasis en el sector de las lagunas de Amuyo.

En los siguientes puntos, se realiza una descripción de la geomorfología y evolución morfotectónica y posteriormente una descripción geológica regional.

Figura 6-3: Elevación y morfología área de estudio.

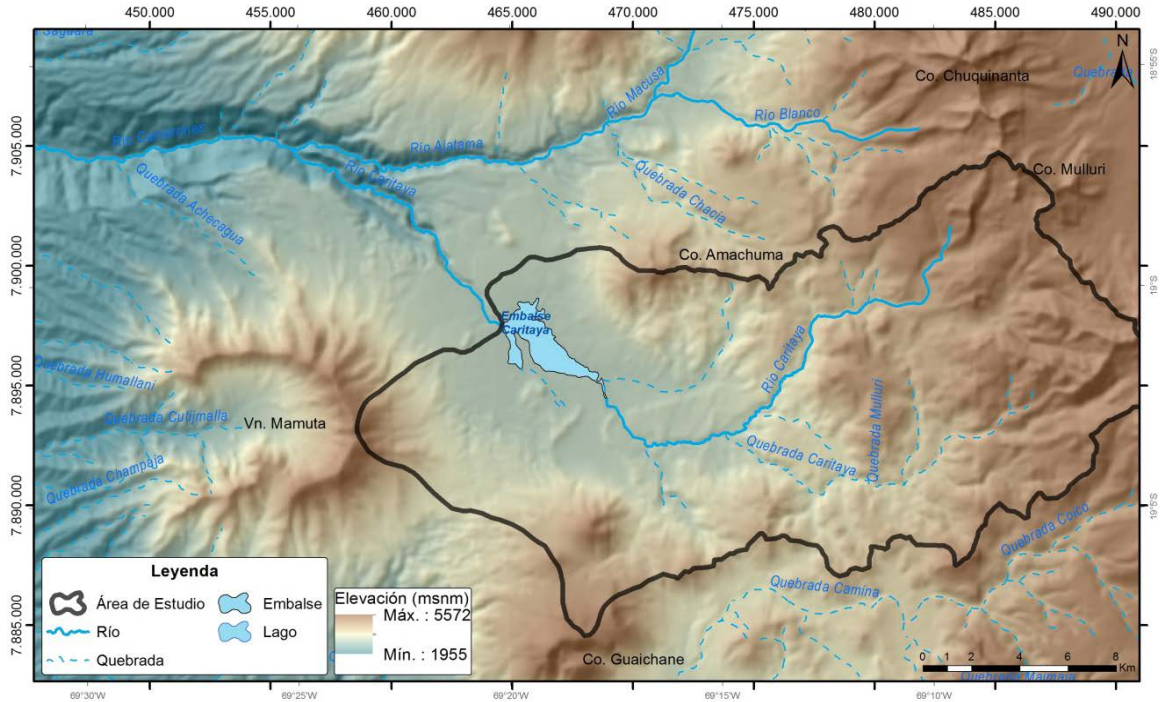


Figura 6-4: Mapa de pendientes

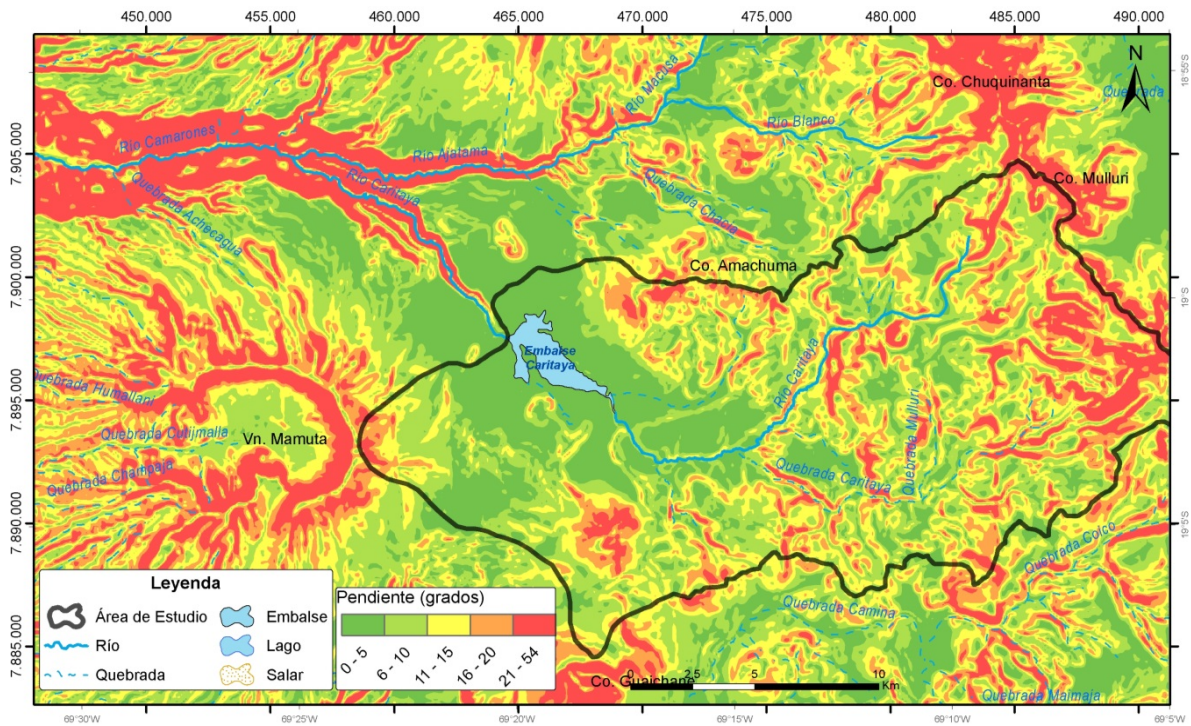
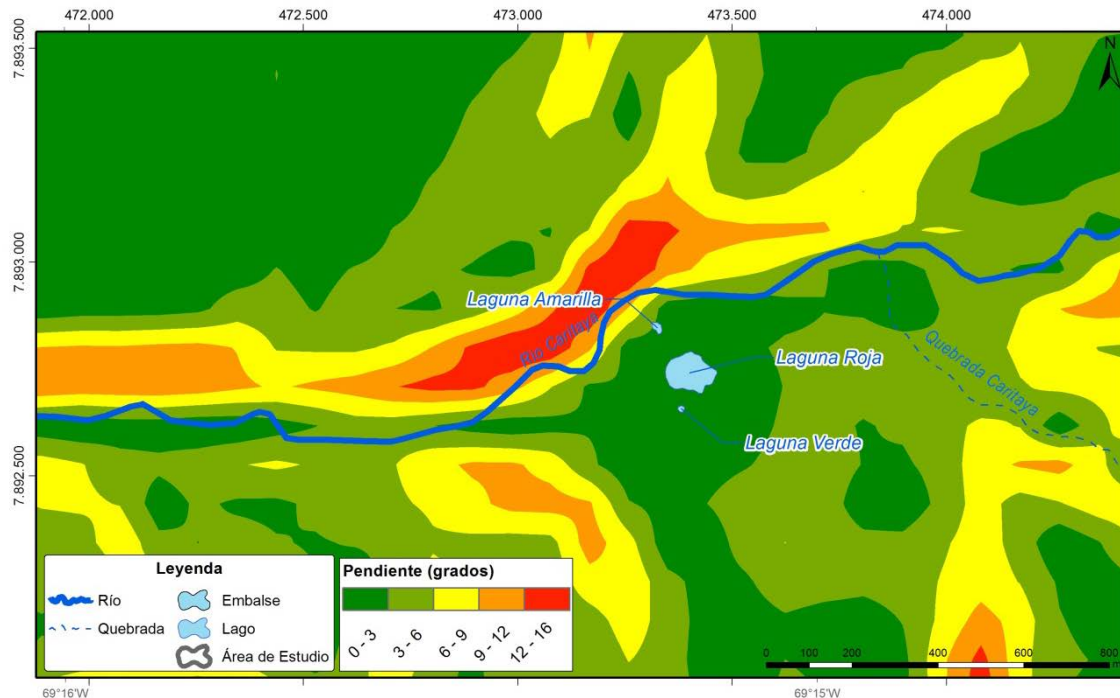


Figura 6-5: Mapa de pendientes detalle río Caritaya y lagunas Amuyo



6.1 GEOLOGÍA SUPERFICIAL

El área de estudio está dominada por la actividad volcánica desde el Mioceno hasta el Pleistoceno y es posible diferenciarla en dos claros dominios, los cuales son:

- El dominio oeste de la zona de estudio, delimita con la precordillera y se depositan lavas basálticas y andesíticas, depósitos de lahares, e ignimbritas del Mioceno (Mmv, M3t y Msv en mapa geológico en Figura 6-6). Estos depósitos incluyen los depósitos del volcán Mamuta, presentes al oeste del área de estudio. Asociados con la actividad volcánica, existen zonas que evidencian procesos de alteración hidrotermal, que dieron origen a los depósitos de oro exhalativos, los cuales han sido incluidos en la franja metalogénica del Altiplano-Cordillera. (García *et al.*, 2004)
- En tanto el dominio este de la zona de estudio está dominado por depósitos asociados a la actividad Pleistocena. (Pv en Mapa geológico en Figura 6-6). Importantes centros de emisión responsables de los depósitos volcánicos del dominio este son los volcanes Chuquinanta y Mulluri.

Es importante de mencionar que existen notorias zonas de alteración en el área de estudio, las cuales pueden ser zonas de aporte de contaminantes naturales al río. Como ha sido

mencionado, el activo afloramiento de agua hidrotermal que se expresa en las lagunas de Amuyo (Ah, Ah(a), Ah(r), Ah(v) en mapa geológico en Figura 6-6 y Figura 6-7.

Los depósitos volcánicos Miocenos y Pleistocenos han sido erosionados por los cauces fluviales pertenecientes a la red de drenaje del río Caritaya, produciendo depósitos fluviales que rellenan el valle

A continuación se describen en detalle las unidades que afloran en el área de estudio y en el mapa geológico (Figura 6-6) es posible observar su distribución en superficie. La leyenda presentada en Figura 6-6 es equivalente para la Figura 6-7

Figura 6-6: Mapa geológico

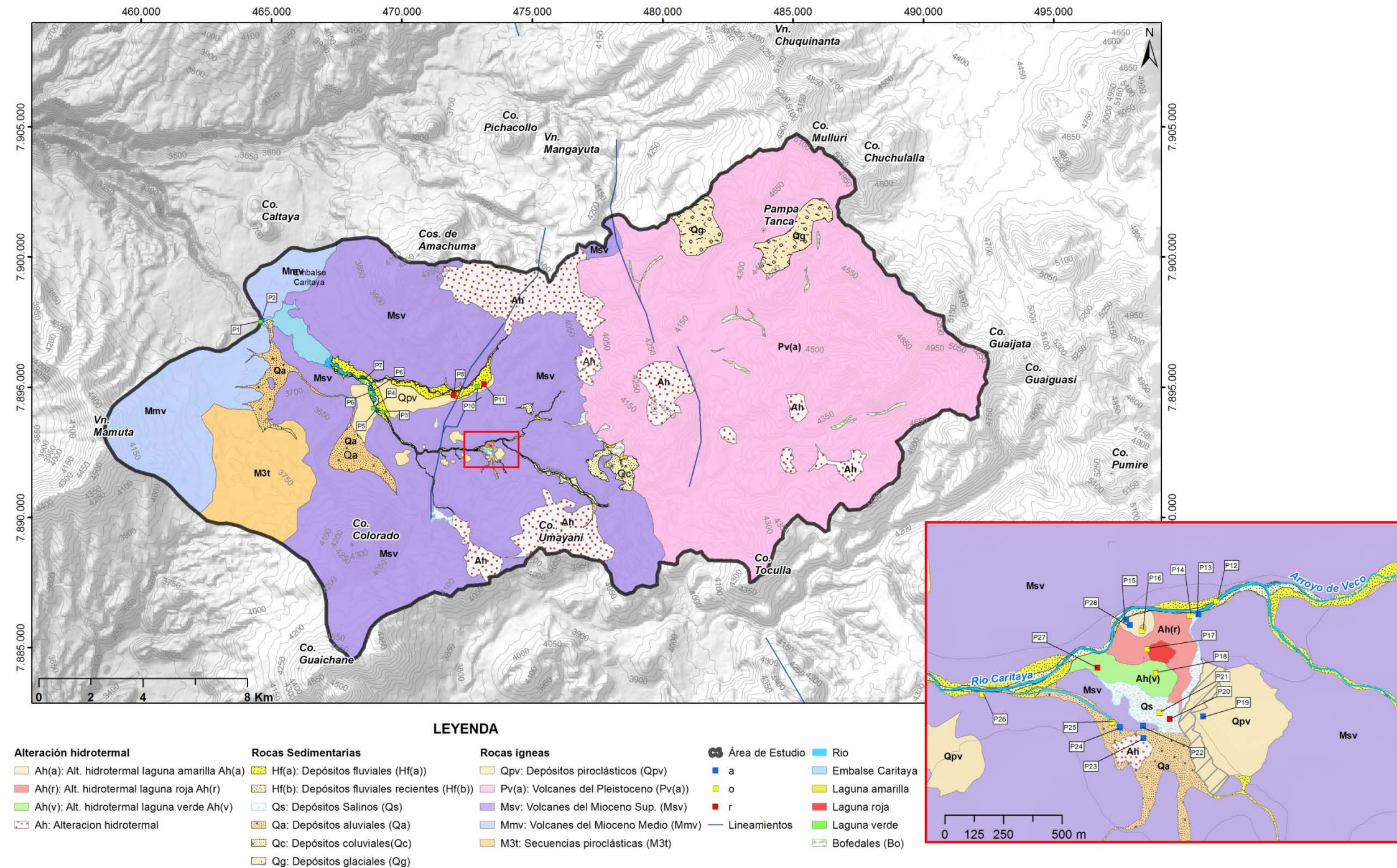
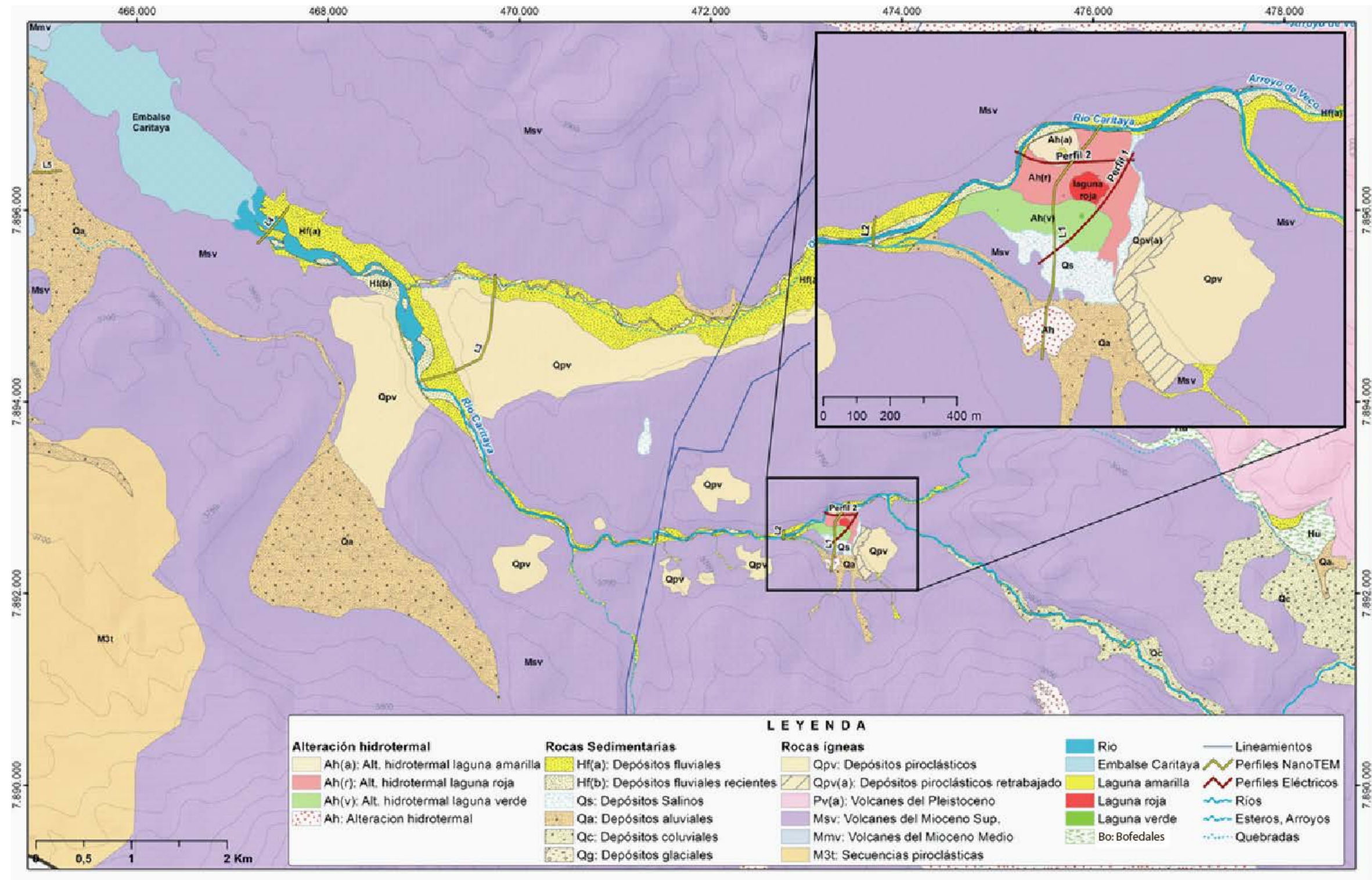


Figura 6-7: Mapa geológico sector río Caritaya y lagunas Amuyo



6.1.1 Secuencias piroclásticas Mioceno Inferior Medio (M3t)

Corresponde a secuencias piroclásticas dacíticas a riolíticas asociadas a calderas de colapso. En la zona de estudio esta unidad es descrita por Pinto *et al.*, (2004) como la Ignimbrita Nama con una edad de 16Ma (K-Ar en biotita) reportada por Muñoz y Sepúlveda (1992). Ésta unidad aflora al sur oeste del área de estudio y presenta un espesor máximo de aproximadamente 200 m. Corresponde a una toba soldada, desvitrificada de color pardo rojizo (65% de matriz), con fenocristales de plagioclasa (13%), feldespato potásico (7%), anfíbola alterada (10%) y cuarzo (1-5%). Esta ignimbrita incluye en su base, un nivel de vitrofírico de hasta 40 m de espesor, no expuesto en el área de estudios. Sobre la ignimbrita Nama, se depositan las lavas de Tana, de edad 9 Ma., correspondiente a los volcanes del Mioceno Superior. En la quebrada de Suca, Pinto *et al.*, 2004 reconoce bajo la ignimbrita Nama las ignimbritas Suca y Moquella.

6.1.2 Volcanes y Remanentes de volcanes del Mioceno Medio (Mmv entre 16-11 Ma)

La unidad se dispone al oeste del área de estudio y corresponde a un conjunto de rocas de edificios volcánicos medianamente conservados constituidos en mayor cantidad por lavas andesíticas y dacíticas. Presentan intercalaciones menores con tobas y rocas sedimentarias epiclásticas. En el área sur oeste afloran rocas asociadas al edificio volcánico del volcán Mamuta. Seguel *et al.*, 1991 por medio de dataciones K/Ar en una andesita pre-caldera, establece una edad basal de 14 Ma.

6.1.3 Volcanes del Mioceno Superior (Msv entre 11-5 Ma)

Unidad informal de rocas pertenecientes a estratovolcanes compuestos, bien a medianamente conservados. Se distribuye en la parte oriental del área de estudio en el volcán Mangayuta ubicado al norte del área de estudio. Sobreyace en discordancia de erosión a la formación Oxaya (OMo) y a los volcanes del Mioceno Medio (Mmv).

La formación Oxaya no aflora en el área de estudio, corresponde a una sucesión volcánica continental compuesta por tobas ignimbríticas, rocas sedimentarias y lavas de edad Oligoceno Superior – Mioceno Medio (García *et al.*, 2004).

Los volcanes Msv presentan formas cónicas irregulares con pendientes suaves. Los cráteres son reconocibles y en general se encuentran afectados por alteración hidrotermal. Las rocas corresponden a coladas de lava frecuentemente frescas pero sin morfologías primarias. Los edificios volcánicos presentan espesores máximos de 800 m. Las lavas son de bloque, masivas y/o fluidales, con núcleos columnares y bases y techos brechosos. Su composición es esencialmente andesítica a dacítica; basaltos y riolitas son menos abundantes. En el trabajo de SERNAGEOMIN (2002), esta unidad corresponde a centros y secuencias volcánicas del Mioceno Superior (Ms3i).

6.1.4 Volcanes y Centro eruptivos menores del Pleistoceno (Pv)

Corresponde a depósitos de estratovolcanes compuestos. Al norte este del área de estudio destaca el volcán Chuquinanta que corresponde a un estratovolcán formado por lavas, lavas-domo y domos de composición andesítica a riolítica, predominando las dacitas de horblenda y biotita. Presenta un importante escarpe abierto hacia el oeste, que deja al descubierto una alteración hidrotermal del núcleo del edificio. Dataciones K-Ar en lava andesítica en biotita arrojaron edad de 1,7 Ma., mientras que datación Ar-Ar en biotita y anfíbola en domo dacítico arrojó 380 y 400 ka. respectivamente. En el área se han observado depósitos de caída recientes (Qpv), lo cual permite plantear la hipótesis que en la zona de estudio pueden existir centros de emisión volcánicos más jóvenes que las dataciones radiométricas previamente mencionadas. En el trabajo de SERNAGEOMIN (2002), esta unidad es descrita como estratovolcanes y complejos volcánicos del cuaternario.

6.1.5 Depósitos piroclásticos de caída (Qpv)

Los depósitos piroclásticos corresponden principalmente a toba de ceniza mal consolidadas que aflora en al centro del área de estudio, sobreyaciendo depósitos Msv. La unidad fue descrita en el punto P19 en un afloramiento de 1 m de espesor. En ese punto se observan depósitos de toba de ceniza laminados a masivos (Figura 6-8), con una capa de toba rica en pómez entre 5 cm a 1 cm en su base. Poseen una masa fundamental de ceniza con un 80% de pómez con biotita (5%) y plagioclasas (2%). Estos depósitos engranan lateralmente con los depósitos hidrotermales recientes de las lagunas de Amuyo. Por ello, se piensa que éstos depósitos de caída son Holocenos a Pleistocenos Superior.

Figura 6-8: Afloramiento Qpv



6.1.6 Depósitos aluviales del Holoceno (Qa)

Los depósitos aluviales del Cuaternario (Qa) corresponden a gravas y brechas de matriz soportadas con intercalaciones de arenas, limos y arcillas. Afloran principalmente como conos en laderas de volcanes o en depresiones o quebradas. Los depósitos Qa son estratificados, mal seleccionados, formados por clastos de origen volcánico angulosos a subangulosos y de esfericidad moderada. Los depósitos se interpretan como producto de flujos de detritos, proximales gatillados probablemente por precipitaciones torrenciales.

6.1.7 Depósitos fluviales del Holoceno (Hf(a y b))

Desde las partes altas de la cuenca, el río Caritaya fluye en forma rectilínea y encajonado por escarpes de afloramientos de rocas de origen volcánico (Figura 6-6 y Figura 6-7). Aproximadamente 4 kilómetros aguas abajo de las lagunas de Amuyo, el río Caritaya deja de estar encajonado, fluye en forma meándrica y ha formado una llanura fluvial extensa que alcanza los 400 metros de ancho. Como se describe a continuación, el tamaño disminuye y el grado de selección mejora cuando el río Caritaya fluye en la llanura de mayor extensión y deja de estar encajonado.

Hf (b)

Corresponde a los depósitos del cauce actual del río Caritaya (Hf (b)). Cercano a las lagunas de Amuyo (Figura 6-10), estos depósitos están compuestos por un 80 % de grava y arena gruesa y 20 % de bolones subredondeados de mala esfericidad y de composición andesítica (Punto P12 en Figura 6-6). Por otro lado, cerca de 6 km aguas abajo de las lagunas de Amuyo (Punto P4 en Figura 6-6 y fotografía en Figura 6-9), los depósitos fluviales corresponden a depósitos clasto a matriz soportado. Presentan una matriz de arena fina a arcilla con clastos de entre 1 a 10 cm. El 80% de los clastos es de tamaño grava de 1 a 2 cm, con esfericidad media, bien redondeados y polimícticos.

Figura 6-9: Fotografía depósitos fluviales



Figura 6-10: Fotografía depósitos fluviales aguas arriba lagunas Amuyo



Hf(a)

Corresponden a depósitos fluviales aterrazados ubicados entre 50 cm y 1 m sobre el nivel actual del río. Entre los depósitos se observan zonas con presencia de vegetación y formación de dunas por transporte de arena debido a la acción del viento. Los depósitos se ubican a lo largo de la quebrada Caritaya teniendo además considerable extensión en el Arroyo Veco. El cauce actual del arroyo Veco disecciona estos depósitos, dejando expuesto hasta 4 metros de potencia de estos.

En el punto P8 (Figura 6-6), se describen estos depósitos donde se observa un afloramiento de 3 m de potencia que sobreyacen a rocas volcánicas de la unidad Msv (Figura 6-6). Corresponden a un depósito fluvial matriz soportado, cuya matriz es de tamaño arena fina a limo, de colores café claro, con estratificación gruesa en capas de entre 20 y 15 cm. Se observa cerca de un 5% de clastos redondeados, con mala esfericidad, tamaños entre 1 y 10 cm, polimícticos, preferentemente andesíticos y con alteración a hidróxidos de hierro.

En la Figura 6-11, se observa una fotografía de los depósitos fluviales. Cabe notar que en el lecho del río aflora roca de la unidad Msv. No es claro la edad para estos depósitos y se estima que pueden ir desde el Pleistoceno Tardío hasta el Holoceno, no obstante para establecer correctamente su edad sería necesario realizar dataciones radiogénicas.

Como se observa en la Figura 6-13 B, en el sector de las lagunas los depósitos Hf(a) están cubiertos por precipitados provenientes de las lagunas de Amuyo (Ah). Los depósitos están compuestos principalmente por bolones, grava y arena.

Por otro lado, en el punto P27 (ver ubicación en Figura 6-6), se observó un afloramiento de depósitos fluviales ubicado a aproximadamente 4 metros sobre el nivel del río (ver fotografía en Figura 6-11). Estos depósitos se encuentran sobre la costra hidrotermal y corresponden a un conglomerado clastosoportado con 10% de bolones andesíticos, con una matriz de tamaño grava (80%) y arena gruesa (10%). Además, posee vetillas irregulares con márgenes definidos de aproximadamente 1-8 mm de sílice.

Figura 6-11: Fotografía depósitos fluviales en P8



Figura 6-12: Fotografía depósitos en P27



6.1.8 Depósitos glaciales (Qg)

Se exponen en la Alta Cordillera en los edificios volcánicos del Mioceno al Holoceno. Corresponden a morrenas laterales y/o frontales. Los depósitos están constituidos de parabrechas polimícticas, consolidadas a semiconsolidadas con mala selección y fragmentos predominantemente volcánicos. Están asociados a diversos avances de las últimas glaciaciones del Pleistoceno Inferior, Pleistoceno Superior y actual.

6.1.9 Depósitos coluviales (Qc)

Depósitos caóticos, no consolidados de origen gravitacional constituidos por bloques, bolones, rodado, arenas y limos. Se encuentran mal seleccionados, con espesores variables de hasta 50 m.

6.1.10 Bofedales (Bo en Figura 6-6)

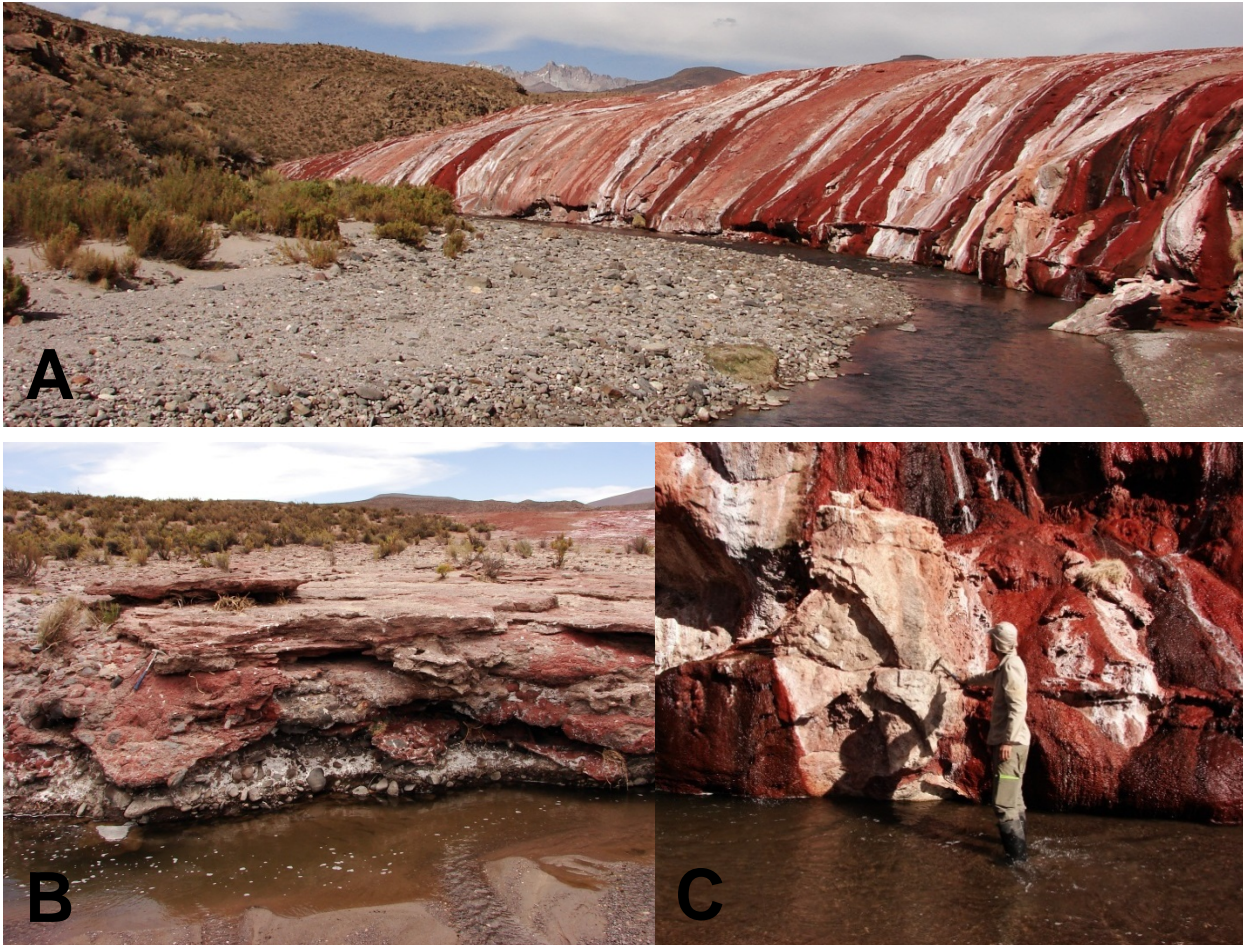
Corresponden a bofedales o vegas ubicadas en la base de las quebradas donde el nivel freático alto permite el desarrollo de vegetación. Se observan a lo largo de toda la ribera del río Caritaya desde el embalse hasta las lagunas de Amuyo.

6.1.11 Alteración hidrotermal y depósitos salinos en las lagunas de Amuyo (Ah (a), Ah (r), Ah (v) y Qs)

Las lagunas de Amuyo corresponden a una expresión de aguas hidrotermales en superficie, existente a 3711 msnm. Las aguas producen la precipitación de minerales (Carbonatos, Sulfatos y Sílice) que se depositan en forma de costras superpuestas sobre las rocas volcánicas del mioceno superior (Msv, ver Figura 6-13 C) y sobre los depósitos fluviales del Río Caritaya (Ha, ver Figura 6-13B). La continua superposición de las costras forman una estructura en forma de domo (Figura 6-13 A), que posee un diámetro aproximado de 380 metros y se eleva por sobre el lecho del río cerca de 15 m.

Las precipitaciones de minerales hidrotermales se realizan en forma de costras y vetillas. Las costras presentan una laminación con espesores entre 1 mm y 20 mm, donde se observan variaciones en el contenido de los distintos minerales que precipitan y aportes de sedimentos. Los distintos depósitos de color rojo, amarillo y verde de las lagunas se disponen interdigitados y trenzados, donde además es posible observar depósitos blancos y negros de sílice y carbonatos. Las vetillas presentan un espesor de 1 mm a 12 mm, están compuestas fundamentalmente por sílice amorfo de color amarillento a gris y se emplazan en fracturas existentes en la roca de caja.

Figura 6-13: Fotografías depósitos Lagunas de Amuyo y relaciones de contacto.



La laguna roja desborda hacia el río Caritaya produciendo precipitados de minerales de color rojizo (Ah(r) en Figura 6-6, Figura 6-13y Figura 6-14 A-B). El análisis de difracción de rayos-x indican la presencia de minerales: calcita, hematita y trazas de cuarzo (muestra P-13 Anexo J). La coloración rojiza de los precipitados se interpreta por la presencia de hematita y rejalgar (mineral rojo) dado que los análisis químicos de elementos mayores y trazas metales revelan una concentración de arsénico de 10208 ppm (Muestra P13 en Tabla 6-1). El rejalgar (As_4S_4) es un sulfuro de arsénico, común en depósitos hidrotermales de baja temperatura, su color varía de rojo oscuro a naranja.

Al igual que la laguna roja, la laguna amarilla desborda sus aguas al río Caritaya produciendo precipitados de minerales color amarillo (Ah(a) en Figura 6-6, Figura 6-14 C). Los análisis de difracción de rayos-x (muestra P-28) muestran presencia de calcita, estilbita cálcica, goergeyita y trazas de montmorillonita. La presencia de calcita indica que la composición de la costra consiste principalmente de carbonatos. Los análisis químicos de la costra (P24 en Tabla 6-1) muestran una concentración de arsénico de 22650 ppm. El arsénico podría estar presente como oropimente (As_2S_3), un sulfuro de arsénico que se encuentra en depósitos hidrotermales de baja temperatura y posee un color amarillo anaranjado. El oropimente no habría sido detectado por la difracción de rayos-x debido a su bajo grado de cristalinidad. En la laguna Amarilla se observó emanación de gases.

La laguna verde, se ubica en el sector sur del domo (Figura 6-6 D), se encuentra levemente elevada por sobre la laguna Roja. Esta laguna descarga sus aguas en forma radial, produciendo precipitados de colores amarillentos, blanquecinos y verdosos (Ah (v)) que actualmente cubren a los de la laguna roja. En la laguna verde se observó emanación de gases en el centro de esta.

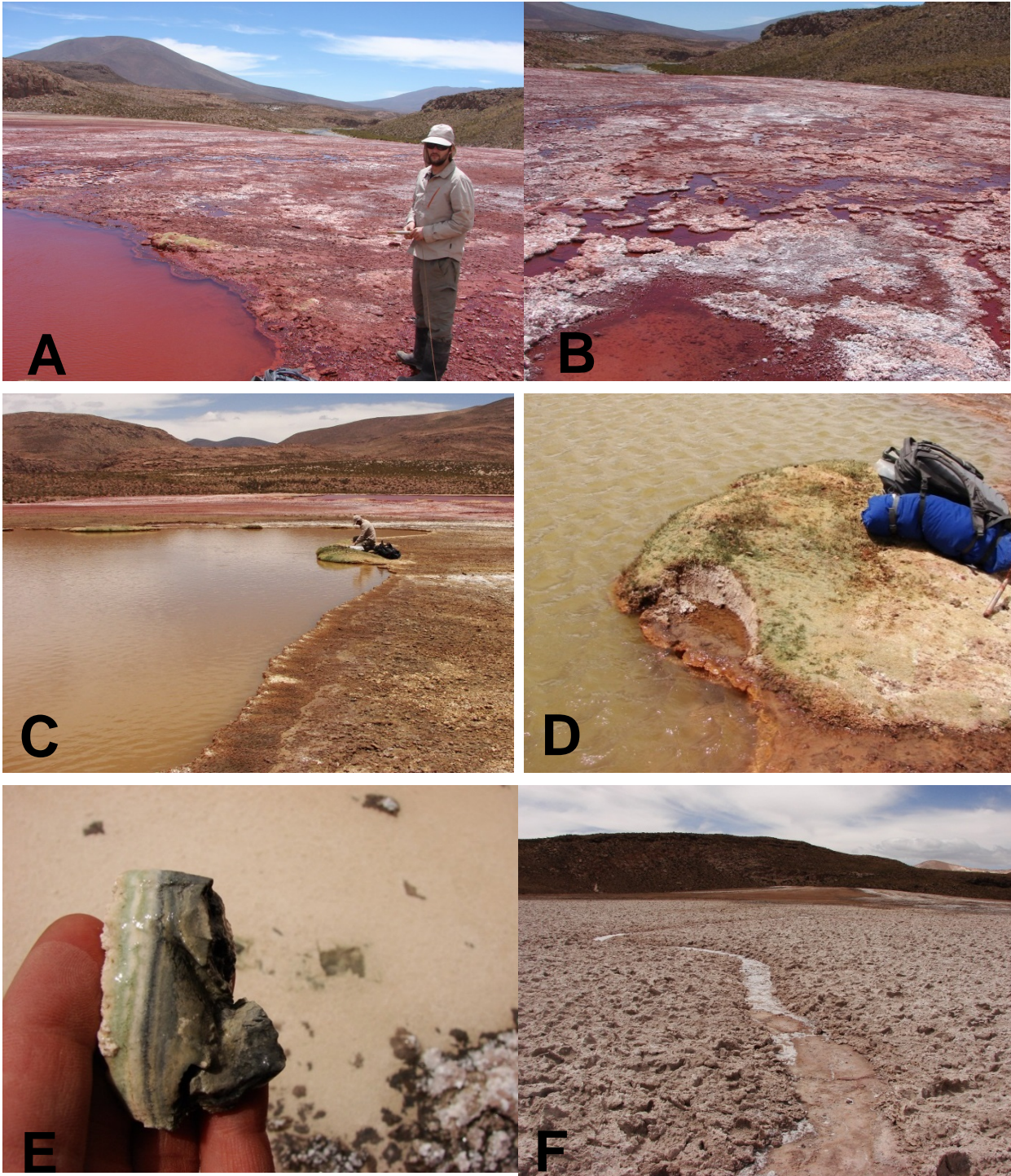
En el sector sur-oeste del domo, se precipita una costra de halita (Figura 6-14 F) rugosa, poligonal, con pináculos de hasta 20 cm de altura. La costra salina es disuelta parcialmente por escurrimientos superficiales y pequeñas pozas salinas someras que contienen tapetes microbianos (Figura 6-14 E) y crustáceos de tamaño milimétrico.

En el margen sur-oeste del domo de las lagunas de Amuyo, se observa un arroyo de agua salobre y pH neutro, el cual produce precipitados de color anaranjado en sus riberas y lecho. Adyacente a este arroyo se observan depósitos aluvio-fluviales, los cuales están alterados por minerales de alteración hidrotermal (oropimente) y con precipitados salinos (Yeso y Halita). Análisis de difracción de rayos-x revelan la presencia de halita, albita, yeso, oropimente, biotita y vermiculita. Los análisis químicos de la costra (P28 en Tabla 6-1) muestran una concentración de arsénico de 47670 ppm. Los altos contenidos de As, en conjunto con la difracción de rayos-x permiten interpretar la presencia de oropimente. No se descarta la existencia de otros minerales de la familia de los sulfuros de arsénico u otros minerales de alteración hidrotermal.

Tabla 6-1: Análisis químico de alteración sector lagunas de Amuyo (Anexo J)

Elemento mayores	Unidad	P-13	P-28	P-24	Metales	Unidad	P-13	P-28	P-24
SiO ₂	%	18.07	2.66	45.93	Cu	ppm	26	8	32
AL ₂ O ₃	%	4.35	<0,001	11.58	V	ppm	97	<10	84
TiO ₂	%	0.7	0.03	0.49	Cr	ppm	20	<10	11
Fe ₂ O ₃	%	7.39	7.27	6.32	Co	ppm	11	<5	9
CaO	%	35.78	40.63	8.22	Ni	ppm	13	<5	12
MgO	%	1.04	1.75	1.69	Zn	ppm	111	79	45
MnO	%	1.24	2.73	0.1	Rb	ppm	42	15	80
Na ₂ O	%	0.97	0.63	5.65	Sr	ppm	867	862	740
K ₂ O	%	0.96	0.13	2.541	Y	ppm	<10	<10	<10
P ₂ O ₅	%	0.1	0	0.12	Zr	ppm	149	95	185
PPC	%	27.29	35.8	8.15	Nb	ppm	<5	<5	<5
SO ₃	%	0.96	3.86	0.2	Ba	ppm	437	164	45
Suma	%	98.84	95.18	90.98	Pb	ppm	8	5	16
					Sc	ppm	<5	<5	<5
					Aq	ppm	<1	<1	<1
					As	ppm	10208	47670	22650
					Bi	ppm	<10	<10	<10
					Ce	ppm	<20	<20	<20
					Cd	ppm	<1	<1	<1
					La	ppm	<20	<20	<20
					Mo	ppm	<5	<5	<5
					Sb	ppm	930	1020	32
					Sn	ppm	<20	<20	<20
					W	ppm	<10	<10	<10

Figura 6-14: Fotografías lagunas de Amuyo



Fuente: Fotografías campaña terreno 1

6.2 GEOLOGÍA DE SUB-SUPERFICIE

6.2.1 Interpretación de perfiles NanoTEM

Con el objetivo de interpretar la geología de sub-superficie se subcontrató una campaña geofísica con la empresa Geodatos S.A.I. la cual permitió obtener información de la estratigrafía, del nivel freático y del espesor del relleno. El levantamiento de datos geofísicos, se planificó considerando que las estaciones se distribuyeran en 5 perfiles NanoTEM y 2 perfiles de Tomografía (Figura 6-7).

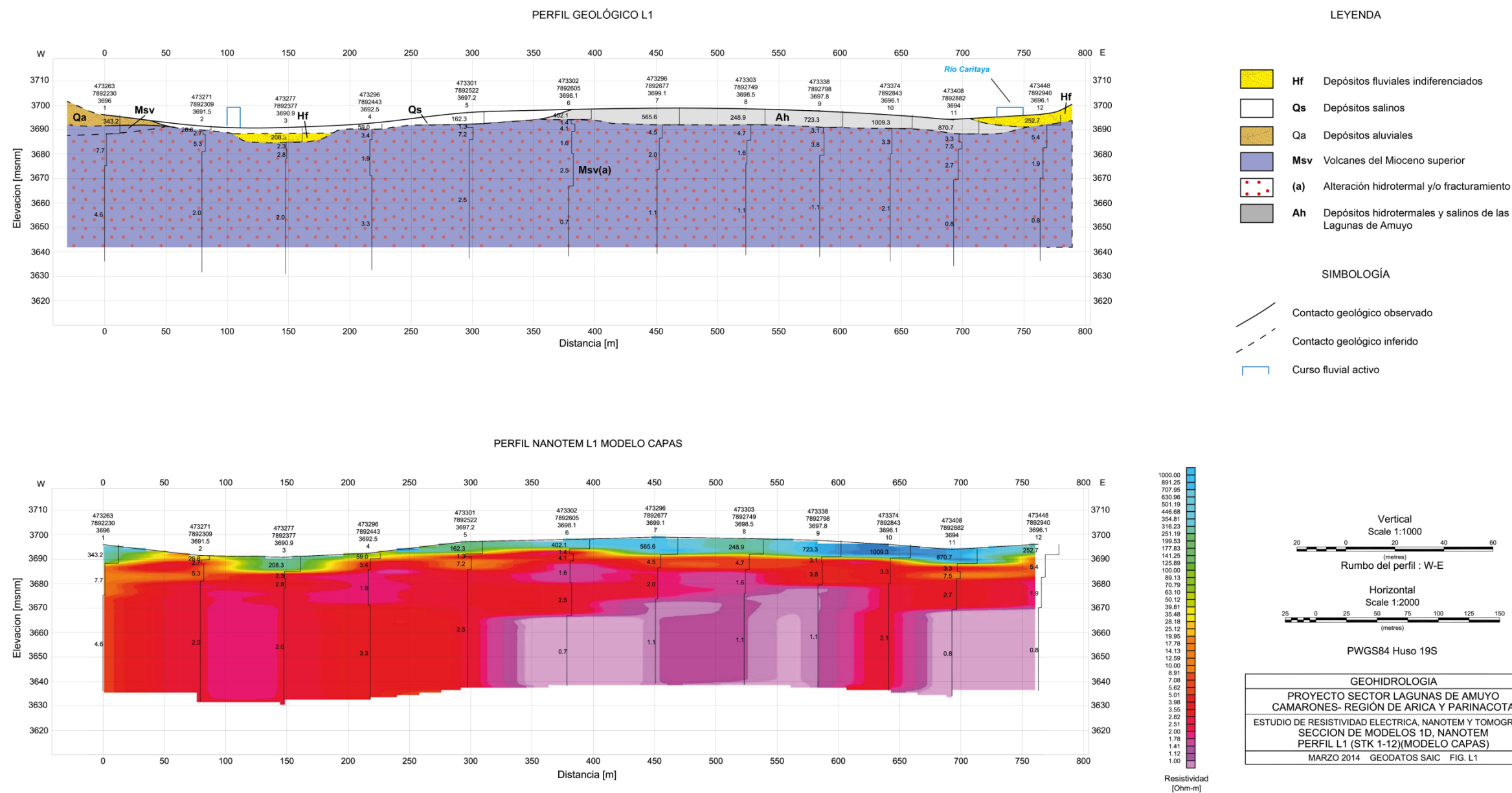
En base a la descripción las unidades geológicas, su disposición observada en superficie la interpretaron de las variaciones de resistividad eléctrica observadas en las secciones de NanoTEM se construyeron perfiles geológicos, los cuales se describen a continuación.

Perfil geológico L1: Trazado por sobre los depósitos hidrotermales y salinos de las Lagunas de Amuyo (Figura 6-7), la sección NanoTEM correspondiente muestra tres unidades geo-eléctricas significativamente contrastantes (Figura 6-15), diferenciadas en los siguientes dominios resistivos: (1) media-alta resistividad (ca. 1000-40 Ohm-m), (2) media-baja resistividad (ca. 40-2 Ohm-m), y (3) muy baja resistividad (<2 Ohm-m).

Acorde a la correlación espacial de cada unidad geo-eléctrica con la geología de superficie, el dominio de alta resistividad agrupa depósitos aluviales, secos, y no consolidados (Qa), depósitos hidrotermales (Ah), depósitos fluviales (Hf), y depósitos salinos (Qs). El límite inferior de esta zona, localizado entre ca. 2 y 8 m de profundidad, se interpreta como el contacto entre las unidades mencionadas y unidades geológicas de alta conductividad. De la misma manera, la potencia de los depósitos hidrotermales Ah alcanzaría una potencia máxima de ca. 6,5 m (Figura 6-15).

Los dominios de media-baja y muy baja conductividad son correlacionados con lavas de los Volcanes del Mioceno superior (Msv) afectadas por una intensa alteración hidrotermal pervasiva (Msv(a) en Figura 6-15), la cual se relaciona directamente a la ocurrencia de las lagunas de Amuyo. En esta sección, el dominio de muy baja resistividad alcanza los valores más bajos observados en el conjunto de perfiles NanoTEM (ca. 0.7 Ohm-m). El dominio sugiere la existencia de núcleos de alta conductividad eléctrica, los cuales coinciden en su proximidad con el afloramiento de aguas hidrotermales de las Lagunas de Amuyo.

Figura 6-15: Interpretación geológica de sección NanoTEM L1



Perfil geológico L2: La sección NanoTEM L2 (Figura 5-33) atraviesa perpendicularmente al río Caritaya, 600 m aguas abajo de las Lagunas de Amuyo (Figura 6-7).

Las unidades geo-eléctricas de esta sección (Figura 6-16) corresponden a dominios de media-alta (130-340 Ohm-m) y media-baja resistividad (7-32 Ohm-m). El contraste entre estas unidades geoeléctricas se interpreta como la morfología del valle relleno por depósitos fluviales del río Caritaya (Hf), y consecuentemente, como el contacto entre los depósitos fluviales y lavas asignadas a Msv. De esta manera, se interpreta que los depósitos fluviales alcanzan un espesor de ca. 7,5 m bajo el eje del curso fluvial activo, y que el nivel freático alcanza la superficie (3685 m.s.n.m.).

Se correlaciona el dominio de media-baja resistividad con rocas volcánicas de Msv alteradas y/o fracturadas. En este perfil es posible notar que el río es alimentado por aguas subterráneas.

Perfil geológico L3: La traza de la sección NanoTEM L3 atraviesa al río Caritaya y a la quebrada Asintoveco, ca. 1 km al sur-este de la confluencia que forman estos valles (Figura 6-7).

En esta sección, se han reconocido dos unidades geo-eléctricas, correspondientes a dominios de media-alta (49-600 Ohm-m) y media-baja (5-49 Ohm-m) resistividad (Figura 6-17).

El dominio de media-alta resistividad, en su porción somera se correlaciona con los depósitos piroclásticos del Cuaternario (Qpv). En esta unidad, una zona de muy baja resistividad, acotada entre los 3.660 y 3.664 m.s.n.m. Se interpreta el contacto entre depósitos piroclásticos y lavas del Mioceno superior (Msv), a una profundidad aproximada de 3644 m.s.n.m (Figura 6-15). También, se interpretan contrastes como diferencias en el grado de alteración que ha sufrido Msv por el paso de fluidos hidrotermales, o intenso fracturamiento, ilustrado en el perfil geológico como el área Msv(a).

En estos perfiles se ha podido distinguir con claridad el espesor del relleno fluvial, el cual en el río Caritaya alcanza un espesor cercano los 20 metros y en la quebrada Asintoveco un espesor aproximado de 16 metros (Figura 6-17). El espesor saturado es interpretado como una disminución en la resistividad, cuyo contraste permite distinguir y delimitar con claridad el nivel freático. El espesor saturado en el río Caritaya alcanza los 12 metros de potencia, en cambio en la quebrada Asintoveco es cercana a los 4 metros.

Figura 6-16: Interpretación geológica de sección NanoTEM L2

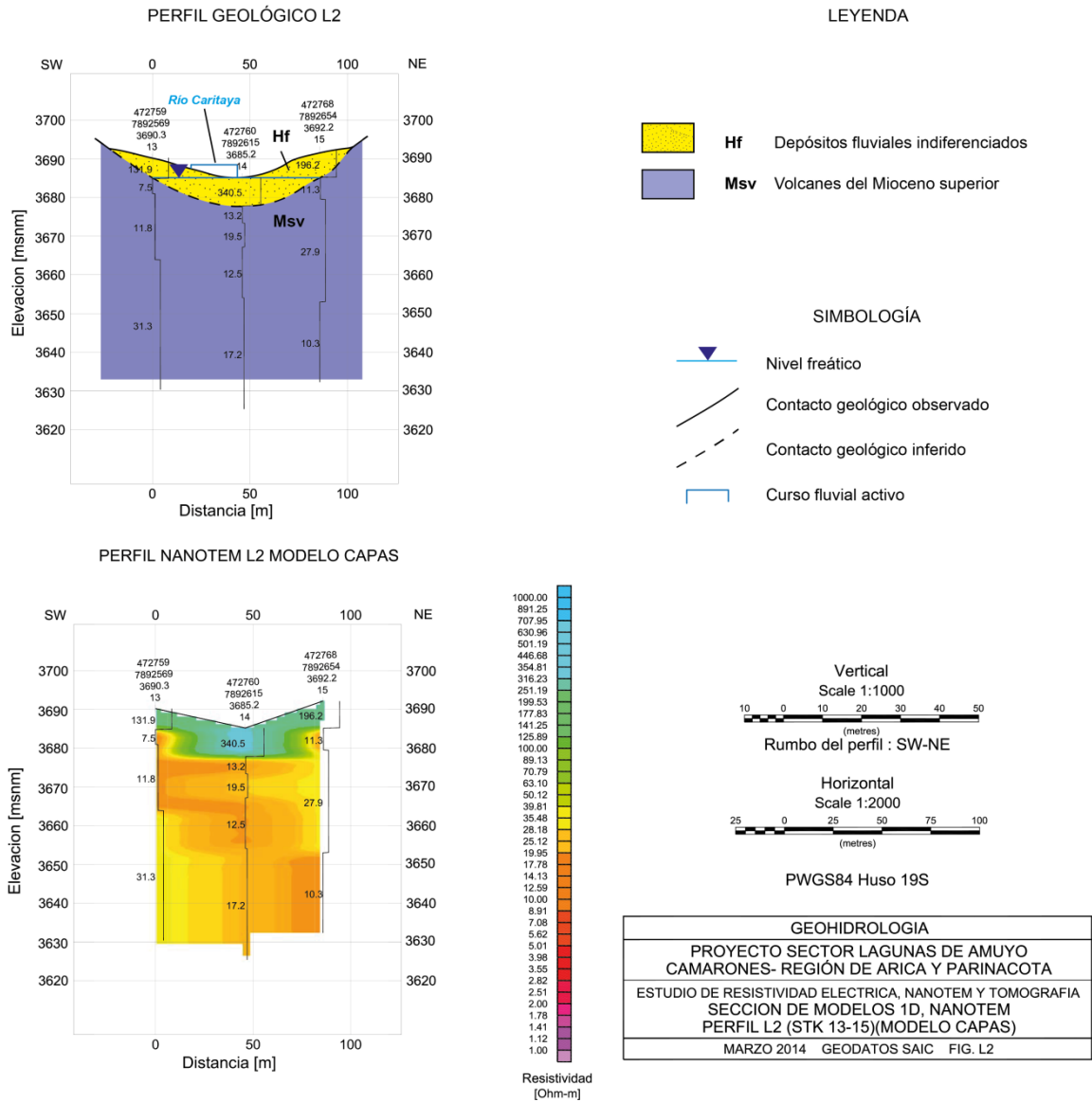
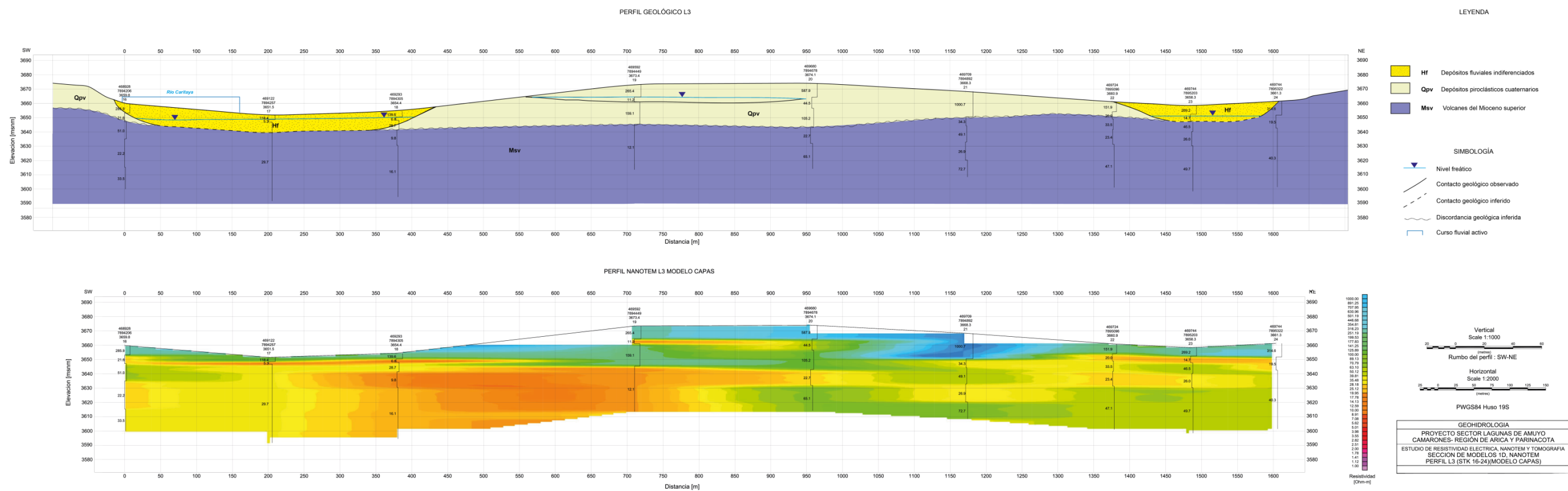


Figura 6-17: Interpretación geológica de sección NanoTEM L3



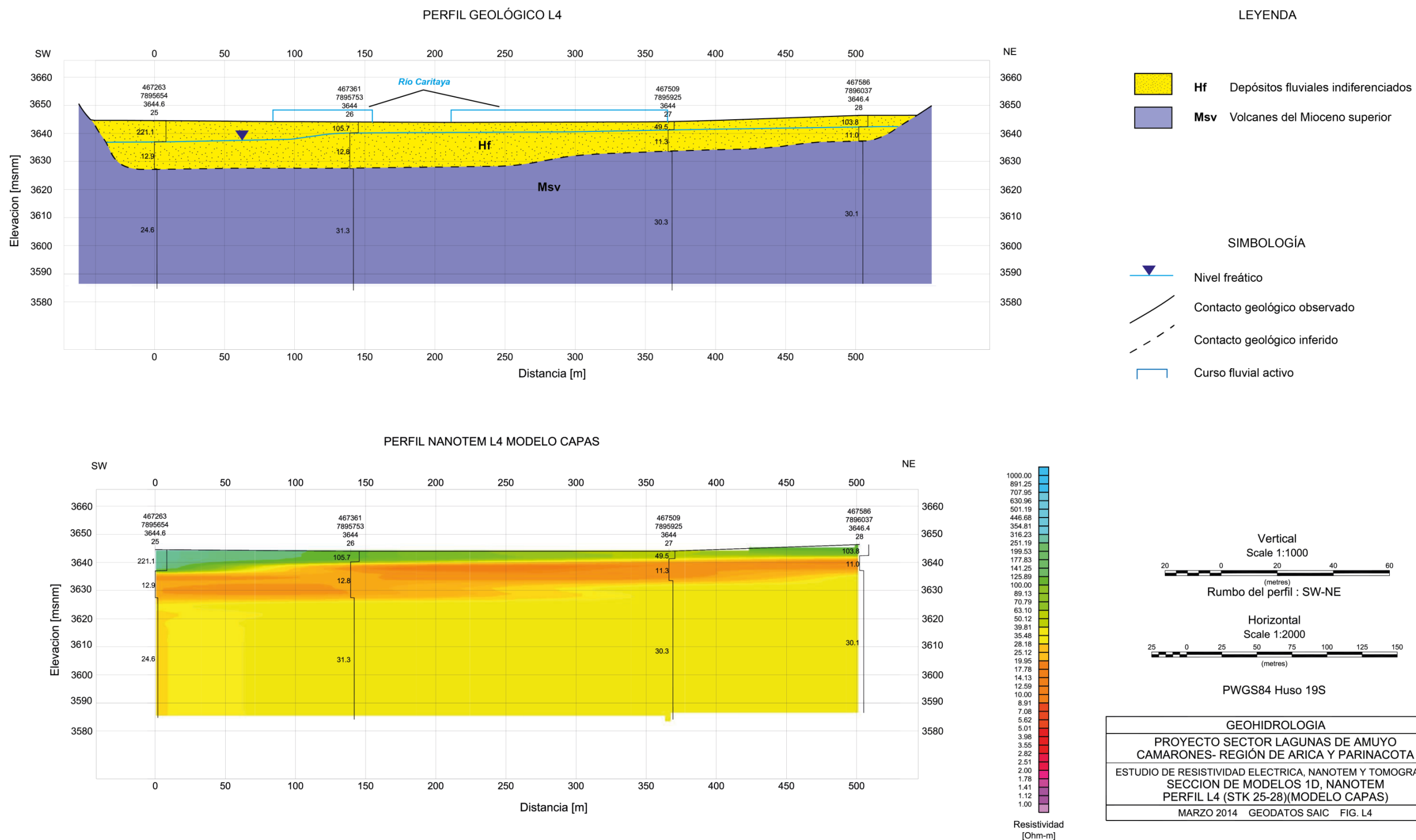
Perfil geológico L4: La sección NanoTEM L4 (Figura 6-7), cuya traza atraviesa al río Caritaya ca. 500 m al sureste del embalse homónimo, muestra tres unidades geo-eléctricas (Figura 6-18) correspondientes a dominios de resistividad media alta (ca. 49-222 Ohm-m), media baja (ca. 24-31 Ohm-m), y baja (ca. 11-13 Ohm-m).

La correlación entre los contrastes resistivos con la geología de superficie permite asignar cada dominio a unidades lito-estratigráficas diferentes. Las cuales se describen a continuación.

Las unidades de media-alta y baja resistividad son correlacionadas con depósitos fluviales del río Caritaya (Hf), que alcanzan un espesor máximo de ca. 17 m (Figura 6-18). El contraste entre estas unidades geo-eléctricas a través de la sección sugiere que el nivel freático se encuentra entre 4 y 7 m de profundidad, esto es, entre 3642 y 3637 m.s.n.m. El dominio de baja resistividad correspondería a depósitos fluviales saturados en agua.

El dominio de media-baja resistividad, ha sido correlacionado con depósitos volcánicos lavas del Mioceno superior (Msv).

Figura 6-18: Interpretación geológica de sección NanoTEM L4



Perfil geológico L5

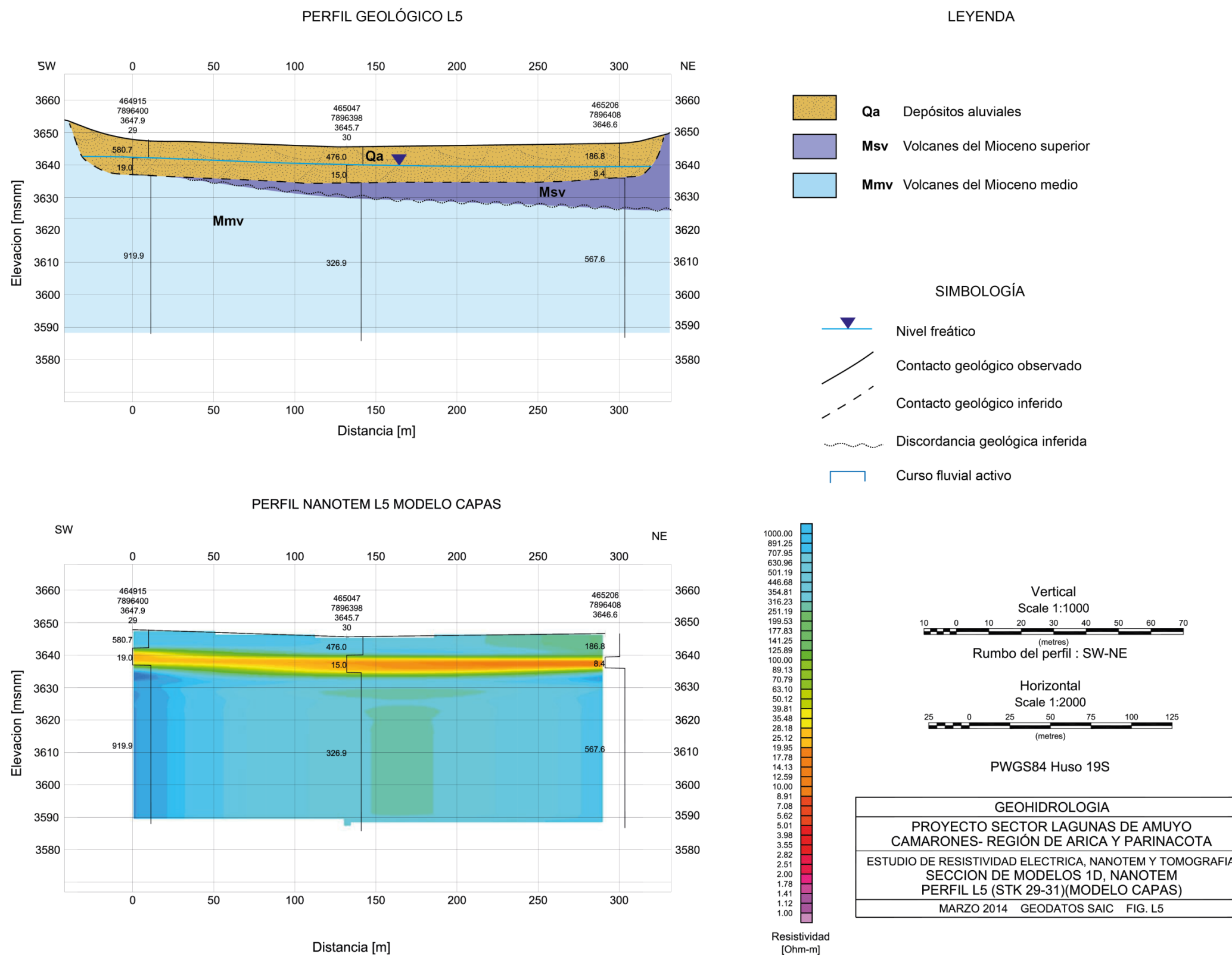
La traza de esta sección se localiza a lo largo de depósitos aluviales a la salida de una sub-cuenca localizada inmediatamente al sur del embalse (Figura 6-7).

La sección NanoTEM L5 (Figura 6-19) muestra dos unidades geo-eléctricas correspondientes a dominios de resistividad de alta (ca. 180 - 920 Ohm-m) y baja (ca. 8 - 20 Ohm-m).

La intersección del perfil con la geología de superficie permite correlacionar al dominio de resistividad alta, en su porción somera, con sedimentos aluviales de Qa secos. La unidad de baja resistividad se encuentra entre 3.635 y 3.640 m.s.n.m., y alcanza una potencia de ca. 5 m. Esta unidad es correlacionada con sedimentos aluviales saturados o húmedos. Así también, se interpreta que el nivel freático se encuentra en el horizonte superior de esta unidad, y que su posición vertical varía entre 3.640 y 3.643 m.s.n.m (Figura 6-19).

En profundidad (< 3.635 m.s.n.m.) la unidad de alta resistividad se muestra continua, correlacionada con rocas volcánicas del Mioceno, y acorde a la geología superficial, se infiere una discordancia entre lavas del Mioceno medio y superior (Figura 6-19).

Figura 6-19: Interpretación geológica de sección NanoTEM L5



6.2.2 Interpretación de tomografías eléctricas

El análisis de secciones de tomografía eléctrica, cuya traza se indica en Figura 6-7, ha permitido interpretar con mayor detalle los depósitos sub-superficiales en las lagunas de Amuyo.

Perfiles geológico R1 y R2: La sección de tomografía eléctrica correspondiente (Figura 6-20) muestra tres unidades geo-eléctricas diferenciadas por contrastes resistivos de alta resolución (zonificación ajustada a tomografía), que delimitan los siguientes dominios resistivos: (1) superficial de alta resistividad (ca. 10 - 100 Ohm-m), (2) baja resistividad (ca. 3-10 Ohm-m), y (3) muy baja resistividad (ca. 0,3 - 3 Ohm-m).

El dominio superficial de alta resistividad es directamente correlacionado con los depósitos hidrotermales de las Lagunas de Amuyo, Ah (a, r y v), y con depósitos salinos Qs. Su límite inferior presenta, en general, una geometría suave y sub-horizontal, cuya pendiente aumenta hacia los límites de la sección. Se observan tramos en que los depósitos hidrotermales se prolongan en profundidad en forma de apófisis. En la prolongación perpendicular a su traza, estos tramos coinciden con los límites superficiales de la Laguna Roja. El espesor máximo de Ah alcanza ca. 15 m. A partir de la geología superficial, se infiere que los depósitos hidrotermales Ah (a), relacionados a la Laguna Amarilla, se interdigitan con sus símiles asociados a la Laguna Roja (Ah (r)).

El dominio de muy baja resistividad, ha sido interpretado como depósitos volcánicos del Mioceno Superior (Msv) fuertemente alterados, fracturados y brechizados por la actividad hidrotermal. El dominio de muy baja resistividad muestra núcleos de magnitudes de resistividad significativamente menor (altamente conductivos), interpretados como zonas permeables donde se canalizaría y concentraría el ascenso de fluidos hidrotermales hacia la superficie. Las direcciones de ascenso de fluidos han sido inferidas en base a geometría de los núcleos de muy baja resistividad, indicando que las zonas brechizadas facilitan, favorecen, y canalizan el paso de aguas hacia la superficie (Figura 6-20).

El dominio de baja resistividad (ca. 3-10 Ohm-m) se correlaciona con rocas volcánicas de Msv, relativamente menos afectadas por alteración y/o fracturamiento, y en consecuencia, poseerían una menor capacidad de canalización de fluidos.

El dominio de baja resistividad, ha sido interpretado como como depósitos volcánicos del Mioceno Superior (Msv) alterados los cuales poseen un menor grado de brechización, encontrándose el macizo rocoso relativamente más sano, con menor desarrollo de permeabilidad secundaria, lo cual restringiría el flujo de agua subterránea.

Figura 6-20: Interpretación geológica de sección Tomografía Eléctrica R1

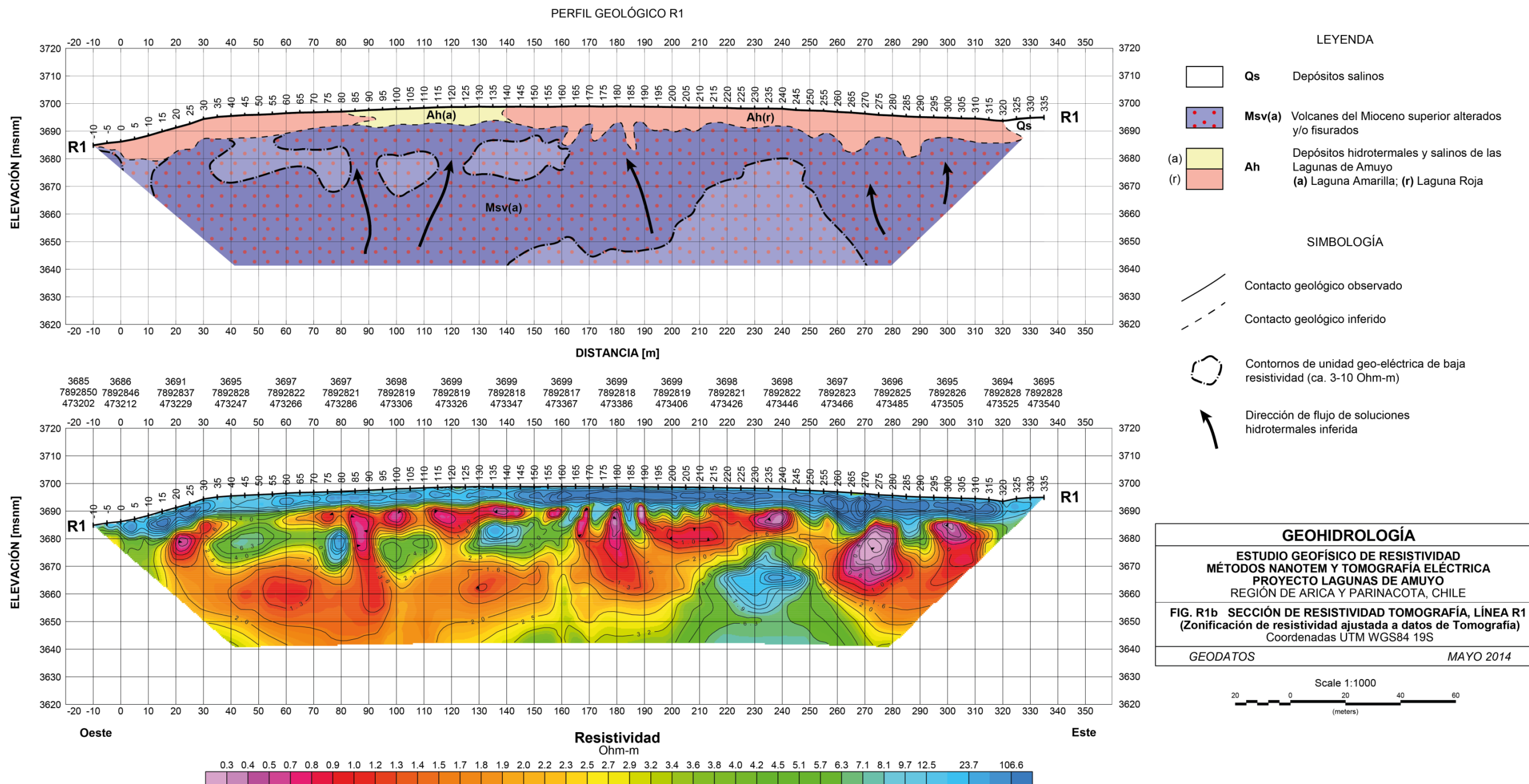
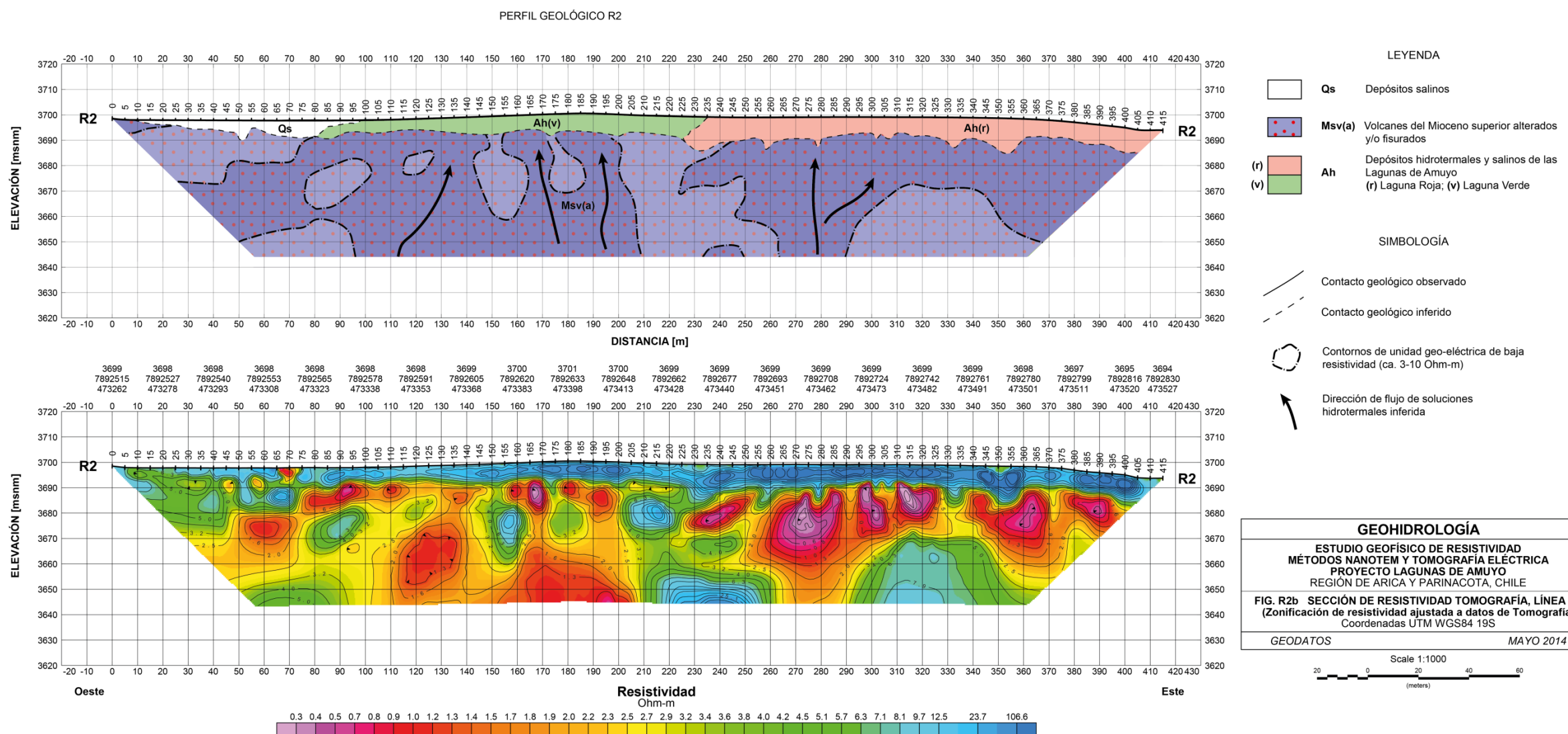


Figura 6-21: Interpretación geológica de sección Tomografía Eléctrica R2



7 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

La metodología utilizada para la caracterización hidrogeológica del área, y la elaboración del mapa hidrogeológico consideró fundamentalmente los siguientes aspectos:

1. Basados en las características litológica y geológicas se agruparon las unidades geológicas en función de su capacidad de almacenar y transmitir agua subterránea (potencial hidrogeológico).
2. Basados en el mapa geológico, los perfiles geológicos y la definición de las unidades hidrogeológicas se confeccionó un mapa hidrogeológico a escala 1:25.000 basado en y perfiles hidrogeológicos.
3. No obstante la inexistencia de pozos subterráneos que permitiesen la medición de los niveles de aguas subterráneas, se estimaron las curvas piezométricas basadas en la interpretación del nivel freático en las estaciones NanoTEM.

Para la zona de estudio se establecieron cinco unidades hidrogeológicas con diferente potencial hidrogeológico. La distribución en planta de las unidades hidrogeológicas se presenta en los mapas de las figuras: Figura 7-1 y Figura 7-2. La distribución en sub-superficie de las unidades hidrogeológicas se muestra en los perfiles de las figuras: Figura 7-4, Figura 7-5, Figura 7-6 y Figura 7-7.

Basados en los perfiles NanoTEM se interpretó la profundidad del nivel piezómetro en cada uno de los perfiles. Gracias a ello, se utilizaron las estaciones NanoTEM para estimar las curvas piezométricas del acuífero localizado inmediatamente aguas arriba del embalse Caritaya.

7.1 UNIDADES ACUÍFERAS DE ALTA IMPORTANCIA HIDROGEOLÓGICA EN DEPÓSITOS NO CONSOLIDADOS (AANC)

Corresponden a depósitos fluviales mal consolidados (Hf a y b) y sales (Qs), Los depósitos fluviales se depositan en las quebradas y en una amplia llanura fluvial localizada inmediatamente aguas arriba del embalse Caritaya. Estos depósitos están compuestos fundamentalmente por gravas y arenas que albergan acuíferos libres que son recargados por aportes aguas hidrotermales y por aguas meteóricas.

Aguas arriba del embalse se desarrolla el acuífero de mejores características hidrogeológicas de la zona de estudio, el cual se desarrolla en la llanura fluvial (Figura 7-2). Como se observa en la piezometría (Figura 7-2) el acuífero fluye de este a oeste paralelo al eje del valle y es recargado por aportes provenientes desde la parte alta del río Caritaya y en menor medida por aportes de la quebrada Asintoveco. En este sector, la zona saturada alcanza un espesor máximo de 12-15 metros y el agua superficial río alimenta al acuífero (Figura 7-5 y Figura 7-6).

Aguas arriba de la llanura fluvial, el río Caritaya fluye encajonado, relleno con cerca de 5-8 metros de depósitos fluviales (Perfil L2) que almacenan y transmiten las aguas

subterráneas. En este sector el acuífero alimenta a las aguas superficiales del río Caritaya (Figura 7-4).

7.2 UNIDADES ACUÍFERAS DE MEDIA A BAJA IMPORTANCIA HIDROGEOLÓGICA EN DEPÓSITOS NO CONSOLIDADOS (AMNC)

Esta unidad hidrogeológica está compuesta por el siguiente grupo de unidades geológicas: Depósitos aluviales (Qa), Depósitos coluviales (Qc), Depósitos glaciales (Qg) y Depósitos piroclásticos de caída (Qpv). Los depósitos Qa, Qc y Qg son depósitos mal seleccionados compuestos por gravas y con contenidos variables de arcilla y limo en su matriz. Los depósitos piroclásticos (Qpv) corresponden principalmente a toba de ceniza mal consolidadas. Pueden formar acuíferos de extensión localizada, de espesores reducidos y en tránsito (Figura 7-5), los cuales presentan una baja recarga o se localizan en las partes altas de las cuencas, pudiendo ser recargados estacionalmente por los deshielos. Dada su gran variabilidad en el tamaño del grano su transmisividad puede ser muy variable, con excepción de los depósitos piroclásticos cuya transmisividad puede ser reducida.

7.3 UNIDADES ACUÍFERAS DE ALTA IMPORTANCIA HIDROGEOLÓGICA EN ROCAS (AARA)

Esta unidad hidrogeológica corresponde a depósitos volcánicos del mioceno Superior (Msv) los cuales han sido fuertemente afectados por procesos de alteración hidrotermal pervasiva. En esta unidad el macizo rocoso se encuentra alterado y fracturado, lo cual permite el desarrollo de una alta permeabilidad secundaria, que canaliza el ascenso de fluidos por zonas con mayor grado de fracturamiento y alteración. Esta unidad hidrogeológica ha sido determinada bajo el domo de precipitados de las Lagunas de Amuyo y a través de ella se transmite el agua que da origen y nutre a las lagunas.

7.4 UNIDADES ACUÍFERAS DE MEDIA A BAJA IMPORTANCIA HIDROGEOLÓGICA EN ROCAS (AMRA)

Esta unidad hidrogeológica está compuesta por rocas las cuales han sido afectadas por una intensa alteración hidrotermal que ha reemplazo total o parcialmente la textura del protolito y están afectadas por vetas, vetillas y fracturas las cuales producen un aumento de permeabilidad secundaria. Corresponden a acuíferos en medios fracturados, de transmisividad variable, los cuales representan un aporte importante de aguas hidrotermales al río Caritaya preferentemente desde las quebradas del margen sur de la cuenca (Figura 7-3).

7.5 UNIDADES ACUÍFERAS DE BAJA IMPORTANCIA HIDROGEOLÓGICA EN ROCAS (AMRX)

Corresponden a depósitos volcánicos del Mioceno al Pleistoceno (Mmv, Msv y Pv) y a Depósitos Piroclásticos del Mioceno Medio bien consolidados (M3t) los cuales no han sido importantemente alterados hidrotermalmente. Son formaciones geológicas de baja permeabilidad que no son capaces de almacenar o transmitir agua.

Figura 7-1: Mapa hidrogeológico

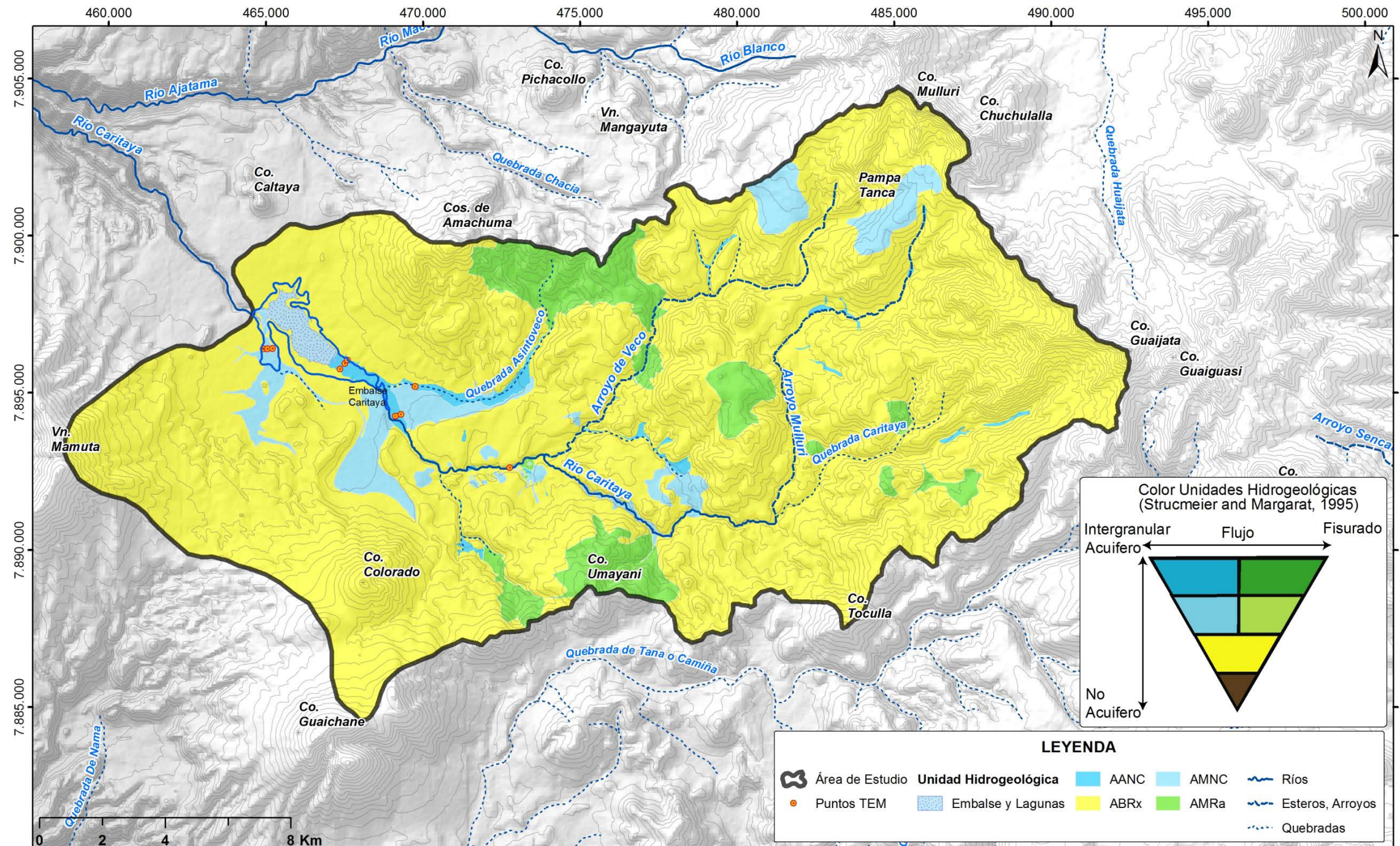


Figura 7-2: Mapa hidrogeológico sector río Caritaya y Lagunas Amuyo

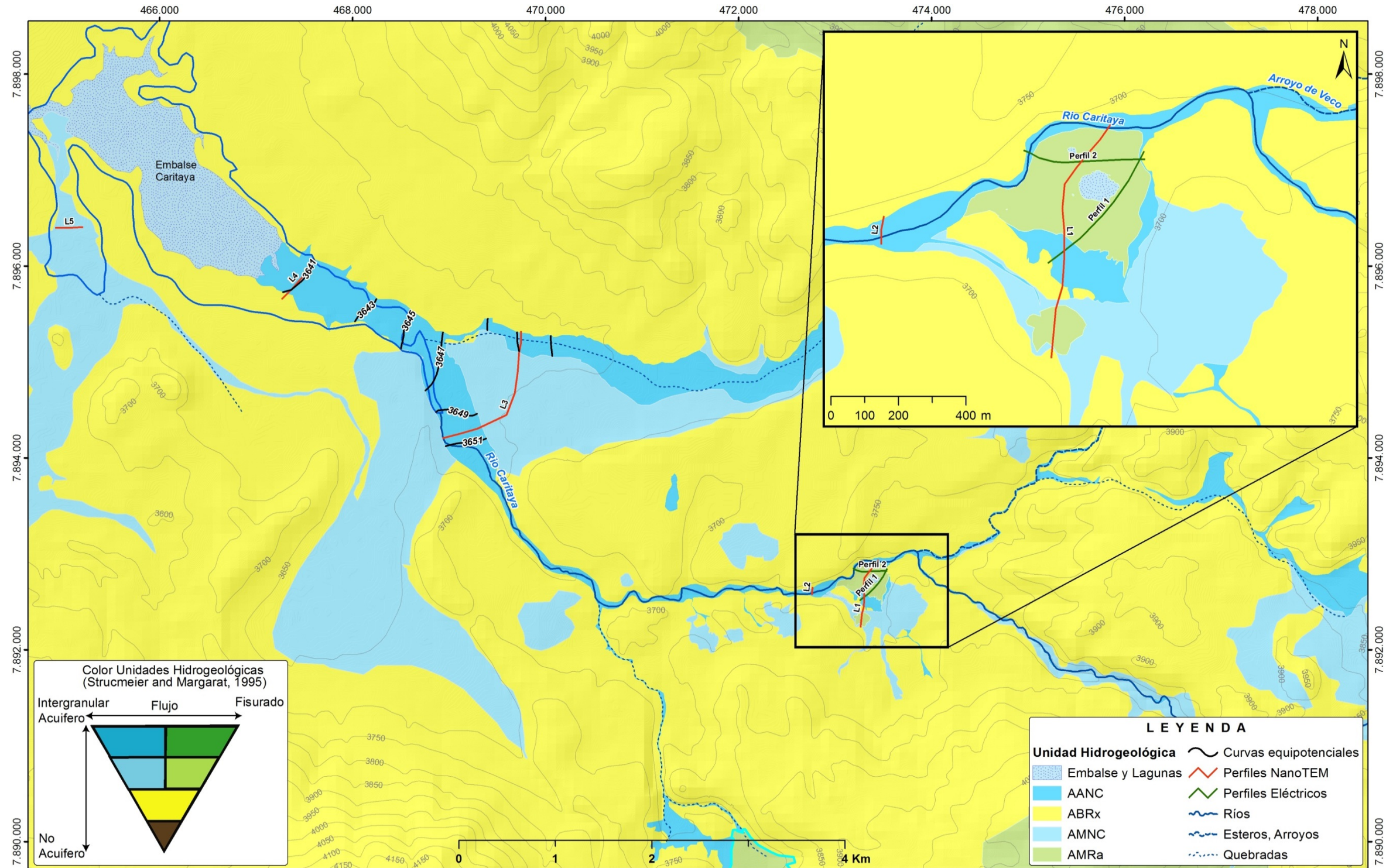


Figura 7-3: Perfil hidrogeológico L1

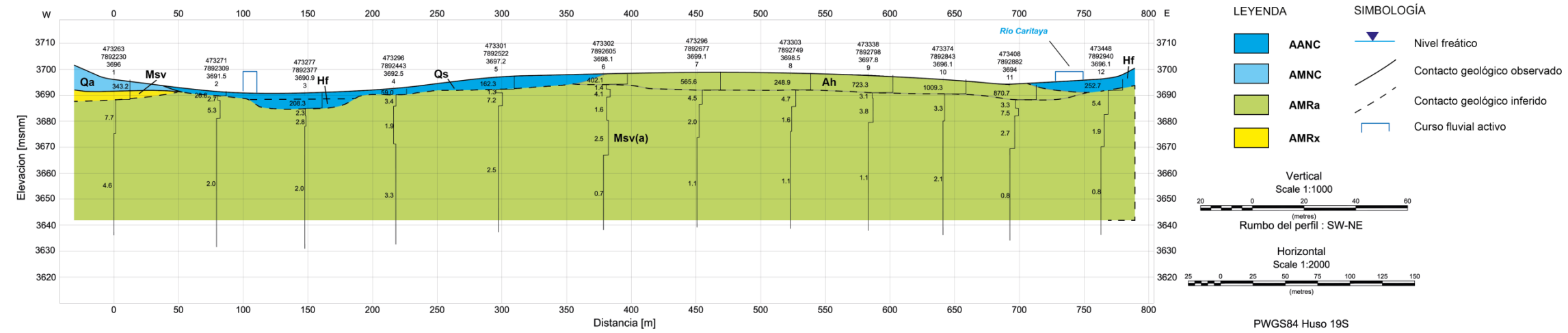


Figura 7-4: Perfil hidrogeológico L2

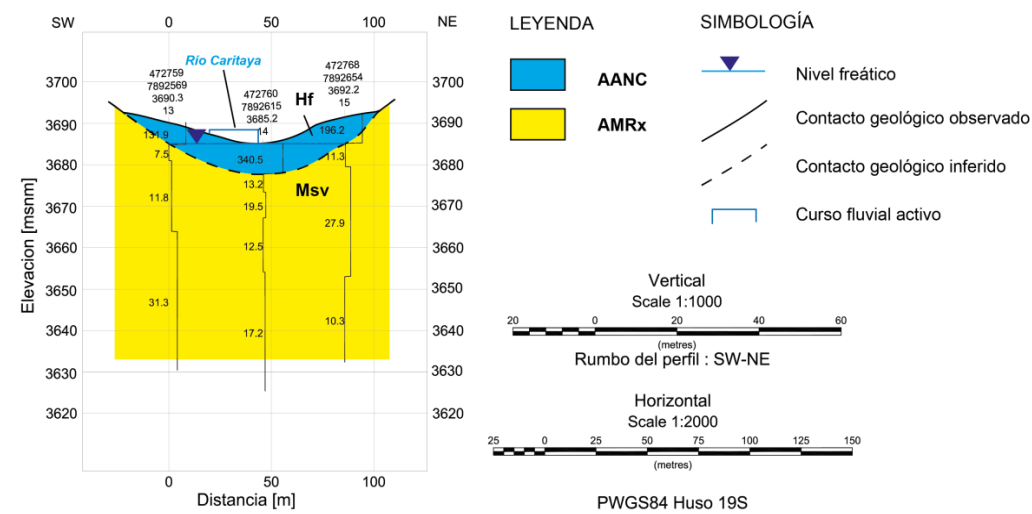


Figura 7-5: Perfil hidrogeológico L3

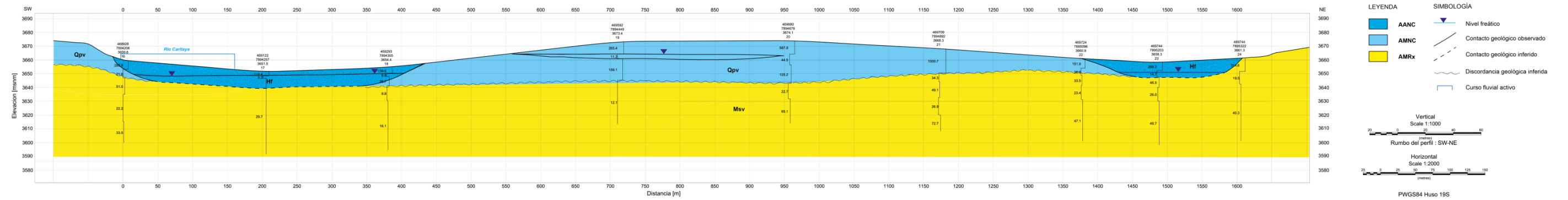


Figura 7-6: Perfil hidrogeológico L4

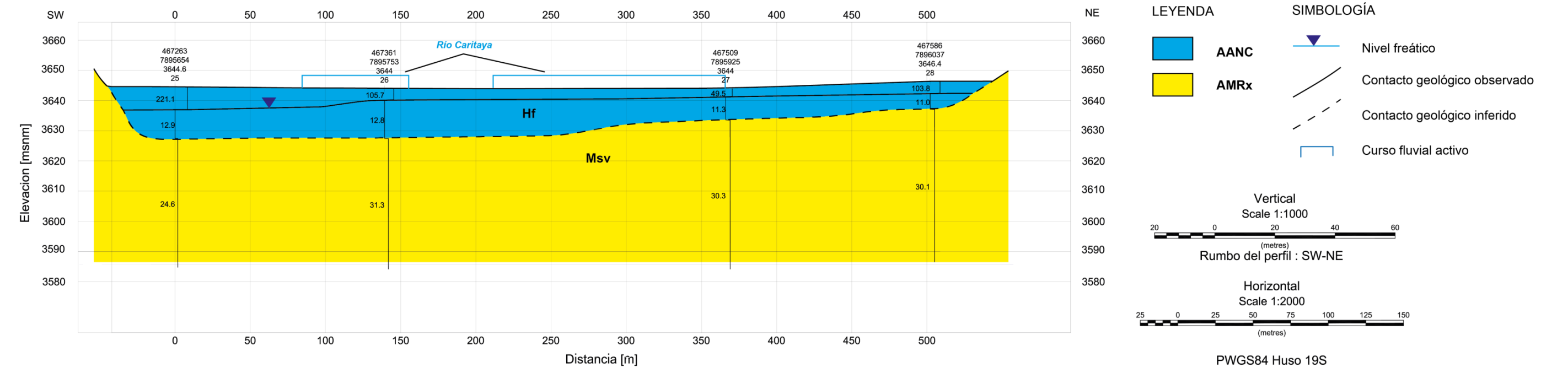


Figura 7-7: Perfil hidrogeológico L5

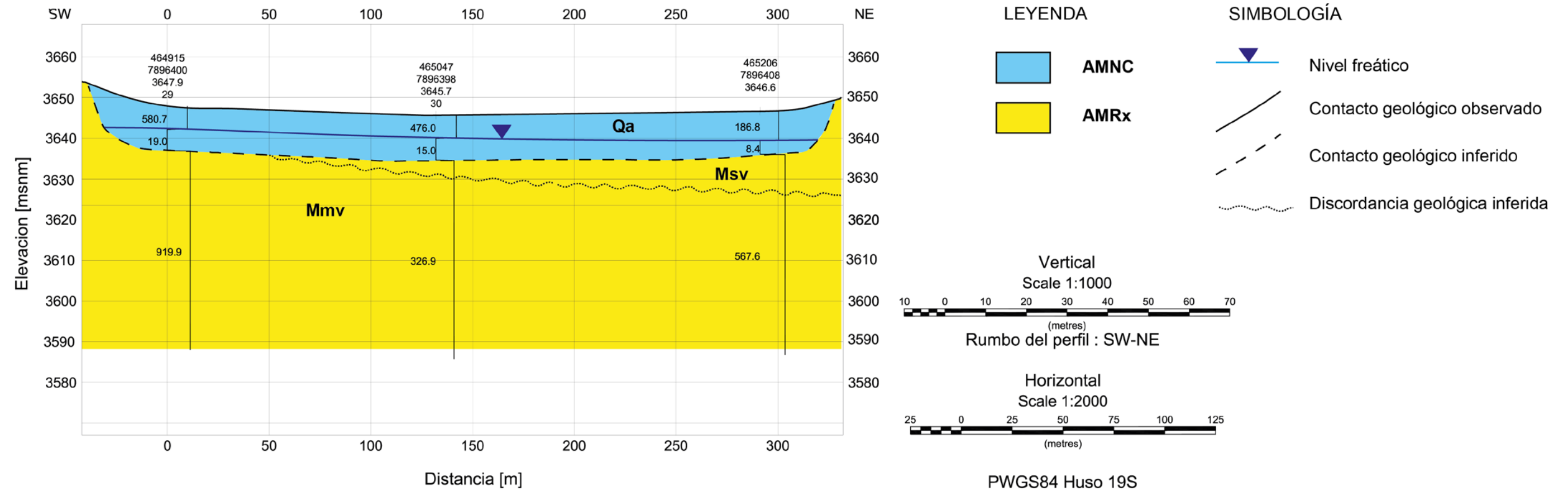
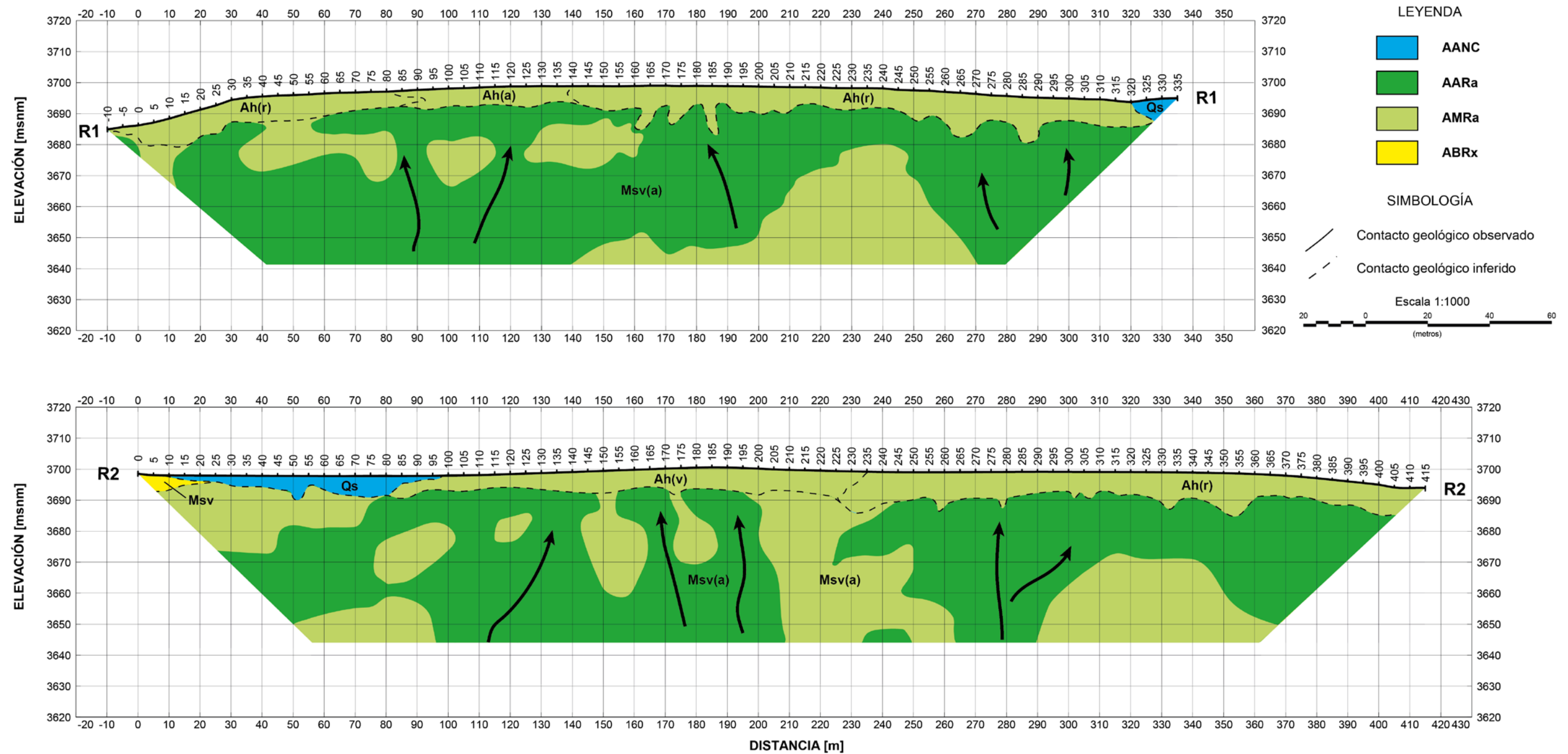


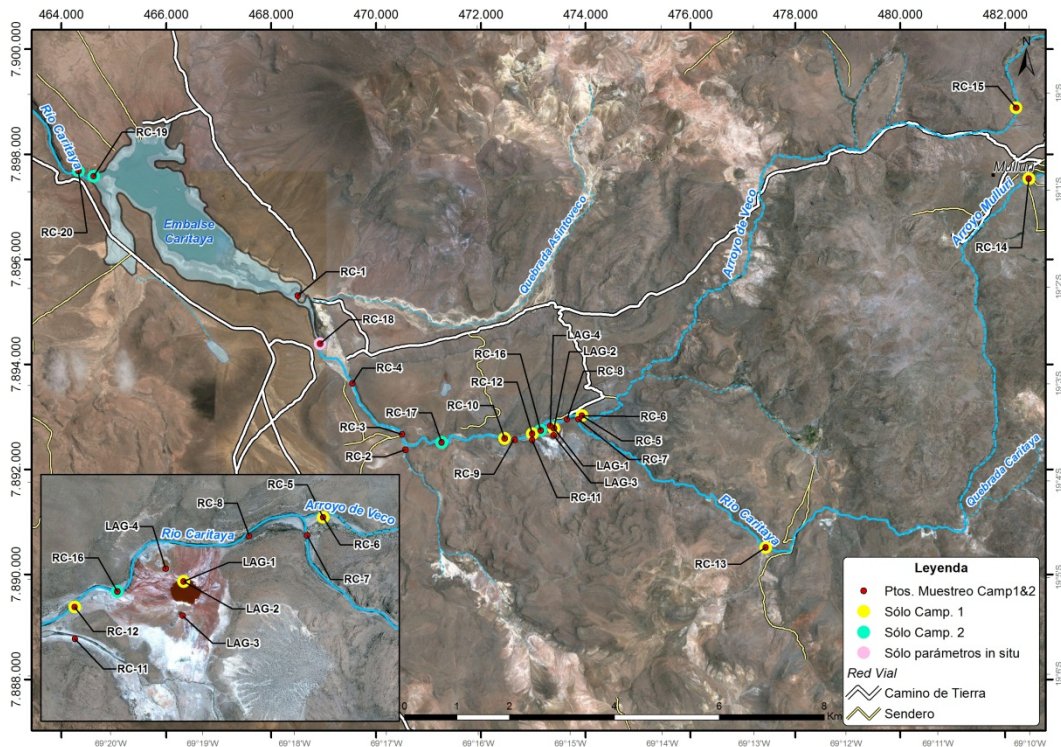
Figura 7-8: Perfil hidrogeológico R1 y R2



8 CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA

Con el objetivo de facilitar la interpretación de los resultados en la Figura 8-1 se presenta la ubicación de los puntos de muestreo indicando si fueron muestreados en una o en ambas campañas.

Figura 8-1: Ubicación de puntos de muestreo hidroquímico



Las muestras de agua superficial del área de estudio han sido representadas en el análisis siguiente con distintos símbolos según su ubicación, como se muestra en la Figura 8-2.

La muestra del tramo superior del arroyo de Veco (RC-15) ha sido representada con una cruz azul y las que están cerca de la desembocadura con el río Caritaya con cuadrados azules (RC-6 y RC-7). La muestra del arroyo Mulluri está identificada con un rombo (RC-14).

Las muestras del tramo medio del río Caritaya han sido representadas con círculos y las del tramo bajo han sido identificadas con triángulos (RC-4, RC-18 y RC-4). Las muestras de las lagunas se identifican con el color de cada una, rojo (Lag-1 y Lag-2), verde (Lag-3) y

amarillo (Lag-4). Por último las muestras de la salida del embalse se representan como una estrella (RC-19 y RC-20).

Figura 8-2: Leyenda de gráficos

▼ LAG-2	★ RC-19
● Lag-3	✱ RC-2
▲ Lag-4	✱ RC-20
△ RC-1	○ RC-3
○ RC-10	▽ RC-4
⊕ RC-11	□ RC-5
○ RC-12	□ RC-6
✱ RC-13	▲ Lag-1
◇ RC-14	⊕ RC-7
⊕ RC-15	○ RC-8
⊕ RC-16	⊕ RC-9
⊕ RC-17	

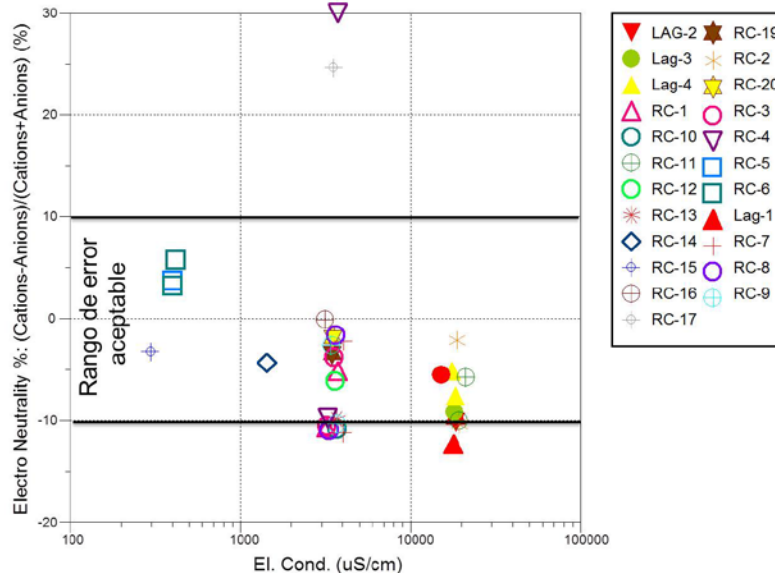
8.1 CÁLCULO DE ERROR DE BALANCE

Los resultados de los análisis químicos de cada campaña fueron validados por el método del error del balance iónico, el cual se basa en el principio de electroneutralidad del agua. El balance iónico considera el contenido de aniones (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , etc.) y de cationes (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , etc.). De esta forma, se verificó que la suma de miliequivalentes de los aniones fuese igual a la suma de miliequivalente de cationes mediante el cálculo del error de balance iónico que entrega la siguiente ecuación:

$$error (\%) = 100 \times \frac{\sum cationes - \sum aniones}{\sum cationes + \sum aniones} \quad \text{Ecuación 2}$$

Se considera aceptable hasta un 10% de error, condición que se cumple en la mayoría de las muestras. No obstante, los análisis que se han detectado fuera de rango están siendo revisados por el laboratorio para el caso particular de las muestras RC-4b, RC-17b y Lag-1b (Figura 8-3).

Figura 8-3: Muestras dentro y fuera del rango de error aceptable



8.2 DESCRIPCIÓN PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS (DESCRIPCIÓN RANGOS, TABLAS, PLANTA CE (GENERAL, DETALLE DE LAS LAGUNAS, Y PERFIL DESCARGA)

En la Figura 8-4 se presenta la relación entre el pH y la conductividad eléctrica (CE) de los puntos de muestreo medidos en terreno. El pH varía entre 6,7 y 8,7 con un pH promedio cercano a 8 alcalinas. Las lagunas de Amuyo presentan un pH neutro (entre 7 y 7,5) y las del río Caritaya y sus tributarios son alcalinos (entre 8 y 8,7).

La CE varía en un amplio rango desde 297 a 21.180 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que permite clasificar a las aguas en tres grupos: frescas, salobres y salobres con tendencia salada (Figura 8-4).

Comparativamente, el grupo de aguas frescas ($<2.000 \mu\text{S}/\text{cm}$) tiene los valores de pH más alcalino de las aguas muestreadas (Figura 8-4). El arroyo de Veco destaca porque contiene las aguas más frescas de la subcuenca, en sus nacientes registra una conductividad de 297 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 8-5) la cual aumenta hasta cerca de 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (401 y 418 $\mu\text{S}/\text{cm}$) en su confluencia con el río Caritaya (Figura 8-5 y Figura 8-6). Las aguas del arroyo Mulluri, en las cercanías del poblado homónimo, presentan una conductividad de 1.435 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 8-5).

Las aguas salobres con una conductividad entre 3.000 y 4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ presentan pH promedio cercano a 8 (Figura 8-4) y se documentaron el río y el embalse Caritaya (Figura 8-5 y Figura 8-6). Una notoria disolución se registra en el río Caritaya desde cerca de 4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (entre 4.008 y 4.050 $\mu\text{S}/\text{cm}$) a cerca de 3.500 (3.331 y 3.650 $\mu\text{S}/\text{cm}$) luego del aporte de agua fresca proveniente del arroyo de Veco.

Las aguas del embalse y aguas abajo del mismo presentan una escasa variación en su conductividad, lo cual es indicativo que la conductividad eléctrica está dada por especies disueltas más que por especies en suspensión sedimentable (Figura 8-6).

Las aguas de las Lagunas de Amuyo y aquellas provenientes de quebradas del margen sur de la subcuenca presentan una conductividad entre 15.240 y 21.180 (Figura 8-5). Las aguas de las lagunas presentan un pH neutro entre 7 y 7,5 el cual las diferencia de las quebradas del margen sur que presentan un pH levemente superior a 8 (Figura 8-4).

Figura 8-4: Gráfico relación pH y conductividad eléctrica (El. Cond.)

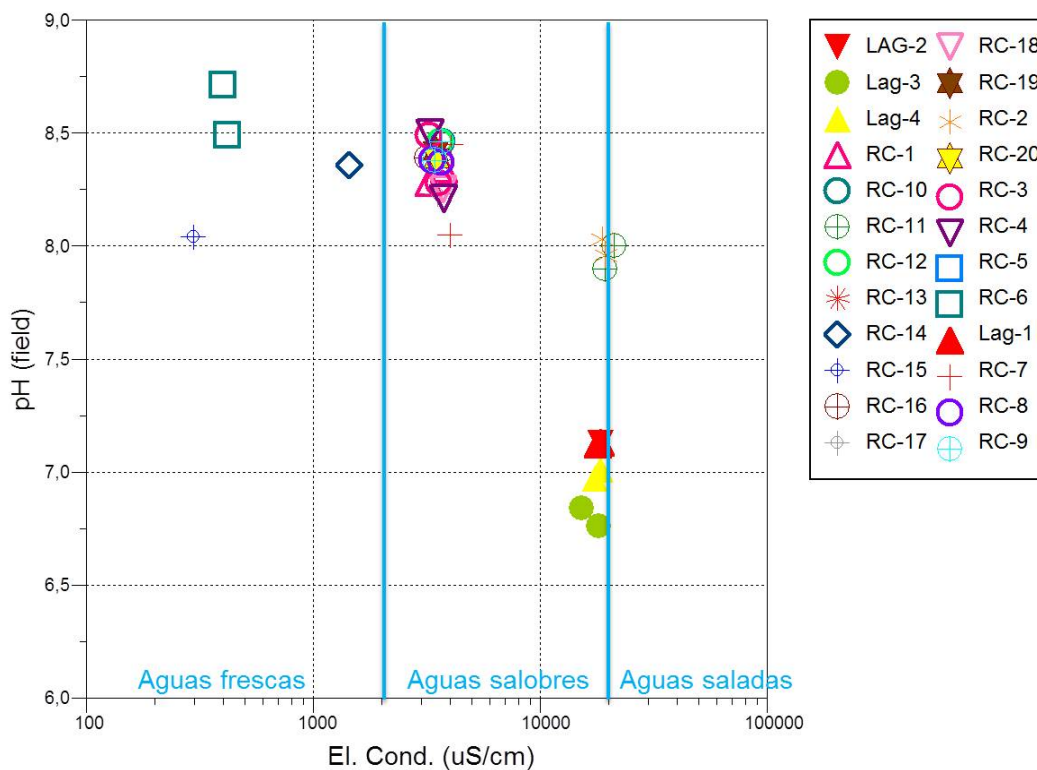


Figura 8-5: Distribución de la CE en campaña 1

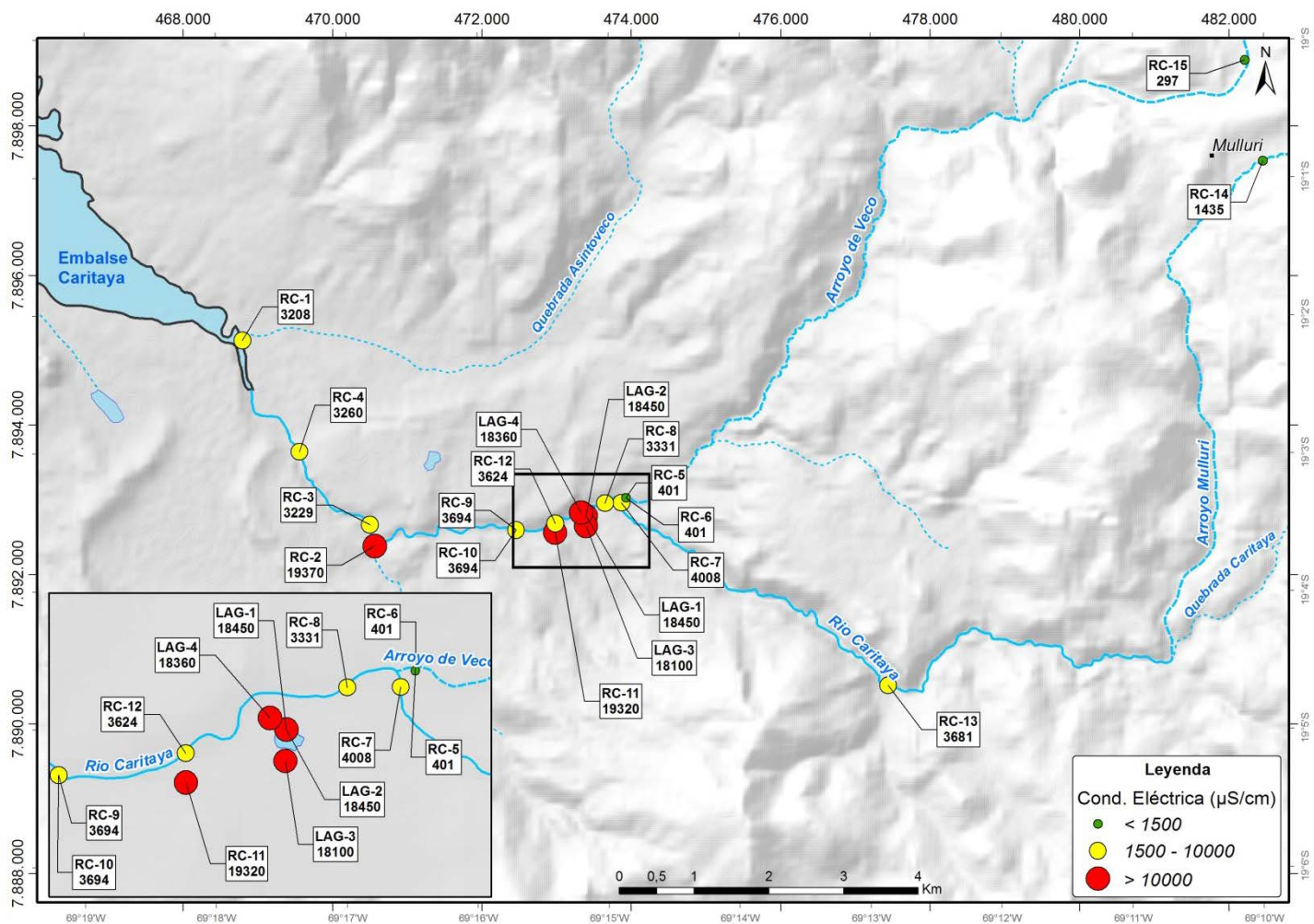
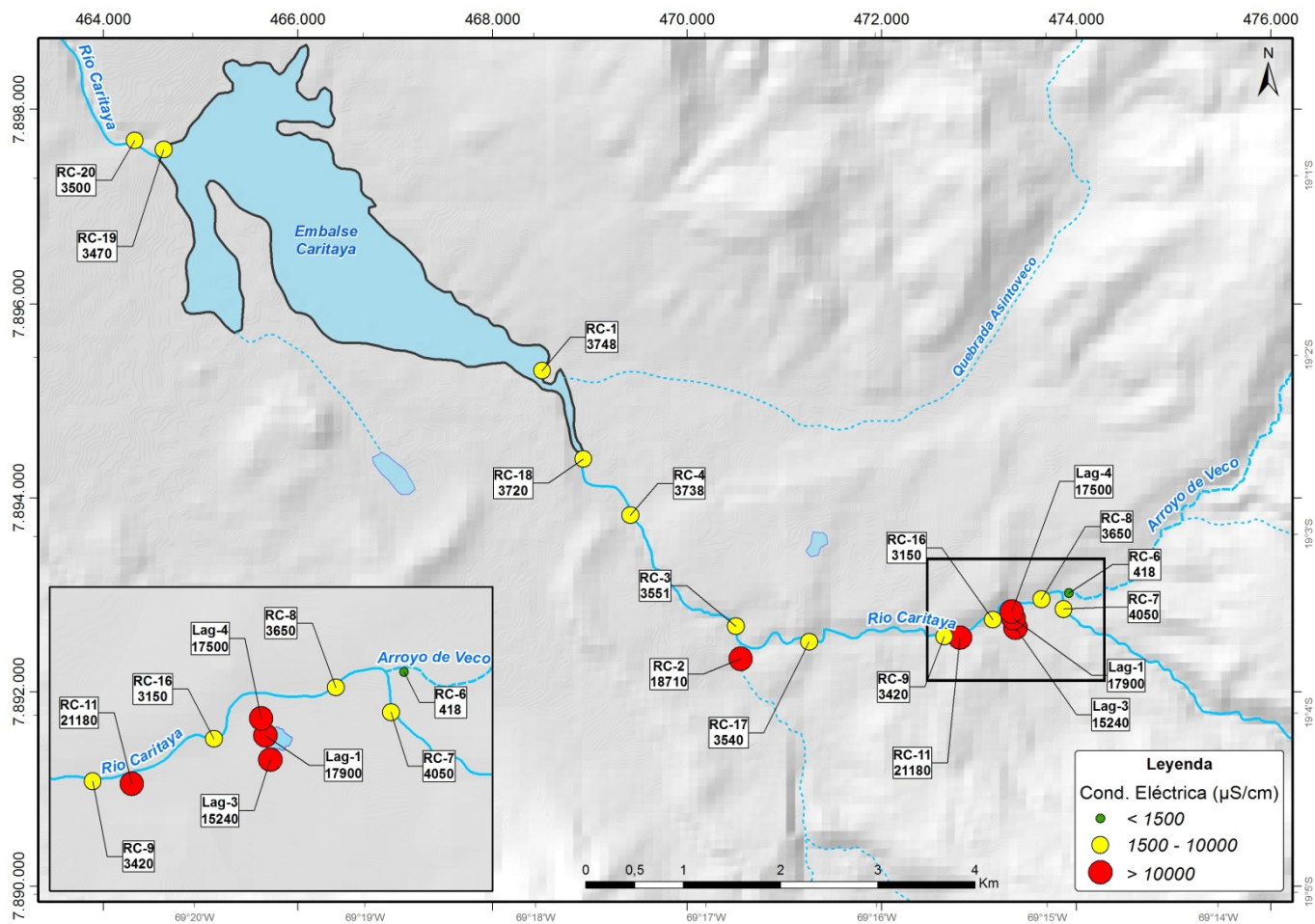
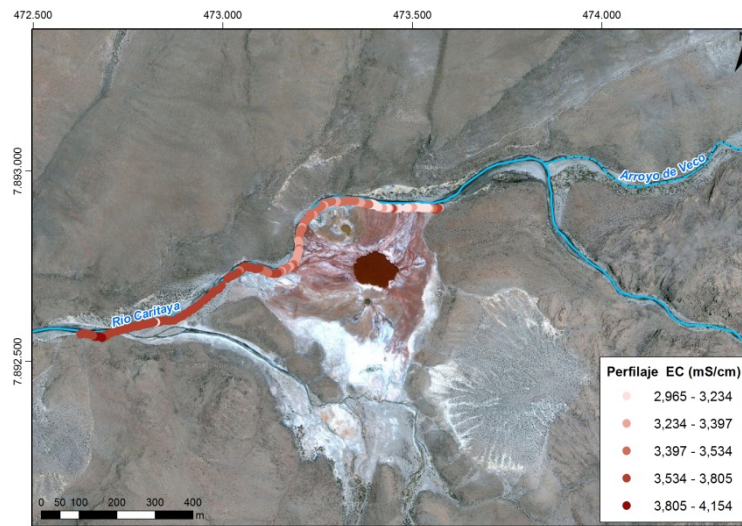


Figura 8-6: Distribución de la CE en campaña 2



Luego del paso por las lagunas de Amuyo el río Caritaya aumenta su conductividad eléctrica (Figura 8-5 y Figura 8-6). Un barrido de conductividad realizado durante su tránsito revela un aumento desde valores cercanos a los 3.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta valores cercanos a los 4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

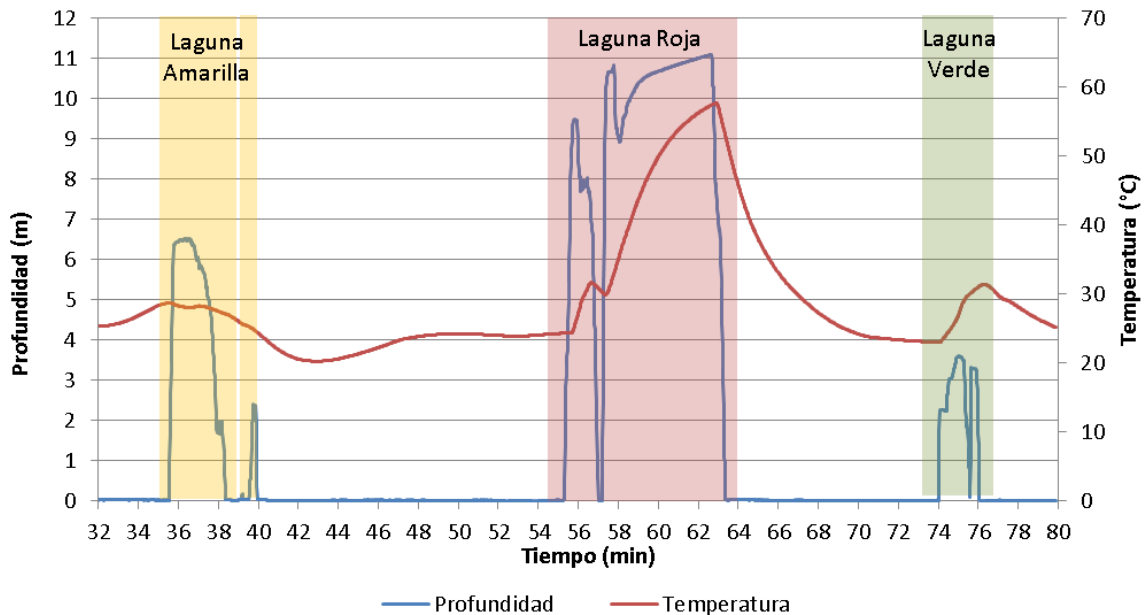
Figura 8-7: Perfil de conductividad del río Caritaya durante su paso por las Lagunas de Amuyo



En las lagunas se realizaron mediciones de temperatura, pH y Conductividad eléctrica superficial. En forma extraordinaria, se midieron las temperaturas y profundidad aproximada del fondo de las lagunas con un transductor marca In-Situ Inc. modelo Rugged troll 100. El transductor fue amarrado a una cuerda, lanzado al centro de la laguna y luego recogido por uno de sus bordes. Con esto se obtuvieron mediciones de temperatura y profundidad a lo largo de la sección por donde el transductor es arrastrado.

Los resultados de esta investigación se muestran en la Figura 8-8. En el eje de las abscisas se presenta el tiempo en el cual el transductor estuvo recolectando datos (con frecuencia de 1 segundo), en el eje de las ordenadas principal se presenta la profundidad y en el eje de las ordenadas secundario se presenta la temperatura.

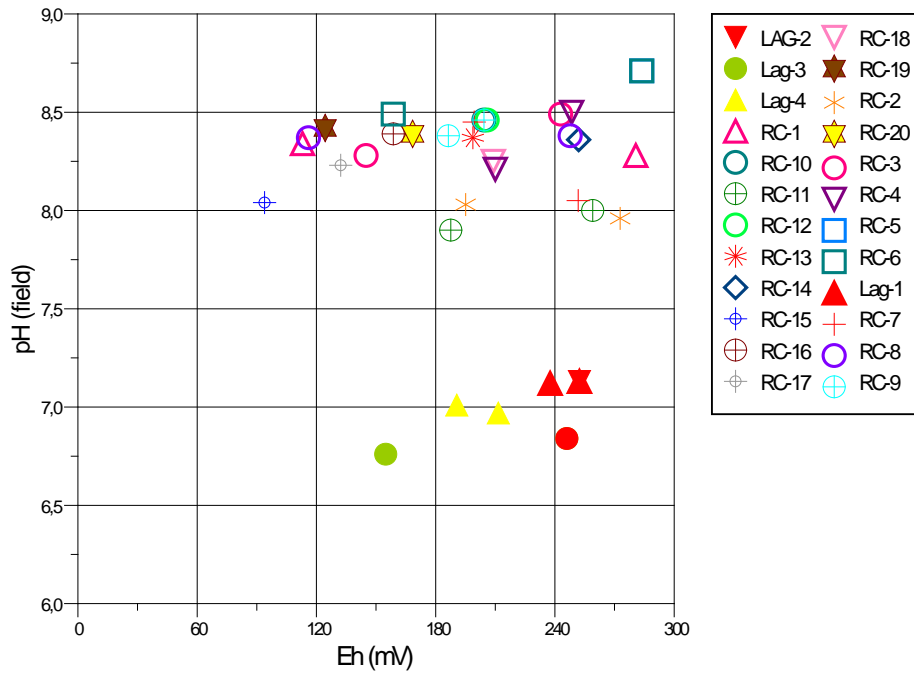
Figura 8-8: Perfiles de temperatura y profundidad de las lagunas de Amuyo



La laguna Roja posee una temperatura superficial cercana a 24,5°C y una profundidad estimada de 11 m, donde se midió una temperatura de 57°C. La laguna amarilla, que es la más próxima al río Caritaya, presenta una temperatura superficial de 25°C, una profundidad estimada de 6,5 m donde se midió una temperatura de 28°C. Luego de cerca de 2 meses luego del terremoto se registró un descenso de aproximadamente 1 metro solo en el nivel de la Laguna Amarilla. La laguna verde presenta una temperatura superficial de 33°C y una profundidad estimada de 3,5 m donde se midió una temperatura de 33°C.

El potencial de óxido reducción de todas las muestras es positivo y fluctúa entre 93 y 284 mV (Figura 8-9). No obstante, se observaron zonas reductoras en los fangos existentes al fondo de las lagunas.

Figura 8-9: Mediciones de pH y Eh in situ



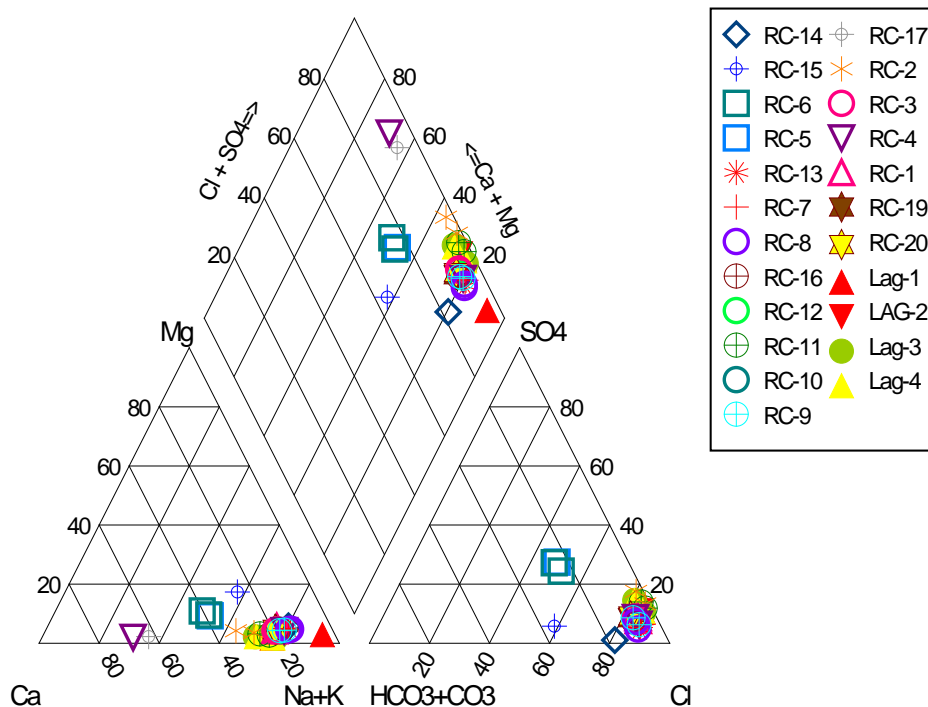
8.3 CLASIFICACIÓN HIDROQUÍMICA Y DESCRIPCIÓN ESPACIAL

La clasificación composicional de las aguas superficiales del sector del río Caritaya se basa en la proporción relativa de los elementos mayoritarios diferenciados en aniones y cationes. En el diagrama de Piper de la Figura 8-10 se observa que las muestras del río Caritaya y las muestras de las lagunas de Amuyo son cloruradas sódicas. Con excepción de las muestras RC-04 y RC-17, localizadas en el río Caritaya que son cloruradas cálcicas. Ello se puede deber a la incorporación de carbonatos cálcicos en suspensión durante el muestreo.

Se interpreta que las aguas salobres cloruradas sódicas del río Caritaya se originan por aportes de aguas meteóricas que lixivian zonas de alteración y reciben aportes de afloramientos hidrotermales directos. Del mismo modo, las aguas salobres de las lagunas de Amuyo corresponden a aguas de origen hidrotermal.

Las muestras del arroyo de Veco y Mulluri son aguas cloruradas sódico- cálcicas con porcentajes de bicarbonato mayores que las muestras del río Caritaya. Se interpreta una fuente meteórica para las aguas frescas del arroyo de Veco con escaso aporte hidrotermal o de lixiviación de zonas de alteración.

Figura 8-10: Diagrama de Piper



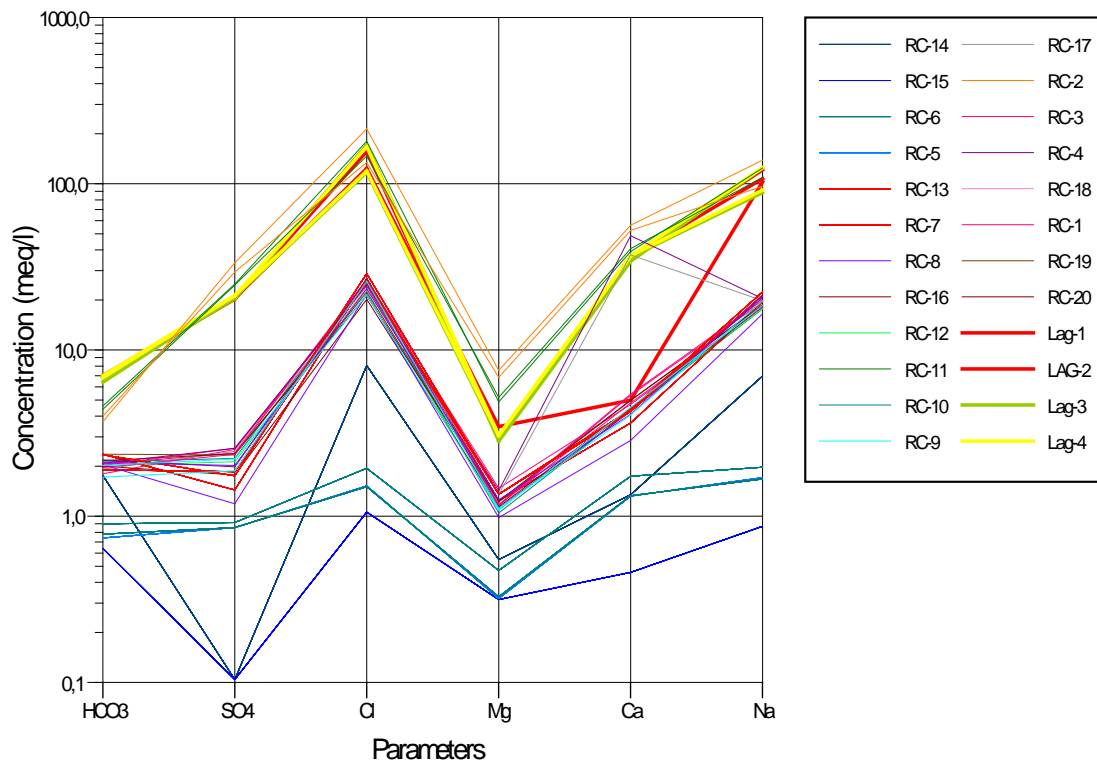
En el diagrama de Schoeller las aguas del arroyo de Veco (RC-15, RC-5 y RC-6) -presentan concentraciones de elementos mayores notoriamente menores que las muestras del río Caritaya y las lagunas de Amuyo. Estas aguas corresponderían a miembros extremos de aguas frescas del sistema, cuyo origen principal son las aguas meteóricas y presentan escasa interacción o aportes de zonas hidrotermales.

Por el contrario, las aguas salobres de las lagunas de Amuyo (Lag-1, 2, 3 y 4) y las quebradas del sur (RC-2 y RC-11) presentan grandes concentraciones de elementos mayores (fundamentalmente Cl y Na) y son el miembro que representa los aportes hidrotermales al río Caritaya.

Las aguas salobres del río Caritaya corresponden a la mezcla entre ambos miembros extremos antes descritos, por ello presentan concentraciones intermedias de los iones mayoritarios.

Las aguas frescas del arroyo Mulluri (RC-14) corresponderían a una mezcla entre ambos miembros con menor proporción de aportes hidrotermales en comparación a las aguas del río Caritaya.

Figura 8-11: Diagrama de Schoeller



En la Figura 8-12 se señala la composición de los puntos de muestreo en los diagramas de Stiff para la primera campaña (marzo) y en la Figura 8-13 es posible observar los diagramas de Stiff para la segunda campaña (mayo). En ambas figuras se observa claramente que la composición predominante de las aguas superficiales del sector es clorurada sódica.

Las aguas frescas del arroyo Veco son cloruradas sódico-cálcicas a lo largo de todo su tránsito y dado que su caudal es cerca de un 25% del río Caritaya y su salinidad es 10 veces menor, en su confluencia produce una dilución leve, la cual es recuperada al paso de las lagunas de Amuyo y las quebradas del margen sur de la cuenca que presentan mayores concentraciones de Cl y Na (Figura 8-12 y Figura 8-13).

El río Caritaya, antes de su paso por las lagunas de Amuyo (ver puntos RC-13 y RC-7 en Figura 8-12 y Figura 8-13), presenta una conductividad eléctrica salobre cercana a los 4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con aguas cloruradas sódicas indicando aportes hidrotermales o la lixiviación de zonas de alteración aguas arriba del punto RC-13. Esto permite interpretar que existen importantes aportes de origen hidrotermal o la lixiviación de zonas de alteración aguas arriba del arroyo Mulluri, muy probablemente en la quebrada de Caritaya.

Figura 8-12: Diagramas de Stiff campaña 1

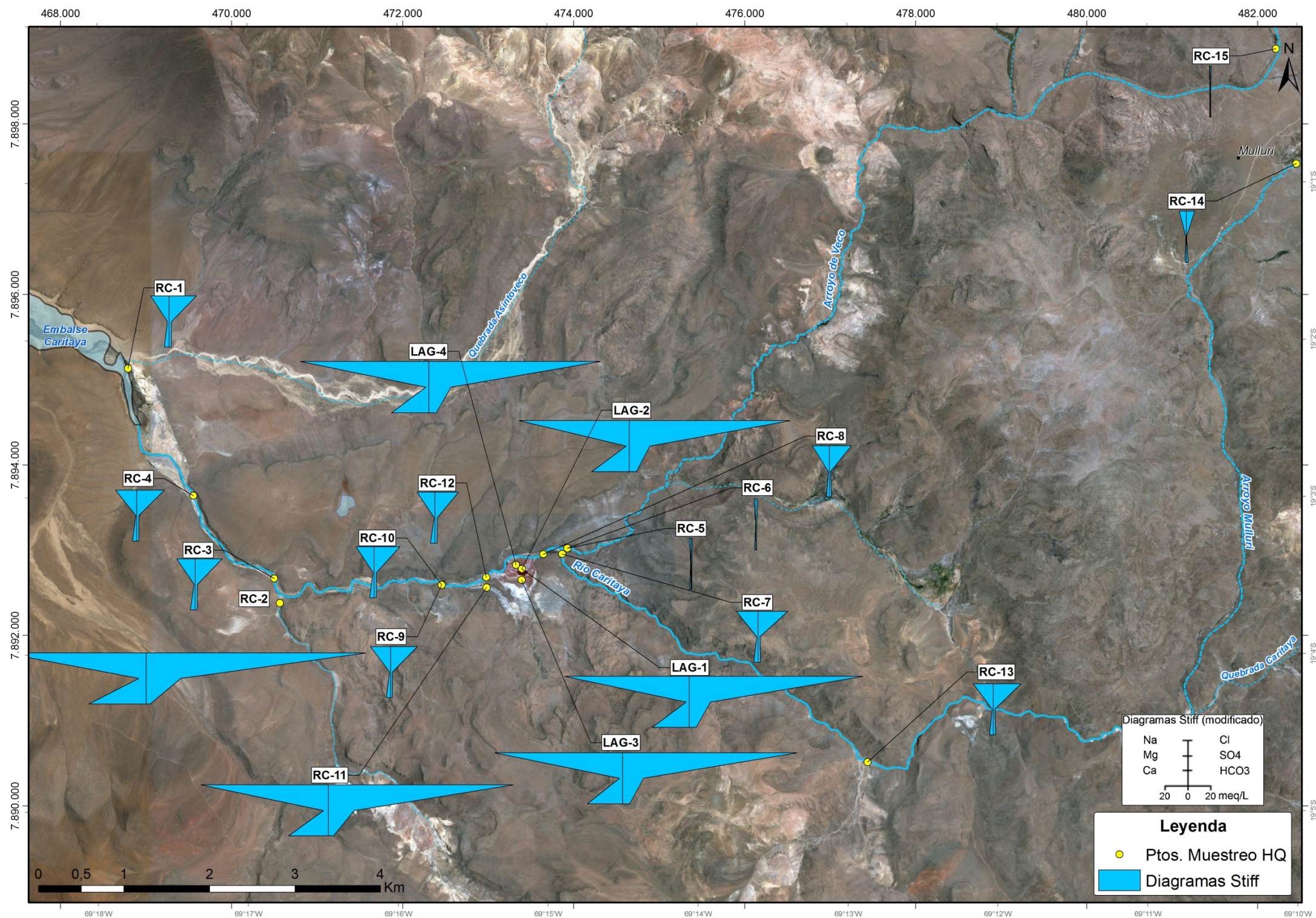
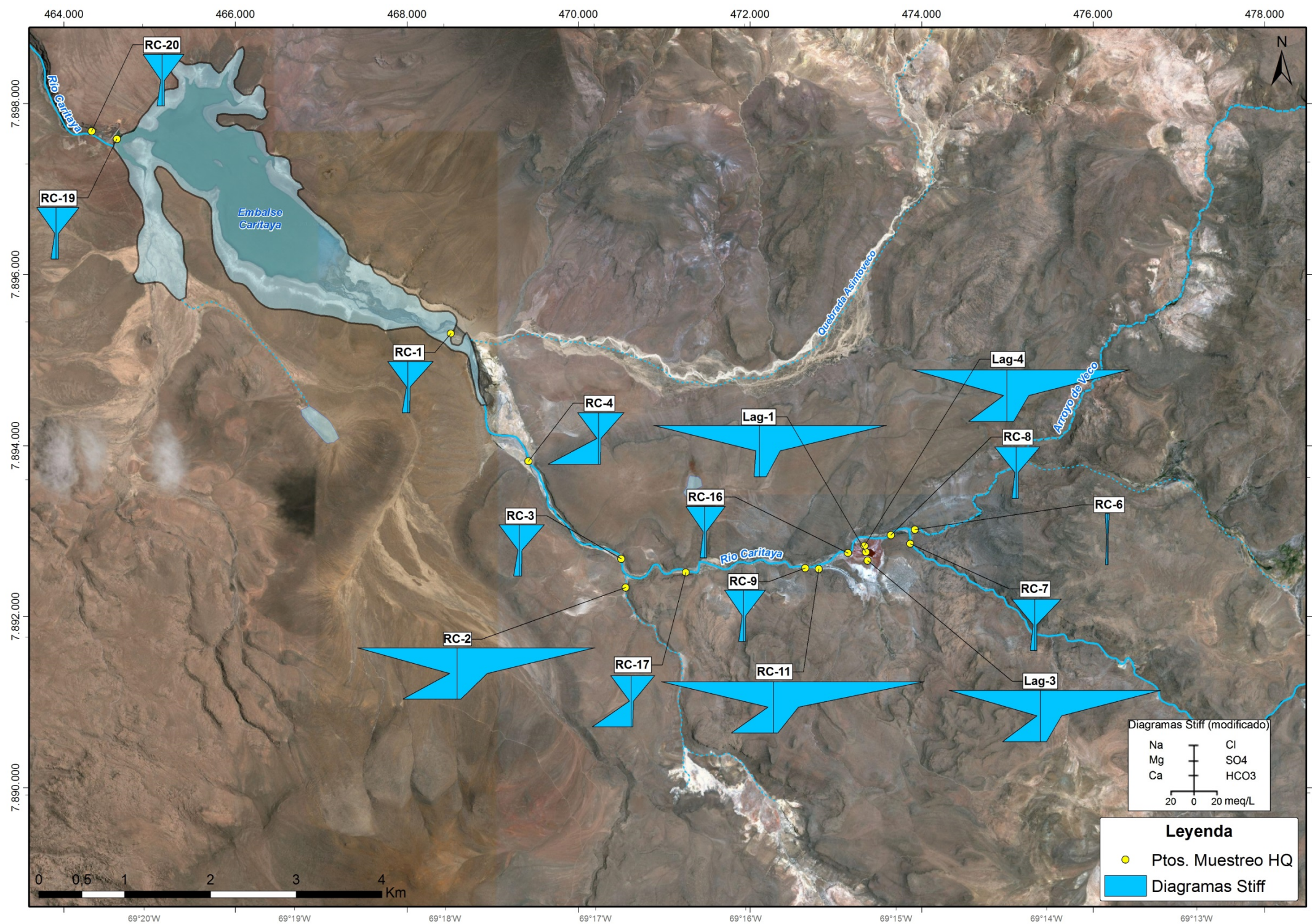


Figura 8-13: Diagramas de Stiff campaña 2



8.4 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE AS Y B

El contenido de As en los puntos de muestreo ha sido graficado mediante puntos escalados en la Figura 8-14 para la campaña 1 y en la Figura 8-15 para la campaña 2. En la parte alta del arroyo de Veco el As se encuentra bajo 0,2 mg/l, lo que aumenta ligeramente al llegar a la confluencia con el río Caritaya, ya que antes de la desembocadura los valores medidos en RC-5 y RC-6 se mantienen bajo los 0,3 mg/l.

En la parte alta del arroyo Mulluri se registró concentración de As de 1,7 mg/l. En el tramo superior del río Caritaya, antes de la confluencia con el arroyo de Veco, la concentración de As aumenta desde 4,5 mg/l de hasta 5,6 mg/l. El aporte de aguas frescas del arroyo de Veco diluye la concentración de As del río Caritaya, de 5,6 a 4,2 mg/l en la campaña de marzo y de 4,6 a 3,1 mg/l en la segunda campaña de mayo.

Las lagunas en particular destacan por su alto contenido de As (entre 15 y 25 mg/l). El aporte de las lagunas produce un leve aumento de As en el río Caritaya, de 4,2 a 4,6 mg/l en la campaña de marzo y de 3,1 a 3,4 mg/l en la segunda campaña de mayo. En la primera campaña de mayo el Caritaya presentó un promedio de As de 4,4 mg/l y en la campaña de mayo el valor descendió a 3,8 mg/l (sin considerar puntos anómalos RC-17 y RC-4).

El contenido de As del embalse es cercano a 3 mg/l (RC-19) y aguas abajo desciende ligeramente a 2,4 mg/l (RC-20). Esta disminución de la concentración de As aguas abajo del embalse refleja un abatimiento de este elemento producido por el embalse Caritaya.

Del mismo modo el contenido de B en los puntos de muestreo ha sido graficado mediante puntos escalados en la Figura 8-16 para la primera campaña de marzo y en la Figura 8-17 para la segunda campaña de mayo.

En general el comportamiento del B es similar al del As, excepto aguas abajo del embalse. Las aguas del arroyo de Veco presentan concentraciones menores a 2 mg/l desde la cabecera hasta la confluencia con el río Caritaya. Como era de esperarse las aguas frescas del arroyo de Veco causan una dilución en el contenido de B, que disminuye de 27,9 a 19,2 mg/l en la primera campaña de marzo y desde 26,92 a 23,95 mg/l en la segunda campaña de mayo.

El arroyo Mulluri presentan concentraciones de B de 8.3 mg/l, las cuales aumentan por sobre 25 mg/l aguas abajo de su unión con la Quebrada Caritaya. Esto permite reforzar la idea de que la quebrada Caritaya es una fuente importante de contaminantes naturales al río Caritaya.

Al igual que las quebradas del margen sur (RC-2 y RC-11), las lagunas poseen concentraciones de boro por sobre los 100 mg/l. En la primera campaña de marzo se detectó un leve aumento asociado a los aportes de las lagunas de Amuyo.

Contrariamente al caso del As, en el embalse Caritaya la concentración de B es de 22,46 mg/l (RC-19) y aguas bajo de éste se mantiene con una concentración similar. Esto indica que el embalse no logra abatir las concentraciones de B, producto de que este elemento es conservativo y se encuentra en disolución.

Figura 8-14: Distribución de As en campaña 1

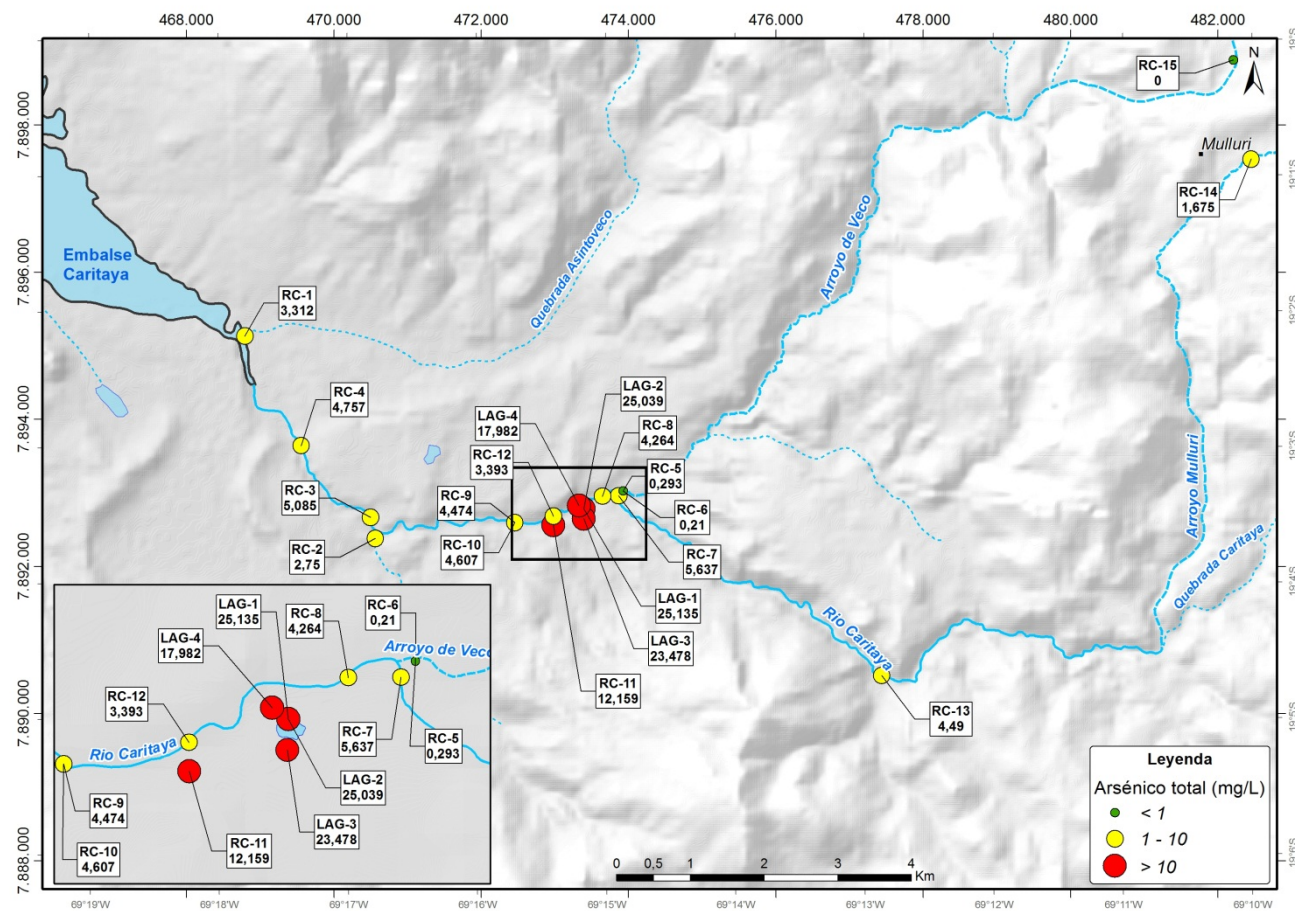


Figura 8-15: Distribución de As en campaña 2

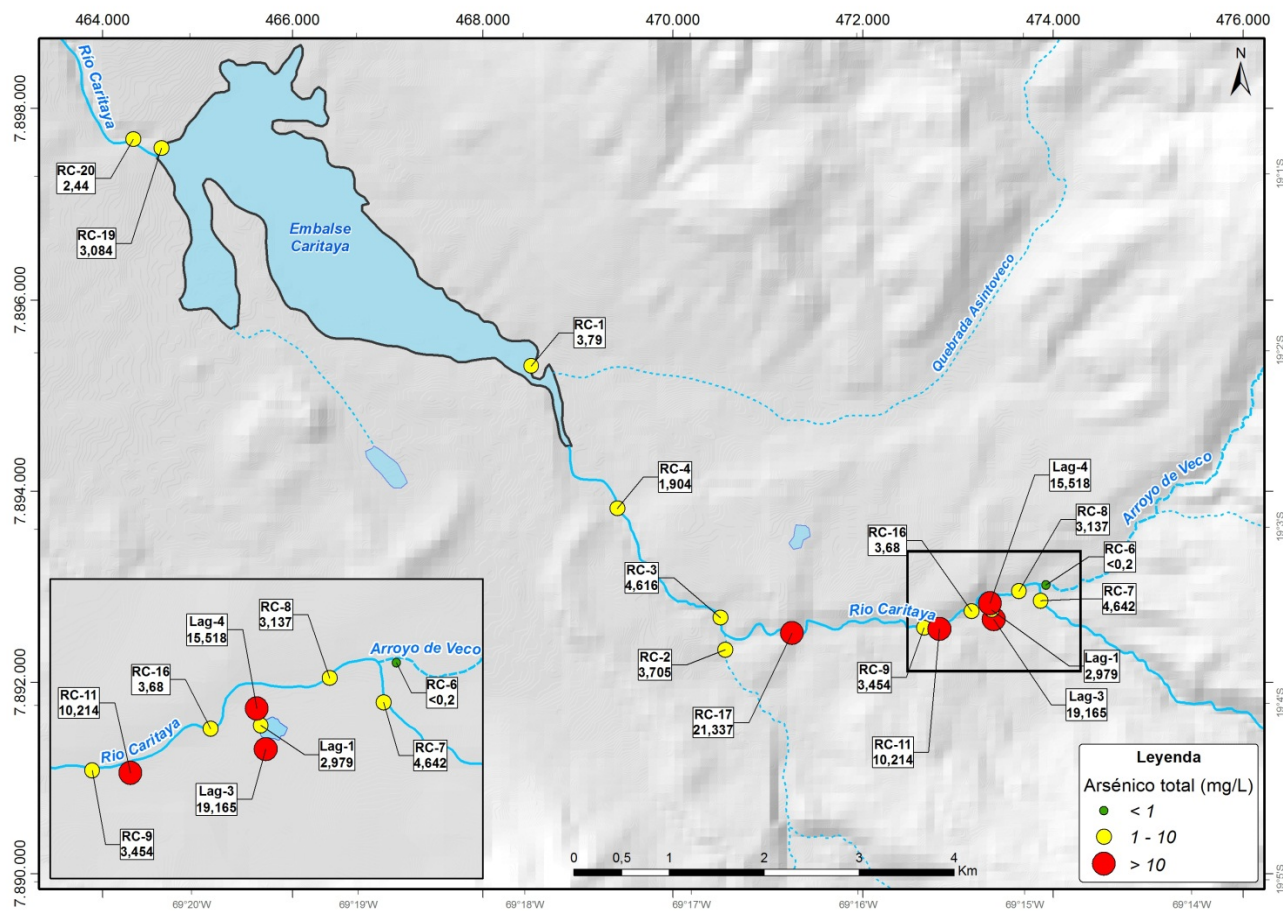


Figura 8-16: Distribución de B en campaña 1

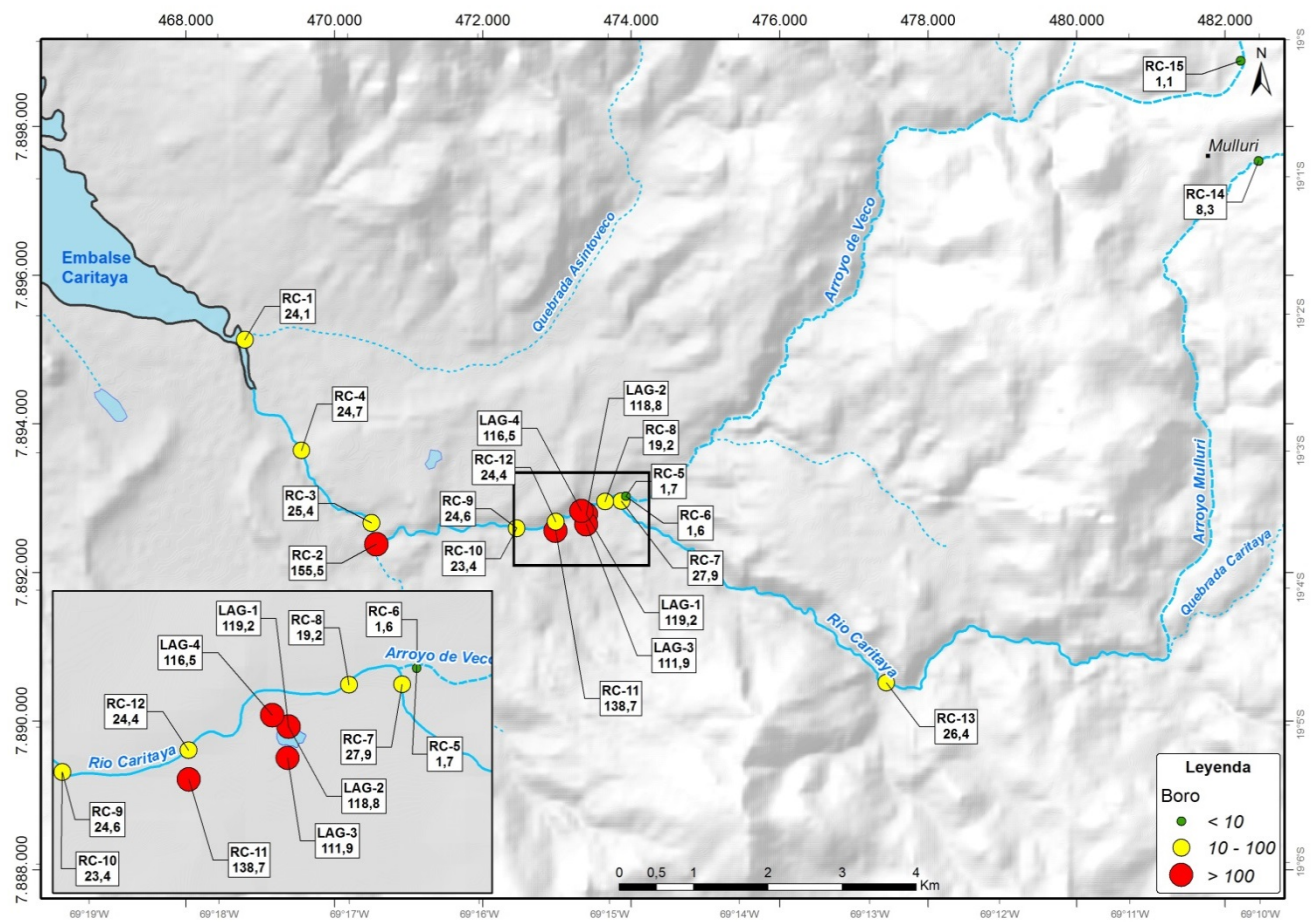
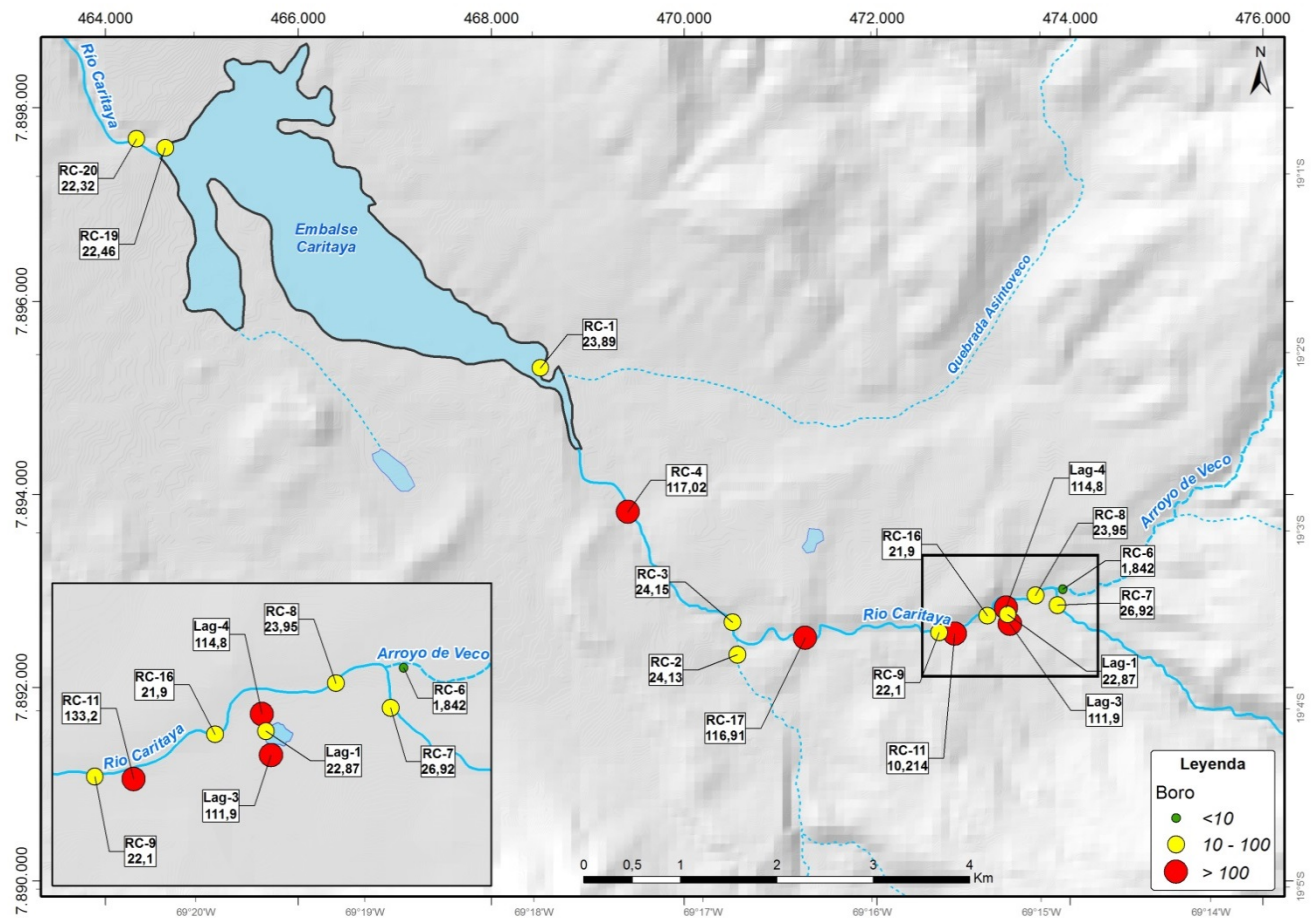


Figura 8-17: Distribución de B en campaña 2



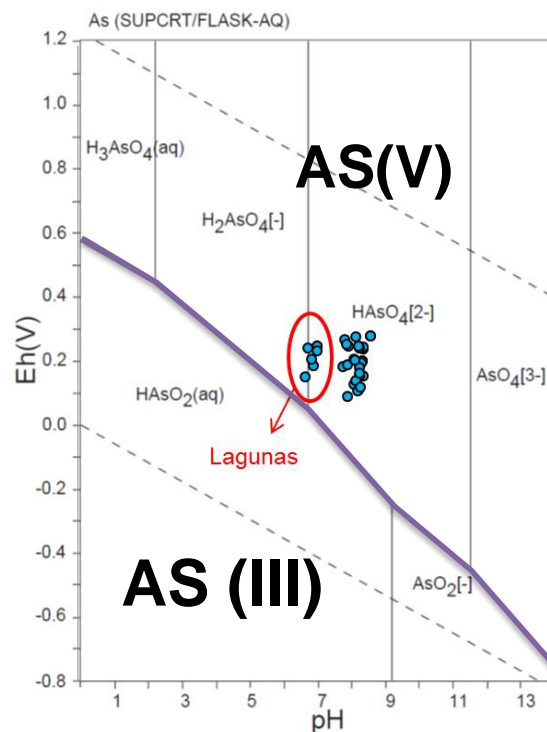
8.5 ESPECIACIÓN ARSÉNICO

La determinación de especies arsenicales no formó parte de los objetivos del presente estudio. No obstante basados en los valores del potencial de óxido reducción y pH medidos con la sonda multiparamétrica es posible graficar los diagramas de Eh-pH para estimar que especies acuosas de As existen en las aguas recolectadas.

Este método es una aproximación y para obtener valores precisos de las especies de As es necesario realizar análisis químicos más específicos (Ejemplo: Especiación por Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia). No obstante, basado en los datos in-situ se determinó que en las muestras recolectadas oxianiones de arsénico donde el estado de oxidación del As es pentavalente (V).

No obstante, no se descarta que el As se presente en forma tetravalente en los fangos precipitados las lagunas o en los sedimentos del embalse donde pueden existir condiciones reductoras. Del mismo modo, los datos recolectados en las lagunas se encuentran muy cercanos al límite entre ambos estados de especiación, por lo cual se recomienda realizar un estudio detallado para determinar las especies arsenicales en las lagunas de Amuyo.

Figura 8-18: Diagrama Eh-pH para especiación As



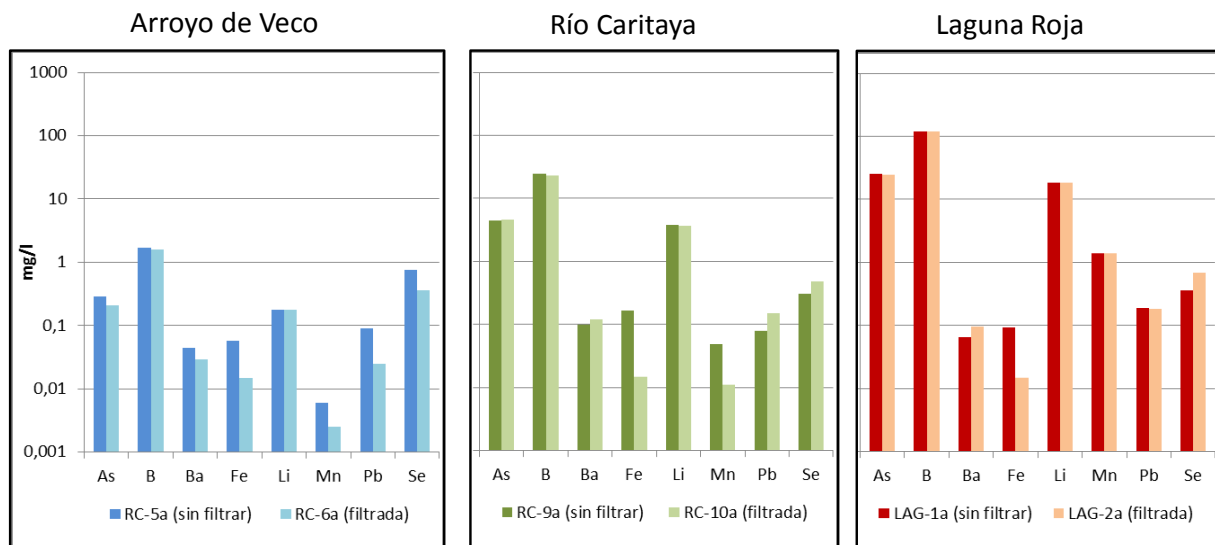
8.6 RELACIONES Y FILTRADAS VERSUS NO FILTRADAS

No fue parte de los objetivos del presente estudio realizar un estudio detallado para conocer cómo se transporta el As y el B en las aguas superficiales. No obstante, como una primera aproximación se recolectaron 3 muestras filtradas y 3 sin filtrar: dos en la laguna Roja (RC-1a y RC-2a filtrada), dos en el río Caritaya aguas debajo de las lagunas y dos en el arroyo de Veco (RC5a y RC-6a sin filtrar).

En los tres puntos de muestreo no se observan grandes diferencias en la concentración de los metales y metaloides (Figura 8-19), permitiendo inferir que el mecanismo de transporte tanto del As y el B es en disolución.

Para el caso del As, el transporte en disolución es consistente con las bajas concentraciones de Fe, lo cual permite inferir la baja presencia de flóculos de hidróxidos de hierro que permitan la captura del As y su transporte e suspensión.

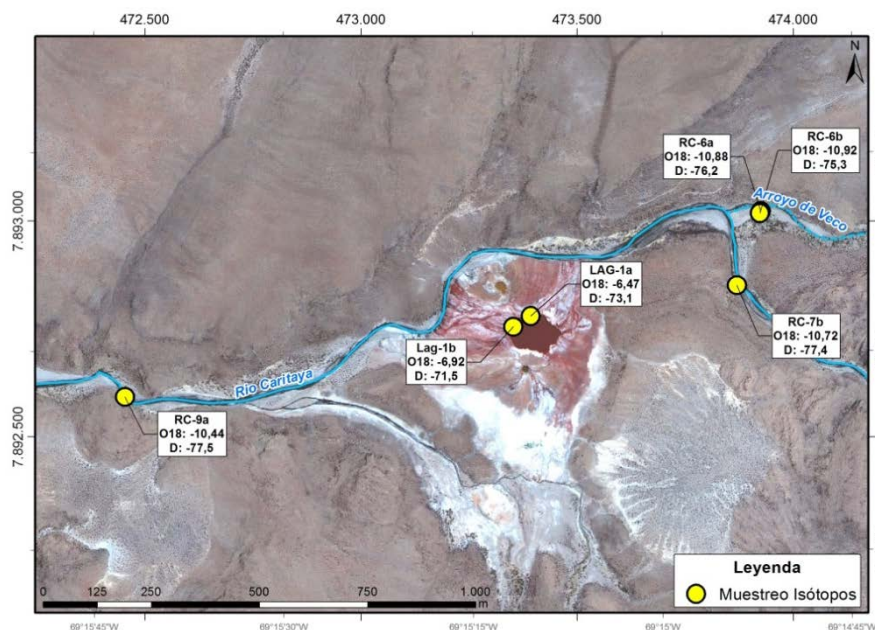
Figura 8-19: Metales y metaloides para muestras filtradas y no filtradas



8.7 ISOTOPIA

Durante la campaña de marzo del 2014 se analizaron 3 muestras (RC-6a, RC-9a y Lag-1a) obtenidas del arroyo de Veco, del río Caritaya y de la laguna Roja. Durante la campaña de mayo del 2014 se recolectaron 3 muestras más (RC-6b-RC-7b y Lag-1b) obtenidas del arroyo de Veco, del río Caritaya y de la laguna Roja. Se analizaron isótopos estables de Oxígeno 18 ($\delta^{18}\text{O}$) y Deuterio ($\delta^2\text{H}$) en aguas frescas del arroyo de Veco, aguas salobres del río Caritaya y aguas salobres a saladas de la laguna Roja (Figura 8-20).

Figura 8-20: Distribución espacial muestras isotópicas

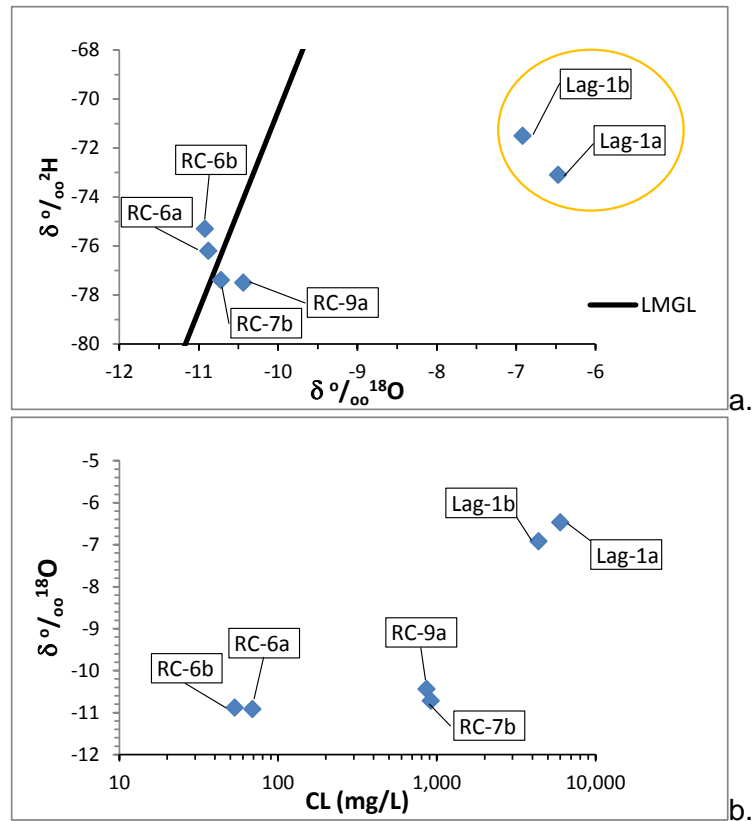


Las aguas de las lagunas se encuentran enriquecidas en $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ respecto a las aguas del río Caritaya y el arroyo de Veco (Figura 8-21 a). Este enriquecimiento se puede atribuir a evaporación desde las lagunas o bien a los procesos geoquímicos de interacción agua - roca. En el primer caso, la composición isotópica final de las aguas de las lagunas sería la consecuencia de un enriquecimiento desde un agua meteórica recargada a una mayor altura. Por otra parte, en el caso de haber enriquecimiento debido al intercambio isotópico entre minerales y el fluido a altas temperaturas, el proceso se traduciría en un enriquecimiento exclusivamente en $\delta^{18}\text{O}$. Donde la variación en $\delta^2\text{H}$ sería despreciable. No se descarta la ocurrencia de ambos procesos.

Por el contrario, las aguas del arroyo de Veco y las del Río Caritaya se localizan muy cercanas a la Línea Meteórica Global (LMGL) indicando que existe un escaso fraccionamiento por procesos de evaporación (Figura 8-21 a). Más aún el aumento en la salinidad de las aguas del río Caritaya no está acompañado por un fraccionamiento

isotópico (Figura 8-21 b), lo cual permite interpretar que el incremento en la salinidad del agua del río es producido por disolución de minerales, más que por proceso de evaporación o mezcla con aguas de origen hidrotermal.

Figura 8-21: Gráficos isotópicos: a. Concentraciones de d2H y d18O para las muestras recolectadas y Línea Meteorica Global (LMGL) teórica



9 CARACTERIZACIÓN MEDIOAMBIENTAL

El objetivo de esta caracterización fue identificar los principales componentes ambientales de la zona de estudio vinculados a los recursos hídricos, por lo que a continuación se describen algunos aspectos bióticos y socioculturales.

La descripción de los componentes ambientales se apoya en los siguientes trabajos:

- Hoffmann A., Arroyo M.K., Liberona F., Muñoz M., y Watson J. 1998. Plantas Alto andinas en la Flora Silvestre de Chile. Ed. Fundación Claudio Gay. 290 pp.
- Luebert y Pliscoff, 2006. Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Cobertura actualizada (2009). Autores: Fuente: CONAMA (2009). Escala 1:250.000, cobertura nacional.
- SIM, 2008. Estudio de Análisis Ambiental. “Diagnóstico Definitivo Reparación Embalse Caritaya, Provincia de Arica, I Región”.
- UNAP, 2011. Revista Conexus. Agua roja, misterio resuelto. Edición 1 Año 1, 2001.

Como se ha mencionado, la subcuenca del embalse Caritaya se localiza en el Altiplano. El clima presenta fuertes fluctuaciones de temperatura, tanto en el día como entre las estaciones del año. Durante toda época, las noches son frías, e incluso en el verano las temperaturas pueden bajar del punto de congelación. Cuando sale el sol, la radiación es intensa y el ambiente se entibia. Pero a la sombra, o si el sol se esconde, las temperaturas bajan rápidamente (Hoffman *et al.*, 1998).

Si bien es cierto que el Altiplano está ubicado en la zona de los Andes desérticos del Norte, donde la topografía se encuentra marcada por el profundo sello de la aridez, tiene vegetación y fauna, lagos y vegas, ya que se ven en algunas épocas del año favorecida por lluvias de origen tropical que vienen desde el Este durante el verano, provocando el llamado “invierno boliviano” y que permite el desarrollo de la vida (Hoffman *et al.*, 1998).

9.1 FLORA Y VEGETACIÓN

En términos generales, La vegetación del Altiplano está conformada principalmente por especies bajas. El único árbol que crece en ese ambiente es la “queñoa” (*Polylepis tarapacana*), de troncos retorcidos recubiertos de una corteza rojiza que se descascara como papel, que forma bosquetes en las quebradas y entre los roqueríos, hasta los 4.700 m de altitud, siendo, de hecho, uno de los árboles que crecen naturalmente a mayor altura en el mundo. Otras plantas muy interesantes de la Puna son las llaretas, arbustos de crecimiento denso y acojinado, de ramas y hojas resinosas.

Las llaretas han sido usadas desde épocas inmemoriales como combustible, especialmente en los tiempos del auge del salitre en el norte de Chile, encontrándose actualmente con problemas de conservación. Las llaretas crecen entre las rocas y son tan duras como ellas. Los lugares planos y abiertos están ocupados por los “tolares”, una formación arbustiva baja y rala, en que predominan la tola, la rica-rica, el lampayo, el pingo-pingo y otros arbustos.

El “pajonal” o “coironal” de los ambientes altoandinos está representado principalmente por pastos duros o “coirones”. En las partes muy húmedas, se producen los “bofedales”, vegas ricas en una variada vegetación muy baja, donde habitualmente pasta el ganado (Hoffman *et al.*, 1998).

En los salares y en lagunas salinas se producen las adaptaciones más notables de las plantas. En terrenos totalmente saturados de sales, una amplia diversidad de especies se ha adaptado a vivir y multiplicarse: varias especies de juncos y pastos y otras de formaciones acojinadas de *Oxychloe*, *Lycium* y *Atriplex*, son habituales. Incluso una pequeña especie de orquídea, llamada “loko-loko” por los nativos (*Aa nervosa*, por los botánicos), de hojas comestibles en forma de ensalada, crece en estos bofedales (Hoffman *et al.*, 1998).

La distribución regional de la vegetación chilena indica que el área de estudio se encuentra dominada por formaciones andinas subtropicales y xerofíticas, dentro de la ecoregión altiplánica andina. Las particulares condiciones ecológicas de altura y sequedad permiten que sólo una fauna y flora muy especializada vivan en este medio.

La ecoregión altiplánica andina se extiende en Chile por las llanuras y aldeas bajas de las montañas entre los 3.500 y más o menos los 4.400 m.s.n.m., variando estos límites según la latitud y la exposición solar. La vegetación está conformada por tres o cuatro formaciones locales, cuyas áreas espaciales de distribución son relativamente precisas

La principal formación vegetal que se puede identificar en el entorno del Embalse Caritaya es el tolar, ya que esta formación se manifiesta desde los 3.100 a 3.900 m de altitud, preferentemente en las numerosas quebradas intermedias, con coberturas que no sobrepasan el 25% del suelo (MOP, 2006?). La especies dominantes dentro del tolar, son *Baccharis tola* y *Baccharis santelices* (conocidas localmente como ñakas) y *Fabiana ramulosa* (kipa), que aparece esporádicamente desde los 3.200 m.s.n.m. (SIM, 2008).

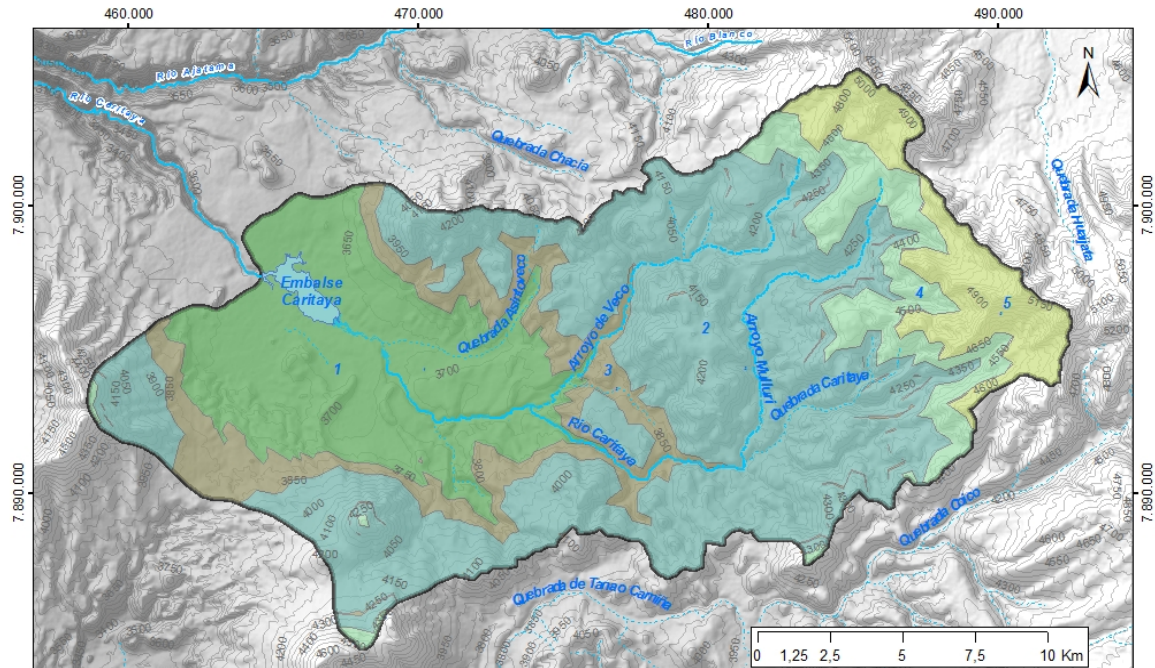
Destacan además las especies arbustivas que se asocian a la kipa, como lo son la añawa (*Adesmia spinosissima*) y la cactácea en cojín *Opuntia camachoi*. El tapiz herbáceo, por su parte es dominado por anuales, tales como soiko (*Tagetes multiflora*) y kashawe, que son diversas especies de *Descurainia*. A partir de los 3.650 m.s.n.m. aumenta gradualmente la riqueza de arbustos con crecimiento de *Baccharis boliviensis* (monte paloma), *B. santelices* (ñakas) y *Parastrephia quadrangularis* (siputula) (SIM, 2008).

En la Figura 9-1 se presenta la distribución altitudinal de los pisos vegetacionales elaborada por Luebert y Pliscoff (2009). Los pisos vegetacionales son:

1. Matorral bajo tropical andino de *Fabiana ramulosa* y *Diplostephium meyenii* (Altitud: 3.650 - 3.950 m.s.n.m.).
2. Matorral bajo tropical andino de *Parastrephia lepidophylla* y *P. quadrangularis* (Altitud: 3.750 - 4.450 m.s.n.m.).
3. Matorral bajo tropical andino de *Parastrephia lucida* y *Festuca orthophylla* (Altitud: 3.750 - 4.600 m.s.n.m.)

4. Matorral bajo tropical andino de *Parastrephia lucida* y *Azorella compacta* (Altitud: 4.200 - 4.650 m.s.n.m.)
5. Matorral bajo tropical andino de *Azorella compacta* y *Pycnophyllum molle* (Altitud: 4.550 - 5.350 m.s.n.m.)

Figura 9-1: Pisos vegetacionales (Modificado de cobertura Luebert y Pliscoff, 2009)



Legenda

Pisos Vegetacionales

- | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> 1 = Matorral bajo tropical andino de <i>Fabiana ramulosa</i> y <i>Diplostephium meyenii</i> 2 = Matorral bajo tropical andino de <i>Parastrephia lepidophylla</i> y <i>P. quadrangularis</i> 3 = Matorral bajo tropical andino de <i>Parastrephia lucida</i> y <i>Festuca orthophylla</i> 4 = Matorral bajo tropical andino de <i>Parastrephia lucida</i> y <i>Azorella compacta</i> 5 = Matorral bajo tropical andino de <i>Azorella compacta</i> y <i>Pycnophyllum molle</i> | <ul style="list-style-type: none"> Área de Estudio Río Embalse Caritaya Ríos Esteros, Arroyos Quebradas |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

9.2 FAUNA TERRESTRE

Los animales también han sabido adaptarse a las difíciles circunstancias altiplánicas. Al visitante interesado y sensible siempre le sorprende encontrar – a esas latitudes – tal variedad de fauna. Grandes manadas de vicuñas y guanacos han vuelto a poblar las laderas, después de haberse visto casi extinguidos y haber sido protegidas celosamente durante los últimos decenios. Huemules, zorros andinos y vizcachas son también habitantes relativamente comunes. Asimismo algunos roedores pequeños, como el ratón chinchilla y el chinchillón, que habitan debajo de las piedras o de los cojines de llareta.

Mucho más raros son los quirquinchos de la puna – una especie de armadillo chileno -, que viven en los lugares con suelo arenoso; la chinchilla cordillerana, de pelaje extraordinariamente fino, y el gato montés andino, un felino del tamaño de un gato, de piel atigrada y cola muy larga.

Los “suris”, los pequeños avestruces altoandinos, son también comunes. La “Kiula” es un tipo de perdiz gigante que – al igual que el suri – prefiere correr entre los coironales, a volar. En lagunas y salares miles de flamencos, de tres diferentes especies, muestran un espectáculo de emocionante belleza. Gansos silvestres, variedad de patos, guairabos y diversidad de otras aves, revolotean en los lugares donde existe bastante agua disponible. Las rocas y los acantilados de las profundas quebradas son el ambiente preferido de cóndores, aguiluchos y tiuques, que anidan en esos sitios y salen a cazar sus presas en los alrededores.

Lagartijas de colores increíbles y sapos graciosos también pueden encontrarse entre las piedras y junto al agua.

La fauna de la ecoregión altiplánica es una de las más ricas y variadas del país. Entre los mamíferos hay roedores como la vizcacha (Figura 9-2) y el quirquincho. Entre los grandes herbívoros destacan la llama, la vicuña y la alpaca, que viven preferentemente en los bofedales y pajonales. El guanaco (Figura 9-3) vive en las partes más altas de esta ecoregión. Los predadores principales son el zorro culpeo y el chingue. Entre las aves, la principal es el ñandú y la perdiz de la puna. Entre las aves de bofedales y lagunas destacan la guallata, la tagua gigante y el flamenco. Entre la fauna herpetológica destacan el Sapo telmatobio y la culebra andina.

A partir de datos obtenidos del “Libro Rojo de los Vertebrados Terrestres de Chile” y la bibliografía consultada se confeccionó una lista con las especies representativas de la ecoregión, y que por tanto se podrían encontrar en el Embalse Caritaya y sus alrededores. La lista cuenta con todas las especies en estado de conservación presentes en la Primera Región del país, ordenados por clase (Mamíferos, Aves, Reptiles y Anfibios), y a su vez especificando su estado de conservación a nivel nacional y regional (ver Tabla 9-1).

Figura 9-2: Vizcacha



Figura 9-3: Guanaco



Tabla 9-1: Especies en estado de conservación presentes en la Primera Región del país (SIM, 2008)

N°	Especie	Distribución	Estado de Conservación	
			I Región	Chile
Mamíferos				
1	Llama (<i>Lama glama</i>)	Vive en el altiplano, en las regiones de Tarapacá y Antofagasta, desde los 2.300 a los 4.000 msnm.		
2	Alpaca (<i>Lama pacos</i>)	El hábitat natural de la alpaca se encuentra en los Andes. En Chile se distribuye entre las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo.	—	—
3	Vicuña (<i>Vicugna vicugna</i>)	Desde Tarapacá hasta Atacama, a partir de los 3.700 m de altura hasta los 4.800 m. Esta especie abunda en Perú, Bolivia y Argentina.	F	V
4	Guanaco (<i>Lama guanicoe</i>)	Habita en el altiplano, desde Tarapacá hasta Antofagasta, y también en algunos refugios de las zonas centro y sur, Aysén y Magallanes	V	V
5	Chinchillón (<i>Chinchillula sahamae</i>)	Región de Tarapacá	P	P
6	Vizcacha (<i>Lagidium viscacia</i>)	Desde Arica hasta Ultima Esperanza (XII región) desde los 600 a 5.000 m de altura	F	V
7	Quirquincho (<i>Euphractus nationi</i>)	Habita al interior de las regiones I y II, entre 3.000 y 3.500 metros de altitud, en zonas abiertas, estepas con matorral bajo y quebradas arenosas asociadas al tolar.	P	P
8	Cuy serrano o de la puna (<i>Galea musteloides</i>)	Habita en las laderas de cerros con cubiertas de matorrales, pajonales y roqueríos donde encuentra su alimento	R	R
9	Ratón Chinchilla (<i>Abrocoma cinerea</i>)	Altoandino	I	I
10	Zorro culpeo (<i>Pseudalopex culpaeus</i>)	El zorro culpeo utiliza muchos tipos de hábitat desde terrenos agrestes y montañosos arriba de la línea de bosques, pasando por valles profundos y desiertos abiertos, pampas de matorrales, matorral esclerófilo, hasta bosques templados deciduos. Se encuentra desde el nivel del mar hasta altitudes de 4.800 m.	I	I
11	Quique (<i>Galictis cuja</i>)	Tarapacá y entre Coquimbo y Magallanes, desde el nivel del mar hasta los 3.800 m de altura.	V	V
12	Taruca (<i>Hippocamelus antisensis</i>)	Sólo vive en la precordillera de la provincia de Parinacota, Región de Tarapacá. Allí se confunde en las laderas rocosas y abruptas que bajan a los valles, entre los 2.800 y 3.900 metros de altura.	V	V
Aves				
13	Perdiz de la puna (<i>Tinamotis pentlandii</i>)	Puede encontrarse entre las regiones de Tarapacá y Atacama. En pastizales y quebradas arbustivas de la zona de la puna, sobre los 3.500 m.s.n.m.	V	V

Tabla 9-1: Especies en estado de conservación presentes en la Primera Región del país (SIM, 2008)

N°	Especie	Distribución	Estado de Conservación	
			I Región	Chile
14	Blanquillo del Norte (<i>Podiceps occipitalis juninensis</i>)	Se lo encuentra entre Arica y Antofagasta en lagunas de la alta cordillera.		
15	Suri (<i>Pterocnemia pennata tarapacensis</i>)	Habita en el extremo norte de Chile y sur de Perú	P	P
16	Cuervo de pantano de la puna (<i>Plegadis ridgwayi</i>)	Se encuentra sólo en la zona altiplánica de Arica.	V	V
17	Pato Juarjual (<i>Lophonetta specularioides alticola</i>)	Se lo encuentra en la cordillera de Los Andes, desde Arica a Curicó en lagos, lagunas y bofedales.		
18	Flamenco chileno (<i>Phoenicopterus chilensis</i>)	Se distribuye desde Tarapacá hasta Tierra del Fuego en zonas de agua poco profundas, dulce o salada, desde la costa hasta unos 4.000 m.s.n.m. Más abundante hacia los extremos del país.	V	V
19	Parina chica (<i>Phoenicoparrus jamesi</i>)	Puede encontrarse desde el límite norte hasta Chañaral en lagos y lagunas de la zona de la Puna.	V	V
20	Condor de los andes (<i>Vultur gryphus</i>)	Se lo encuentra a lo largo de toda la Cordillera de Los Andes; llegando hasta las costas en la zona norte y en el extremo sur del país.	V	V
21	Tagua gigante (<i>Fulica gigantea</i>)	Alta cordillera de Tarapacá en lagos y lagunas de la zona de la puna.	V	V
22	Pato Jergón Chico del Norte (<i>Anas flavirostris oxypterum</i>)	Lagos y lagunas desde la costa hasta la zona de la puna. Desembocadura de ríos, entre Arica y Atacama		
23	Pato Puna (<i>Anas puna</i>)	Lagos, lagunas y ríos de la puna, en zona altiplánica entre Arica y Antofagasta		
24	Gaviota andina (<i>Larus serranus</i>)	De Arica hasta Ñuble. Más escasa hasta Aysén en lagos y lagunas de la alta cordillera. En invierno algunos ejemplares bajan hasta la zona costera.	F	R
25	Comesebo de los tamarugales (<i>Conirostrum tamarugense</i>)	Extremo norte (Pampa del Tamarugal. Salar de Pintados; Salar de Zapiga. Pica y Mamiña). En bosque de Tamarugos y laderas semi-vegetadas de la zona desértica.	I	I
Anfibios				
26	Sapo (<i>Telmatobius pefauri</i>)	Tierra típica: Murruntani, Arica. 3000-3200 msnm)	—	R

Tabla 9-1: Especies en estado de conservación presentes en la Primera Región del país (SIM, 2008)

N°	Especie	Distribución	Estado de Conservación	
			I Región	Chile
27	Sapo (<i>Pleurodema marmorata</i>)	Andes de la I y II regiones.		
Reptiles				
28	Culebra (<i>Philodryas tachimenoides</i>)	En los valles de Arica, Camarones, Lluta y Azapa. I Región.	V	V
29	Culebra andina (<i>Tachymenis peruviana</i>)	Se encuentra en el altiplano de la I y II Región y también en Perú.		

Fuente: MOP, 2006

Simbología:

E: Extinta

P: En peligro

V: Vulnerable

R: Rara

A. Amenaza indeterminada

I: Inadecuadamente conocida

F: Fuera de peligro

-- : Sin estado de conservación

9.3 FLORA Y VEGETACIÓN ACUÁTICA

Las lagunas de Amuyo corresponden a una expresión de aguas hidrotermales en superficie, existente a 3711 msnm. Las aguas producen la precipitación de minerales (Carbonatos, Sulfatos y Sílice) que se depositan en forma de costras superpuestas sobre las rocas volcánicas del mioceno superior y sobre los depósitos fluviales del Río Caritaya (Figura 9-4). La continua superposición de las costras forman una estructura en forma de domo, que posee un diámetro aproximado de 380 metros y se eleva por sobre el lecho del río cerca de 15 m. Estas lagunas son una rareza geológica y presenta un gran potencial como atractivo geo turístico.

El estudio de EAA presentado por el SIM (2008) arrojó como resultado la ausencia de flora y vegetación acuática. No obstante estudios en curso de la Universidad Arturo Prat revelan que en la laguna de Amuyo existen microalgas Chlamynodephris.

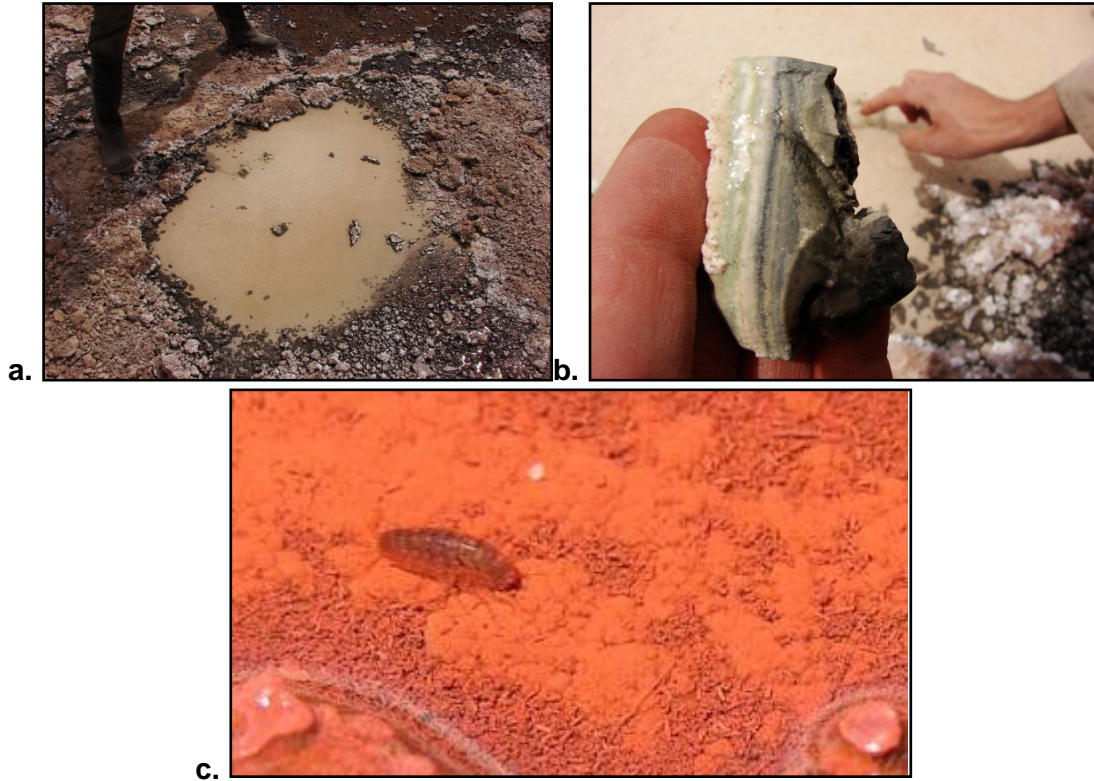
Entorno a las lagunas de Amuyo se desarrollan pequeños “charcos” salinos en los cuales se observaron crustáceos anfípodos y tapes microbianos (Figura 9-5)

Figura 9-4: Domo de precipitados en Lagunas de Amuyo



Fuente: Geohidrología Consultores

Figura 9-5: a. Charco con tapete microbiano; b. Tapete microbiano c. Foto de Crustáceo tomada por UNAP (2011)



Fuente: Geohidrología Consultores

9.4 IDENTIFICACIÓN DE BOFEDALES

La identificación de bofedales y zonas de alto vigor vegetacional fue estimada a través de la teledetección y posterior reconocimiento en terreno de los bofedales durante la campaña geológica.

La presencia de bofedales en el área de estudio fue interpretada utilizando el Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI), el cual permite estimar y evaluar el vigor fotosintético de las cubiertas vegetales, en base a la medición de la radiación que las plantas emiten o reflejan. El NDVI se calcula a partir de la información obtenida de la reflectancia espectral del rojo (R_R , Figura 9-6) y del infrarrojo cercano (R_{IRC} , Figura 9-7), con la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{R_{IRC} - R_R}{R_{IRC} + R_R} \quad \text{Ecuación 3}$$

El cálculo del NDVI fue realizado para dos temporadas del año 2001, una en febrero y la otra en julio, de manera de observar la evolución de la vegetación durante ambos periodos. Las imágenes utilizadas corresponden a las del tipo Landsat 7 y fueron adquiridas descargándolas de *Earth Resources Observation and Science Center (EROS)* (<http://glovis.usgs.gov/>).

En la Figura 9-6 y Figura 9-7 se presentan las imágenes multiespectrales Landsat utilizadas para determinar la existencia y extensión de humedales de altura.

Figura 9-6: Izquierda: Banda 3 (Rojo); Derecha: Banda 4 (Infrarrojo cercano) (Febrero 2001).

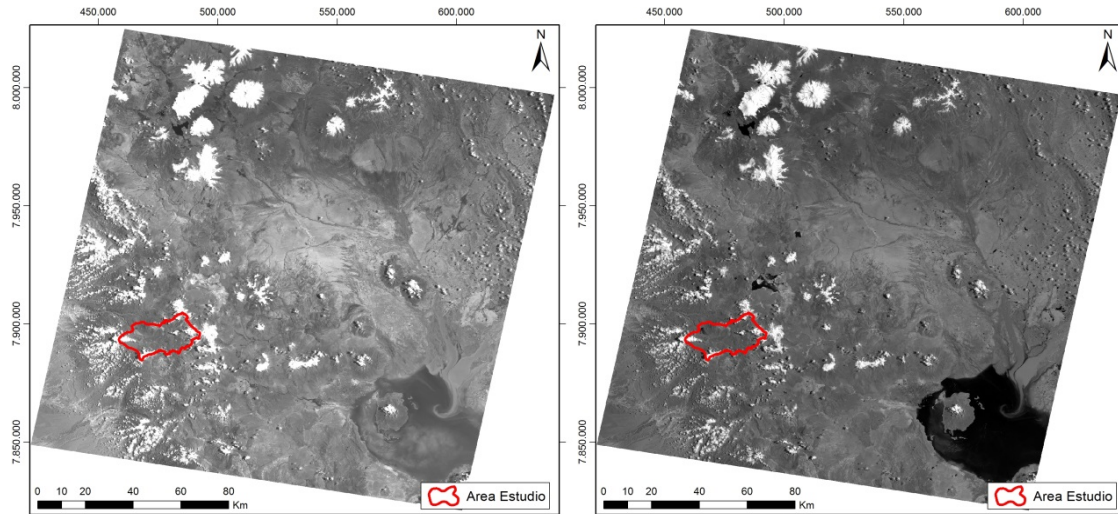
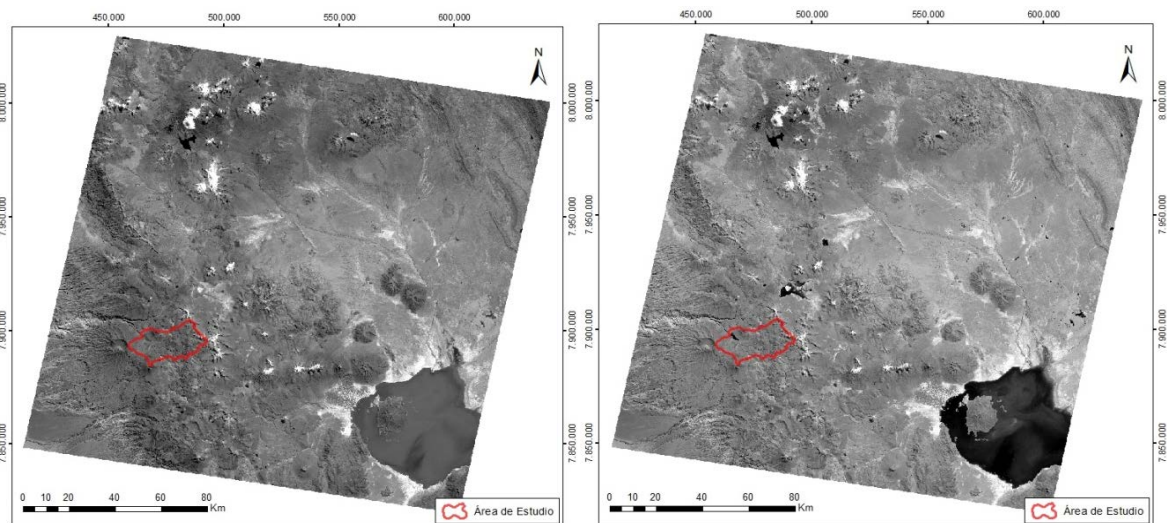


Figura 9-7: Izquierda: Banda 3 (Rojo); Derecha: Banda 4 (Infrarrojo cercano) (Julio 2001).



El cálculo del NDVI entrega una medida cuantitativa con valores entre -1 y 1, en donde los valores negativos corresponden a áreas sin vegetación, y los valores positivos aquellas zonas con vegetación, siendo más vigorosa cuando se acerca a 1.

Aplicando el algoritmo con las bandas 3 y 4 de las imágenes Landsat del área de estudio, se reclasificaron los valores resultantes con la finalidad de obtener las cubiertas vegetacionales

para cada periodo. El resultado se aprecia en la Figura 9-8 para febrero del 2001 y Figura 9-9 para julio del 2001.

Figura 9-8: Zonas con alto vigor vegetacional detectado por NDVI (Febrero 2001)

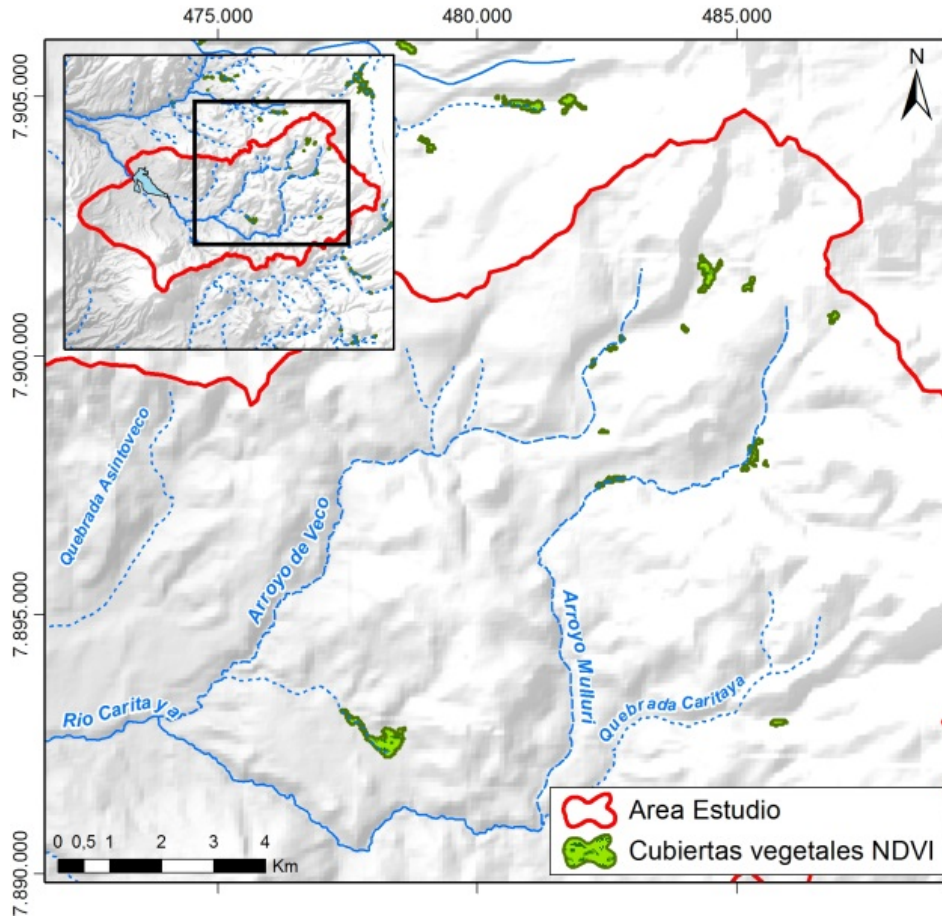
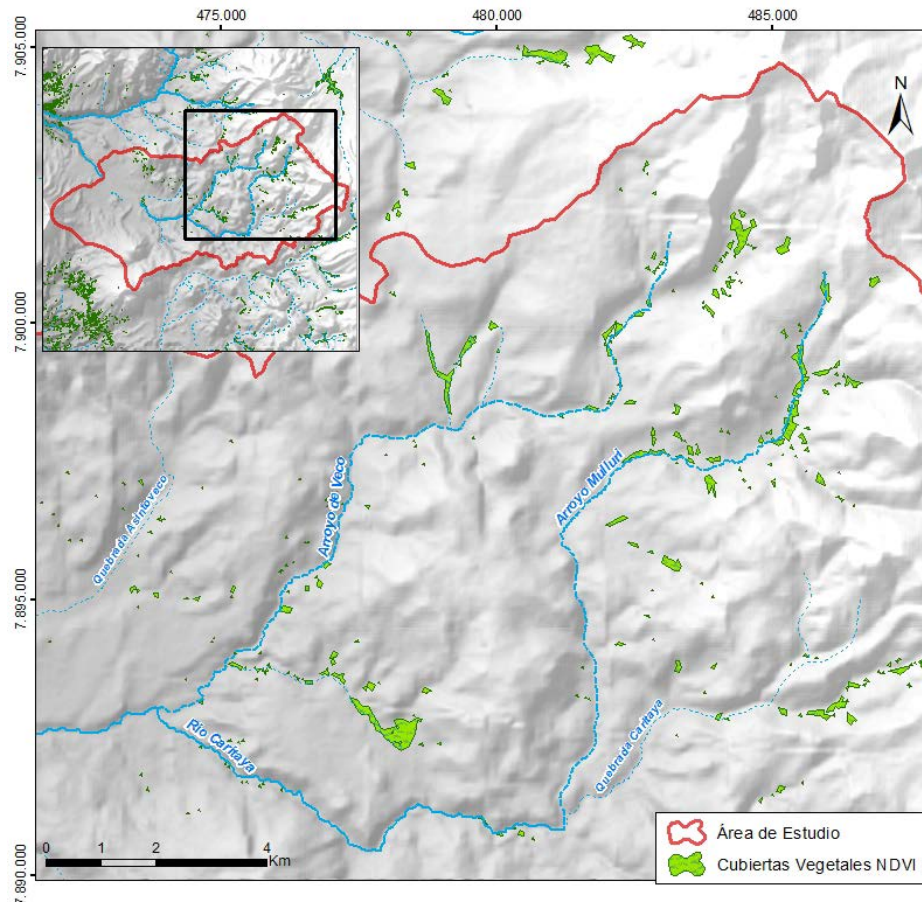


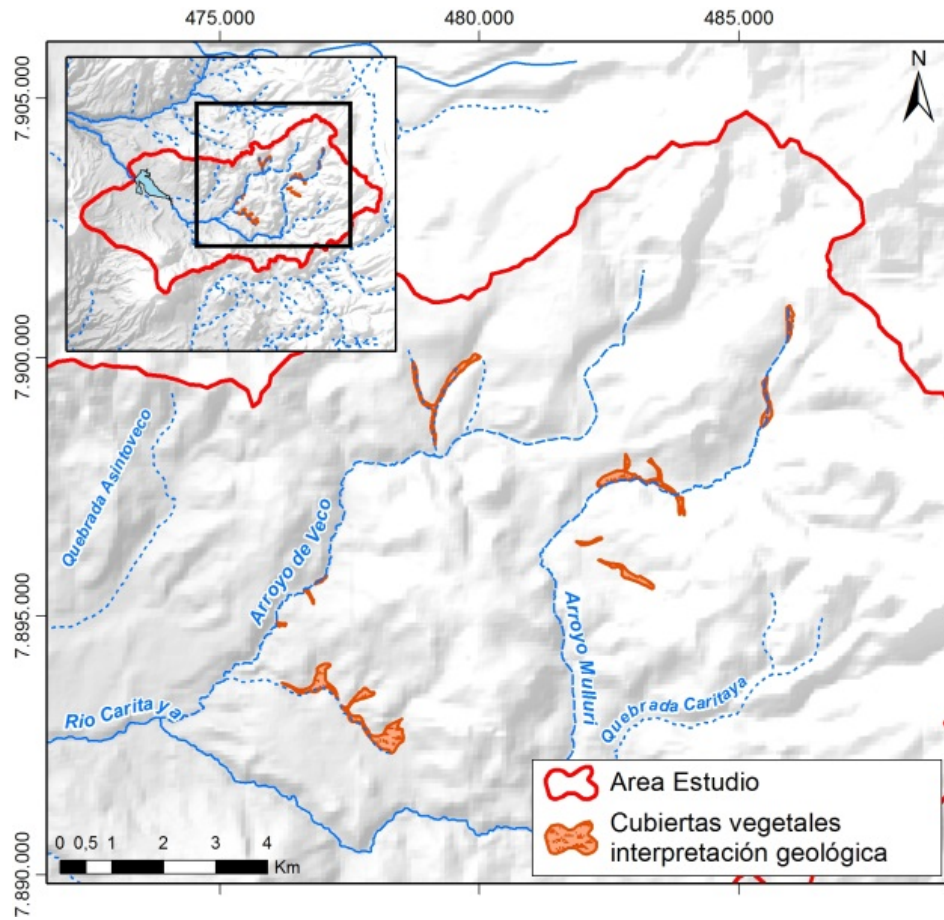
Figura 9-9: Zonas con alto vigor vegetacional detectado por NDVI (Julio 2001)



En ambas figuras se observa la existencia de cubiertas vegetacionales, las que coinciden con los bofedales observados durante la realización de la caracterización geológica a través de imágenes satelitales y posteriormente corroboradas en terreno.

En el área de estudio no se observan áreas protegidas, pero si existen componentes ambientales sensibles, las cuales corresponden a bofedales alto-andinos localizados en la cabecera de la subcuenca (Figura 9-10), el sistema de Lagunas de Amuyo y la ribera del Rio Caritaya en su totalidad.

Figura 9-10: Zonas de humedales mapeadas



9.5 MEDIO SOCIOCULTURAL

En términos generales, los habitantes actuales del Altiplano, principalmente representantes de pueblos indígenas Aymaras y Quechuas, están adaptados fisiológicamente para vivir a esas altitudes; su sangre tiene mayor número de glóbulos rojos por unidad de volumen y éstos, a su vez, contienen más hemoglobina, con lo que mejoran el intercambio de los gases del sistema circulatorio, mejorando con ello la captación, el transporte y la entrega de oxígeno. Están acostumbrados a los cambios bruscos de temperaturas y a las condiciones extremas para la vida que priman en el Altiplano. Los poblados alto-andinos, generalmente cercanos a vertientes o a bofedales, donde los habitantes pueden pastorear a sus animales, llamas y alpacas, domesticadas desde hace milenios (Hoffman *et al.* 1998)

Gran parte de la zona de estudio corresponden a tierras de la comunidad Indígena de Mulluri. El poblado de Mulluri se encuentra a cerca de 4.100 m.s.n.m y actualmente es utilizado esporádicamente durante las celebraciones u otros momentos del año. En el poblado se encuentra la iglesia de Mulluri, la cual se construyó a fines del siglo XIX y posee un estilo entre barroco andino y neoclásico. Fue declarada Monumento Nacional de Chile, en la categoría de Monumento Histórico, mediante el Decreto Exento n.º 1778, del 24 de noviembre de 2005.

Figura 9-11: Iglesia de Mulluri



Fuente: Wikipedia (http://es.wikipedia.org/wiki/Iglesia_de_Mulluri)

Durante la visitas de terreno se pudieron observar diferentes vestigios antropológicos. En los márgenes de las laderas del río Caritaya (468934 E, 7894053 N, WGS 84/19°S) se encontró una herramienta lítica (Figura 9-12)

Figura 9-12: Herramienta lítica posiblemente pre-hispánica



Fuente: Geohidrología Consultores

Inmediatamente al sur del muro del Embalse Caritaya se observa un conjunto de ruinas de viviendas edificadas en rocas (Figura 9-13), las cuales muy probablemente fueron utilizadas durante la construcción del embalse en los a principios del siglo pasado (1930). Se compone de por lo menos 10 recintos de características variables, los que apuntan a una relativa estabilidad del asentamiento. Este campamento, que ocupa un área de 1,7 ha, presenta un potencial investigativo histórico.

Figura 9-13: Ruinas embalse Caritaya



Fuente: Geohidrología Consultores

En el lugar donde la llanura fluvial del río Caritaya se ensancha, protegidos de eventos de escorrentía torrenciales existen un conjunto de corrales construidos con piedra. Escasos kilómetros antes de llegar a las lagunas de Amuyo se observó una hermosa casa de piedra la cual es habitada por personas de la Comunidad Indígena de Mulluri. A escasos metros de

la casa de piedra de las Lagunas de Amuyo se localiza un refugio de la Comunidad Indígena de Mulluri.

Figura 9-14: Casa de las lagunas de Amuyo



Fuente: Geohidrología Consultores

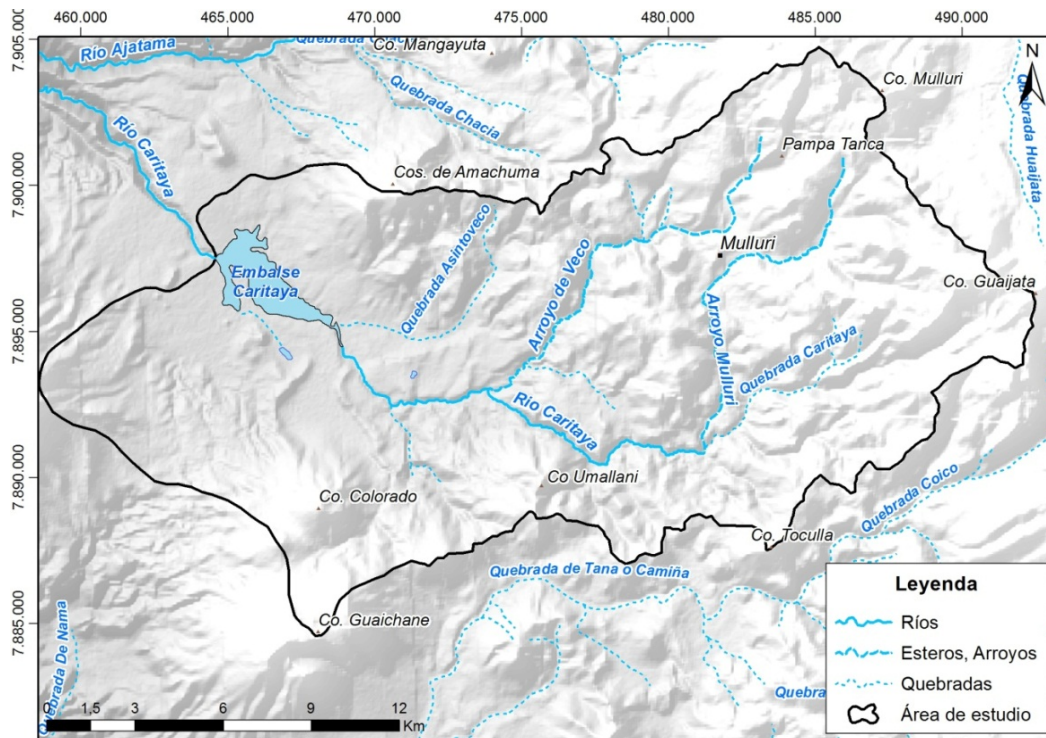
10 MODELO CONCEPTUAL

La zona de estudio comprende la subcuenca localizada inmediatamente aguas arriba del embalse Caritaya (capacidad embalse de 42.171.000 m³), el cual fue construido en el año 1932 e inundó el lugar donde se localizaba la laguna Pareacota. La subcuenca de estudio tiene un largo W-E de 22 km y un ancho N-S de 12 km aproximadamente, con un área de 362 km². La subcuenca en estudio es parte de los terrenos de la Comunidad Indígena de Mulluri.

El río Caritaya, drena de oriente a poniente y sus nacientes se localizan en el margen oeste de los volcanes Mulluri y Guaijata (Figura 10-1). El río Caritaya nace en la unión de los cauces permanentes de la quebrada Caritaya con el arroyo Mulluri. Su principal tributario corresponde al arroyo de Veco (Yustacaba), el cual confluye a 350 m aguas arribas del paso del río Caritaya por las lagunas de Amuyo.

Las lagunas de Amuyo son una fuente de recarga de aguas hidrotermales al río. Un tributario de menor importancia corresponde a la quebrada Asintoveco, la cual presenta un régimen esporádico. Otros afluentes permanentes, los que no presentan nombres, se localizan en el margen sur de la subcuenca y cuyas nacientes se encuentran en los cerros Colorado, Umallani y Toculla (Figura 10-1). Las alturas en la subcuenca están comprendidas entre los 3.642 msnm, en la desembocadura del embalse Caritaya, y sobre los 5.200 msnm al este de la cuenca, en los cerros Mulluri (5.247 msnm) y Guaijata (5.341 msnm) y posee una altura media de 4.066 msnm.

Figura 10-1: Subcuenca aportante al embalse Caritaya



Fuente: Elaboración propia

Consistentemente con la ocurrencia del invierno altiplánico, las precipitaciones al interior de la subcuenca ocurren fundamentalmente entre los meses de diciembre a marzo, siendo el mes de febrero el que registra la mayor precipitación. La precipitaciones están fuertemente relacionadas a la altitud. Se calculó que el incremento de precipitaciones es de 13,9 mm por cada 100 m de altitud con un coeficiente de correlación igual a 0,97. Se estima que para la altura media de la cuenca de 4.066 msnm y la precipitación media anual es de 236,3 mm. A partir de la estimación del gradiente de evaporación potencial y la altura media de la cuenca presentada, se estima que la evaporación potencial media anual para la subcuenca aportante al embalse Caritaya es de 5,3 mm/día, equivalente a 1.937 mm/año.

Dado que en la subcuenca aportante al embalse Caritaya no existen registros fluviométricos, el análisis de caudales para la subcuenca de estudio se realizó a partir de dos cuencas cercanas y de características similares, las cuales son las cuencas de Codpa y Camiña. Se estima que entre abril y noviembre (estación seca), el 90% de los caudales se encontraría bajo los 300 l/s; para el período de lluvias (Invierno Altiplánico). Por otra parte, se estima a partir de la estación ubicada en Camiña que un 10% excede o iguala caudales de 720 l/s, mientras que a partir de la estación de Codpa, en un 10% excede o iguala caudales de 1.200 l/s. Se estima que los caudales máximos instantáneos para un periodo de retorno de 100 años son de 13,1 m³/s traspuestos desde Camiña y de 17,1 m³/s traspuestos desde Codpa.

De los aforos de terreno se observa que el principal aporte proviene de los arroyos Mulluri y de Veco. El arroyo Mulluri en su nacimiento registró un caudal de 110 l/s (Figura 10-2). El río Caritaya antes de su confluencia con el arroyo Veco llega a un caudal cercano a los 389 l/s. Para el arroyo Veco, se midió en su nacimiento un caudal de 90 l/s y antes de la confluencia con el río Caritaya un caudal de 118 l/s (Figura 10-2). El río Caritaya aguas abajo de la confluencia con el arroyo Veco fluye con un caudal entorno a los 500 l/s.

La CE varía en un amplio rango desde 297 a 21.180 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 10-2), lo que permite clasificar a las aguas en tres grupos: frescas, salobres y salobres con tendencia salada. El arroyo de Veco contiene las aguas más frescas de la subcuenca, en sus nacientes registra una conductividad de 297 $\mu\text{S}/\text{cm}$ la cual aumenta hasta cerca de 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en su confluencia con el río Caritaya (Figura 10-2). Las aguas del arroyo Mulluri, en las cercanías del poblado homónimo, presentan una conductividad de 1435 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 10-2).

El agua salobre, con una conductividad entre 3.000 y 4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, presentan pH promedio cercano a 8 y se documentaron para el río y el embalse Caritaya (Figura 10-2). Una notoria disolución se registra en el río Caritaya desde cerca de 4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 3.500 luego del aporte de agua fresca proveniente del arroyo de Veco (Figura 10-2).

El agua proveniente de las lagunas de Amuyo y aquellas provenientes de quebradas del margen sur de la subcuenca presentan una conductividad entre 15.240 y 21.180 (Figura 10-2).

En términos generales, toda el agua del río Caritaya, de las lagunas y de las quebradas del margen sur son cloruradas sódicas. Las aguas salobres cloruradas sódicas del río Caritaya se originan por aportes de aguas meteóricas que lixivian zonas de alteración y reciben aportes de afloramientos hidrotermales directos. El arroyo de Veco está compuesto por aguas meteóricas frescas del arroyo de Veco con escaso aporte de lixiviación de zonas de alteración y refresca el importante sistema de aguas salobres del río Caritaya. De este modo el arroyo de Veco diluye la concentración de As del río Caritaya, de 5,6 a 4,2 mg/l y la de B disminuye de 27,9 a 19,2 mg/l, en la campaña de marzo (Figura 10-2).

Las lagunas y quebradas del margen sur destacan por su alto contenido de As (mayor a 15 mg/l) y altas concentraciones de boro (sobre los 100 mg/l). No obstante, en las muestras recolectadas aguas arriba y abajo de estas fuentes de contaminación la concentración del río Caritaya sube levemente, consistentemente con el bajo caudal aportado.

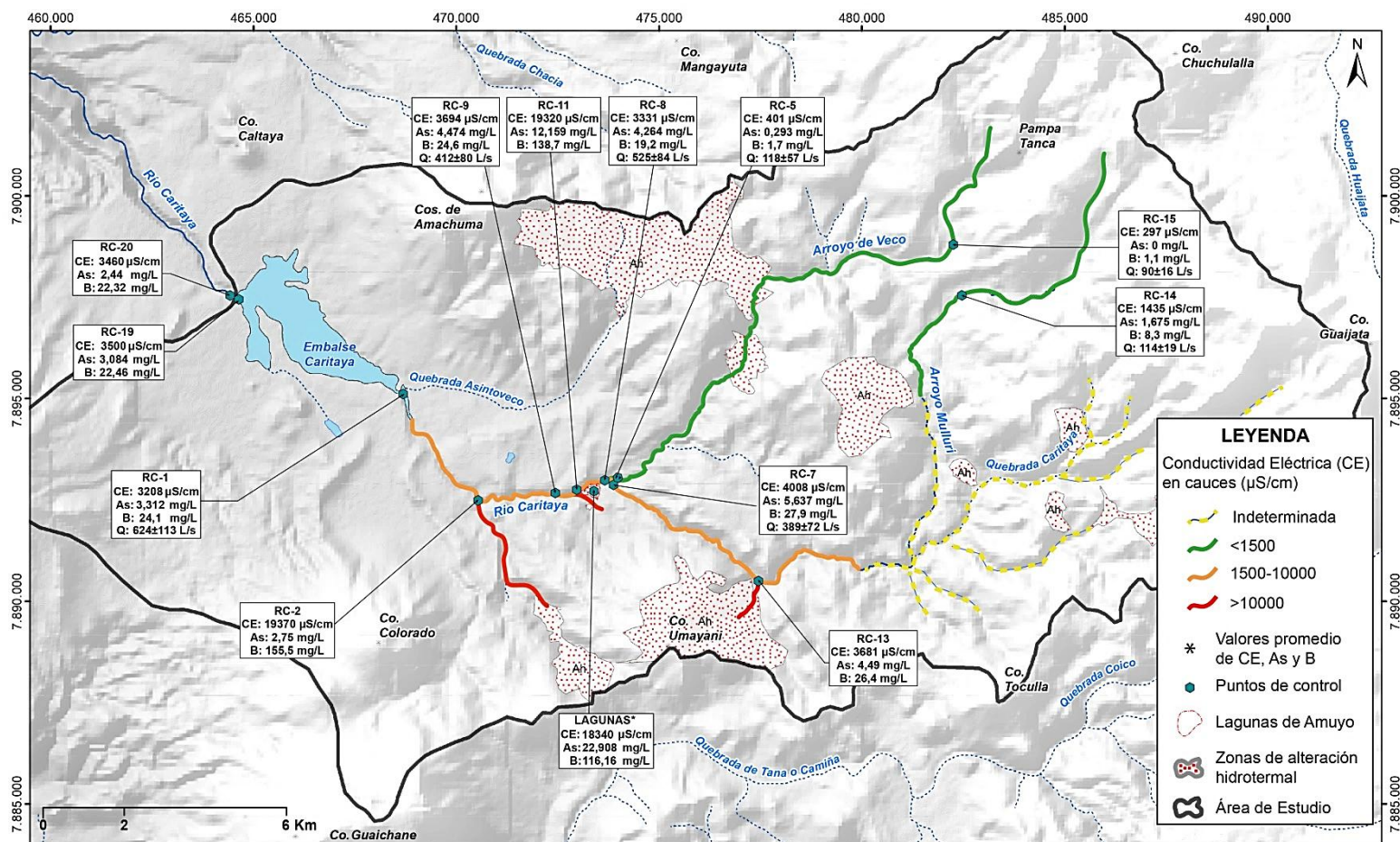
El contenido de As del embalse es cercano a 3 mg/l (RC-19) y aguas abajo desciende ligeramente a 2,4 mg/l (RC-20). Esta disminución de la concentración de As aguas abajo del embalse refleja un leve abatimiento de este elemento producido por el embalse Caritaya. Contrariamente al caso del As, en el embalse Caritaya la concentración de B es de 22,46 mg/l y aguas abajo de éste se mantiene con una concentración similar. Esto indica que el embalse no logra abatir las concentraciones de B, producto de que este elemento es conservativo y se encuentra en disolución.

Los análisis isotópicos permiten sumar evidencias de que el proceso de lixiviación de zonas de alteración es un factor preponderante en la mala calidad de las aguas del río Caritaya. Las aguas de las lagunas se encuentran enriquecidas en $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ respecto a las aguas del río Caritaya y el arroyo de Veco, diferenciándolas claramente como un miembro extremo.

Los análisis isotópicos y de Cloruro de las aguas del río Caritaya indican que el aumento en la salinidad de las aguas del río Caritaya no está acompañado por un fraccionamiento isotópico, lo cual permite interpretar que el incremento en la salinidad del agua del río es producido por disolución de minerales, más que por un proceso de evaporación o mezcla con aguas de origen hidrotermal.

En síntesis el río Caritaya presenta altas concentraciones de As, B y una mala calidad producto de los aportes de las quebradas del margen Sur, de las lagunas de Amuyo y por aportes de elementos químicos provenientes de la lixiviación o disolución de minerales. El proceso de lixiviación-disolución ocurre fundamentalmente aguas arriba de las lagunas, y aguas abajo de las lagunas su CE y química permanecen relativamente constantes (Figura 10-2).

Figura 10-2: Mapa funcionamiento conceptual



El área de estudio está dominada por la actividad volcánica desde el período Mioceno hasta posiblemente el período Holoceno, lo cual produjo la depositación fundamentalmente de lavas basálticas y andesíticas e ignimbritas, que representan el basamento hidrogeológico de la subcuenca y conforman conjunto de edificios volcánicos (Ejm. Volcanes Mamuta, Chuquinanta, Mulluri). El basamento volcánico es rellenado por depósitos aluviales y fluviales. Los depósitos fluviales están asociados a los procesos del sistema de drenaje del río Caritaya.

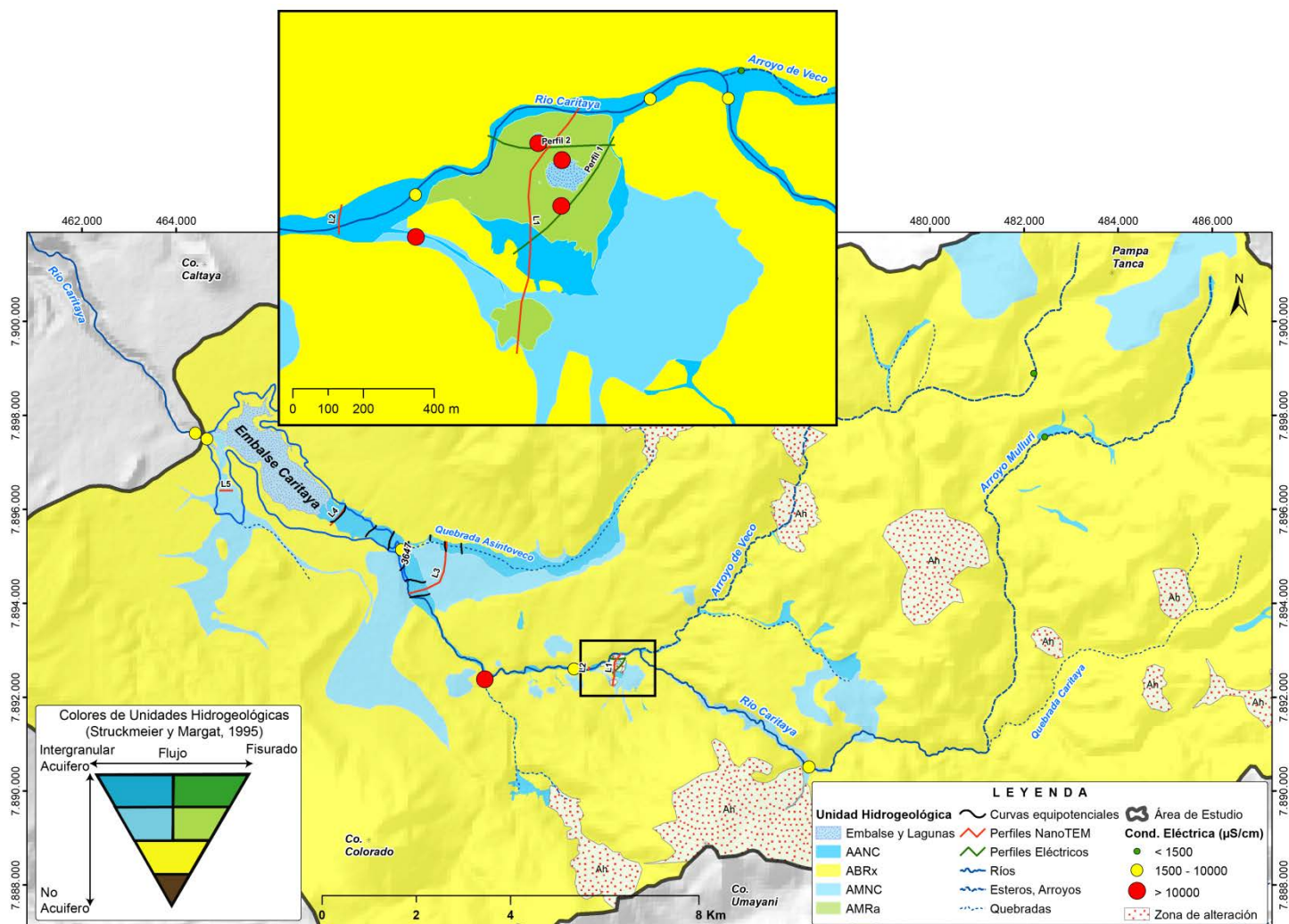
Desde las partes altas de la cuenca, el río Caritaya fluye en forma rectilínea y encajonado por escarpes de afloramientos de rocas de origen volcánico, depositando arenas gruesas, gravas y bolones con una potencia entorno a los 5 metros. Aproximadamente 4 kilómetros aguas abajo de las lagunas de Amuyo, el río Caritaya deja de estar encajonado, fluye en forma meándrica y ha formado una llanura fluvial extensa que alcanza los 400 metros de ancho, con depósitos de hasta 15 metros de potencia compuestos fundamentalmente de clastos de tamaños arenas y gravas que albergan a un acuífero aluvial que fluye libremente hacia el embalse Caritaya y es recargado fundamentalmente por la infiltración del río.

Para la zona de estudio se estableció cinco unidades hidrogeológicas con diferente potencial hidrogeológico. La distribución en planta de las unidades hidrogeológicas

1. Unidades acuíferas de alta importancia hidrogeológica en depósitos no consolidados (AANC): Corresponden a depósitos fluviales mal consolidados (Hf a y b) y sales (Qs), Los depósitos fluviales se depositan en las quebradas y en una amplia llanura fluvial localizada inmediatamente aguas arriba del embalse Caritaya. Estos depósitos están compuestos fundamentalmente por gravas y arenas que albergan acuíferos libres que son recargados por aportes aguas hidrotermales y por aguas meteóricas.
2. Unidades acuíferas de media a baja importancia hidrogeológica en depósitos no consolidados (AMNC): Esta unidad hidrogeológica está compuesta por el siguiente grupo de unidades geológicas: Depósitos aluviales (Qa), depósitos coluviales (Qc), depósitos glaciales (Qg) y depósitos piroclásticos de caída (Qpv). Los depósitos Qa, Qc y Qg son depósitos mal seleccionados compuestos por gravas y con contenidos variables de arcilla y limo en su matriz. Los depósitos piroclásticos (Qpv) corresponden principalmente a toba de ceniza mal consolidadas. Pueden formar acuíferos de extensión localizada, de espesores reducidos y en tránsito, los cuales presentan una baja recarga.
3. Unidades acuíferas de alta importancia hidrogeológica en rocas (AARa): Esta unidad hidrogeológica corresponde a depósitos volcánicos del mioceno Superior (Msv) los cuales han sido fuertemente afectados por procesos de alteración hidrotermal pervasiva. En esta unidad el macizo rocoso se encuentra alterado y fracturado, lo cual permite el desarrollo de una alta permeabilidad secundaria, que canaliza el ascenso de fluidos por zonas con mayor grado de fracturamiento y alteración. Esta unidad hidrogeológica ha sido determinada bajo el domo de precipitados de las lagunas de Amuyo y a través de ella se transmite el agua que da origen y nutre a las lagunas.

4. Unidades acuíferas de media a baja importancia hidrogeológica en rocas (AMRa): Esta unidad hidrogeológica está compuesta por rocas las cuales han sido afectadas por una intensa alteración hidrotermal que ha reemplazo total o parcialmente la textura del protolito y están afectadas por vetas, vetillas y fracturas las cuales producen un aumento de permeabilidad secundaria. Corresponden a acuíferos en medios fracturados, de transmisividad variable, los cuales representan un aporte importante de aguas hidrotermales al río Caritaya preferentemente desde las quebradas del margen sur de la cuenca.
5. Unidades acuíferas de baja importancia hidrogeológica en rocas (AMRx): Corresponden a depósitos volcánicos del Mioceno al Pleistoceno (Mmv, Msv y Pv) y a Depósitos Piroclásticos del Mioceno Medio bien consolidados (M3t) los cuales no han sido importantemente alterados hidrotermalmente. Son formaciones geológicas de baja permeabilidad que no son capaces de almacenar o transmitir agua.

Figura 10-3: Mapa hidrogeológico conceptual



10.1 FUNCIONAMIENTO CONCEPTUAL DE LAS LAGUNAS DE AMUYO

Las lagunas de Amuyo corresponden a una expresión de aguas hidrotermales en superficie, existente a 3711 msnm. Las aguas producen la precipitación de minerales (Carbonatos, Sulfatos, Sílice, Rejalgar y Oropimente) que se depositan en forma de costras superpuestas sobre las rocas volcánicas y sobre los depósitos fluviales del río Caritaya (Figura 10-5). La continua superposición de las costras forman una estructura en forma de domo, que posee un diámetro aproximado de 380 metros y se eleva por sobre el lecho del río cerca de 15 m (Figura 10-5).

La laguna Roja posee una temperatura superficial cercana a 24,5°C y una profundidad estimada de 11 m, donde se midió una temperatura de 57°C. La laguna amarilla, que es la más próxima al río Caritaya, presenta una temperatura superficial de 25°C, una profundidad estimada de 6,5 m donde se midió una temperatura de 28°C. Transcurridos dos meses del terremoto, se registró un descenso de aproximadamente 1 metro solo en el nivel de la Laguna Amarilla. La laguna Verde presenta una temperatura superficial de 33°C y una profundidad estimada de 3,5 m donde se midió una temperatura de 33°C.

En los perfiles de tomografía eléctrica se detectó un dominio de muy baja resistividad, el cual fue interpretado como zonas donde los depósitos volcánicos del Mioceno Superior (Msv) han sido fuertemente alterados, fracturados y brechizados por la actividad hidrotermal. Estas zonas brechizadas canalizarían y concentrarían el ascenso de fluidos hidrotermales hacia la superficie, generando las lagunas de Amuyo (Figura 10-5).

Figura 10-4: Planta líneas geofísicas área laguna Roja

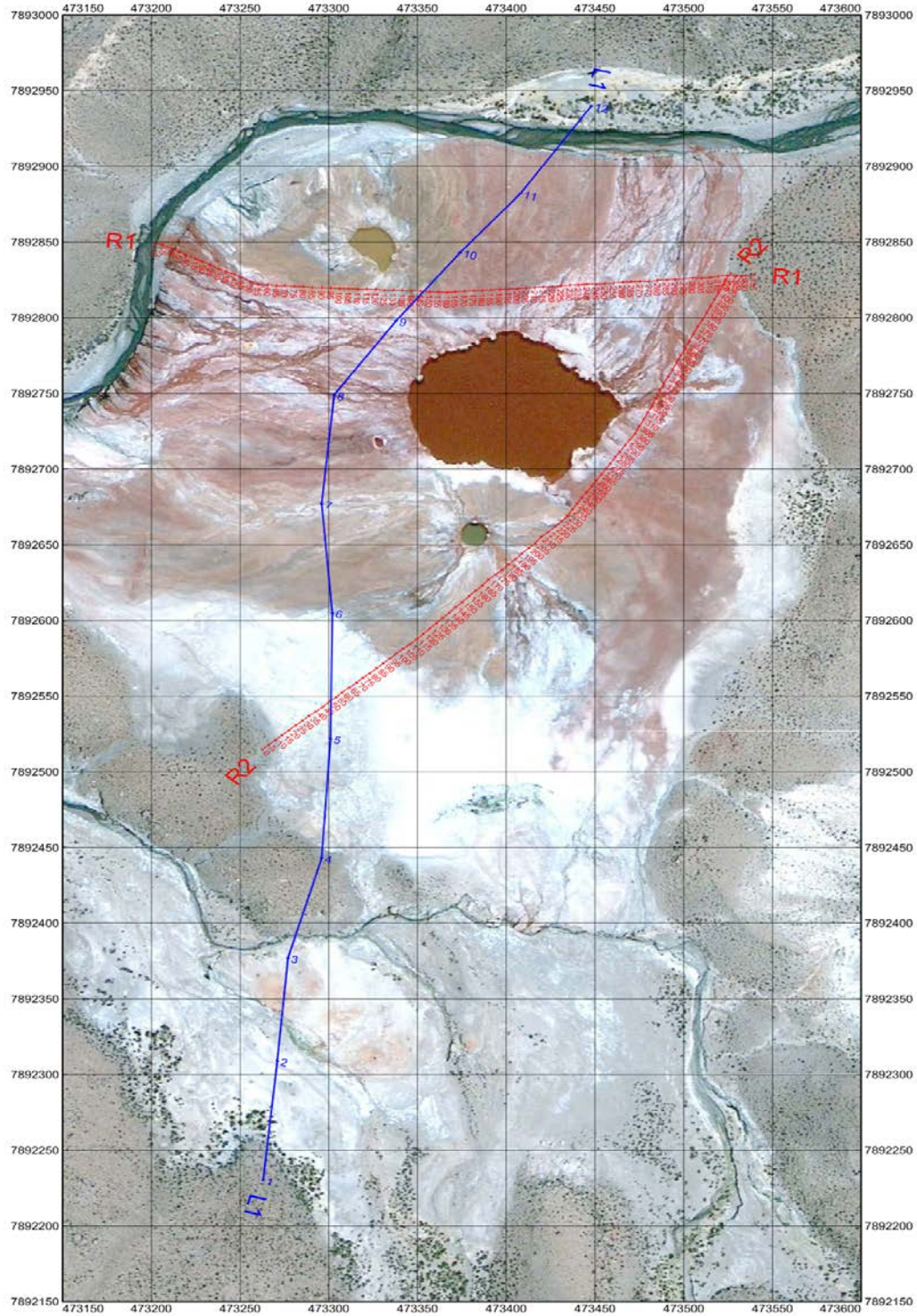
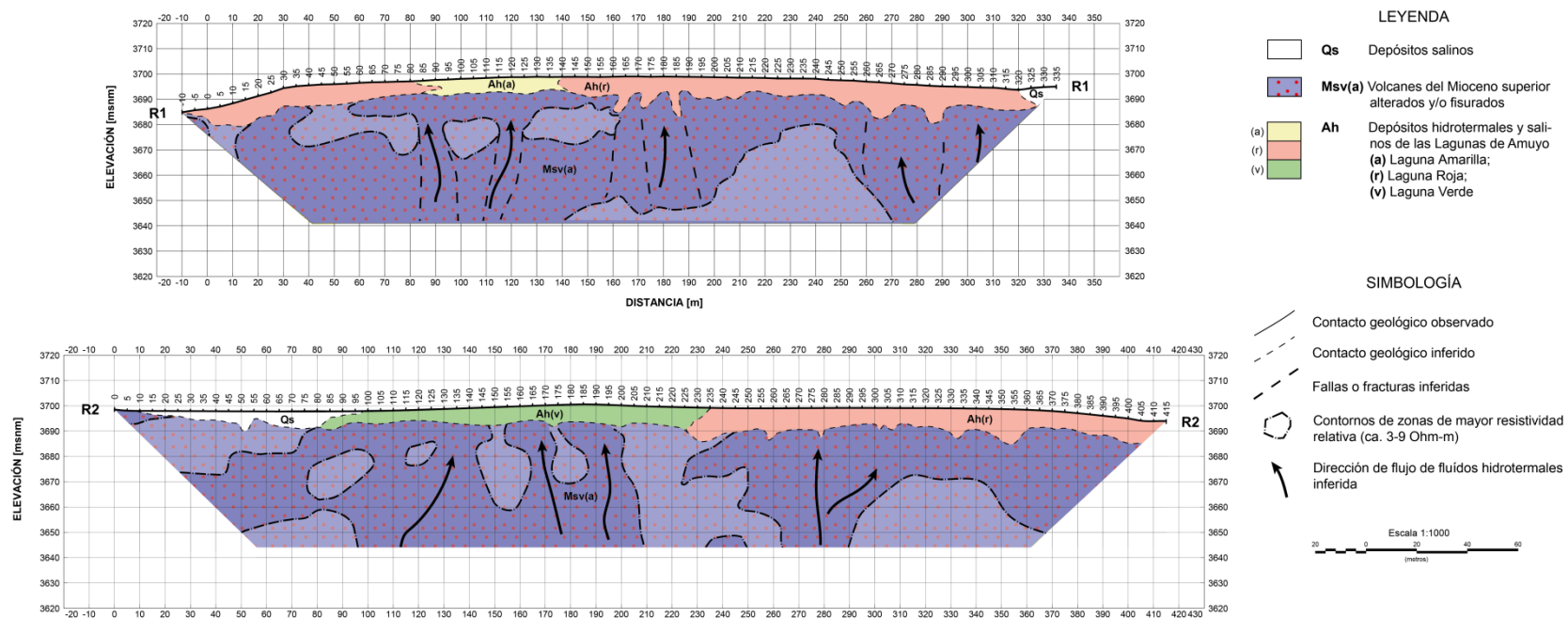
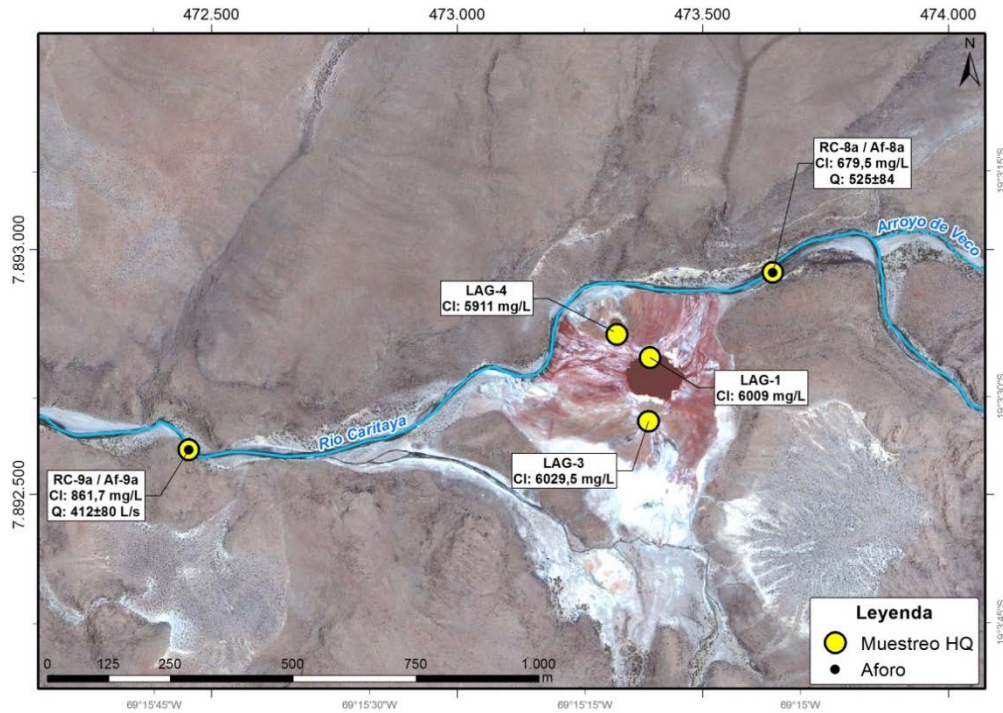


Figura 10-5: Interpretación geológica de sección Tomografía Eléctrica R1 y R2



Con el objetivo de estimar conceptualmente el caudal aportado por las lagunas de Amuyo al río Caritaya se realizó un balance hídrico y un balance de masas utilizando la concentración del Cloruros (Cl) como elemento conservativo.

Figura 10-6: Componentes considerados para el balance hídrico y de masas



El balance hídrico puede expresarse por la siguiente ecuación:

$$Q_{RC-9} = Q_{RC-8} + Q_{Lagunas} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde Q_{RC-9} corresponde al caudal aguas debajo de las lagunas, Q_{RC-8} al caudal aguas arriba de las lagunas y $Q_{Lagunas}$ al caudal aportado por las lagunas y un pequeño estero localizado inmediatamente al oeste de las mismas.

El balance de masas con elementos conservativos se puede expresar por la siguiente ecuación:

$$Q_{RC-9} * [Cl]_{RC-9} = Q_{RC-8} * [Cl]_{RC-8} + Q_{Lagunas} * [Cl]_{Lagunas} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde $[Cl]_{RC-9}$ representa la concentración de Cloruro aguas debajo de la laguna, $[Cl]_{RC-8}$ la concentración de Cloruro aguas arriba de la laguna y $[Cl]_{Lagunas}$ la concentración promedio de Cloruro de las lagunas.

Remplazando la **Ecuación 4** en la **Ecuación 5** es posible expresar el caudal de las lagunas ($Q_{Lagunas}$) de la siguiente manera:

$$Q_{Lagunas} = Q_{RC-8} * \frac{([CI]_{RC-9} - [CI]_{RC-8})}{([CI]_{Lagunas} - [CI]_{RC-9})} \quad \text{Ecuación 6}$$

En base al balance de masas anterior se estima un caudal aportante desde las lagunas al río Caritaya es de 19 ± 3 l/s.

11 ALTERNATIVAS DE MEJORAS EN LA CALIDAD DEL RECURSO

Aguas arriba del embalse, el río Caritaya es alimentado por aguas de baja salinidad provenientes desde los arroyos Veco y Mulluri. Por el contrario, el agua del río Caritaya recibe agua con altas concentraciones de boro y arsénico proveniente de las lagunas de Amuyo y aportes desde quebradas del margen sur. A continuación se presenta un sistema de mejoras de la calidad del recurso, el cual está compuesto por tres alternativas de solución, las cuales son:

- Alternativa de solución 1. Planta de tratamiento
- Alternativa de solución 2. Humedales artificiales y fitoremediación
- Alternativa de solución 3. Venta del recurso a la minería

Las alternativas mencionadas cuentan con un sistema de captación y conducción orientado a desviar las aguas de buena calidad, evitando que se mezclen con contaminantes naturales provenientes de las lagunas de Amuyo y las quebradas del margen sur, además del incremento de metales y salinidad producidos por el proceso de lixiviación durante el avance de aguas superficiales y aportes de otras fuentes.

Se ha clasificado el agua en función del valor de conductividad eléctrica, según los siguientes rangos de valores:

- Buena calidad: $CE \leq 2.000 \mu\text{S}/\text{cm}$
- Mala calidad: $CE > 2.000 \mu\text{S}/\text{cm}$

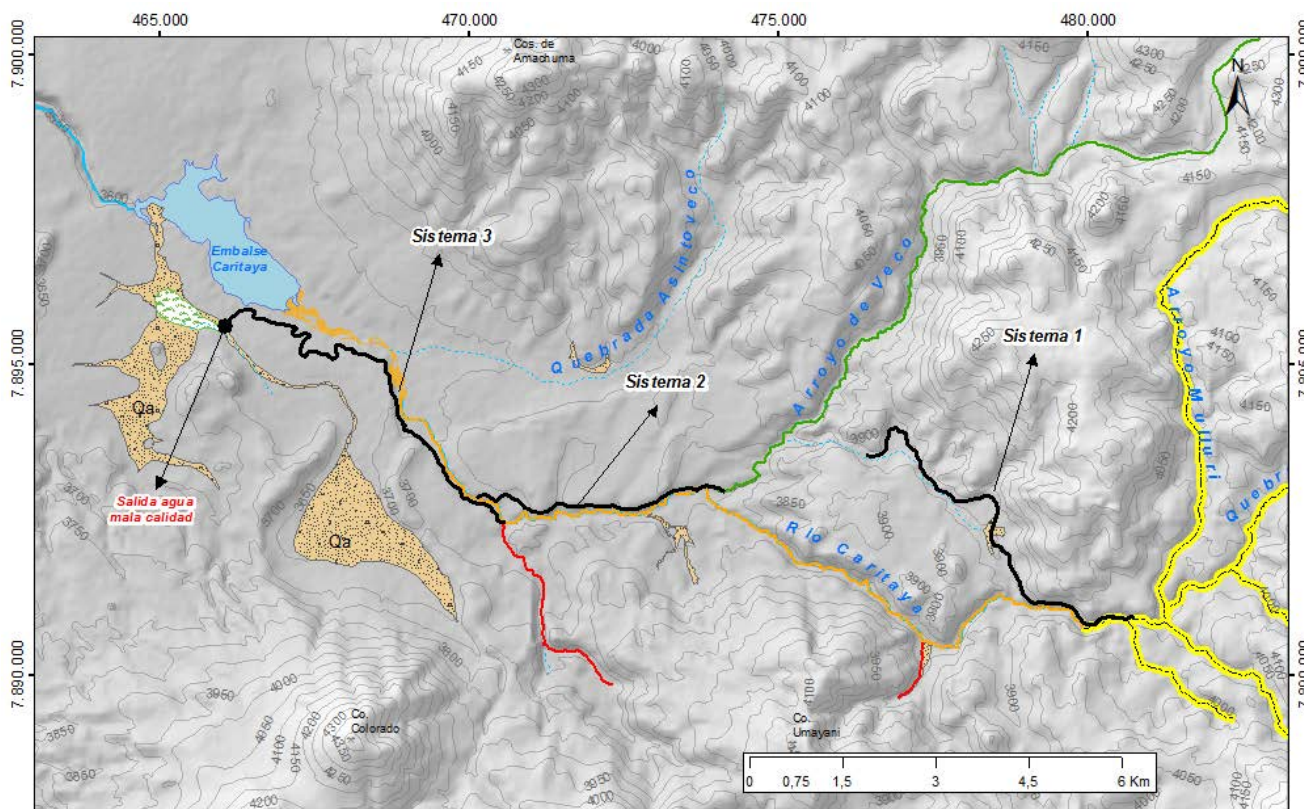
Esta clasificación se basó en la norma chilena NCh 1.333, donde se advierte que el agua con un rango de $1.500 \mu\text{S}/\text{cm} < CE < 3.000 \mu\text{S}/\text{cm}$ puede tener efectos adversos en muchos cultivos. Por otro lado, el estudio "Criterios de calidad de aguas o efluentes tratados para uso en riego", de la División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile (2005), recomienda la restricción del agua para riego si la conductividad eléctrica está en el rango de $700 \mu\text{S}/\text{cm} < CE < 3.000 \mu\text{S}/\text{cm}$. Basándose en estos estudios, se consideró adecuado el valor de $2.000 \mu\text{S}/\text{cm}$ como valor referencial.

A continuación se describe en detalle el sistema de captación y conducción de las aguas:

11.1 SISTEMA DE CAPTACIÓN Y CONDUCCIÓN DE LAS AGUAS

El sistema de captura y conducción, considera la implementación de 3 sistemas complementarios, los cuales se presentan en la Figura 11-1. Estos tramos constan de una obra de toma, conducción y descarga de las aguas al cauce natural.

Figura 11-1: Esquema conceptual de sistema de mitigación



SISTEMA 1

Captación arroyo Mulluri y quebrada Caritaya
 $50 < Q < 300$ l/s
 $CE \approx 2.000 \mu\text{S/cm}$; $As \approx 2$ mg/l ; $B \approx 12$ mg/l
Entrega arroyo de Veeco
 $100 < Q < 500$ l/s
 $800 < CE < 2.000 \mu\text{S/cm}$
 $0,5 < As < 1,5$ mg/l
 $5 < B < 10$ mg/l

SISTEMA 2

Captación arroyo de Veeco
 $100 < Q < 500$ l/s
 $800 < CE < 1.600 \mu\text{S/cm}$
 $0,5 < As < 1,5$ mg/l
 $5 < B < 10$ mg/l
Entrega aguas abajo de quebrada sur

SISTEMA 3

Captación río Caritaya (aguas abajo lagunas de Amuyo) y quebrada sur
 $50 < Q < 200$ l/s
 $9.000 < CE < 18.000 \mu\text{S/cm}$
 $5 < As < 20$ mg/l
 $75 < B < 160$ mg/l
Entrega suroeste de embalse Caritaya:
 3 alternativas de solución



11.1.1 Funcionamiento de sistemas de captación y conducción

Los tres sistemas de captación y conducción complementarios propuestos, desvían el agua de mediana y mala calidad hasta el sector indicado en la Figura 11-1, donde posteriormente se realizará la mejora del recurso utilizando la alternativa más conveniente.

A continuación se describe cada uno de los sistemas propuestos:

11.1.1.1 Sistema 1

1. Se capta el agua de baja salinidad de la quebrada de Caritaya y arroyo Mulluri, en los puntos donde su conductividad eléctrica alcance valores cercanos a los 2.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Esta agua tendría concentraciones de arsénico y boro entorno a los 2 y 12 mg/l respectivamente. Los puntos de captación de este sistema deberán ser definidos por un estudio de aforos y parámetros físico químicos in-situ (Salinidad, pH, Eh, temperatura, OD), aguas arriba de las lagunas de Amuyo, quebrada Caritaya y arroyo Mulluri. Se espera capturar con este sistema un caudal medio entre 50 y 300 l/s. Los caudales de crecidas no serán captados por este sistema, el que será diseñado de manera de permitir su paso en caso de ocurrencia.
2. El agua captada se conducirá por medio de una tubería en forma gravitacional, la cual descargará al arroyo de Veco, el que cuenta con buena calidad de agua ($\text{CE} < 2.000 \mu\text{S}/\text{cm}$). Se espera que el agua resultante de esta mezcla oscile entre 100 y 500 l/s, con una salinidad entre 800 y 1.600 $\mu\text{S}/\text{cm}$, una concentración de boro entre 5 y 10 mg/l y una concentración de arsénico entre 0,5 y 1,5 mg/l.
3. Existen dos posibilidades para reintegrar el agua desviada al arroyo de Veco:
 - a. Descargar el agua al término del bofedal y que posteriormente escurran en forma natural hasta el arroyo de Veco.
 - b. La segunda posibilidad es aprovechar los 200 metros de diferencia de cota para generar energía mediante una central hidroeléctrica de pasada, previo a su descarga al arroyo de Veco.

11.1.1.2 Sistema 2

1. Este sistema de conducción capta el agua de baja salinidad del arroyo Veco, proveniente del sistema anterior, antes de la confluencia con el río Caritaya. Posteriormente se conduce el agua por medio de una tubería que evita la interacción con el lecho del río. Se espera capturar entre 100 y 500 l/s, con una salinidad entre 800 y 1.600 $\mu\text{S}/\text{cm}$, una concentración de boro entre 5 y 10 mg/l y concentraciones de arsénico entre 0,5 y 1,5 mg/l.
2. Finalmente el agua es reintegrada aguas abajo de la última quebrada que aporta aguas de mala calidad.

11.1.1.3 Sistema 3

1. Este sistema capta el agua de mala calidad, inmediatamente aguas abajo de la última quebrada del margen sur. Esto permite captar el agua de las lagunas y las quebradas del margen sur en un solo punto, minimizando de esta manera costos y el impacto visual de sistemas independientes para cada fuente de contaminación. Se espera captar entre 50 l/s y 200 l/s, con una salinidad entre 9.000 y 18.000 uS/cm, con concentración de B entre 75 y 160 mg/l y concentraciones de As entre 5 y 20 mg/l.
2. El agua de mala calidad se conduce al sector suroeste del embalse Caritaya.
3. A la salida de este sistema, las aguas de mala calidad deberán ser tratadas de acuerdo a las alternativas mencionadas.

11.1.2 Obras de Captación y Conducción

El sistema de captura y conducción, para los 3 tramos proyectados, consta de una obra de toma, conducción y descarga de las aguas de mala calidad al cauce natural.

La obra de toma corresponde a una barrera transversal al cauce que desvía las aguas hacia un canal de transición o aducción (Figura 11-2), al cual se empalma una tubería de HDPE destinada a portear, mediante escurrimiento gravitacional, el flujo hasta el punto de descarga, en el cual se contempla una obra tipo enrocado para la protección del terreno natural.

Dada la magnitud de las crecidas asociadas al invierno altiplánico, se consideró como obra de toma una barrera utilizando el material disponible en el sector, la cual deberá ser repuesta después de cada crecida. El canal de aducción será excavado en tierra y el punto de empalme con la tubería proyectada se contempla una obra de hormigón que permita darle estabilidad a la tubería, y considera su inicio sobre la cota de fondo del canal para evitar el ingreso de piedras al interior del tubo (Figura 11-3).

Estas obras deberán permitir el paso de un caudal ecológico, que permita sustentar los ecosistemas aguas abajo.

Figura 11-2: Esquema de planta de la captación y canal de aducción

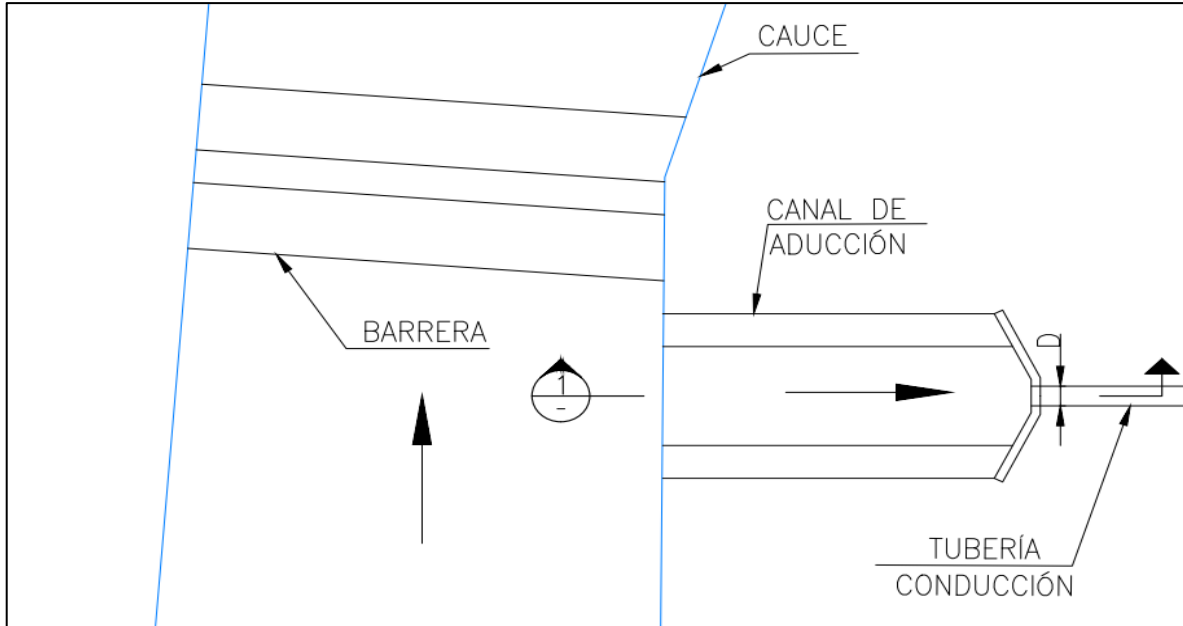
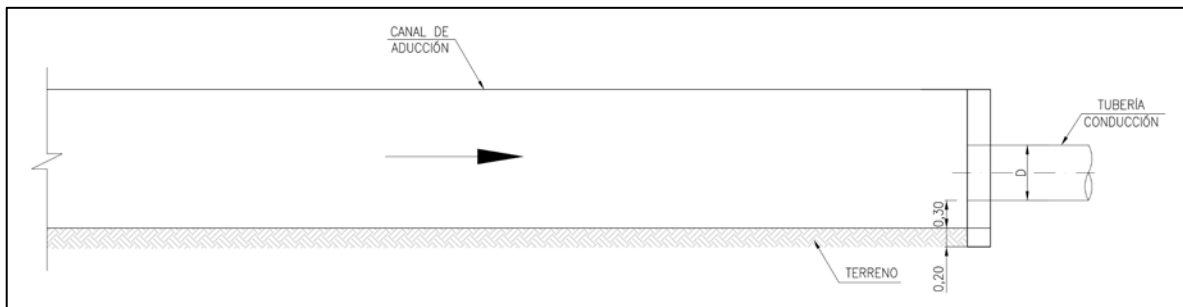
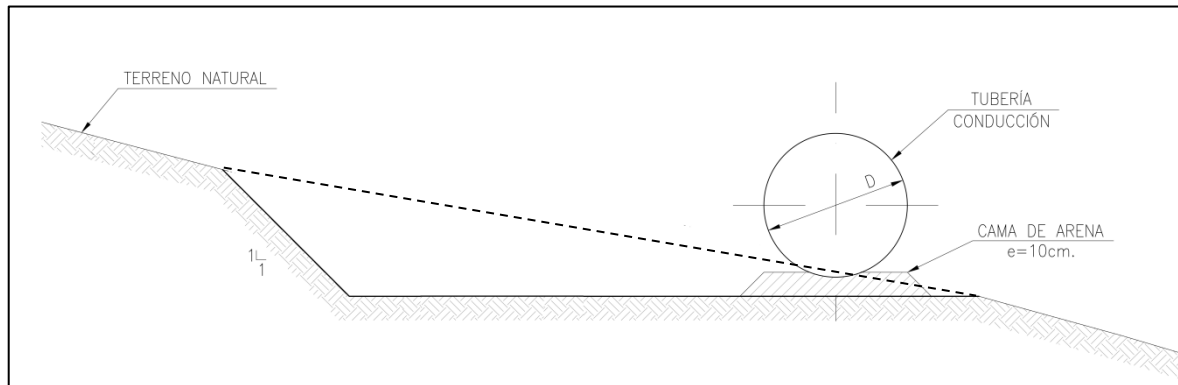


Figura 11-3: Esquema de Corte 1



Para el trazado de la tubería se proyecta una plataforma sobre el terreno (Figura 11-4), con una cama de arena sobre la cual se dispone la tubería.

Figura 11-4: Esquema de corte transversal de la tubería



La estimación de los diámetros de las tuberías para los sistemas de conducción, se realizó a partir de los datos proporcionados en la Tabla 11-1, y como criterio de diseño hidráulico, se consideró una relación de altura de escurrimiento y diámetro (h/D) al interior de las tuberías de 70% para asegurar el correcto funcionamiento de la tubería.

Debido a que sólo se cuenta con un levantamiento topográfico general de la zona, se consideró una pendiente única a lo largo de todo el trazado, en futuras etapas de ingeniería, donde se cuente con mayor información de los trazados, esta condición debe ser revisada.

Tabla 11-1 Parámetros para la estimación del diámetro de las tuberías

Parámetro	Conducción 1 (C1)	Conducción 2 (C2)	Conducción 3 (C3)
Caudal de diseño (m ³ /s)	0,300	0,500	0,200
Pendiente de diseño*	0,010	0,006	0,004
Diámetro (mm)	450	600	450

Nota: El coeficiente de rugosidad escogido corresponde a una tubería de tipo HDPE o PRFV ($n=0,010$).

* La pendiente de diseño se obtuvo a partir del desnivel entre la captación y restitución y la longitud estimada de los trazados. C1: Desnivel = 70 m – Longitud = 6970 m; C2: Desnivel = 30 m – Longitud = 4400 m; C3: Desnivel = 30 m – Longitud = 7600 m.

La cubicación del movimiento de tierra y materiales asociados a los 3 tramos de conducción se consignan en la Tabla 11-2, Tabla 11-3 y Tabla 11-4, respectivamente. Para la cubicación del canal de aducción se consideró una longitud de 10 m, con un ancho promedio de 4 m y 2 metros de profundidad, y para el enrocado se consideró un tramo de 5 m de largo y 2 de ancho con un espesor 0,3 m.

Tabla 11-2 Cubicación de la Conducción 1

Ítem	Unidad	Cantidad
Excavación para colocar tubería	m ³	32.500
Excavación canal de aducción	m ³	80
Relleno cama de la tubería	m ³	558
Hormigón	m ³	3
Armadura (20 kg/m ³)	kg	50
Tubería HDPE $\phi=450$ mm	m	6.970
Enrocado	m ³	3

Tabla 11-3 Cubicación de la Conducción 2

Ítem	Unidad	Cantidad
Excavación para colocar tubería	m ³	20.000
Excavación canal de aducción	m ³	80
Relleno cama de la tubería	m ³	352
Hormigón	m ³	3
Armadura (20 kg/m ³)	kg	50
Tubería HDPE $\phi=600$ mm	m	4.400
Enrocado	m ³	3

Tabla 11-4 Cubicación de la Conducción 3

Ítem	Unidad	Cantidad
Excavación para colocar tubería	m ³	17.000
Excavación canal de aducción	m ³	80
Relleno cama de la tubería	m ³	608
Hormigón	m ³	3
Armadura (20 kg/m ³)	kg	50
Tubería HDPE $\phi=450$ mm	m	7.600
Enrocado	m ³	3

Una vez las aguas de mala y mediana calidad sean desviadas de acuerdo a los sistemas complementarios descritos anteriormente, es que se debe seleccionar la alternativa de mejora del recurso más conveniente.

A continuación se describen en detalle las alternativas de solución:

11.2 ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN 1: PLANTA DE TRATAMIENTO

La primera alternativa considera tratar el agua proveniente del sistema 3 de captación y conducción, la que tiene peor calidad química por su alto contenido de arsénico y boro. El tratamiento se realizaría en las inmediaciones de la descarga del sistema 3, aprovechando el sistema gravitacional y su cercanía con el embalse Caritaya, el cual recibiría el agua tratada para su acumulación y regulación para el riego.

Para la remoción de arsénico generalmente se ocupan procesos de precipitación química, como es la coagulación con sales de aluminio y fierro y el ablandamiento con cal. Otros métodos alternativos que no son de uso masivo, son remoción por resinas de intercambio iónico, por adsorción en alúmina activada y por procesos de membranas como osmosis inversa y nanofiltración.

Para la utilización del proceso de coagulación-filtración, hay que tener claro ciertos factores y recomendaciones. Antes de agregar el coagulante es necesario ajustar el pH según sea el coagulante a utilizar, tener presente que la presencia de fosfato y sílice afectan el proceso, la presencia de cloruros, carbonato y sulfato no interfieren en el tratamiento y que habiendo presencia de calcio y manganeso puede favorecer el proceso. Si se utiliza un proceso de membranas se requiere que el agua a tratar tenga una nivel bajo de SDT y SST, se tenga en consideración que la presencia de cloruro, sulfato, nitrato y metales pesados disminuye eficiencia de tratamiento y que la presencia de materia orgánica, fierro y manganeso puede ensuciar las membranas.

Por otro lado, el uso de coagulación, sedimentación y filtración, no es muy efectivo en la remoción de altas concentraciones de boro. Para esto, son necesarios procesos especiales como intercambio iónico y osmosis inversa, los cuales reducen en una cantidad considerable el nivel de boro en el agua, pero aun así su tratamiento es muy costoso si sólo existe boro.

Soluciones más económicas para reducir el nivel de boro, contemplan mezclar el agua con gran contenido de boro con aguas que tengan menos de este contaminante. De esta manera se tiene un agua con mucho menos boro, a un precio accesible. Pero debido a los altos niveles de boro encontrados en las fuentes en Chile, esta solución no es factible dado que habría que mezclar grandes cantidades de agua pre-tratada para diluirla finalmente, lo que aumentaría su costo notoriamente.

Teniendo en cuenta lo anterior, se contempla un tratamiento en base a intercambio iónico, lo que permitiría reducir los niveles tanto de arsénico como boro a los niveles que se requiere para cumplir con las exigencias de la norma de riego (NCh 1.333).

El intercambio iónico es un proceso donde iones con carga iguales son intercambiados entre el agua y la resina sólida. El agua se hace pasar por un lecho de resina catiónica, y los iones de calcio y magnesio son remplazados por iones de sodio. Cuando los iones de sodio se agotan, la resina de intercambio iónico pierde su función y se puede regenerar añadiendo una solución de cloruro de sodio.

Una planta de tratamiento de intercambio iónico tipo, consiste en dos o más lechos de resina contenidas en unidades a presión, conectadas con bombas, cañerías y equipos auxiliares para su regeneración. Las unidades a presión son típicamente de 4 metros de diámetro, con la resina a unos 0,6 – 1,5 metros de profundidad.

Este tipo de tecnología es aplicable a la zona de estudio, dado que las temperaturas ambientales a la cual operan estas plantas pueden variar entre los 2 a 40°C. Además, no se necesitan espacios grandes, comparados con otros tipos de plantas de tratamiento, para lo cual es óptimo para el sector donde descarga el sistema 3 dado su cercanía con el embalse Caritaya.

Otra ventaja de utilizar este tipo de tecnología, es que reduce indirectamente la conductividad y la salinidad del agua, la cual es alta en el agua captada.

Los costos para este tipo de tecnología, pueden estimarse según las siguientes curvas de costos (Fundación Chile, 2010):

- Costo de inversión (Miles de USD) en función del caudal (Q):

$$7 \times 10^{-5} \cdot Q(l/s)^3 - 0,0691 \cdot Q(l/s)^2 + 33,063 \cdot Q(l/s) + 464,29 \quad \text{Ecuación 7}$$

- Costo tratamiento (USD/m³) en función de la concentración del parámetro (c):

$$0,0106 \cdot c \left(\frac{mg}{l} \right) + 0,0116 \quad \text{Ecuación 8}$$

De manera de homogenizar los costos y que sean comparables con las alternativas propuestas, es que se ha utilizado un caudal de 100 l/s, debido a que no se conocen costos asociados a la construcción e implementación de humedales artificiales con caudales similares a los esperados considerando la situación más desfavorable (200 l/s).

Los costos estimados de inversión corresponden a 7,2 millones de dólares aproximadamente, el cual se detalla en la Tabla 11-5, además de un costo de tratamiento de 1,7 dólares por m³, considerando una concentración de 160 mg/l de boro.

Tabla 11-5 Costo de Inversión Alternativa 1

Costos Alternativa N°1	
Ítems	Precio Total
1. Costos del Sistema de Captación y Conducción	USD
1.1 Sistema 1	\$ 1.704.356
1.2 Sistema 2	\$ 1.787.702
1.3 Sistema 3	\$ 1.557.238
2. Costos de Inversión e Implementación Planta de Tratamiento	\$ 2.221.010
Subtotal de costos de inversión	\$ 7.270.306
3. Costos de tratamiento por volumen de agua (m³)	\$ 1,7

Fuente: Elaboración propia

11.3 ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN 2. HUMEDALES ARTIFICIALES Y FITOREMEDIACIÓN

La segunda alternativa de solución considera la implementación y puesta en marcha de un humedal artificial y fitoremediación. Esta alternativa consiste en el ingreso de las aguas de mala y mediana calidad provenientes del sistema 3 al humedal artificial y la remoción del exceso de elementos contaminantes utilizando ciertas especies bióticas.

Los humedales son áreas de tierra que se mantienen húmedas durante gran parte o todo el año, cuya constitución produce una alteración de las propiedades del suelo, dado los cambios químicos, físicos y biológicos que ocurren durante la inundación. Estos humedales incluyen especies de plantas aptas para crecer en medios saturados y que pueden también sobreponerse a escasez periódica de elementos químicos esenciales como oxígeno.

La gran cantidad de agua involucrada en los humedales hace que éstos tengan una alta tasa de actividad biológica, la que hace que los humedales sean capaces de transformar muchos contaminantes comunes presentes en aguas, volviéndolos subproductos inocuos o nutrientes esenciales que pueden ser usados para actividad biológica adicional (Kadlec and Wallace, 2009). Esta tecnología de tratamiento puede ser aplicada a aguas residuales, tanto de origen industrial, animal, como residencial, aguas de tormentas de origen urbano y de agricultura, agua de minería y remediación de agua subterránea, entre otros.

Los humedales naturales han sido usados como sitios de descarga de agua contaminada, desde la existencia de las aguas residuales (al menos 100 años atrás, dependiendo del lugar). Así mismo, los humedales artificiales (o humedales construidos), para el tratamiento de aguas tienen su origen en la investigación llevada a cabo en Alemania Occidental en la década de los 50 y en el hemisferio occidental en la década de los 70.

La implementación de esta tecnología ha crecido en forma acelerada en el mundo desde 1985, ya que, a pesar de ser una solución mecánicamente simple, constituyen sistemas biológicos complejos, capaces de alcanzar altos niveles de tratamiento.

Dentro de las aplicaciones de fitoremediación en el mundo se pueden mencionar el caso de Trail, British Columbia, Canadá, donde se ha implementado un humedal para el tratamiento de aguas contaminadas con metales, dentro de los que destacan arsénico, cadmio y zinc (Duncan et al., 2004). Este sistema comenzó con la fase de prueba en 1998 y ha estado en operación intermitente al menos hasta el año 2002, siendo objeto de mejoras tecnológicas y ampliación. Dicho humedal contiene especies como *Brassica*, conocida por tolerar metales pesados, además de *Helianthus annuus*, *Calamagrostis canadensis* y *Typha latifolia*. Según datos de 2 períodos de operación, entre los años 2000 y 2002, el porcentaje promedio de remoción de arsénico fue de 98,1%, mientras que para cadmio se alcanzó una remoción de 99,4% y para zinc un 95,7% (Duncan et al., 2004).

En Kirka, Turquía, se ha implementado un humedal construido a pequeña escala, para tratar los efluentes de boro de la mina de bórax más grande del mundo. Este humedal experimental ha sido vegetado con *Phragmites australis* y *Typha latifolia*, obteniendo una tasa promedio de remoción de boro de 32% (Türker O.C. et al., 2013).

En Chile, solo hay experiencia de humedales plantados a escala de laboratorio. Se ha usado la especie *Phragmites australis* en distintos medios de soporte: grava, turba de coco, zeolita y piedra caliza, para remoción de arsénico, boro y fierro (Lizama et al., 2011, 2012). Esta especie ha sido usada con estos fines, ya que está bien documentada su tolerancia a pH ácidos, sobreviviendo bien en un rango de pH entre 2 y 8 (Cooper et al., 1996). Según el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), en Norte América, esta planta se observa en climas variados pasando por húmedos, subtropicales, semiáridos y áridos, en alturas de hasta 2.100 msnm. En Great Basin y desierto de Mojave, en Utah y Oregon, esta planta ocupa hábitats áridos y semiáridos. En Diamond Pond, Oregon, la humedad relativa es baja, la evaporación alta, la fluctuación diaria y estacional de temperatura es alta, y la temporada de crecida es corta (80-117 días). En esta zona la precipitación media anual es de entre 200-300 mm.

Dentro de las especies no nativas, aquella con haplotipo M, resulta ser más frecuente en hábitats áridos y de baja precipitación en China (An et al., 2012). Según USDA, este haplotipo es capaz de sobrevivir altas salinidades de hasta 23.400 ppm.

La experiencia de remoción de metales utilizando distintos tipos de sustrato indica una dependencia de éste en la eficiencia del proceso. Bajo una carga hidráulica de 0,073 m³/m²día, el sustrato de piedra caliza resultó ser el más eficiente para la remoción de arsénico y fierro, con un 99% y 98% respectivamente (Lizama et al., 2012). Por otra parte, el sustrato de zeolita presentó un 92% de remoción de arsénico y 86% de fierro. El sustrato de grava, a pesar de ser capaz de remover 43% del arsénico disuelto, no fue capaz de remover fierro en forma simultánea. Finalmente, el sustrato de turba de coco, mostró una baja capacidad de remoción de arsénico (9%), una mejor capacidad de remover fierro (46%) y fue el único medio que demostró potencial para remover boro.

De acuerdo a lo anterior, es que se propone la especie *Phragmites australis* para ser utilizada en el humedal artificial propuesto. Estas plantas soportan una carga hidráulica de $0,073 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{día}$ (Lizama et al., 2012). El caudal disponible para riego del humedal artificial, proveniente del sistema 3, variaría entre 50 l/s y 200 l/s. Por lo tanto, el área de riego necesaria para entregar una carga hidráulica de $0,073 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{día}$ con un caudal entre 50 l/s y 200 l/s ($4.320 \text{ m}^3/\text{día}$ y $17.280 \text{ m}^3/\text{día}$), variaría entre aproximadamente 6 ha y 24 ha. El área propuesta para su localización se señala en la Figura 11-1, cuya superficie total es de aproximadamente 30 ha.

Se propone que el humedal artificial esté localizado sobre depósitos aluviales (aguas abajo de la descarga del sistema 3), de los cuales se cree poseen un nivel escaso de conexión hidráulica con el sistema hidrogeológico del río Caritaya. Pese a esto, se hace necesario la impermeabilización del terreno de manera de evitar que exista algún tipo de infiltración en acuíferos más profundos.

Por otra parte, un humedal de las dimensiones anteriormente descritas hace sentido, ya que a menos de 30 km al noreste de la zona de estudio se han identificado humedales naturales protegidos por la DGA, de dimensiones mayores que la indicada. Estos son Parcoalla, con 64 ha y Surire con 487 ha.

Desde un punto de vista socio-cultural, se sugiere que los humedales sean mantenidos por las comunidades Aymaras. De este modo, la mejora de la calidad de las aguas será una fuente de trabajo para la comunidad de Nama y/o Mulluri.

En términos de costos, la transformación de contaminantes es de relativo bajo costo, y puede involucrar movimiento de tierra, impermeabilización del terreno, la plantación de las especies bióticas que harán la labor de remoción de los contaminante y el tratamiento correspondiente. Por otra parte, en comparación con otras tecnologías de tratamiento de aguas, los humedales artificiales o fitoremediación, corresponden a los menos costosos, tanto en operación como mantención.

Debido a la baja implementación de esta tecnología en Chile y el mundo, es que la valorización de los costos asociados es complicada y sólo debe considerarse como referencial y no como valor absoluto. Los costos para este tipo de tecnología, pueden estimarse de acuerdo un estudio realizado en EEUU (Dunner, 2004) para un humedal artificial de 4,38 (l/s), el cual fue extrapolado a 100 l/s, en donde se consideraron los costos de especies bióticas, impermeabilización.

Por lo tanto, considerando un caudal de 100 l/s los costos estimados de inversión corresponden a 6,9 millones de dólares aproximadamente y se detallan en la Tabla 11-6, además de un costo de operación y mantenimiento de 160.000 dólares aproximadamente.

Tabla 11-6 Costo de Inversión Alternativa 2

Costos Alternativa N°2	
Ítems	Precio Total
1. Costo del Sistema de Captación y Conducción	USD
1.1 Sistema 1	\$ 1.704.356
1.2 Sistema 2	\$ 1.787.702
1.3 Sistema 3	\$ 1.557.238
2. Costos de Inversión Humedal Artificial	\$ 1.900.835
Subtotal de costos de inversión	\$ 6.950.131
3. Costos de operación y mantención por caudal (l/s)	\$ 1.600

Fuente: Elaboración propia

11.4 ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN 3. VENTA DEL RECURSO A LA MINERÍA

La última alternativa de solución es considerar la venta o arriendo del agua que se capte por medio de los sistemas de captación y conducción. Esta agua podrá ser utilizada para procesos mineros, de modo que el agua de mejor calidad, que se almacene en el embalse Caritaya, sea utilizada para usos agrícolas.

Esta alternativa no tiene asociado ningún costo para su implementación, ya que la captación y posterior direccionamiento quedaría a cargo de terceros interesados en el agua.

En cuanto a los aspectos legales de esta alternativa, se puede indicar que se deberá implementar una fórmula que, reconociendo los derechos de aguas y organizaciones de usuarios, que se encuentran en la cuenca del río Camarones, permita descartar en forma compensada las aguas altamente contaminadas por Boro y Arsénico y que contaminan las aguas del embalse Caritaya, con la consecuente disminución significativa en su disponibilidad de uso.

La última quebrada aportante al río Caritaya del margen sur, requiere ser excluida físicamente como tributaria del río y del embalse, lo que supone consecuentemente excluir de derechos de embalsamiento a los propietarios de estas aguas.

Esta iniciativa tiene por finalidad, tal como se ha señalado, excluir estas aguas altamente contaminadas, a efecto de enajenarlas o arrendarlas a terceros, posiblemente a empresas mineras que puedan aprovecharlas adecuadamente, dado que en sus procesos productivos pueden utilizar recursos hídricos de mala calidad.

Cabe tener presente que los regantes captan desde el río Camarones sin distinguir entre recursos provenientes del río Ajatama o del río Caritaya, ni tampoco cuentan con una obra

de medición ni obra de descarga, situación que hace imposible mantener un control sobre las tomas.

De acuerdo a información dispuesta en el estudio Diagnóstico y diseño definitivo “Reparación embalse Caritaya” (SMI Ltda., 2009), a nivel de organización de canales, a fecha del informe habían constituidas 36 comunidades de aguas, de los 60 canales que componen el sistema. El valle se encuentra dividido en 3 secciones de las cuales la sección alta, se encuentra totalmente regada y los regantes se comprometieron a captar agua únicamente entre las 06:00 y las 19:00 horas. Cuenta con 27 canales, 8.994 acciones con 450 l/s aproximadamente, entre los que destaca Umaxo-Illapata con 52 regantes. Incluye los sectores:

- Condumaya (10 canales)
- Illapata- Esquiña (7 canales)
- Quebradas (10 canales)

Estas aguas, en la medida que existan titulares de su propiedad adecuadamente identificados y con sus derechos regularizados, pueden enajenarlas o arrendarlas sin limitación alguna.

En efecto, el Código de Aguas en su Artículo 6° establece que el derecho de aprovechamiento, es un derecho real que recae sobre las aguas y consiste en el uso y goce de ellas, con los requisitos y en conformidad a las reglas que prescribe este código.

El derecho de aprovechamiento sobre las aguas es de dominio de su titular, quien podrá usar, gozar y disponer de él en conformidad a la ley. Esto quiere decir que los propietarios de estas aguas, pueden enajenarlas o arrendarlas conforme a las normas de derecho privado que regulan la materia.

A su vez el Artículo 21° señala que la transferencia, transmisión y la adquisición o pérdida por prescripción de los derechos de aprovechamiento se efectuará con arreglo a las disposiciones del Código Civil, salvo en cuanto estén modificadas por el presente código.

Sin perjuicio de lo expuesto, y de las plenas atribuciones y garantías de los propietarios de estas aguas, en términos que son libres y soberanos para llegar a una solución voluntaria, el embalse Caritaya requiere de un consenso o concurso de voluntades de la totalidad de sus usuarios, en un acuerdo global que beneficie a todos y a la que todos deben concurrir con sus respectivos aportes.

Conforme a las características y alcances de la solución técnica mencionada y el marco legal vigente es posible mencionar las siguientes conclusiones y recomendaciones:

1. La primera medida a implementar, es la actualización de un estudio en derecho sobre la titularidad de las aguas, tanto del embalse Caritaya, como de sus ríos aportantes, con un especial énfasis y precisión en la quebrada aportante al río Caritaya denominada “última quebrada del margen sur”. Estos antecedentes deben contener los registros específicos de los titulares de derechos de aguas, expresados

- en litros por segundo, tanto del Conservador de Bienes Raíces, como del Catastro Público de Aguas de la DGA.
2. Se debe contar con el consentimiento de los agricultores involucrados, en un acuerdo global que involucre no sólo a los propietarios de las aguas de la quebrada aportante, sino a los usuarios y regantes del embalse Caritaya.
 3. Lo anterior por cuanto, en la eventualidad de venderse o arrendarse estas aguas, los titulares de las mismas quedarán sin abastecimiento, lo que requiere por tanto que una parte del precio o de la renta vaya en beneficio de los restantes usuarios del embalse y estos como contrapartida hagan participe a los vendedores o arrendadores de un porcentaje del suministro hídrico.
 4. Para lo expuesto se requiere de los consensos necesarios, lo que debe ir asociado a un proceso detenido de participación ciudadana, con la participación de a lo menos el SAG y la CONADI.
 5. Sobre este último punto y dado que se trataría de un acuerdo entre privados (propietarios y compradores o arrendatarios), no requeriría del trámite de la Consulta, consagrada en el Convenio 169 de la OIT. Sin embargo, si se requiere de un acto administrativo asociado, tal como por ejemplo la modificación de la Resolución N° 594 del 24 de abril de 1990 del Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), que regula el sistema de entrega de agua desde el embalse Caritaya, eventualmente podría existir un requerimiento en este sentido, toda vez que los agricultores son comunidades Aymaras, reconocidas en la Ley 19.253, de Pueblos Indígenas.
 6. La Consulta Previa: Reglamento DS. N° 66 de 04 de Marzo de 2014 “aprueba Reglamento que regula el procedimiento de consulta indígena, en virtud del artículo 6 n° 1 letra a) y n° 2 del Convenio n° 169 de la Organización Internacional del Trabajo y deroga normativa que indica.

La regulación de la consulta señalada en el artículo 6° N°1 del Convenio 169 de la OIT, al tratar la consulta referida a proyectos de inversión establece que se debe:

“a) consultar a los pueblos interesados, mediante procedimientos apropiados y en particular a través de sus instituciones representativas, cada vez que se prevean medidas legislativas o administrativas susceptibles de afectarles directamente”.

7. Otro aspecto a considerar son las exigencias de la Ley 19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente y el necesario análisis de pertinencia sobre la obligatoriedad de someter este proyecto al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. Para el estudio de esta materia, se requiere analizar caudales y obras hidráulicas asociadas, así como la calidad jurídica de los territorios en donde se emplaza, tales como por ejemplo si existe un Área Silvestre Protegida (SNASPE) o un Área de Desarrollo Indígena (ADI) involucrada.

En principio, y como análisis preliminar, se concluye que el Embalse Caritaya se encuentra fuera de algún área protegida por el SNASPE y de la ADI Jiwasa Oraje. Sin embargo, la solución de desvío podría eventualmente coincidir con estas u otras áreas de protección.

8. El proyecto tiene por finalidad mejorar la calidad del agua embalsada en el embalse Caritaya, y de esta forma ampliar las posibilidades de cultivo en la zona, haciéndola compatible con una diversidad de productos agrícolas hoy inviables dada la mala calidad de las aguas utilizadas, por lo que el proyecto redundará en beneficios de todos los usuarios, ya que a pesar de haber menos agua, esta será de una calidad tal que se ampliará la gama de especies a producir.
9. El mecanismo necesariamente tendrá que incluir tanto la situación de enajenación o arriendo de los derechos de aguas, y un convenio entre la totalidad de los usuarios del embalse, por el cual estos se beneficien con el precio o renta y por la otra compensen proporcionalmente a los propietarios de las aguas de la quebrada aportante.

11.5 ESTIMACIÓN DE IMPACTOS EN LA PRODUCCIÓN

El estudio de la UTA (2010) describe que la calidad química de las aguas del río Camarones es deficiente para el riego por el alto contenido salino total y por el elevado contenido de boro. Los niveles de boro en sus aguas son extraordinariamente altos (Figura 3-14), tanto para normativas internacionales como para la norma chilena de riego NCh 1.333 que acepta 0,75 mg/l. En el estudio de la UTA (2010) se menciona que el valor promedio de arsénico varía entorno a los 0,86 mg/l y el contenido de boro promedio con un valor de 20,6 mg/l (en Conanoxa, localizado aguas arriba del poblado de Cuya). En el caso del arsénico este valor promedio se encuentra más de 80 veces por sobre el valor recomendado por la NCh 409.2005 que establece un contenido máximo de arsénico total de 0,01 mg/l para el agua destinada para consumo humano (Par más detalle ver “Capítulo de Marco Conceptual”).

Para lograr estimar el impacto en la producción agrícola que tendría implementar las medidas antes narradas, primero es necesario estimar cual será la mejora en la calidad de las aguas del río Camarones.

El agua del río Camarones, se forma gracias a la mezcla de aguas del río Ajatama y las del río Caritaya, los cuales no presentan información de calidad y cantidad sistemática que permitan realizar una correcta estimación de sus estado base. Sumado a ello no existe control sobre las extracciones o fuentes de aporte de contaminación antrópica en toda la amplitud de la cuenca del río Camarones.

Dada la carencia de información descrita, la estimación en la potencial mejora en calidad del río Camarones y una posterior estimación de su impacto productivo presenta mucha incerteza, por lo que el análisis que se presenta a continuación debe ser considerado como orientativo y preliminar.

Para estimar las mejoras en la calidad que puede experimentar el río Camarones se realizan los siguientes supuestos:

- Las concentraciones de boro supuestas son: 20,6 mg/l para el del río Camarones, 25 mg/l para la salida del embalse Caritaya y 2 mg/l para el aporte del río Ajatama.
- El caudal del río Camarones es la suma entre los aportes del río Caritaya y el río Ajatama, y su balance hídrico puede expresarse con la siguiente ecuación:

$$Q_{Cam} = Q_{Car} + Q_{Aja} \quad \text{Ecuación 9}$$

- Las medidas de mitigación reducirán entre un 20 y 40 % la concentración de boro en el caudal de salida del embalse Caritaya.
- El boro es un elemento conservativo.
- No existen otros aportes de boro al río Camarones además de los del río Caritaya y Ajatama.

- Luego de las medidas de mitigación el caudal de salida del embalse Caritaya será igual al caudal aportante del río Ajatama. Cada uno aportará en promedio anual 200 l/s.
- El balance de masas para el boro en el río Camarones se puede expresar :

$$Q_{Cam} * [B]_{Cam} = Q_{Car} * [B]_{Car} + Q_{Aja} * [B]_{Aja} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde Q_{Cam} , Q_{Car} y Q_{Aja} con los caudales de los ríos Camarones, Caritaya y Ajatama, respectivamente. $[B]_{Cam}$, $[B]_{Car}$, $[B]_{Aja}$ son las concentraciones de boro de los ríos Camarones, Caritaya y Ajatama, respectivamente.

Como se mencionó, no existen medidas de los caudales en forma sistemática en los ríos Caritaya y Ajatama. Por ello se buscó encontrar los valores de caudales de ambos ríos y que luego de mezclarse (Ecuación 3) expliquen los 20,6 mg/l de concentración promedio de boro de la estación de Conanoxa. Para ello, se supuso un valor promedio de la concentración de boro en el río Caritaya de 25 mg/l y en Ajatama es de 1,5 mg/l.

Posteriormente, se calculó en base a las Ecuaciones 4 y 5 la concentración de boro en el río Camarones luego de la mezcla entre los ríos Caritaya y Ajatama (Tabla 11-7).

El cálculo de la concentración de boro en río Camarones, en función de la variación de caudales en los ríos Caritaya y Ajatama, revelan que las combinaciones de caudales más probables de mezcla son entre 50 y 200 l/s, para aportes del río Ajatama, y entre 200 y 500 l/s para aportes del río Caritaya.

Tabla 11-7: Cálculo de la concentración de boro en río Camarones en función de la variación de caudales en los ríos Caritaya y Ajatama

Concentración boro río Caritaya (mg/l)	25	Cte.				
Concentración boro río Ajatama (mg/l)	2	Cte.				
Q. R. Ajatama (L/s) \ Q. R. Caritaya (L/s)	50	100	200	300	400	500
50	13,5	9,7	6,6	5,3	4,6	4,1
100	17,3	13,5	9,7	7,8	6,6	5,8
200	20,4	17,3	13,5	11,2	9,7	8,6
300	21,7	19,3	15,8	13,5	11,9	10,6
400	22,4	20,4	17,3	15,1	13,5	12,2
500	22,9	21,2	18,4	16,4	14,8	13,5

Si descendemos la concentración de boro del río Caritaya en 20% (20 mg/l), es posible recalcular la matriz del cálculo de la concentración de boro para el río Camarones (Tabla 11-8).

Tabla 11-8: Cálculo de la concentración de boro en río Camarones en función de la variación de caudales en los ríos Caritaya y Ajatama, para reducción del 80% en el río Caritaya

Concentración boro río Caritaya (mg/l)	20					
Concentración boro río Ajatama (mg/l)	2					
Q. R. Ajatama (l/s) \ Q. R. Caritaya (l/s)	50	100	200	300	400	500
50	11,0	8,0	5,6	4,6	4,0	3,6
100	14,0	11,0	8,0	6,5	5,6	5,0
200	16,4	14,0	11,0	9,2	8,0	7,1
300	17,4	15,5	12,8	11,0	9,7	8,8
400	18,0	16,4	14,0	12,3	11,0	10,0
500	18,4	17,0	14,9	13,3	12,0	11,0

Si descendemos la concentración de boro del río Caritaya en 40% (15 mg/l), es posible recalcular la matriz del cálculo de la concentración de boro para el río Camarones (Tabla 11-9).

Tabla 11-9: Cálculo de la concentración de boro en río Camarones en función de la variación de caudales en los ríos Caritaya y Ajatama, para reducción del 60% en el río Caritaya

Concentración boro río Caritaya (mg/l)	15					
Concentración boro río Ajatama (mg/l)	2					
Q. R. Ajatama (l/s) \ Q. R. Caritaya (l/s)	50	100	200	300	400	500
50	8,5	6,3	4,6	3,9	3,4	3,2
100	10,7	8,5	6,3	5,3	4,6	4,2
200	12,4	10,7	8,5	7,2	6,3	5,7
300	13,1	11,8	9,8	8,5	7,6	6,9
400	13,6	12,4	10,7	9,4	8,5	7,8
500	13,8	12,8	11,3	10,1	9,2	8,5

Considerando el análisis anterior, las concentraciones del río Camarones pueden pasar desde 14,7 mg/l en promedio a valores entre 11,3 y 18,4 mg/l de boro.

De acuerdo a lo señalado en el estudio “Criterios de calidad de suelo agrícola” desarrollado por la Universidad de Chile para el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG, 2005), la barrera suelo-planta protege a la cadena alimentaria de elementos como el boro y el arsénico.

La toxicidad del boro en las plantas se caracteriza por un crecimiento lento, malformaciones en las hojas, colores café y amarillo, clorosis, necrosis, incremento de moho, marchitez e inhibición de germinación de polen y crecimiento de tubos de polen. Sin embargo, existen cultivos tolerantes a concentraciones relativamente altas de este elemento traza, como el espárrago, considerado muy tolerante (concentraciones de hasta 15 mg/l), la alfalfa y el tomate (concentraciones de hasta 6 mg/l). La Tabla 11-10 muestra la tolerancia de los cultivos al boro indicados en este estudio.

El caso del arsénico es diferente, pues los cultivos sólo pueden tolerar bajas concentraciones. El efecto principal del arsénico en las plantas aparece en la destrucción de la clorofila en el follaje como consecuencia de la inhibición de la producción de enzimas. Debido a que el crecimiento de la planta se retarda ante la posible ocurrencia de una acumulación significativa de arsénico, las partes comestibles usualmente no acumulan arsénico a niveles dañinos para los consumidores. De acuerdo a este estudio, la concentración máxima aceptable del agua de riego es de 2 mg/l de arsénico para suelos neutros a alcalinos de textura fina. Concentraciones mayores reducen el rendimiento de los cultivos pues retarda su crecimiento.

Tabla 11-10: Sensibilidad o tolerancia al boro de cultivos agrícolas

Tolerancia al boro	Cultivo
Muy tolerante (6 a 15 mg/l)	Espárrago
Tolerante (4 a 6 mg/l)	Tomate, Alfalfa, Betarraga, Remolacha
Moderadamente tolerante (2 a 4 mg/l)	Lechuga, Repollo, Apio, Avena, Maíz, Trébol, Alcachofa, Calabaza
Moderadamente sensible (1 a 2 mg/l)	Arveja, Zanahoria, Rábano, Papa, Pepino
Sensible (0,5 a 1 mg/l)	Durazno, Cereza, Ciruela, Uva, Cebolla, Ajo, Camote, Trigo, Cebada, Girasol, Frutilla, Poroto
Muy sensible (< 0,5 mg/l)	Mora

El desvío de aguas de buena calidad de afluentes al embalse Caritaya reducirá las concentraciones de arsénico a un rango de entre 0,5 y 1,5 mg/l, mientras que el boro se reducirá a un rango de entre 3,6 y 9,1 mg/l. Esto permitirá la reducción de la concentración de boro en el río Camarones entre 11,3 y 18,4 mg/l dependiendo de los caudales de sus

tributarios (río Caritaya y río Ajatama). Por su parte el arsénico se reducirá a valores inferiores a 2 mg/l lo que permitirá un adecuado desarrollo de la actividad agrícola.

Estas concentraciones permitirán un adecuado crecimiento de especies muy tolerantes y tolerantes al boro como espárrago, tomate, alfalfa, betarraga y remolacha, lo que permitirá ampliar la gama de cultivos presentes en el valle, dominado por la alfalfa (70% aproximadamente).

Para determinar el aumento de la productividad agrícola del valle del río Camarones, se calculó la demanda hídrica de los cultivos tolerantes al boro antes señalados. Para ello se utilizó la metodología de cálculo de evapotranspiración de cultivos bajo condiciones de stress hídrico señalada en el documento “Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos” (FAO, 2006). De acuerdo a esta guía, condiciones de baja fertilidad del suelo, toxicidad salina, suelos inundados, plagas, enfermedades y la presencia de horizontes duros o impenetrables en la zona radicular, pueden generar un crecimiento deficiente de la planta y una reducción de la evapotranspiración. Asimismo, condiciones de falta de agua y salinidad en el suelo pueden reducir la absorción del agua y limitar la evapotranspiración del cultivo (ET_c). Esta metodología señala que:

$$ETc \text{ ajustado} = Ks * Kc * ET_0 \quad \text{Ecuación 11}$$

Dónde:

ETc ajustado = es la evapotranspiración de cultivo ajustada para condiciones de stress hídrico.

Ks = describe el efecto del stress hídrico en la transpiración del cultivo.

Kc = es el coeficiente de cultivo.

ET₀ = es la evapotranspiración de referencia.

La Tabla 11-11 muestra los valores de *Kc* y *Ks* utilizados para cada uno de los cultivos tolerantes a las concentraciones de boro presentes en el río Camarones producto de la implementación de la alternativa de solución 1. Se asumió un valor de *Ks* de 0,5 para todos los cultivos homogéneamente y se utilizó un valor de *ET₀* de 5,4 mm/d correspondiente a la evapotranspiración observada en la estación Codpa.

De acuerdo a lo señalado en los TDR del presente estudio, los predios actualmente cultivados cubren una superficie de 1.630,7 ha, mientras que la superficie total cultivable es de 1.861,6 ha. De acuerdo al Censo Agropecuario realizado en 2007, en la región de Tarapacá las principales técnicas de riego son tendido y goteo. Considerando esto, la última columna de la Tabla 11-11 muestra el riego requerido por cada cultivo asumiendo el uso total del área cultivable (1.861,6 ha) para cada especie, con una eficiencia de riego del 20%

para el riego por tendido y 95% para el riego por goteo. De esta tabla se desprende que los cultivos que requieren menos riego son espárrago, alfalfa y betarraga y que el caudal requerido está en el rango de caudales aportados por los ríos Caritaya y Ajatama, siempre que éste sea realizado mediante goteo, por lo que sería factible utilizar al máximo el potencial agrícola del río Camarones.

Tabla 11-11: Caudal de riego requerido por cultivos tolerantes al boro.

Tolerancia al boro	Cultivo	Kc	Ks	ETc (mm/d)	Riego requerido (l/s)	
					Tendido	Goteo
Muy tolerante	Espárrago	0,95	0,5	2,57	2.763	582
Tolerante	Tomate	1,15	0,5	3,11	3.345	743
	Alfalfa	0,95	0,5	2,57	2.763	614
	Betarraga	1,05	0,5	2,84	3.054	679
	Remolacha	1,20	0,5	3,24	3.491	776

Para determinar cuáles de los 5 cultivos incluidos en este análisis generan mayor rentabilidad del uso del suelo, se utilizó los datos de productividad y precio de mercado de ellos. La Tabla 11-12 muestra el análisis realizado con información extraída desde las bases de datos de ODEPA. Como resultado se obtuvo que los cultivos más rentable son el espárrago y el tomate, los que alcanzan un valor total por hectárea cultivada alrededor de los \$30.000.000. Por el contrario, la betarraga, tiene la producción menos rentable, con un valor total de \$208.000 por hectárea.

Tabla 11-12: Análisis de productividad y precios de cultivos tolerantes al boro

Cultivo	Productividad por hectárea	Precio	Valor del cultivo por hectárea producida
Espárrago	20 ton	\$1500 por kilo	\$30.000.000
Tomate	100 ton	\$230 por kilo	\$23.000.000
Alfalfa	15 ton	\$100 por kilo	\$1.500.000
Betarraga	160.000 unidades	\$13 por unidad	\$208.000
Remolacha	80 ton	\$25 por kilo	\$2.000.000

Considerando estos resultados, se recomienda el cultivo de espárragos para los predios agrícolas que actualmente están sin uso en la zona y que alcanzan las 230 ha aproximadamente. Si se mantiene la distribución actual de cultivos en el valle, dominado principalmente por alfalfa, y se aprovechan estas 230 ha actualmente no cultivadas con tomates, se podrían generar \$6.900 millones adicionales en ingresos para la zona.

12 PARTICIPACIÓN CIUDADANA

Como parte del desarrollo del proyecto “Diagnóstico de la subcuenca aportante al Embalse Caritaya”, GeoHidrología Consultores realizó, el día 5 de marzo de 2014 en la ciudad de Arica, un taller inicial de participación ciudadana (PAC de inicio). La PAC de inicio tuvo como propósito presentar a la comunidad, los objetivos y alcances del estudio, y levantar las inquietudes, sugerencias, requerimientos y problemáticas que existen actualmente con respecto a los recursos hídricos y su gestión.

La convocatoria a la actividad de participación se realizó con el apoyo de la I. Municipalidad de Camarones y profesionales de la CNR. En conjunto se hizo llegar invitaciones a los actores representantes de la comunidad y a las autoridades. Logrando una convocatoria de más de 37 participantes.

El programa con el cual se desarrolló la actividad se presenta en la Tabla 12-1.

Tabla 12-1: Programa del Taller de Participación Ciudadana

Hora	Actividad	Responsable
11:30 a 11:35	Saludo maestro de ceremonia	Sra. Javiera Herrera (CNR)
11:35 a 11:45	Palabras de Bienvenida	Sr. Andrés Puiggros Seremi de Agricultura (s) de la región de Arica y Parinacota
11:45 a 12:10	Presentación PAC	Sr. Leonardo Machuca (CNR) - Sr. Marcelo Solari (GeoH)
12:10 a 12:35	Ronda de preguntas	
12:35 a 12:45	Entrega de bonos Ley de Riego*	Seremi de Agricultura (S) de la región de Arica y Parinacota-Coordinador de la Macrozona Norte de la CNR- Autoridades asistentes- Regantes beneficiados
12:45 a 12:55	Palabras de beneficiario*	
13:05 a 13:15	Palabras de cierre	Sr. Alberto Manzanares- Coordinador de la Macrozona Norte de la CNR
13:15 a 13:40 hrs	Cóctel	

*Actividad anexa al Taller Participativo.

La asistencia controlada durante la realización del taller contabilizó la participación de 37 asistentes (Figura 12-1). En Anexo I se presenta la lista de asistencia de la actividad.

Figura 12-1: Asistencia primer Taller de Participación Ciudadana



Para recoger las inquietudes, consultas y sugerencias de los asistentes con respecto al proyecto, en el Taller Participativo se realizó una sesión de consultas donde se entregó la palabra a los asistentes. En ésta los asistentes manifestaron interés o inquietud fundamentalmente en cuatro aspectos:

- Cuantificación de la mejora en la calidad de las aguas tras el proyecto y cómo se amplían las posibilidades de especies cultivables,
- Qué obras de solución genera el estudio y cómo podría afectar al turismo,
- Posibilidades de ampliar el estudio hacia aguas abajo del Embalse Caritaya para un mejor análisis de la calidad de las aguas,
- Involucrar a la comunidad en la realización del estudio.

Ante estas consultas las respuestas de los encargados de desarrollar el proyecto, tanto de GeoHidrología como CNR, fue reformular las expectativas de los asistentes recalcando que éste es un estudio básico, que pretende generar un modelo conceptual del sistema y establecer las bases para evaluar posibles soluciones al problema de la calidad de las aguas. Además, y como parte de los objetivos del taller, se invitó a los asistentes a colaborar y participar del desarrollo del estudio.

13 CONCLUSIONES

Para realizar el diagnóstico de la subcuenca aportante al embalse Caritaya, se comenzó analizando y caracterizando la geología, hidrología, hidrogeología e hidrogeoquímica del sector. Complementando lo anterior, se realizó una campaña de aforo de caudales, un muestreo hidroquímico e isotópico y además una campaña geofísica.

La hidrología del sector está caracterizada por precipitaciones fundamentalmente entre los meses de diciembre a marzo, siendo el mes de febrero el que registra la mayor precipitación. Estas precipitaciones están fuertemente relacionadas con la altitud, en el que se estimó un incremento en la precipitación de 13,9 mm por cada 100 m de altitud.

La subcuenca estudiada no presenta registros fluviométricos, por ello el análisis de caudales realizado se estimó en base a cuencas cercanas de Codpa y Camiña. El resultado del análisis de caudales determinó que en la estación seca, entre abril y noviembre, el 90% de los caudales se encontraría bajo los 300 l/s. Para el período de lluvias e invierno altiplánico, se estimó que un 10% es igual o mayor a 1.200 l/s. Por otra parte, se estimó que los caudales máximos instantáneos, para un periodo de retorno de 100 años, son del orden de los 17 m³/s.

Se determinó con la caracterización hidrogeológica del sector, que la subcuenca está compuesta por rocas volcánicas y relleno por depósitos aluviales y fluviales mal consolidados que se depositan en las quebradas y en una amplia llanura fluvial localizada inmediatamente aguas arriba del embalse Caritaya. Estos depósitos albergan un acuífero con una baja capacidad de almacenamiento, el cual fluye libremente hacia el embalse Caritaya y es recargado fundamentalmente por la infiltración del río Caritaya.

Se puede indicar, según la hidrogeoquímica analizada del sector, que el río Caritaya presenta aguas de mala calidad, con conductividades entre 3.000 y 4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Por su lado, los principales afluentes al río Caritaya provienen de la quebrada Caritaya, el arroyo de Veco, con conductividades entorno a los 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ donde comienza y 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en su confluencia con el río Caritaya, y el arroyo Mulluri con una calidad intermedia de alrededor de 1.435 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Según lo anterior, una de las principales conclusiones de este estudio, a diferencia del estudio de la UTA (2010), el cual atribuía como única fuente de contaminación natural a las lagunas de Amuyo, es la identificación de múltiples fuentes de contaminación aportantes al embalse Caritaya. Se identificó, incluso, que aguas arriba de las lagunas de Amuyo el río Caritaya ya tiene una calidad deficiente, y que además el arroyo de Veco aporta con aguas de buena calidad.

El río Caritaya, principal afluente al embalse Caritaya, presenta altas concentraciones de arsénico y boro, dado los aportes de las quebradas del margen sur, de las lagunas de Amuyo y por la incorporación de elementos químicos provenientes de la lixiviación o disolución de minerales durante su tránsito aguas arriba de las lagunas de Amuyo. Estas fuentes de contaminación presentan conductividades eléctricas entre 15.240 y 21.180

$\mu\text{S/cm}$, un alto contenido de arsénico (mayor a 15 mg/l) y altas concentraciones de boro (sobre los 100 mg/l).

Basados en las conclusiones anteriores, se propone como principal medida la captación y desvío de aguas de buena calidad ($< 2.000 \mu\text{S/cm}$) para evitar que las aguas disuelvan minerales que incorporen contaminantes y que se mezclen con aportes de mala calidad.

En forma complementaria se propuso la captación, desvío y manejo del agua de mala calidad, de manera que no sea incorporada al embalse. En la descarga del agua de mala calidad se propusieron tres alternativas de solución, una que contempla utilizar una planta de tratamiento para el abatimiento de arsénico, boro y conductividad eléctrica, otra que consiste en utilizar un sistema de fitoremediación, para tratar en forma natural esta agua, y por último se propuso vender o arrendar esta agua a terceros.

Se consideró además, una estación fluviométrica la cual tiene como objetivo generar información base para potenciales medidas de remediación, mitigación y/o separación de las aguas de buena y mala calidad. En este sentido, la construcción de esta estación busca poder registrar y transmitir los caudales que ocurren el 90% del tiempo del río Caritaya, y así comprender de mejor manera el aporte de la contaminación natural de arsénico y boro, junto con el aporte de aguas frescas del arroyo de Veco.

14 RECOMENDACIONES

En términos generales se recomienda realizar un conjunto de estudios complementarios que permitan evaluar y mejorar el diseño e implementación de las medidas de mejora de la calidad del agua almacenada. Estos estudios debiesen considerar al menos:

- Estudiar la conductividad eléctrica, pH, la reducción de la oxidación potencial (ORP) y la hidroquímica del río Mulluri, quebrada Caritaya y quebradas aguas arriba de las lagunas. El motivo de lo anterior es identificar de forma más precisa los cambios de calidad del agua superficial, con miras a identificar los puntos de captación del sistema de conducción.
- Considerar el contexto regional cuando se desarrolle en detalle las soluciones, al incluir por ejemplo el río Ajatama en la calidad del agua a ser destinada para riego.
- Complementar la estación fluviométrica con sensores de conductividad eléctrica que reporten teleméricamente los datos recolectados.
- Realizar levantamiento topográfico de detalle para mejorar el diseño del sistema de conducción, mitigación y remediación.
- Realizar una investigación específica para el diseño e instalación de un sistema de remediación pasivo por humedales y piscina de infiltración. Este estudio debiese incluir aspectos tales como:
 - Caracterización de eficiencia de especies autóctonas para remover arsénico y boro.
 - Realizar estudio hidrogeológico de línea de base, para caracterizar la geometría (profundidad de basamento, nivel freático), la permeabilidad, transmisividad, almacenamiento, características geoquímicas e hidroquímicas del subsuelo y la mineralogía del suelo.
- Definir y desarrollar los aspectos legales, ambientales y sociales que debiesen cumplir los proyectos asociados a las medidas mejoras de la calidad del agua almacenada.

15 REFERENCIAS

- Aceituno, P. (1996). (Aceituno, 1996) Sud Americano. *Revista Geofísica –IPGH*. 44, 37-55.
- Ayala y Cabrera Asociados Ltda. (2003), Diagnóstico Actual del Riego y Drenaje en Chile y su Proyección: Diagnóstico del Riego y Drenaje en la I Región. Informe Final. 1-68
- Campos, D.F. (1998). Procesos del ciclo hidrológico. Ed. Universitaria Potosina, San Luis de Potosí. San Luis de Potosí, México.
- Charrier, R., Pinto, L. y Rodríguez, M.P. 2007. Tectono-stratigraphic evolution of the andean orogen in Chile. The Geology of Chile, Chapter 3. Spec. Publ. Geological Society, London.
- Chadwick, F., Rengifo, P., Uribe, J., Acosta, O., Delgado, J.L. & Muñoz, J.F. (2012). Estimation of recharge by precipitation to the aquifers of Coposa and Michincha Salar Basins. 3rd International Congress on Water Management in the Mining Industry. Santiago, Chile.
- Dirección General de Aguas (DGA), 1978. Normas Hidrométricas. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Hidrología. Santiago, Chile.
- Dirección General de Aguas (DGA). Banco de datos. 2013.
- Dunner, I (2004). Evaluación Integral de plantas de tratamiento de aguas servidas y alternativas de tratamiento en localidades rurales concentradas. Aplicaciones en las regiones R.M. y VII, Santiago, Chile.
- García, M., Gardeweg, M., Clavero, J. y Hérail, G. 2004. Hoja Arica. Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Carta Geológica de Chile 84.
- García, M. y Hérail, G. 2005. Fault-related folding, drainage network evolution and valley incision during the Neogene in the Andean Precordillera of Northern Chile. *Geomorphology*, 65, 279–300.
- Garreaud, R. y Aceituno, P. (2001). Interannual Rainfall Variability over the South American Altiplano. *Journal of Climate* 14(12), 2779-2789.
- Fundación Chile, (2010). Consultoría de apoyo a los procesos de normas ambientales en sistemas hídricos: estimación de costos de abatimiento de contaminantes en residuos líquidos, Santiago, Chile.
- Hartley, A. J., May, G., Chong, G., Turner, P., Kape, S. J. y Jolley, E. J. 2000. Development of a continental forearc: A Cenozoic example from the Central Andes, northern Chile. *Geology*, 28, 331–334.

- IPLA, (1986). Mapa hidrogeológico de Chile : texto explicativo, escala 1:2.500.000. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, 1-66 .
- Instituto Nacional de Estadísticas (INE). Proyección de Población. 2012.
- Ministerio del desarrollo social. Encuesta Casen. 2011
- Muñoz, N.; Sepúlveda, P. 1992. Estructuras compresivas con vergencia al oeste en el borde oriental de la Depresión Central, Norte de Chile (19°15'S). *Revista Geológica de Chile*, Vol. 19, No. 2, p. 241-247.
- Niemeyer H., (1980). Hoyas hidrográficas de Chile: Primera Región, publicación DGA, 1-123.
- Pilgrim, D. H., Chapman, T. G. y Doran, D. G. (1988). Problems of rainfall-runoff modeling in arid and semiarid regions, *Hydrological Sciences Journal*, 33(4), 379-400.
- Pinto, L; Hérail, G; & 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.
- Salas, R.; Jast, R.; Montecinos, F.; Salas, I. (1966). Geología y recursos minerales del Departamento de Arica, Provincia de Tarapacá. *Instituto de Investigaciones Geológicas Boletín*, 21, 1-130.
- Somoza, R. 1998. Updated Nazca (Farallon) – South America relative motions during the last 40 My: implications for mountain building in the central Andean region. *Journal of South American Earth Sciences*, 11, 211–215.
- SERNAGEOMIN, 2002. Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, *Publicación Geológica Digital*, No. 4 (CD-ROM, versión1.0, 2003). Santiago.
- SMI, (2008), Diagnóstico y diseño definitivo reparación embalse Caritaya. Provincia de Arica, I Región, publicación DGA, 1-390
- Struckmeier W., Margat J., 1995. *Hidrogeological Maps. A guide and a standard legend*. International Association Hydrogeologists, *International Contributions to Hydrogeology*, Vol. 17. Hannover, Alemania.
- Salas, R., Jast, R., Montecinos, F.; Salas, I. (1966). Geología y recursos minerales del Departamento de Arica, Provincia de Tarapacá. *Instituto de Investigaciones Geológicas Boletín*, 21, 1-130.
- Seguel, J., Lahsen, A., Vergara, M. 1991. Contribución al conocimiento del Complejo Volcánico Guaichane-Mamuta, pre-cordillera de Iquique, Región de Tarapacá: un

Complejo Volcánico del Mioceno Medio a Superior. In Congreso Geológico Chileno, No. 6, Actas, Vol. 1, p. 368-372. Viña del Mar.

Uribe, J. (2012). Estimación de la recarga del acuífero Salar del Huasco en base a un modelo de precipitación-escorrentía y una caracterización isotópica. Tesis Magister en Ciencias. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.

UTA, 2010. Cuenca de Camarones: Identificación y caracterización de fuentes que condicionan la calidad de las aguas superficiales: rol del embalse Caritaya. DGA-UTA: Informe final para apoyo técnico para la mesa regional del agua en la región de Arica Parinacota y desarrollo de estrategias regionales del recurso hídrico.

Yáñez, G., Cembrano, J., Pardo, M., Ranero, C. y Sellés, D. 2002. The Challenger-Juan Fernández-Maipo major tectonic transition of the Nazca–Andean subduction system at 33–34°S: geodynamic evidence and implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 15, 23–38.

ANEXOS

ANEXO A: METODOLOGÍA DE TRABAJOS DE TERRENO

ANEXO B: INFORME DEL ESTUDIO GEOFÍSICO

ANEXO C: CURVAS HIPSOMÉTRICAS

ANEXO D: DATOS HIDROQUÍMICOS E ISOTÓPICOS

**ANEXO E:
MAPA GEOLÓGICO 1:50.000**

**ANEXO F:
MAPA GEOLÓGICO 1:5000**

**ANEXO G:
DIFRACCIÓN RAYOS X DE LA ALTERACIÓN DE LAS LAGUNAS DE
AMUYO**

**ANEXO H:
ANÁLISIS QUÍMICOS DE LA ALTERACIÓN DE LAS LAGUNAS DE
AMUYO**

**ANEXO I:
LISTA DE ASISTENCIA PARTICIPACIÓN CIUDADANA**

ANEXO J: PRESENTACIÓN PARTICIPACIÓN CIUDADANA

ANEXO K : ESTACIÓN FLUVIOMÉTRICA



Comisión Nacional de Riego

ESTUDIO BÁSICO “DIAGNÓSTICO DE LA SUBCUENCA APORTANTE AL EMBALSE CARITAYA”

INFORME FINAL

VOLUMEN I

SANTIAGO, NOVIEMBRE DE 2014

Estudio Elaborado por:



GEOHIDROLOGÍA CONSULTORES LTDA.

Dirección: Av. Antonio Varas 621, Piso 2, PROVIDENCIA – SANTIAGO

Fono: +562 2381 6000

www.geohidrologia.cl