



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

HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA CUENCA DEL ESTERO PUNITAQUI, IV REGIÓN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

GONZALO JAVIER HUERTA VÁSQUEZ

PROFESOR GUÍA:
BRIAN TOWNLEY CALLEJAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MARTIN REICH MORALES
CARLOS ESPINOZA CONTRERAS

SANTIAGO DE CHILE
ABRIL 2009

RESUMEN

El objetivo del presente estudio es determinar la calidad del agua subterránea de la cuenca del estero Punitaqui, e identificar y cuantificar una posible contaminación por sustancias químicas en las aguas, que afectaría al pueblo homónimo ubicado en la IV Región de Coquimbo.

A partir de los análisis químicos del agua subterránea, es posible separarlas en 3 grupos. El primero de ellos incluye gran parte de la zona estudiada, y sus aguas son de composición bicarbonatada y cálcica a calcosódica. El segundo grupo lo constituyen aguas de la zona inmediatamente aguas abajo del tranque de relave de la mina Los Mantos de Punitaqui (Au-Cu), ubicado en el sector de Pueblo Nuevo, cuyas aguas son de composición sulfatada y cálcica, mientras que el último grupo abarca aguas de zonas relativamente cercanas a los principales yacimientos mineros del área de estudio, y son de composición bicarbonatada a sulfatada y cálcica a calcosódica.

La dirección general de los flujos subterráneos es hacia el NW, siguiendo el mismo sentido de las aguas superficiales del estero Punitaqui. Los parámetros medidos en terreno indican que cercano a la zona de recarga el agua subterránea posee un pH levemente alcalino (entre 7 y 8) y una baja cantidad de oxígeno disuelto (OD), mientras que aguas abajo las aguas se van acidificando, hasta llegar a un pH cercano a 6, y el ambiente se vuelve oxidante (alto OD). Con respecto a la conductividad eléctrica (CE), en general toda la cuenca posee bajos valores (menor a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Las aguas del sector de Pueblo Nuevo poseen valores altísimos de CE (mayor a 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$), un pH muy alcalino (sobre 8,5) y un ambiente reductor (bajo OD relativo al resto de la cuenca). Estas aguas subterráneas, de composición sulfatada y cálcica, y con una cantidad de sólidos totales disueltos (TDS) que sobrepasan notablemente al resto de las aguas estudiadas, es considerada una zona anómala con respecto a las aguas del área de recarga aguas arriba de ésta, y posee una extensión de tan sólo 2 km.

Como la composición principal del acuífero es bicarbonatada y calcosódica, se infiere que contiene aguas infiltradas recientemente y de circulación local, con poco tiempo de interacción con las rocas circundantes.

El origen de la anomalía identificada en las aguas de Pueblo Nuevo no es posible determinarla con certeza con los datos químicos que se tienen, pudiendo tener un origen natural, antrópico, o ambos. Al haber un gran yacimiento de Au, Cu y Hg, es innegable un grado de contaminación natural por exceso de sulfatos, generados por oxidación de la gran cantidad de sulfuros (principalmente pirita) que éste posee, proceso que ha sido acelerado por la exposición al ambiente subaéreo de dichos sulfuros durante el proceso de extracción de mineral, realizado desde tiempos coloniales.

El pH alcalino a neutro observado en casi toda el área de estudio es propia de aguas en equilibrio con rocas intrusivas del Batolito Illapel, litología dominante en toda la cuenca. La causa de la alcalinidad de las aguas de Pueblo Nuevo probablemente se deba a la utilización de cal para neutralizar el drenaje ácido producido en los procesos de lixiviación, o bien a la infiltración de las aguas extremadamente alcalinas (sobre 10) usadas en el proceso de flotación, ambos relacionados a la explotación de la mina Los Mantos de Punitaqui. Asimismo, la gran cantidad de sulfatos medidos en esta localidad da cuenta de un medio sólido sumamente oxidado y de una fase líquida muy reducida, evidenciado por las bajas cantidades de oxígeno disuelto medidas en dichas aguas. Estas condiciones de pH y redox ayudarían a los metales pesados a diluirse y presentarse en su especie más reducida, y por ende más peligrosa. Sin embargo, la presencia de estos metales disueltos en las aguas de toda la zona de estudio es prácticamente nula.

Cabe señalar que sólo el sector de Pueblo Nuevo presenta algún grado de contaminación según las normas chilenas para agua potable (NCh. 409) y para su uso en riego (NCh. 1333), mientras que el resto de la zona estudiada posee aguas de muy buena calidad para su consumo y su uso en riego.

Anexo al objetivo central, este trabajo pretende ser una línea de base para el estudio de las aguas subterráneas de la cuenca del Estero Punitaqui, dada la falta de estudios públicos relacionados a éstas.

TABLA DE CONTENIDOS

TABLA DE CONTENIDOS	1
ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS	5
1. INTRODUCCIÓN	6
1.1 Problemática.....	6
1.2 Objetivos	6
1.2.1 Objetivo General	6
1.2.2 Objetivos Específicos.....	7
1.3 Hipótesis de trabajo.....	7
1.4 Metodología de trabajo	7
1.5 Limitaciones y Alcances	8
2. ANTECEDENTES	9
2.1 Ubicación y Accesos	9
2.2 Antecedentes Generales	9
2.3 Antecedentes de Trabajos Previos.....	11
2.4 Antecedentes Geográficos y Climáticos	12
3. GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO	15
3.1 Rocas Estratificadas.....	15
3.1.1 Estratos de Tamaya	15
3.1.2 Estratos del Reloj.....	15
3.1.3 Formación Arqueros.....	16
3.1.4 Formación Limarí	17
3.1.5 Depósitos No Consolidados.....	17
3.2 Rocas Intrusivas.....	20
3.2.1 Batolito Illapel	20
3.3 Estructuras.....	21
3.3.1 Fallas	21
3.4 Mineralización.....	22
4. MARCO TEÓRICO PARA EL ESTUDIO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	24
4.1 Origen y efectos de las sustancias disueltas en el agua.....	24
4.1.1 Cationes	25
4.1.2 Aniones.....	26
4.1.3 Parámetros físico-químicos.....	28
4.2 Influencia geológica en las aguas.....	29
4.3 Evolución geoquímica de las aguas subterráneas.....	30
5. METODOLOGÍA DE ESTUDIO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	32
5.1 Metodología de Terreno	32
5.2 Metodología de Laboratorio	35
5.3 Metodología de Análisis de Resultados.....	37

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	39
6.1 Validación de Resultados	40
6.2 Química de Aguas.....	41
6.2.1. Tipo de aguas.....	41
6.2.2 Diagramas de Correlación.....	45
6.2.3 Caracterización Físico-Química de las aguas.....	46
6.2.4 Elementos Traza o Metales Disueltos.....	51
6.3 Comparación con las normas de agua chilenas.....	52
6.3.1 Norma NCh. 409 /Of. 84 de calidad de agua potable.....	53
6.3.2 Norma NCh. 1333 /Of. 78 para riego.....	54
7. DISCUSIONES	56
7.1 Evolución de las aguas y detección de anomalías.....	56
7.2 Diagramas de Correlación.....	58
7.3 Origen y Causas de anomalías en las aguas	58
7.4 Análisis de pH y Oxígeno Disuelto.....	60
7.5 Elementos traza o Metales Disueltos	61
7.6 Elementos sobre las normas de aguas chilenas	61
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	63
8.1 Conclusiones	63
8.2 Recomendaciones.....	64
9. REFERENCIAS	66
ANEXOS	69
ANEXO 1	70
ANEXO 2.....	73
ANEXO 3.....	88
3.1 Comparación Norma Agua Potable NCh 409.....	88
3.2 Comparación Norma Riego NCh 1333.....	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Mapa rutero de ubicación y acceso al pueblo de Punitaqui	9
Figura 2.2. Mapa topográfico de Punitaqui.....	13
Figura 3.1. Mapa Geológico del área de estudio. Modificado de Thomas (1967) y Gana (1991).	18
Figura 3.2. Andesitas ocoíticas, Estratos del Reloj.....	19
Figura 3.3. Andesitas ocoíticas, con Clorita como mineral de alteración. Estratos del Reloj.....	19
Figura 3.4. Tonalita de Anfíbola, Batolito Illapel	20
Figura 3.5. Falla menor, perteneciente a la Zona de Falla Los Mantos.	22
Figura 3.6. Limonitas en zona de falla asociada al yacimiento El Delirio	23
Figura 4.1. Modelo de circulación de aguas subterráneas, tomado de Custodio y Llamas (1976).	31
Figura 5.1. Mapa de distribución y ubicación de pozos y norias muestreadas	34
Figura 6.1. Diagrama general de Piper (1944) para la zona estudiada.....	43
Figura 6.2. Diagrama de Stiff (1951) para la zona estudiada.....	44
Figura 6.3. Diagrama (Na +Cl) vs TDS.....	45
Figura 6.4. Diagrama (SO ₄) vs TDS.	45
Figura 6.5. Mapa de distribución de ph para el área estudiada.	48
Figura 6.6. Mapa de distribución de CE para el área estudiada.	49
Figura 6.7. Mapa de distribución de OD para el área estudiada.....	50
Figura 7.1. Dirección general de flujos subterráneos	56
Figura 7.2. Diagrama de Schoeller para la zona de estudio.	57
Figura 7.3. Diagrama de Piper zonado según el origen de los contaminantes.	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Datos pluviométricos estación meteorológica DGA, Estero Punitaqui, tomado de MWH (2005).....	14
Tabla 4.1. Origen de las principales sustancias disueltas en el agua subterránea (Custodio y Llamas, 1976).	27
Tabla 5.1. Elementos y compuestos a analizar en cada pozo o noria.....	33
Tabla 5.2. Procedimientos para la preservación de cada muestra, Standard Methods for Examination of Water and Wastewater 21 st Edition 2005.	35
Tabla 5.3. Límites de detección inferior del Laboratorio Ambiental DGA.	37
Tabla 6.1. Concentraciones de los elementos mayores en las aguas muestreadas.	40
Tabla 6.2. Balance iónico para todas las muestras.....	41
Tabla 6.3. Elementos traza con muestras sobre el límite de detección (en negrita).....	51
Tabla 6.4. Normas chilenas para agua potable y para riego.	52
Tabla 6.5. Parámetros del pozo N° 6 que sobrepasan los valores indicados por la norma NCh 409.....	53
Tabla 6.6. Parámetros del pozo N° 7 que sobrepasan los valores indicados por la norma NCh 409.....	54
Tabla 6.7. Pozos con pH superior o en el límite establecido por la norma NCh 409	54
Tabla 6.8. Parámetros del pozo N° 17 que sobrepasan los valores indicados por la norma NCh 409.....	55
Tabla 6.9. Pozos con valores de SO ₄ superior al establecido por la norma NCh 409.....	55

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Problemática

El pueblo de Punitaqui, capital comunal de la homónima, fue fundado en 1810 con una clara vocación minera. En el lugar se extraía originalmente oro y mercurio, y actualmente cobre y oro. La principal actividad minera de la zona corresponde a las faenas de la Compañía Minera Los Mantos de Punitaqui SCM, y en segundo término, actividades agrícolas distribuidas en todo el valle. Ambas actividades coexisten dentro del mismo valle, y por lo tanto, se abastecen de aguas del mismo origen.

Actualmente la localidad de Punitaqui ha sido priorizada como sitio contaminado por presencia de mercurio en el listado de sitios contaminados de CONAMA, y también es parte de un proyecto denominado “Conservación del Agua en Comunidades Rurales” de la Universidad de la Serena. En el contexto de desarrollo de dicho proyecto, la Dirección General de Aguas (DGA), organismo estatal que tiene como responsabilidad, entre otras cosas, el monitoreo de calidad de aguas y el brindar recomendaciones para un adecuado aprovechamiento de los recursos hídricos, fue notificada sobre la preocupación en el mundo rural de la localidad de Punitaqui por problemas en la calidad de las aguas subterráneas.

Con la finalidad de comprobar si efectivamente existe un problema de contaminación por sustancias químicas en las aguas subterráneas de la cuenca del Estero Punitaqui y cuantificar la gravedad de éste, determinando sus posibles fuentes y proponiendo posibles soluciones técnicas a dicho problema, es que se realiza este estudio de caracterización hidrogeoquímica de aguas subterráneas en dicha cuenca, el que se realiza con el apoyo técnico y financiero de la DGA.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Determinar la calidad del agua subterránea de la cuenca del Estero Punitaqui, IV Región, e identificar los posibles contaminantes químicos y su origen dentro de la cuenca.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Caracterizar la hidrogeoquímica de las aguas subterráneas en la cuenca del Estero Punitaqui.
2. Elaborar un mapa de distribución de calidad de aguas subterráneas en una base geológica actualizada a escala 1:50.000 de la cuenca del Estero Punitaqui.

1.3 Hipótesis de trabajo

Dado que desde tiempos coloniales la principal actividad de la zona ha sido la minera, se esperaría que la fuente principal de anomalías hidrogeoquímicas la constituya la presencia de botaderos de estériles y tranques de relave existentes en la cuenca del Estero Punitaqui, *aguas arriba* del pueblo homónimo. Sin embargo, no es descartable la presencia de contaminación natural, dada la presencia de importantes yacimientos en la zona.

1.4 Metodología de trabajo

- Referente al Objetivo Específico 1.

- Realizar un muestreo geoquímico sistemático de norias o pozos accesibles en la cuenca del Estero Punitaqui.
- Analizar geoquímicamente las muestras de agua, mediante espectrometría y volumetría ácido-base, considerando los siguientes parámetros: temperatura, ph, oxígeno disuelto, sólidos totales disueltos, cationes mayores (Na, K, Ca, Mg), aniones mayores (Cl, SO₄, HCO₃), y elementos traza.

- Referente al Objetivo Específico 2.

- Realizar un mapeo geológico a escala 1: 50.000, definiendo las unidades litológicas aflorantes, su disposición espacial, y las estructuras (estratificación y fallas) de la zona, actualizando la información geológica existente.
- Recopilar información hidrológica/hidrogeológica de la cuenca del Estero Punitaqui.

1.5 Limitaciones y Alcances

Debido a los escasos antecedentes hidroquímicos existentes sobre las aguas subterráneas de la cuenca del estero Punitaqui, este trabajo pretende ser un estudio piloto o una línea base para próximos trabajos sobre el tema que se hagan en la zona. Asimismo, la falta de estudios hidrogeológicos de la zona impide la creación de un modelo hidrogeológico, limitando este estudio sólo a un modelo estático y no a uno dinámico.

Como el objetivo de este trabajo es detectar la presencia de contaminantes de origen químico, se descartarán otros posibles contaminantes presentes en el agua, como aquellos de origen biológico, radioactivos, de turbiedad, naturales, entre otros, que resultan relevantes a la hora de evaluar la aptitud del agua para consumo humano y su uso en riego.

Con respecto al muestreo en sí, como los pozos y norias utilizadas son de propiedad privada y dada la imposibilidad de crear nuevos pozos, la distribución y cantidad no necesariamente corresponden a los óptimos requeridos para un estudio de calidad de aguas. Además, por este motivo tampoco se pudo completar el muestreo según el protocolo establecido por la DGA, que incluye el purgar el pozo tres veces antes de muestreo, lo que podría llevar a un resultado que no refleje totalmente las características físico químicas del agua subterránea en un cierto punto. Sin embargo, igualmente se usaron métodos de preservación que fueron aplicados a cada muestra.

2. ANTECEDENTES

2.1 Ubicación y Accesos

La comuna de Punitaqui pertenece a la provincia del Limarí, Región de Coquimbo. Se ubica en los 30° 50'S y 71°15'W, a 30 km al sur de Ovalle aproximadamente (Fig. 2.1). Se accede tomando la ruta pavimentada que une al pueblo de Punitaqui con la ciudad de Ovalle.

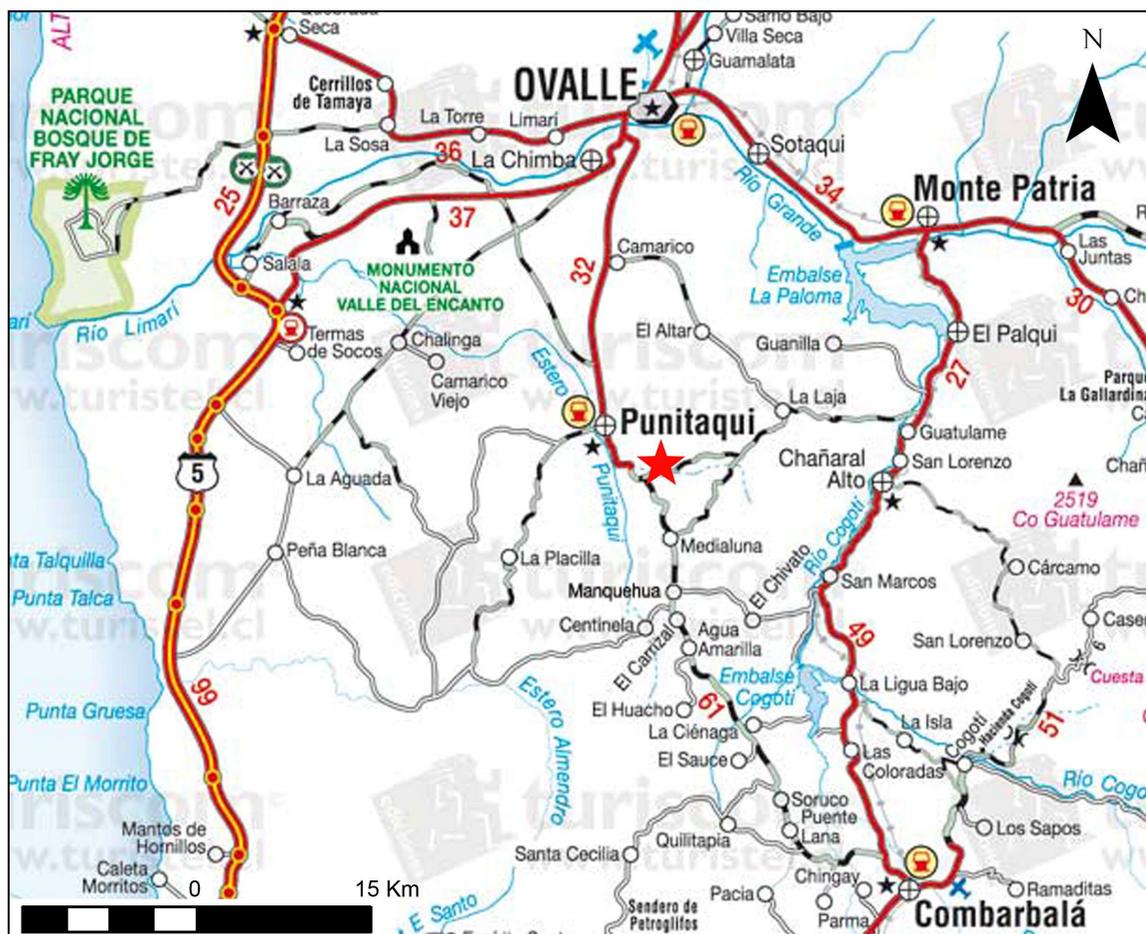


Figura 2.1. Mapa rutero de ubicación y acceso al pueblo de Punitaqui, tomado de Turistel

2.2 Antecedentes Generales

La comuna de Punitaqui tiene 3 formas básicas de abastecimiento de agua para consumo humano:

- Norias particulares (5 - 15 metros de profundidad)
- 5 Sistemas de Agua Potable Rural (APR)
- Sistema de agua potable concesionado a la de la empresa de servicios sanitarios Aguas del Valle (posee 3 pozos de 8-15 metros de profundidad, más un dren donde se recogen aguas excedentes del sistema de canales asociados al Embalse La Paloma y además compra agua a un sistema APR).

Todas las formas de abastecimiento de agua mencionadas tienen su origen en las aguas subterráneas de la cuenca, por lo tanto, se hace imperiosa la necesidad de saber sobre la calidad de dicha agua.

La metodología utilizada contempló el muestreo de la mayor cantidad de los pozos o norias existentes en la zona y el análisis, mediante espectrometría y volumetría ácido-base, de cationes y aniones mayores, elementos traza, sólidos totales disueltos, oxígeno disuelto, temperatura y ph. Se obtuvo así mapas de distribución de calidad de aguas del acuífero freático o subsuperficial homogéneo reconocido en la zona (Ingeniería y Geología Dos Ltda., 1995), sobre un mapa geológico a escala 1:50.000, actualizado a partir de la Carta Geológica de la zona (Thomas, 1967). Además, basado en observaciones de terreno y en la actividad minera de la localidad, se hizo especial énfasis en la presencia de botaderos y relaves dentro de la cuenca, *aguas arriba* del pueblo de Punitaqui. A estos últimos se les realizó un muestreo geoquímico *aguas arriba* y *aguas abajo*, con el fin de verificar si se trataba de una fuente principal de contaminantes de la cuenca.

Durante el transcurso de este trabajo se tomó conocimiento de la existencia de tres nuevos pozos hechos por la Compañía Minera Punitaqui SCM, los cuales no se encontraban debidamente registrados en la DGA, por lo que rápidamente fueron clausurados. Además, se esperaba contar con los datos de estudios ambientales periódicos con que debe cumplir la minera. Sin embargo estos estudios son inexistentes, por lo que actualmente la Compañía Minera Punitaqui SCM se encuentra en proceso de sanción por parte de la Comisión Nacional de Medio Ambiente, CONAMA.

2.3 Antecedentes de Trabajos Previos

Estudios ambientales previos en la localidad de Punitaqui, cuyos objetivos son evaluar el grado de contaminación atmosférica y de suelos, entregan valiosos datos sobre la composición química de suelos, sedimentos y aguas superficiales, además de cuantificar la cantidad de Hg presente en la atmósfera de Punitaqui y alrededores. Estos trabajos son:

- Higuera et al (2004): Environmental assessment of copper-gold-mercury mining in the Andacollo and Punitaqui districts, northern Chile. Applied Geochemistry 19, p.1855-1864.
- Higuera et al (2005): Atmospheric mercury data for the Coquimbo region, Chile: influence of mineral deposits and metal recovery practices. Applied Geochemistry 39, p.7587-7596.

Los datos geoquímicos en dichos estudios hablan de altas concentraciones de Cu y Hg en suelos y sedimentos del Estero Punitaqui, mientras que las aguas superficiales se encuentran libres de contaminación. Esta contaminación de suelos y sedimentos sugieren una dispersión limitada aguas abajo de la mina Los Mantos, y las altas cantidades de mercurio son probablemente introducidas por la actividad minera (Higuera et al, 2004).

Por otro lado, los datos atmosféricos hablan de altas y anómalas concentraciones de Hg sobre las zonas de actividad minera pero que se reducen rápidamente al alejarse de éstas, llegando a valores normales en áreas agrícolas (Higuera et al, 2005).

Se cuenta también con un estudio hidrogeológico básico de Punitaqui:

- Ingeniería y Geología Dos Ltda. (1995): Hidrogeología preliminar de la cuenca del Estero Punitaqui. Resumen, 10 p. Ingeniería y Geología Dos Ltda., Santiago, Chile.

Este último reconoce la presencia de un acuífero superficial, y determina su capacidad de explotación, realizando básicamente un balance hídrico de la cuenca.

Todos los estudios mencionados aportan antecedentes químicos de suelos, sedimentos y atmósfera, aparte de brindar información hidrogeológica básica. Lamentablemente, no se cuenta con antecedentes hidroquímicos de las aguas subterráneas en la cuenca del Estero Punitaqui.

2.4 Antecedentes Geográficos y Climáticos

La comuna de Punitaqui se ubica al norte de Chile, en la IV Región de Coquimbo. Geográficamente se localiza en la Cordillera de la Costa, en una zona de relieve moderado, donde los altos topográficos alcanzan entre 900 y 1000 msnm de altura en su parte oriental, mientras que en su parte occidental alcanzan los 700 y 800 msnm de elevación. Su cerro más alto corresponde al Cerro Punitaqui (1.215 msnm), ubicado al SW del centro de Punitaqui.

La zona se constituye de un valle principal asociado al Estero Punitaqui, de altura entre 230 y 300 msnm, que corre de norte a sur, rodeado de cerros al oriente y poniente. Entre éstos hay numerosas quebradas de dirección E-W, cuyas escorrentías superficiales confluyen en el Estero Punitaqui. De éstas, las más importantes, y que serán muestreadas en este estudio, son las quebradas Los Mantos y El Pozo (Fig. 2.2).

La región de Coquimbo se ubica en una región cordillerana, interrumpido por valles que corren de E a W (zona de valles transversales). Su clima está fuertemente dominado por la acción del anticiclón del Pacífico, y corresponde a un clima transicional entre el Desierto de Atacama y la zona central de Chile, por lo que se le considera como semiárido. Sus temperaturas promedio son 14°C en la costa, subiendo a 16°C hacia el continente

Las precipitaciones en general son escasas, siendo su promedio cercano a los 160 mm/año, con fuertes variaciones anuales inducidas por la acción de los vientos desde el W, que se correlacionan con los años donde actúa el fenómeno del Niño (Veit, 1996). La Tabla 2.1 muestra datos de precipitaciones entre los años 1961 y 2005, medidos en la estación meteorológica de la DGA ubicada en el estero Punitaqui, justo antes de su desembocadura en el río Limarí. En ésta se puede observar que las precipitaciones se concentran en los meses invernales (mayo-agosto), mientras que entre los meses de Noviembre y Marzo se aprecia una ausencia casi total de lluvias. Cabe destacar que la cuenca del Estero Punitaqui sólo recibe aportes pluviales, siendo inexistentes los aportes nivales (Cade-Idepe, 2004).

Dadas las escasas precipitaciones y el clima semiárido, el recurso hídrico se hace cada vez más importante dentro de la comunidad, y por tanto es imprescindible tener estudios que avalen la calidad de éste, para asegurar su consumo óptimo y seguro.

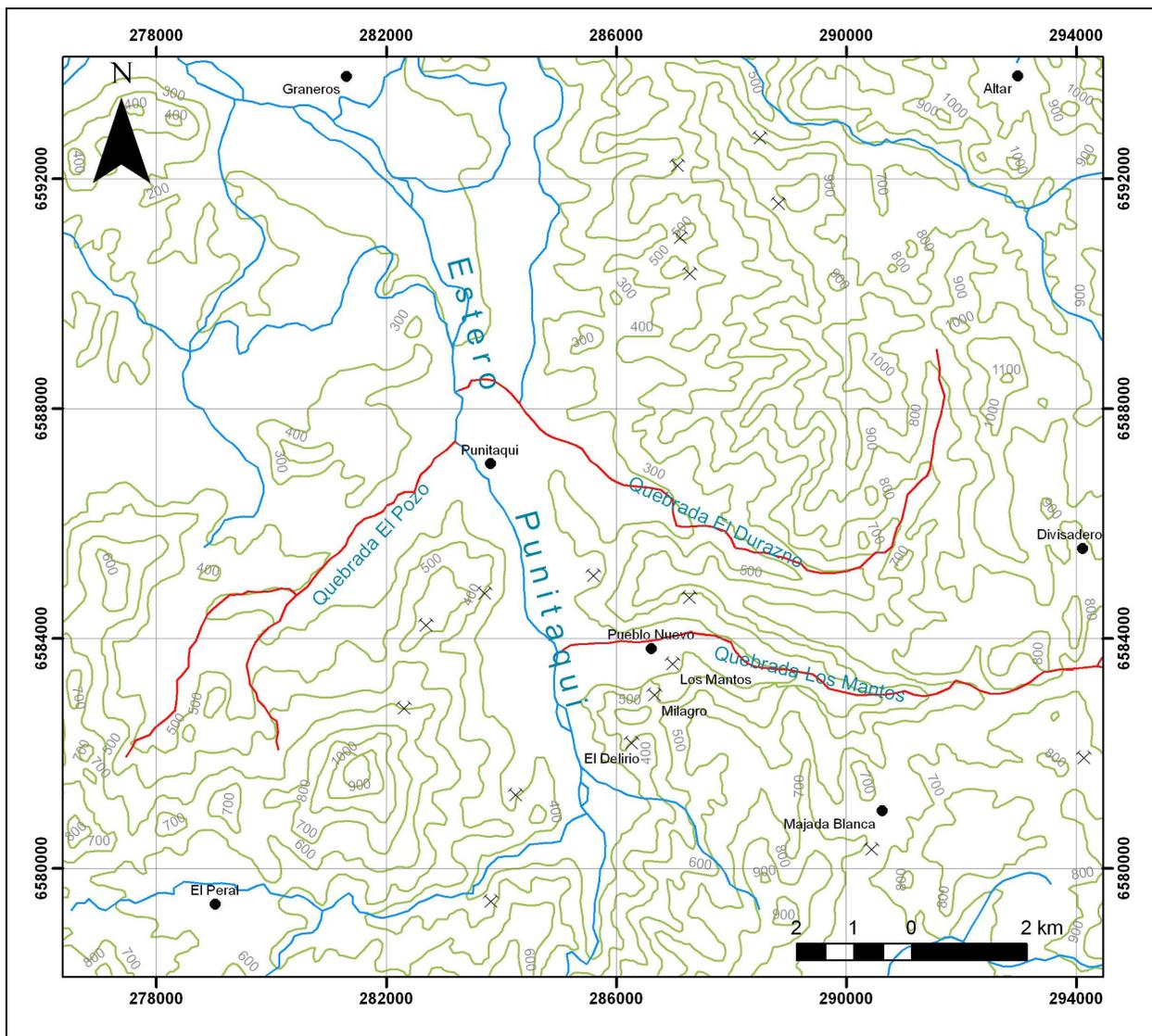


Figura 2.2. Mapa topográfico de Punitaqui, en rojo se marcan las quebradas muestreadas

Tabla 2.1. Datos pluviométricos estación meteorológica DGA, Estero Punitaqui, tomado de MWH (2005).

Período	Precipitaciones (mm)												Total Anual
	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Enero	Feb.	Marzo	
1961-62					95,40	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	97,40
1962-63	0,00	0,00	132,50	0,50	0,50	0,00	22,50	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	157,00
1963-64	0,00	31,00	50,00	63,50	51,50	102,50	0,00	2,50	0,00	0,00	0,00	0,00	301,00
1964-65	0,00	0,00	21,00	16,00	39,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	76,50
1965-66	0,50	39,50	0,00	163,20	210,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	413,20
1966-67	7,00	0,00	124,50	90,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	222,00
1967-68	0,00									0,00	0,00	0,00	0,00
1968-69	0,00	0,00	42,00	0,00	6,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	48,50
1969-70	0,00	0,00	16,70	0,00	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	26,70
1970-71	0,00	1,70	0,00	2,70	8,00	0,00	7,50	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	21,90
1971-72	0,00	0,00	33,30	15,00	24,00	31,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	103,80
1972-73	0,00	2,50	157,00	42,50	114,00	20,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	336,00
1973-74	2,00	1,00	60,00	34,50	0,00	0,00	26,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	123,50
1974-75	0,00	1,50	99,00	0,00	0,00	6,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	106,50
1975-76	0,00	22,00	24,00	59,00	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	110,00
1976-77	0,00	57,00	0,00	2,00	24,50	0,00	41,50	15,00	0,00	0,00	0,00	0,00	140,00
1977-78	0,00	0,00	14,00	175,00	31,00	0,00	17,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	237,00
1978-79	0,00	0,00	0,00	111,00	0,00	39,00	0,00	20,00	0,00	0,00	0,00	0,00	170,00
1979-80	0,00	0,00	0,00	30,00	2,00	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	39,00
1980-81	105,00	0,00	19,00	84,50	16,50	10,00	13,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	248,00
1981-82	0,00	52,50	22,00	10,50	3,00	5,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,00	101,50
1982-83	0,00	59,50	22,80	70,10	54,70	2,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	209,60
1983-84	0,00	19,00	16,50	140,50	52,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	228,50
1984-85	0,00	18,00	0,00	307,50	6,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	332,00
1985-86	0,00	2,00	0,00	50,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	52,00
1986-87	0,00	47,00	8,00	0,00	15,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	70,00
1987-88	0,00	25,00	24,00	312,00	93,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	454,00
1988-89	0,00	2,00	18,00	8,00	11,50	3,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	43,00
1989-90	0,00	14,00	0,00	62,00	133,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	209,00
1990-91	0,00	0,00	5,00	37,30	1,50	6,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	50,30
1991-92	0,00	36,00	129,00		2,00	11,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	26,00	204,00
1992-93	9,00	12,00	132,50	0,00	112,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	266,00
1993-94	29,00	57,00	0,00	26,00	11,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	123,50
1994-95	0,00	8,00	28,50	10,00		0,00	0,00			7,00	0,00	0,00	53,50
1995-96	0,00	0,00	7,00	25,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	32,00
1996-97	0,00	0,00	4,00	65,00	0,00	0,00	7,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	76,00
1997-98	0,00	4,00	179,50	16,00	291,00	0,00	60,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	550,50
1998-99	2,00	0,00	8,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	12,20
1999-00	1,00	13,00	3,00		19,50	43,50	17,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	97,00
2000-01	0,00	11,00	143,40	17,00	0,00	61,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	233,00
2001-02	0,00	52,50	0,00	164,90	33,60	19,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	270,00
2002-03	2,00	83,00	96,00	105,50	45,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	332,00
2003-04	0,00			15,00	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	21,50
2004-05	31,00	1,50	23,00	72,50	49,50	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00		177,50
Promedio												163,10	

3. GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1 Rocas Estratificadas

En la zona estudiada se aprecian rocas volcánicas con pequeñas intercalaciones sedimentarias de los llamados Estratos de Tamaya y Estratos del Reloj, y rocas volcánicas de la Formación Arqueros (Fig. 3.1). Al conjunto de unidades nombradas, Thomas (1967) le asigna el nombre de Grupo Ovalle, con una edad Valanginiano – Barremiano (Neocomiano). También se reconocen rocas sedimentarias semiconsolidadas de la Formación Limarí, de edad Plioceno – Pleistoceno, y el relleno cuaternario en el valle principal y quebradas aledañas (Fig. 3.1).

3.1.1 Estratos de Tamaya (Thomas, 1967)

Conjunto de rocas volcánicas andesíticas que se distribuyen en la zona centro-occidental del área de estudio, en una franja N-S de aproximadamente 5 km. de largo y 1 km de ancho, constituyendo un “roof pendant” sobre plutones y sills de edad Cretácico Inferior tardío (Fig. 3.1).

Consiste principalmente en rocas volcánicas andesíticas ocoíticas, con cristales de plagioclasa de tamaño entre 0.5 y 2 cm de largo. Más al norte de la zona de estudio, Thomas (1967) y Gana (1991) las describen como rocas andesitas porfíricas, brechas y tobas riolíticas, con intercalaciones de areniscas rojas, brechas y conglomerados del mismo color, además de visibles intercalaciones de rocas volcánicas traquíticas y riolíticas de color gris claro anaranjado o blanco que constituyen capas guías características.

Los Estratos de Tamaya constituyen estratigráficamente la parte más baja de la zona de estudio, subyaciendo a los Estratos del Reloj, de probable edad Valanginiana. Por este motivo, y dado que no se han encontrado restos fósiles que permitan determinar su edad, se le asigna una edad Valanginiana o más antigua (Thomas, 1967).

3.1.2 Estratos del Reloj (Thomas, 1967)

Conjunto de rocas volcánicas andesíticas, en ocasiones ocoíticas, que se distribuyen en una franja alargada en dirección NE-SW, abarcando prácticamente todo el largo de la zona estudiada (Fig. 3.1). Presentan un ancho máximo de 9 a 10 km al SW del pueblo de Punitaqui, con un ancho promedio de 4 km. Alcanzan una potencia máxima de 500 m al centro del área de estudio.

Consiste en lavas andesíticas y andesitas porfíricas ocoíticas, con escasas intercalaciones de rocas calcáreas hacia el techo de la secuencia, de pocos metros de espesor (Fig. 3.2). Sin embargo, inmediatamente al norte del área de estudio, en la localidad de El Reloj se identificaron, intercalados entre la secuencia de lavas, varios paquetes de calizas fosilíferas de espesor cercano a los 30 m cada uno, además de intercalaciones de areniscas rojas (Thomas, 1967; Gana, 1991). Los estratos poseen rumbo general N-NW y manteo suave al E al oriente del Estero Punitaqui, y 50°W al occidente de éste (Fig. 3.1).

La base de estos estratos no es posible observarla, ya que la unidad completa aflora entre medio de plutones y sills del Cretácico Inferior tardío. El techo corresponde a la actual superficie de erosión. Hacia el oriente, los estratos se encuentran truncados por una zona de cizalle NNE, que los pone en contacto con un plutón granodiorítico. Debido a la gran cantidad de plutones que intruyen a la unidad, parte de ésta se encuentra afectada por metamorfismo de contacto, con clorita como principal mineral de alteración (Fig. 3.3). Cabe destacar también que, en ciertas zonas del contacto con el plutón granodiorítico, las andesitas presentan una masa fundamental cloritizada y blanqueada, y los fenocristales albitizados de plagioclasa presentan un color negro y fuerte magnetismo debido a la presencia de pequeñas inclusiones de magnetita (Oyarzún et al., 2001). Las escasas rocas calcáreas encontradas también se han observado en parte granatizadas cercano a la zona de cizalle (Oyarzún et al., 2001).

Basado en su contenido faunístico, Corvalán (1966) determinó una edad Valanginiana para los Estratos del Reloj.

Las rocas que conforman esta unidad son parte de una extensa provincia volcánica con características geoquímicas tipo MORB, y que han sido interpretadas como el resultado de efusiones generadas en una cuenca ensiálica donde se desarrollaron fenómenos de rifting propios de una evolución abortada hacia una cuenca de tipo marginal (Levi et al., 1987).

3.1.3 Formación Arqueros (Aguirre y Egert, 1965)

Afloramientos de limitada extensión de rocas volcánicas y escasas rocas sedimentarias ubicadas en el extremo oriental de la zona de estudio, al E del poblado de Las Cruces, abarcando una zona de aproximadamente 2 km de largo y 1 km de ancho (Fig. 3.1). Estas rocas se encuentran intruidas por plutones del Cretácico Inferior tardío, correspondiendo a un “roof pendant”

Consiste en lavas andesíticas porfíricas con escasas intercalaciones de areniscas rojas. Su base no es posible observarla y su techo constituye la actual superficie de erosión. Thomas (1967) le asigna una edad Hauteriviano – Barremiano.

3.1.4 Formación Limarí (Gana, 1991)

Sedimentos semiconsolidados que se distribuyen en la zona noroccidental del área de estudio, abarcando un área aproximada de 25 km² (Fig. 3.1). Se disponen horizontalmente sobre el Batolito Illapel, y el techo corresponde a la actual superficie de erosión. Hacia el centro del área de estudio subyacen a los depósitos no consolidados del Estero Punitaqui.

Corresponden a gravas, arenas, limos y arcillas parcialmente consolidados, de origen aluvial y fluvial. Gana (1991) le atribuye una edad Pleistoceno – Plioceno.

3.1.5 Depósitos No Consolidados

Los sedimentos no consolidados recientes se distribuyen principalmente en el valle central y en las quebradas aledañas. Hacia la parte norte de la zona de estudio, la llanura de inundación de este valle principal alcanza un ancho cercano a los 3.5 Km, aunque su ancho promedio es de 1 a 2 Km en la zona media del área de estudio (Fig. 3.1).

Consisten en gravas y gravas arenosas, uniformemente distribuidas en la actual llanura de inundación del Estero Punitaqui. Hacia el borde de las zonas topográficamente altas y en quebradas presentan clastos de mayor tamaño y más angulosos que en el centro del valle principal, siendo los clastos redondeados a subangulosos en el centro de éste. Gran parte del valle presenta una cobertura de suelo muy bien desarrollada.

Genéticamente, la unidad se vincula a procesos de transporte y erosión actuales, de origen fluvial y aluvial.

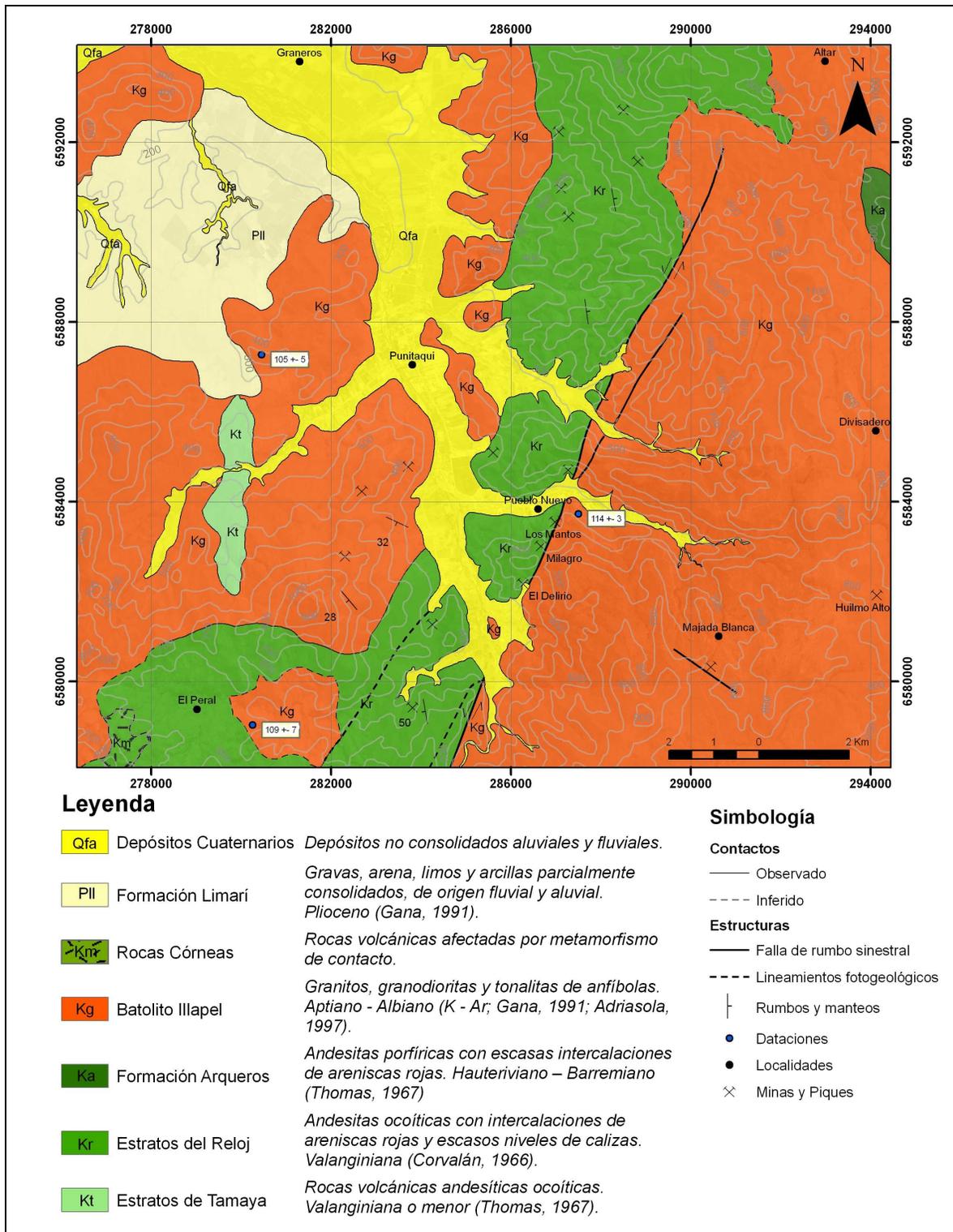


Figura 3.1. Mapa Geológico del área de estudio. Modificado de Thomas (1967) y Gana (1991).



Figura 3.2. Andesitas ocoíticas, Estratos del Reloj



Figura 3.3. Andesitas ocoíticas, con Clorita como mineral de alteración.
Estratos del Reloj.

3.2 Rocas Intrusivas

3.2.1 Batolito Illapel (Rivano et al, 1985)

Rocas granitoides que se distribuyen prácticamente en toda la zona estudiada, siendo el tipo de roca predominante en ésta (Fig. 3.1). Abarcan un área de aproximadamente 180 km² e intruyen a rocas del Cretácico Inferior (Neocomiano).

Consisten en granodioritas a tonalitas de anfíbola y biotita, monzogranitos de biotita, y monzodioritas a dioritas de anfíbola, de grano medio a grueso (Fig. 3.4). Su disposición generalmente es masiva, salvo al SW del pueblo de Punitaqui, donde su disposición es en forma de sills, con rumbo al NW y manteo aproximado de 30° al SW.

Dataciones K – Ar en roca total indican edades de 105 ± 5 Ma y 109 ± 7 Ma (Aptiano – Albiano; Gana, 1991) en plutones ubicados al W del área de estudio. Dataciones K – Ar de Adriasola (1997) indican una edad de 114 ± 3 Ma (Aptiano) en el plutón oriental de la zona estudiada.

La intrusión de estos plutones y sills observa desarrollo de rocas córneas en los Estratos del Reloj producto de metamorfismo de contacto.



Figura 3.4. Tonalita de Anfíbola, Batolito Illapel

3.3 Estructuras

Las estructuras existentes en la zona de estudio (región de valle central) se asocian a una cuenca extensional de trasarco desarrollada durante el Cretácico e invertida por lo menos a partir del Eoceno (Mpodozis et al., 1988; Pineda, 1996).

3.3.1 Fallas

En el área de estudio predominan fallas oblicuas de orientación N-NE y NE, y fallas de menor escala de orientación N-S (Figs. 3.1 y 3.5). Las fallas afectan a las unidades del Grupo Ovalle y a los plutones Cretácicos.

La falla más importante del área es la zona de falla Los Mantos (Adriasola, 1997), cuya falla principal, de rumbo NNE y manteo $70^{\circ}W$, atraviesa prácticamente la totalidad del área de estudio (16 km de longitud aproximadamente). La falla pone en contacto a los Estratos del Reloj en el W, de edad Neocomiana, con el Batolito Illapel al E, de edad Aptiano – Albiano (Fig. 3.1).

Al sur de la zona de estudio se reconocen lineamientos fotogeológicos paralelos a la falla Los Mantos, y se cree que pertenecen a la misma zona de falla. Adriasola (1997) reconoce a la altura de los yacimientos El Delirio, Milagro y Los Mantos, y asociada a la falla principal NNE, fallas de menor escala de orientación N-S y de extensión inferior a 2 km al W de la falla Los Mantos, y arreglos de fracturas y vetas de orientación principal NW, formando un patrón en echelon.

Según Pavicic (1998), la zona de cizalle está definida por una faja de deformación dúctil, intensamente foliada, de carácter milonítico, y que afecta principalmente a las rocas estratificadas. A esta deformación se le sobreimpone otra frágil (brittle-on-ductile), con desarrollo de brechas de trituración, las que presentan clastos calcáreos, andesíticos, miloníticos y fragmentos de filones. A las estructuras extensionales desarrolladas durante la etapa de deformación frágil se atribuyen los espacios que permitieron el emplazamiento de los cuerpos filonianos que componen parte de los yacimientos existentes en la zona de falla.

Evidencias cinemáticas encontradas por Adriasola (1997), permiten definir un carácter sinistral a la zona de falla.



Figura 3.5. Falla menor, perteneciente a la Zona de Falla Los Mantos.

3.4 Mineralización

El origen de yacimientos de Au – Cu – Hg se ha asociado genéticamente con la intrusión de los plutones y sills del Batolito Illapel (Oyarzún et al, 2001). Estos yacimientos se han explotado desde tiempos coloniales, con el nombre de distrito minero Los Mantos de Punitaqui, que incluye a tres yacimientos principales: Los Mantos, Milagro y El Delirio (Fig. 3.1).

La mineralización de Au – Cu del distrito está íntegramente relacionado a la zona de cizalle descrita anteriormente, y se aloja en cuerpos de brecha y vetas o filones (Adriasola, 1997), mientras que el Hg se asocia principalmente a vetas (Oyarzún et al., 2001).

El yacimiento consta de sulfuros como pirita, calcopirita, bornita, calcosina, covelina, cinabrio y rejalgar, además de óxidos como especularita, magnetita, malaquita, azurita y limonitas (Fig. 3.6). Adriasola (1997) reconoció, además de los minerales ya mencionados, cuprita y cobre nativo como óxidos y tetraedrita mercurial como sulfuros.

La paragénesis del yacimiento comienza con un primer pulso con magnetita, cuarzo, calcita, pirita y tetraedrita. El segundo pulso incluye hematites, calcopirita, bornita, oro nativo y cinabrio.

Finalmente, con los procesos supérgenos se forma calcosina, covelina, cuprita y cobre nativo (Adriasola, 1997).

Los contenidos medios de Au son de 3-10 g/t, los de Hg son de 0,4% en Los Mantos, y los de Cu son de 0,5 a 1,5% en Los Mantos y Milagro, y de 2-3% en El Delirio. El distrito en general tiene bajos contenidos de Ag (< 10 g/t), y muy bajos de Pb y Zn, incluso en comparación con los contenidos normales de las rocas (Oyarzún et al., 2001).

La edad de la mineralización está acotada inferiormente al Cretácico Superior (post-Albiano), por la presencia de fragmentos de rocas intrusivas Albianas incluidas en las brechas mineralizadas y en vetas emplazadas en las rocas de caja (Adriasola, 1997).



Figura 3.6. Limonitas en zona de falla asociada al yacimiento El Delirio

4. MARCO TEÓRICO PARA EL ESTUDIO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

A continuación se presenta un marco teórico básico acerca de la composición química y comportamiento que hipotéticamente se espera que posea el agua subterránea, dependiendo de factores como el tipo de roca con que interactúe, el tiempo de dicha interacción, la composición química inicial del agua infiltrada, presencia de fuentes contaminantes, entre otros parámetros.

El marco teórico que se presenta está conformado por tres subtemas principales:

- Origen y efectos de las sustancias disueltas en el agua
- Influencia geológica en las aguas subterráneas
- Evolución geoquímica de las aguas subterráneas

4.1 Origen y efectos de las sustancias disueltas en el agua

Los principales componentes químicos que teóricamente se encontrarán en cualquier muestra de agua subterránea incluyen a los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ , y a los aniones Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- . A menudo el nitrato (NO_3^-) se considera dentro de este grupo de iones principales, y se incluirá en la descripción de los aniones.

El resto de iones y sustancias disueltas se encuentran por lo general en cantidades notablemente menores que el grupo ya expuesto, y se les denomina iones menores o elementos traza, y conforman menos del 1% del total de componentes en el agua, por lo que no son descritos en particular en este marco, el cual está basado en Custodio y Llamas (1976). La Tabla 4.1 resume el origen que podría tener cada sustancia descrita a continuación.

Además, se describen los principales parámetros físico químicos propios de las aguas, como la conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y pH.

4.1.1 Cationes

- **Sodio (Na^+)**

A condiciones ambientales posee alta solubilidad, y cuando entra en solución, tiende a permanecer en ese estado (Hem, 1985). Suele ir asociado al ion Cl, aunque no siempre sucede así. Es adsorbido con facilidad por arcillas. Se puede encontrar en concentraciones de varios miles de ppm, pero para aguas meteóricas no suele superar los 150 ppm. Aguas con elevadas concentraciones de sodio son perjudiciales a las plantas, y son especialmente nocivas si las concentraciones de Ca y Mg son bajas.

- **Potasio (K^+)**

Las sales de K^+ poseen alta solubilidad a condiciones ambientales. Es absorbido de forma muy poco reversible por las arcillas en formación (illita y montmorillonita), pasando a ser parte de su estructura. Por esto se encuentra en mucho menores cantidades que el Na en las aguas, llegando hasta los 10 ppm de concentración en agua dulce (eventualmente se puede encontrar hasta cientos de ppm). Es un elemento vital para las plantas y no presenta problemas especiales a sus concentraciones habituales.

- **Calcio (Ca^{2+})**

Su química va muy asociada a la de los iones HCO_3^- y CO_3^{2-} en muchas aguas naturales, pudiéndose precipitar y disolver en respuesta a cambios de pH, de temperatura o de presión parcial de CO_2 . Eventualmente se puede encontrar en concentraciones de entre 10 y 250 ppm en aguas dulces, generalmente en cantidades menores que carbonatos o bicarbonatos (Hem, 1985). Es un indicador directo de la dureza de las aguas.

- **Magnesio (Mg^{2+})**

Posee propiedades similares al Ca^{2+} , pero según Yanat'eva (1954) la dolomita (MgCO_3 , la sal de Mg^{2+} más común) es más soluble que la calcita (CaCO_3) bajo una presión parcial de CO_2 a condiciones ambientales. Una vez diluido, el Mg^{2+} tiende a permanecer en este estado (Hem, 1985). Se puede encontrar en concentraciones que van desde 1 ppm hasta los 100 ppm en

aguas meteóricas, pudiendo llegar a veces a algunos miles de ppm en salmueras o aguas salinas. En cuanto a su toxicidad a la ingesta, posee propiedades laxantes y da sabor amargo al agua de bebida si hay algunos centenares de ppm. Contribuye además a la dureza del agua.

4.1.2 Aniones

- **Cloruro (Cl⁻)**

En general es muy soluble en agua a condiciones ambientales (25 °C y 1 atm). No se oxida ni reduce en aguas naturales. Generalmente va asociado al Na⁺, en especial en aguas muy salinas. Su concentración varía entre los 10 y 250 ppm en aguas dulces, y de varios miles de ppm en aguas salinas. Más de 300 ppm le dan un sabor salado al agua, pero no es perjudicial por lo menos hasta unos miles de ppm. Es esencial para la vida, y en contenidos elevados es perjudicial para las plantas y le dan corrosividad al agua.

- **Sulfato (SO₄²⁻)**

En general son sales moderadamente solubles a condiciones ambientales (25 °C y 1 atm), excepto las de Sr y Ba, ambas muy insolubles en agua a esas condiciones. En medios reductores con abundante materia orgánica puede sufrir una reducción bacteriana a S o S²⁻, pero en general es estable. Es difícilmente precipitable químicamente ya que las sales solubles de Sr y Ba son muy escasas en la naturaleza, pero puede separarse de la solución por concentración si existe una evaporación importante. Su concentración varía entre 2 y 150 ppm en aguas dulces, llegando a miles de ppm en aguas salinas. Las aguas de elevado contenido en sulfato no quitan la sed y tiene un sabor amargo, además de tener propiedades laxantes.

- **Bicarbonato (HCO₃⁻)**

Tanto el bicarbonato como el carbonato (CO₃²⁻) aportan alcalinidad al agua, en el sentido que dan capacidad de consumo de ácido. No son oxidables ni reducibles en aguas naturales, y en general [CO₃] << [HCO₃]. Las concentraciones de bicarbonato varían entre 50 y 350 ppm en aguas dulces. Las aguas bicarbonatadas sódicas son malas para el riego, debido a la fijación de Na⁺ en el terreno y a la creación de un medio alcalino.

- **Nitrato (NO_3^-)**

Es muy soluble en agua, y una vez en este estado es estable en un considerable rango de condiciones. En medios reductores puede pasar a N_2 o NH_4 , y excepcionalmente a NO_2 . La mayoría de compuestos nitrogenados en medios oxidantes se encuentran como NO_3^- , por lo que su concentración será similar al nitrógeno total de la muestra. Sus concentraciones varían entre 0,1 y 10 ppm, y en aguas contaminadas puede llegar a los 200 ppm e incluso superarlos. Concentraciones altas en aguas de bebida pueden producir cianosis en los niños y agregan corrosividad al agua, además de producir interferencias en fermentaciones.

Tabla 4.1. Origen de las principales sustancias disueltas en el agua subterránea (Custodio y Llamas, 1976).

Tipos	Ion	Orígenes
Aniones	Cloruro (Cl^-)	Mezclas con agua marina, ataque de rocas y minerales (evaporitas, sodalita, apatito, etc), de gases y líquidos de emanaciones volcánicas, vertidos urbanos e industriales.
	Sulfato (SO_4^{2-})	Lavado de terrenos marinos, oxidación de sulfuros de todo tipo de rocas, concentración en el suelo de aguas de lluvia, disolución de yeso, anhidrita y terrenos yesíferos, actividades urbanas, industriales y agrícolas.
	Bicarbonato (HCO_3^-)	Disolución de CO_2 atmosférico o del suelo, disolución de calizas y dolomitas (ayudado por CO_2 o por ácidos naturales), hidrólisis de silicatos.
	Nitrato (NO_3^-)	Abonos agrícolas, procesos de nitrificación naturales, agua de lluvia, desarrollo de pozos explosivos, descomposición de materia orgánica y contaminación urbana, industrial y ganadera.
Cationes	Sodio (Na^+)	Ataque de feldespatos y otros silicatos, lavado de sedimentos marinos, mezcla con agua de mar, disolución de sales evaporitas, contaminación urbana e industrial, concentración en agua de lluvia.
	Potasio (K^+)	Ataque de ortosa y otros silicatos (micas, arcillas, etc), disolución de sales potásicas (sylvita, carnalita), agua de lluvia, contaminación minera, industrial y agrícola (abonos).
	Calcio (Ca^{2+})	Disolución de calizas, dolomitas, yeso y anhidrita, ataque de feldespatos y otros silicatos cálcicos, disolución de cemento calcáreo de muchas rocas, agua de lluvia
	Magnesio (Mg^{2+})	Disolución de dolomitas y calizas dolomíticas, ataque de silicatos magnésicos y ferromagnésicos, lavado de rocas evaporíticas magnésicas (carnalita), agua de mar, contaminación industrial y minera.

4.1.3 Parámetros físico-químicos

- **pH**

Se define como $-\log aH^+$, siendo un parámetro que es función de la actividad química de H^+ (aH^+). Para el agua pura se considera que el valor de pH es igual a 7.0 a 25° C, considerándose este valor como neutro, mientras que a 18° C, el valor de pH neutro es de 7.08 (Schoeller, 1962). La adición de HCl o NaOH en el agua modifica fuertemente el pH, por el aporte de H^+ o OH^- , produciendo un agua ácida ($pH < 7$) o básica ($pH > 7$), respectivamente.

Muchas sustancias neutras al disolverse reaccionan con el agua destruyendo este equilibrio, aumentando o disminuyendo el pH del agua. Por lo general, en las aguas subterráneas se tendrá un pH entre 6.5 y 8, y pocas ocasiones entre 5.5 y 8.5. El agua marina tiene un pH aproximado de 8.

Aguas ácidas ($pH < 7$) suelen ser corrosivas, y un pH muy alcalino ($pH > 9$) crea dificultades en las plantas. El intervalo óptimo para la vida es entre 6.5 y 8.5.

- **Conductividad Eléctrica (CE) y Sólidos Totales Disueltos (TDS)**

La CE se define como la capacidad de un agua para conducir electricidad. Es considerado un parámetro importante, pues sus valores son directamente proporcionales a la cantidad de sólidos totales disueltos en el agua, y por lo tanto, es un indicador directo si un determinado pozo se encuentra contaminado. Custodio y Llamas (1976), indican que la relación entre conductividad eléctrica y sólidos disueltos está dada por las siguientes ecuaciones:

$$C (\mu S/cm) = A * R_s (ppm)$$

Donde R_s corresponde al residuo seco a 110°C, y los valores de A son los siguientes, a 18° C (Custodio, 1965, citado en Custodio y Llamas, 1976):

$$A = 0.86 \text{ a } 1.72 \text{ en casos extremos}$$

$$A = 1.15 \text{ a } 1.56 \text{ en casos normales}$$

Luego, la relación entre R_s y TDS (total de sólidos disueltos) es la siguiente:

$$\text{TDS} = \text{Rs} + \frac{1}{2} \text{HCO}_3 \text{ (ppm)}$$

Si se toma un valor promedio para A de 1.3, la relación entre TDS y conductividad sería:

$$\text{TDS} = (\text{C} - 0.65 \text{HCO}_3) / 1.3$$

- **Oxígeno Disuelto (O₂)**

Se define como la cantidad de oxígeno que hay disuelto en el agua. Es un parámetro muy importante en aguas subterráneas ya que incide sobre las reacciones redox y en la especiación de elementos, de manera que si se encuentra en altas concentraciones producirá un medio oxidante y favorecerá la presencia de las especies más oxidadas de los elementos presentes, y si se encuentra en bajas concentraciones producirá un medio reductor y ayudará a que los elementos presentes se encuentren en su estado reducido. Estos últimos son solubles y por tanto peligrosos para la salud humana. Juega un papel importante en la actividad de los microorganismos.

4.2 Influencia geológica en las aguas

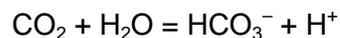
Las unidades geológicas con las que entra en contacto el agua subterránea también influirán en la composición química de éstas, dependiendo de la composición y grado de fracturamiento de la roca, del grado de acidez del agua, del tiempo en que ambas interactúen, de la permeabilidad, entre otros aspectos. A continuación se detallan características generales que tendrán las aguas dependiendo del tipo de roca (Custodio y Llamas, 1976):

- **Rocas Ígneas:** las aguas relacionadas con los granitos son en general poco salinas y en ellas domina como anión el HCO_3^- y como cationes el Na^+ , el Ca^{2+} , o ambos. Aunque se puede solubilizar cantidades importantes de K y Fe, el primero es retenido por las arcillas existentes, mientras que el segundo es precipitado como hidróxido de hierro o ferrihidrita ($\text{Fe}(\text{OH})_3$). El contenido de Cl^- y SO_4^{2-} en general es bajo dada la composición de los granitos, excepto si se tienen cantidades importantes de pirita (FeS_2), que si logran oxidarse originan aportes notables de sulfato. Para que esto último ocurra, se precisa de una facilidad de suministro de oxígeno. Si en vez de granito se tiene un terreno basáltico, se tendrán aguas relativamente más salinas, dada la mayor facilidad para alterar sus componentes.

- **Rocas Sedimentarias:** al haber una gran cantidad de este tipo de rocas, la características del agua dependerán del tipo de roca sedimentaria con la que interactúan. Estas rocas son en general más porosas y son capaces de aportar más sales más rápidamente que las rocas ígneas.
- **Rocas Metamórficas:** estas rocas suponen una gradación entre rocas ígneas y sedimentarias, por lo que las aguas que entren en contacto con rocas metamórficas tendrán características intermedias más próximas a unas u otras según el grado de metamorfismo.

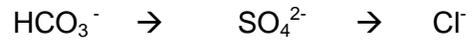
4.3 Evolución geoquímica de las aguas subterráneas

En general, el origen de las aguas subterráneas, y la composición química primaria que tendrán, se encuentra en el agua de lluvia. Ésta tiene una composición muy variable, y de acuerdo a Matveyev y Bashmakova (1967), los iones dominantes son el Cl, Na y K cerca de la costa, y los iones SO₄, HCO₃ y Ca predominan hacia el interior de los continentes. Esta disminución de NaCl en el agua de lluvia hacia el interior del continente es inversamente proporcional a la distancia a la que se encuentre de la costa (Kolodijajnaia, 1962), y disminuye aún más si media una elevación topográfica importante (por ejemplo, la Cordillera de la Costa). Esta agua de lluvia, al entrar en contacto con el suelo (que a su vez contiene abundante CO₂), genera la siguiente reacción.



Generándose así primeramente HCO₃⁻, y acidificando el agua. Esta relación se favorece a medida que el suelo contenga más CO₂, como sucede en terrenos cultivados y con abundante vegetación (Custodio y Llamas, 1976).

Una vez infiltrada, la composición química de las aguas subterráneas dependerá directamente de los minerales con que entre en contacto en el acuífero, y del tiempo de interacción que tenga con ellos, el que puede llegar a ser de miles de años (Custodio y Llamas, 1976). Así, a mayor tiempo de permanencia en el acuífero, mayor será la cantidad de sales presentes en el agua, debido a la mayor disolución de éstas. Se determina una secuencia entonces, la cual dice que las aguas con menor tiempo de permanencia en el subsuelo serán generalmente bicarbonatadas, y con el paso del tiempo se vuelven sulfatadas y finalmente cloruradas. Análogamente para los cationes, aguas inicialmente cálcicas pasan a ser magnésicas y luego sódicas:



Esta secuencia es correcta para un flujo lineal. Sin embargo, las aguas al infiltrarse y circular por el terreno, pueden seguir un recorrido corto de circulación local, un camino de cientos de km de circulación regional, o algún camino intermedio entre éstos (Fig. 4.1, tomada de Custodio y Llamas, 1976). Así, las aguas más profundas suelen ser más salinas que las más cercanas a la superficie debido a que las oportunidades para disolver sales son mayores (Custodio y Llamas, 1976).

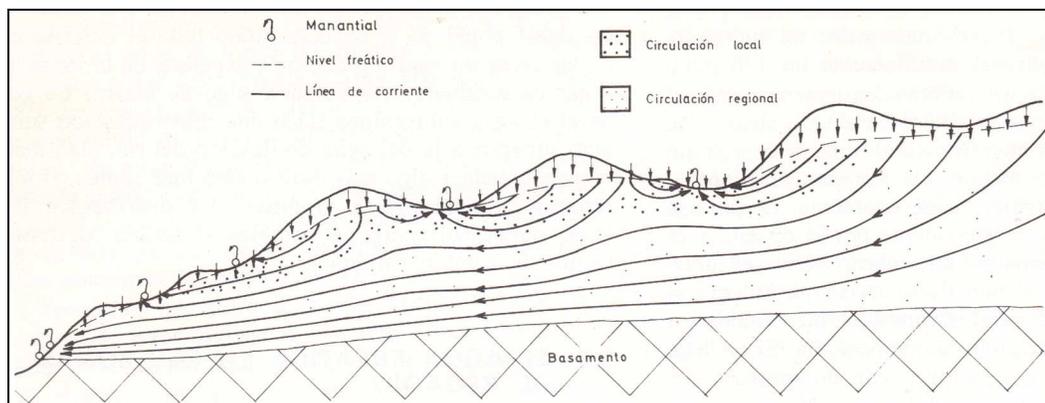


Figura 4.1. Modelo de circulación de aguas subterráneas, tomado de Custodio y Llamas (1976).

5. METODOLOGÍA DE ESTUDIO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

5.1 Metodología de Terreno

Para analizar la química de las aguas, se realizó un muestreo sistemático a un total de 28 pozos y norias en la cuenca del estero Punitaqui, durante los meses Septiembre y Octubre de 2009 (Fig. 5.1). Dada la imposibilidad económica de realizar pozos nuevos, se eligieron sólo pozos y norias privadas, pertenecientes a la comunidad de Punitaqui (24 pozos), a la empresa Aguas del Valle S.A. (1 pozo), y a la Compañía Minera de Punitaqui S.A. (3 pozos).

La elección de los puntos se realizó en base a su ubicación dentro de la cuenca, y si bien no alcanzan a cubrirla entera, se procuró que su distribución abarcara la mayor parte de ésta. Además, especial énfasis se le dió a la ubicación de tranques de relave y botaderos de estériles presentes en la cuenca, escogiendo pozos y norias *aguas arriba* y *aguas abajo* de éstos.

En cada lugar de muestreo se registró su ubicación y altura con GPS, se fotografió y se realizó una descripción de los alrededores (geomorfología, fuentes de contaminación, cantidad de vegetación, etc).

El muestreo consistió en extraer 1 litro de agua en cada pozo o noria, repartido en 4 botellas de plástico de polietileno de alta densidad (HDPE de 250 ml). Las 4 botellas fueron necesarias para analizar concentraciones totales de aniones y cationes mayores (Cl, SO₄, Na, K, Ca, Mg), bicarbonatos (HCO₃), nitratos (N(NO₃)), y elementos traza o metales disueltos (Tabla 5.1). Cada una de ellas fue ambientada 3 veces antes de extraer la muestra de agua, y a todas se les colocó una etiqueta adhesiva, registrando con plumón permanente el número de muestra, la fecha y hora a la que fue tomada.

Además, en cada pozo o noria se midieron *in situ* los parámetros pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y temperatura, todos medidos con la sonda multiparámetros marca Quanta II (Hidrolab), de propiedad de la Dirección General de Aguas. Por último, se midió el nivel freático en cada pozo, utilizando un pozómetro de propiedad de la DGA.

Todo el material utilizado para el muestreo de aguas en terreno, incluida la sonda, era lavado con abundante agua desionizada y destilada después de cada pozo muestreado, minimizando así el riesgo de contaminación al momento de extraer el agua.

Tabla 5.1. Elementos y compuestos a analizar en cada pozo o noria

Elementos a Analizar	
Macros (Cationes y Aniones mayores)	Ca
	Mg
	Na
	K
	Cl
	SO ₄
Metales Disueltos (Elementos traza)	Ag
	Al
	As
	B
	Cd
	Co
	Cr
	Cu
	Hg
	Mn
	Mo
	Ni
	Pb
	Se
Zn	
Bicarbonatos	HCO ₃
Nitratos	N(NO ₃)

Con respecto a la preservación de las muestras de agua, cada botella fue tratada de forma diferente, dependiendo de la capacidad natural de cada elemento para preservarse por una cantidad de tiempo determinado.

En terreno, 3 de las 4 botellas de 250 ml fueron filtradas con el fin de evitar contaminación externa del acuífero, usando filtros de acetato de celulosa con membrana de poro de 0.45 µm. Sólo la botella destinada al análisis de HCO₃ no fue filtrada.

La botella filtrada destinada al análisis de los elementos traza o metales disueltos fue acidificada con 1 ml de ácido nítrico concentrado (HNO₃) de alta pureza (65%). Finalmente, todas las muestras fueron refrigeradas en la oscuridad a 4°C, a la espera de ser llevadas al laboratorio correspondiente. La Tabla 5.2 resume estos procedimientos para la preservación de las muestras de agua.

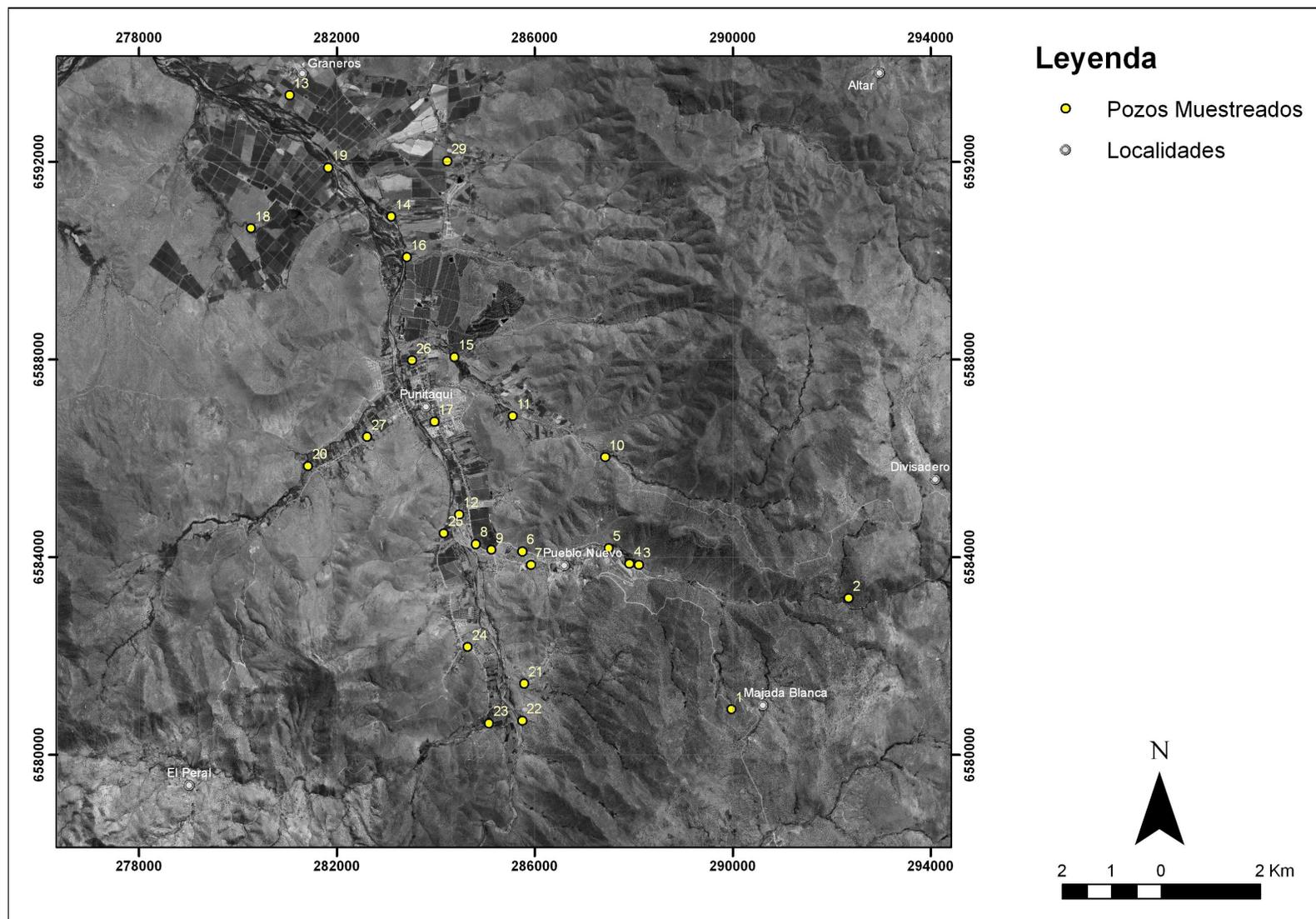


Figura 5.1. Mapa de distribución y ubicación de pozos y norias muestreadas

Tabla 5.2. Procedimientos para la preservación de cada muestra, Standard Methods for Examination of Water and Wastewater 21 st Edition 2005.

Determinación	Método de Preservación	Tiempo máximo de almacenamiento
Macros (Aniones y Cationes mayores)	Filtrar inmediatamente por filtro de membrana de poro 0,45 µm (acetato de celulosa). Refrigerar a 4°C en la oscuridad	28 días
Metales Disueltos (Elementos Traza)	Filtrar inmediatamente por filtro de membrana de poro 0,45 µm y acidificar a pH < 2 con ácido nítrico concentrado (HNO ₃) de alta pureza. Refrigerar a 4°C	6 meses
Nitratos	Filtrar inmediatamente por filtro de membrana de poro 0,45 µm (acetato de celulosa). Refrigerar a 4°C en la oscuridad	48 horas
Alcalinidad (Bicarbonatos)	Llenar completamente la botella y tapar herméticamente sin dejar aire en el interior. Refrigerar a 4°C en la oscuridad	24 horas
		6 horas si hay gran actividad biológica

5.2 Metodología de Laboratorio

Las botellas de cationes y aniones mayores, de nitratos y de elementos traza fueron enviadas para su análisis al Laboratorio Ambiental de la Dirección General de Aguas.

Por problemas logísticos, este último no realiza el análisis de bicarbonatos, por lo que éstos fueron enviados al Laboratorio Hidrolab para su análisis mediante volumetría ácido base (SM-2320 B y SM4500 HB, Standard Methods for Examination of Water and Wastewater 21 st Edition 2005).

Las metodologías analíticas utilizadas por el Laboratorio de la DGA incluyen:

- **Nitratos (N(NO₃)):** Método de Salicilato Sódico, mediante la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica (Rodier, 1981).
- **Elementos Traza:**
 - Método de Espectrofotometría de Absorción Atómica, para **Ag, Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb y Zn** (SMEWW 19th Edition, Method 3111 B y 3111 D).
 - Método de Espectrofotometría de Absorción Atómica con generación de hidruros, mediante, para **As y Se** (SMEWW 19th Edition, Method 3114 B/Perkin Elmer).

- Método de Espectrofotometría de Absorción Atómica con vapor frío, para **Hg** (SMEWW 19th Edition, Method 3112 B/Perkin Elmer).
- Método del Azometino-H, mediante la técnica de Espectrofotometría de Absorción Molecular, para **B** (AOAC Método Oficial 982, 01).

- **Cationes y Aniones mayores:**
 - Método de Espectrofotometría de Absorción Atómica, para **Ca, Mg, Na, K** (SMEWW 19th Edition, Method 3111 B).
 - Método de Titulación, mediante la técnica de Titulación Analítica para **Cl** (SMEWW 19th Edition, Method 4500-Cl-C).
 - Método de Turbidimetría, mediante la técnica de Espectrofotometría de Absorción Molecular, para **SO4** (SMEWW 19th Edition, Method 4500-SO4-E).

Los límites de detección inferior para cada elemento o compuesto del Laboratorio de la DGA se muestran en la Tabla 5.3.

El Laboratorio Hidrolab, ubicado en la ciudad de Santiago, se encuentra bajo las acreditaciones INN LE 214 – LE 215 – LE 216 – LE 217, de acuerdo a NCh – ISO 17025 del año 2005. El Laboratorio de la DGA se encuentra trabajando para acreditarse de acuerdo a la norma NCh – ISO 17025. No se cuenta con los controles de calidad propios de ninguno de los dos laboratorios.

Tabla 5.3. Límites de detección inferior del Laboratorio Ambiental DGA.

Parámetros	Límite de Detección (ppm)
Sulfato	2
Cloruro	1
Sodio	0,05
Potasio	0,03
Calcio	0,08
Magnesio	0,03
Nitratos	0,01
Aluminio	0,3
Arsénico	0,001
Boro	1
Cadmio	0,02
Cobalto	0,01
Cobre	0,01
Cromo	0,01
Hierro	0,03
Manganeso	0,01
Mercurio	0,001
Molibdeno	0,05
Niquel	0,02
Plata	0,01
Plomo	0,05
Selenio	0,001
Zinc	0,01

5.3 Metodología de Análisis de Resultados

La metodología de análisis de resultados o el procesamiento de datos incluye lo siguiente:

- Determinación del tipo de agua: corresponde a la clasificación química de las aguas subterráneas. Se determina utilizando diagramas Piper (1944), Stiff (1951) y Schoeller (1964), los que arrojan tendencias químicas y evolución de las aguas en un acuífero.
- Mapas de distribución geoquímica: mapas de pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto.
- Interpretación geológica de resultados.
- Comparación con la Norma chilena NCh. 409/Of. 84 de calidad de agua potable y Norma chilena de riego NCh. 1333/Of. 78, cuyo fin es determinar zonas contaminadas respecto de dichas normas.

Todos estos análisis se realizan utilizando programas computacionales técnicos como ArcGis 9.2, RockWorks 2006 e Inaquas 1.0, y programas de procesamiento y mejoramiento de imágenes como Adobe Photoshop CS y Adobe Illustrator CS.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Tabla A1.1 del Anexo 1 se presentan la ubicación, elevación, nivel estático del acuífero, los parámetros medidos en terreno (pH, temperatura, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto), mientras que en las Tablas A1.2 y A1.3 del mismo Anexo se entrega el detalle de los resultados completos de los análisis químicos realizados por los laboratorios.

En total, los elementos estudiados corresponden a 24. De ellos, 8 son elementos mayores (Na, K, Ca, Mg, SO₄, HCO₃ y N(NO₃)), y 16 son elementos traza o metales disueltos (Ag, Al, As, B, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Se y Zn). Dentro de los mayores, el N(NO₃) incluye tanto a los nitratos (NO₃) como a los nitritos (NO₂), y corresponde al nitrógeno total existente en la muestra. Esto se debe a que la mayoría de compuestos nitrogenados en medios oxidantes se encuentran como NO₃, por lo que la concentración de nitratos será similar al nitrógeno total de la muestra.

A continuación se presentan los resultados químicos de los elementos mayores, en unidades de mg/l. Cabe destacar que los datos de TDS se calculan en base al punto 4.1.3 del marco teórico (Tabla 6.1).

Tabla 6.1. Concentraciones de los elementos mayores en las aguas muestreadas.

Nº Pozo	Cationes Mayores (mg/l)				Aniones Mayores (mg/l)				TDS (mg/l)
	K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	SO ₄ ⁻²	Cl ⁻	HCO ₃	N(NO ₃)	
1	3,4	35,2	37,7	13,7	45,0	31,8	128	4,542	255,2
2	0,6	48,6	89,6	33,2	45,0	76,7	350	0,867	455,0
3	2,4	50,6	66,7	27,5	60,0	66,8	261	1,690	408,7
4	2,3	49,7	60,4	22,5	50,0	57,4	244	1,453	370,3
5	3,6	58,8	76,4	26,9	75,0	78,3	266	1,491	470,8
6	3,8	81,8	188,1	76,0	600,0	101,5	256	3,546	1087,4
7	5,4	142,6	354,1	128,6	1550,0	140,0	257	2,962	1979,2
8	1,9	67,3	93,8	41,4	225,0	63,5	290	1,530	609,6
9	1,7	67,7	97,5	46,2	275,0	72,5	271	1,201	666,8
10	3,7	70,8	97,5	42,0	105,0	75,0	454	0,109	553,8
11	2,4	55,1	54,3	22,0	50,0	39,3	293	2,745	*
12	3,1	65,3	77,6	40,3	195,0	59,0	299	0,788	312,0
13	2,8	72,9	61,0	28,4	90,0	42,1	329	5,194	459,3
14	4,4	67,0	69,3	36,0	110,0	55,0	354	0,997	497,6
15	3,1	43,7	59,4	23,0	75,0	31,0	281	1,390	360,3
16	3,6	53,9	62,1	28,4	65,0	36,4	287	7,879	425,7
17	5,5	98,7	103,6	44,5	225,0	77,9	329	12,994	748,6
18	9,6	19,0	143,7	54,8	250,0	3217,6	384	3,673	1192,6
19	3,0	22,2	64,5	37,4	155,0	95,9	336	4,463	652,0
20	1,7	69,5	85,8	56,5	70,0	75,3	472	0,739	538,6
21	3,5	55,7	75,8	31,9	135,0	63,6	231	5,490	511,4
22	4,6	56,4	54,3	27,1	45,0	62,9	233	2,824	385,0
23	6,0	50,6	59,5	34,0	350,0	43,5	281	1,600	376,4
24	2,3	42,4	62,0	31,3	125,0	23,1	232	2,330	368,6
25	2,1	59,8	62,0	22,3	55,0	35,3	292	1,536	345,5
26	4,8	58,8	70,0	30,4	75,0	48,9	329	5,510	480,1
27	2,4	46,8	46,9	25,3	55,0	23,8	275	2,923	325,6
29	0,9	62,4	52,2	25,9	50,0	21,4	342	3,061	327,5

* : Concentración no medida

6.1 Validación de Resultados

Como análisis de validación de resultados, dada la falta de una cantidad importante de duplicados y del control de calidad propio de los laboratorios, se realizó un balance iónico para todas las muestras cuyos resultados se exponen en la Tabla 6.2.

De todas las muestras, sólo los puntos 18, 19 y 23 superan el 16% de error que se consideró como el límite permitido para este estudio. En estricto rigor el límite máximo de error permitido debiera ser de un 10% a un 15%, pero debido a que para aguas con concentraciones muy elevadas de sulfatos (o para aguas ácidas) el criterio del balance iónico es casi imposible que

se cumpla, se permitió aceptar un 16% de límite, incluyendo así la muestra 7, única que sobrepasa el 15% de error en el balance.

Por lo tanto, las muestras 18, 19 y 23 **no** fueron consideradas para el análisis de resultados.

Tabla 6.2. Balance iónico para todas las muestras

Muestra	Aniones (meq)			Cationes (meq)				Balance iónico			
	Cl	SO4	HCO3	NO3	Na	Mg	Ca	K	Suma Aniones	Suma Cationes	Error (%)
1	0,90	0,94	2,10	0,07	1,53	1,13	1,88	0,09	4,01	4,63	14,39
2	2,16	0,94	5,74	0,01	2,11	2,73	4,47	0,02	8,85	9,33	5,28
3	1,88	1,25	4,28	0,03	2,20	2,26	3,33	0,06	7,44	7,85	5,42
4	1,62	1,04	4,00	0,02	2,16	1,85	3,01	0,06	6,68	7,09	5,85
5	2,21	1,56	4,36	0,02	2,56	2,21	3,81	0,09	8,15	8,68	6,19
6	2,86	12,49	4,20	0,06	3,56	6,25	9,39	0,10	19,61	19,29	-1,62
7	3,95	32,27	4,21	0,05	6,20	10,58	17,67	0,14	40,48	34,59	-15,69
8	1,79	4,68	4,75	0,02	2,93	3,41	4,68	0,05	11,25	11,06	-1,71
9	2,05	5,73	4,44	0,02	2,94	3,80	4,87	0,04	12,23	11,65	-4,84
10	2,12	2,19	7,44	0,00	3,08	3,45	4,87	0,09	11,75	11,49	-2,19
11	1,11	1,04	4,80	0,04	2,40	1,81	2,71	0,06	7,00	6,98	-0,30
12	1,66	4,06	4,90	0,01	2,84	3,32	3,87	0,08	10,64	10,11	-5,07
13	1,19	1,87	5,39	0,08	3,17	2,33	3,04	0,07	8,54	8,62	1,00
14	1,55	2,29	5,80	0,02	2,92	2,96	3,46	0,11	9,66	9,45	-2,21
15	0,87	1,56	4,61	0,02	1,90	1,89	2,96	0,08	7,06	6,84	-3,28
16	1,03	1,35	4,70	0,13	2,35	2,33	3,10	0,09	7,21	7,87	8,78
17	2,20	4,68	5,39	0,21	4,29	3,66	5,17	0,14	12,48	13,26	6,06
18	90,77	5,21	6,29	0,06	0,83	4,50	7,17	0,25	102,33	12,75	-155,69
19	2,71	3,23	5,51	0,07	0,96	3,08	3,22	0,08	11,51	7,34	-44,32
20	2,12	1,46	7,74	0,01	3,02	4,65	4,28	0,04	11,33	12,00	5,71
21	1,79	2,81	3,79	0,09	2,42	2,62	3,78	0,09	8,48	8,92	5,05
22	1,77	0,94	3,82	0,05	2,45	2,23	2,71	0,12	6,58	7,51	13,26
23	1,23	7,29	4,61	0,03	2,20	2,80	2,97	0,15	13,15	8,12	-47,26
24	0,65	2,60	3,80	0,04	1,84	2,57	3,09	0,06	7,09	7,57	6,51
25	1,00	1,15	4,79	0,02	2,60	1,83	3,09	0,05	6,95	7,58	8,69
26	1,38	1,56	5,39	0,09	2,56	2,50	3,49	0,12	8,42	8,68	3,00
27	0,67	1,15	4,51	0,05	2,03	2,08	2,34	0,06	6,37	6,51	2,23
29	0,60	1,04	5,61	0,05	2,72	2,13	2,61	0,02	7,30	7,47	2,37

6.2 Química de Aguas

6.2.1. Tipo de aguas

Para clasificar los tipos de agua que corresponden al acuífero superficial reconocido en la cuenca de Punitaqui (Ingeniería y Geología Dos Ltda., 1995), se utiliza la composición química de éstas. Los diagramas de Piper (1944) y de Stiff (1951) son las herramientas a utilizar,

basado en las concentraciones de los elementos mayores, tanto cationes (Ca, Mg, Na, y K), como aniones (Cl, HCO₃, SO₄). El diagrama de Piper utiliza dichas concentraciones medidas exclusivamente en miliequivalente (meq), mientras que el de Stiff se puede utilizar en unidades como meq, %(mg/l), o %(meq/l).

Del diagrama de Piper (Fig. 6.1) se infiere la existencia de 3 grupos principales de aguas:

1. Grupo conformado por los pozos 6, 7 y 9: Corresponden a aguas de composición sulfatada y cálcica, y se ubican en el sector de Pueblo Nuevo (Fig. 5.1), inmediatamente aguas abajo del tranque de relave de la mina Los Mantos de Punitaqui.
2. Grupo conformado por los pozos 8, 12, 17, 21 y 24: Corresponden a aguas de composición bicarbonatada a sulfatada y cálcica a calcosódica. Su distribución en la zona de estudio abarca zonas relativamente cercanas de las zonas principales de yacimientos mineros y actividad relacionada a ésta.
3. Grupo conformado por los pozos restantes: Corresponden a aguas de composición bicarbonatada y cálcica a calcosódica. Se distribuye en casi toda la zona de estudio, desde zonas topográficamente altas hasta las zonas más bajas. Cabe destacar que abarca toda la zona aguas arriba de las zonas mineras principales, mientras que los pozos de este grupo que se encuentran aguas abajo de éstas, están alejadas a una distancia considerable de las mismas.

Las tres zonas descritas se pueden apreciar fácilmente en el diagrama de Stiff, presentado en la Figura 6.2. En el Anexo 2 se presentan los gráficos de Stiff detalladamente para cada pozo, graficados según 3 unidades: %(mg/l), %(meq/l), y meq.

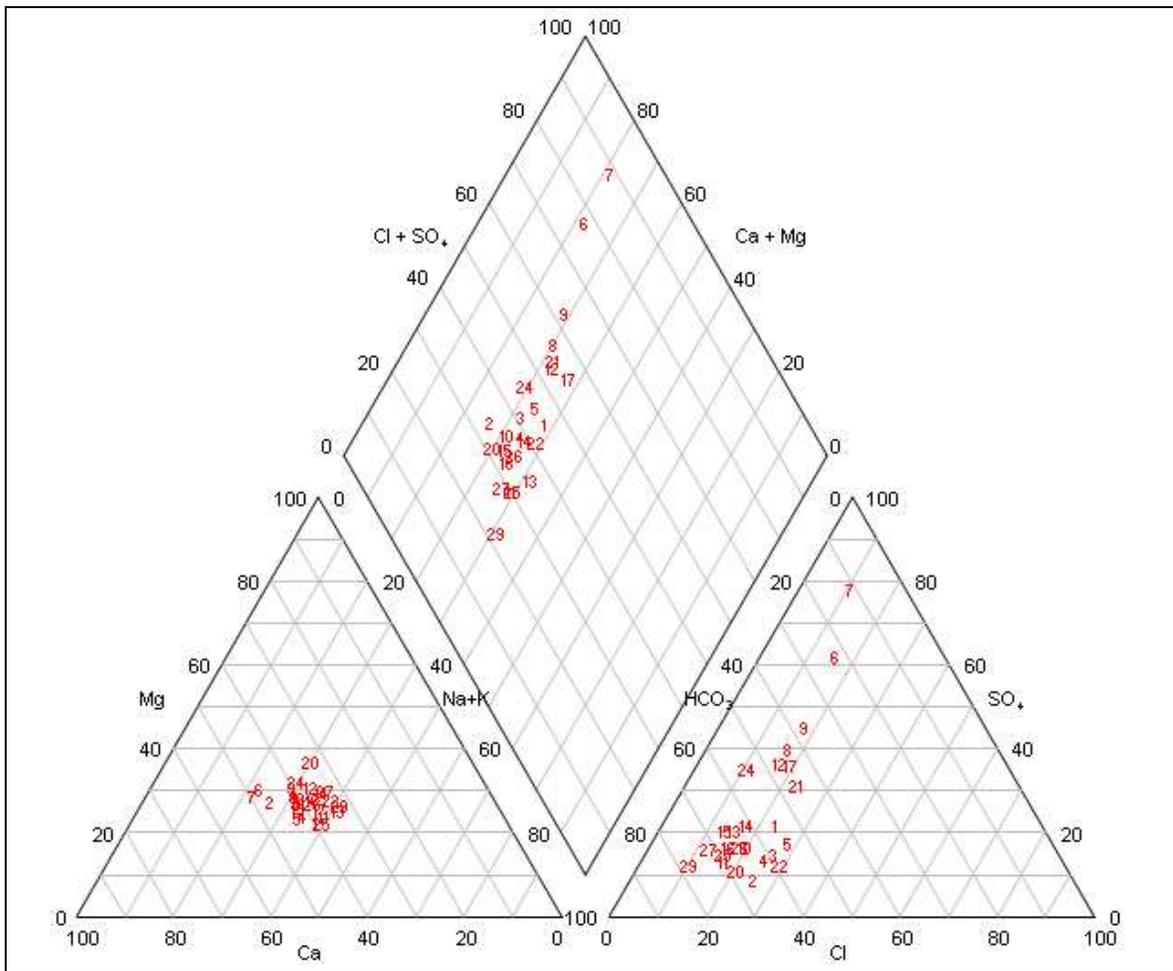


Figura 6.1. Diagrama general de Piper (1944) para la zona estudiada.

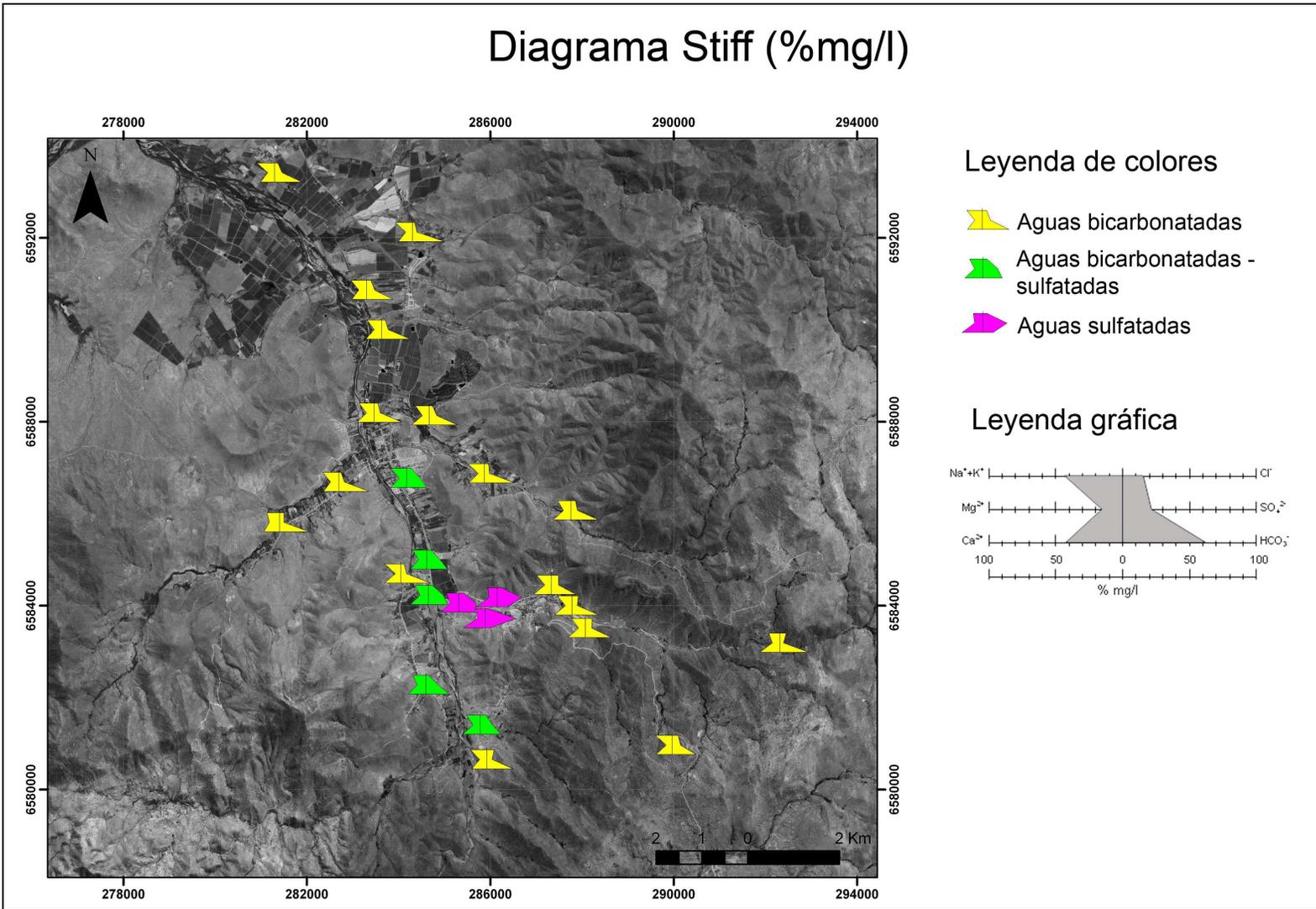


Figura 6.2. Diagrama de Stiff (1951) para la zona estudiada

6.2.2 Diagramas de Correlación

A continuación se muestran diagramas de correlación realizados entre TDS y las concentraciones de sulfatos y Na+Cl, con el fin de detectar precipitaciones de minerales, dadas las altas concentraciones de dichas sales (Figs. 6.3 y 6.4).

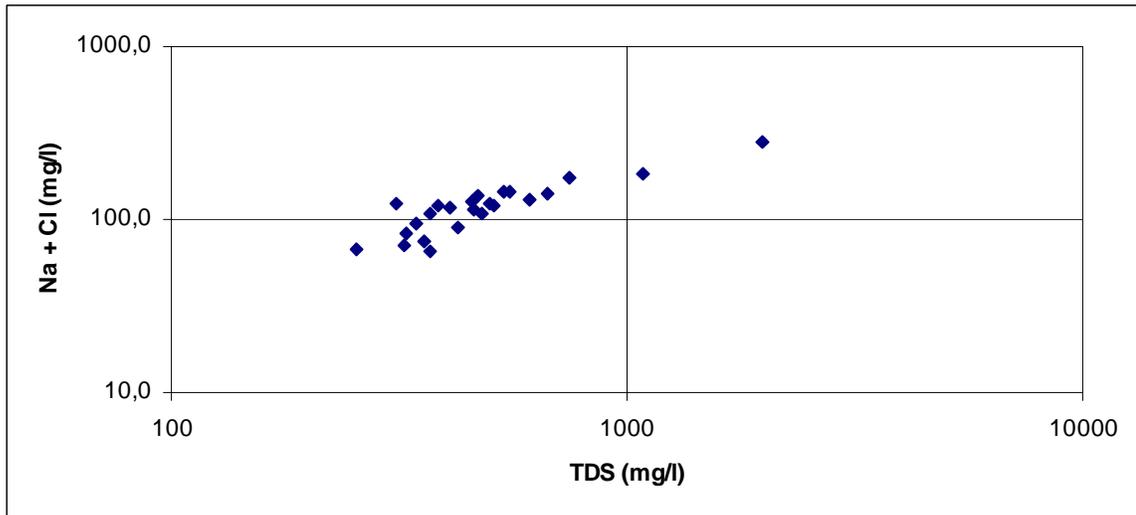


Figura 6.3. Diagrama (Na +Cl) vs TDS.

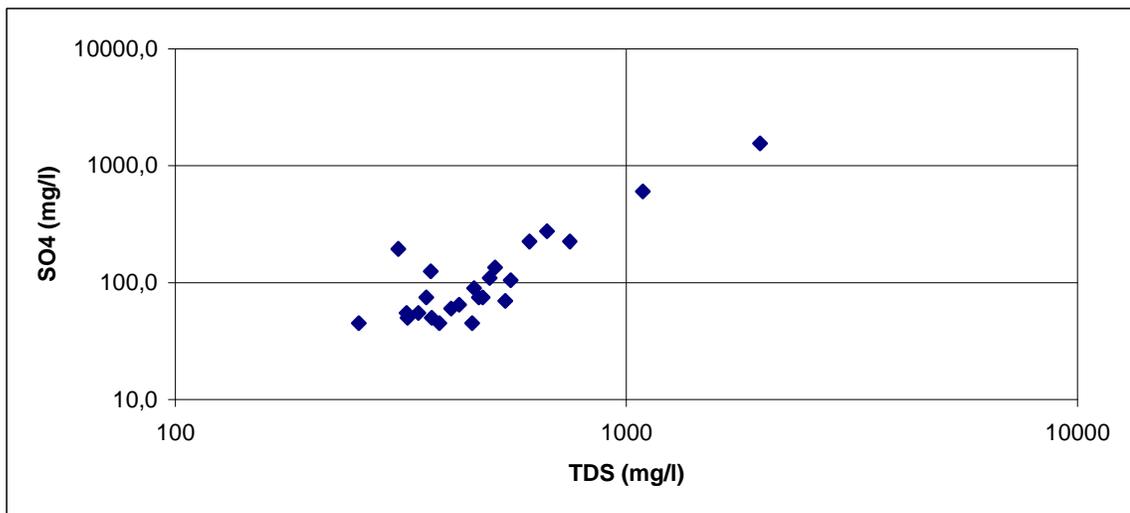


Figura 6.4. Diagrama (SO₄) vs TDS.

En ambos gráficos se observa una correlación positiva entre las concentraciones de sales y sulfatos con la cantidad de sólidos totales disueltos. Por lo tanto, ambas sustancias aportan directamente en la cantidad de TDS que se mide en cada muestra de agua.

6.2.3 Caracterización Físico-Química de las aguas

En este punto se incluyen los mapas de distribución de los parámetros pH, Conductividad Eléctrica y Oxígeno Disuelto, medidos en terreno, además de sus respectivas descripciones. Cabe destacar que las temperaturas medidas en terreno oscilan en general entre los 15°C y 21°C.

6.2.3.1 pH

La Figura 6.5 muestra la distribución de pH en la zona de estudio. Como tendencia general, se puede apreciar un pH alcalino (entre 7 y 8) en las zonas altas de la cuenca, que se va acidificando a medida que se avanza en dirección N (hacia el río Limarí), hasta llegar a un pH levemente ácido (cercano a 6) al NW de la zona de estudiada. Destacable es la quebrada Los Mantos (Fig. 2.2), levemente alcalina aguas arriba de la mina Los Mantos, y notablemente alcalina aguas abajo de ésta, llegando a tener un pH sobre 8 y cercano a 9. Esta alta alcalinidad es observable hasta el centro de la localidad de Punitaqui, donde el valle principal se une con la quebrada El Pozo, zona donde las aguas se acidifican.

El pozo 21, ubicado aguas arriba del valle principal e inmediatamente aguas abajo de la mina El Delirio y de un botadero de estéril, posee un pH levemente ácido. La diferencia con los pozos ubicados aguas debajo de la mina Los Mantos, podría radicar en que ésta es explotada en forma industrial en la actualidad, mientras que El Delirio es explotada artesanalmente por pirquineros.

6.2.3.2 Conductividad Eléctrica

En la Figura 6.6 se aprecian los distintos valores que toma la conductividad eléctrica, medida en $\mu\text{S}/\text{cm}$, en la zona de estudio. En general, se observan en toda el área valores menores a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, excepto en algunos pozos puntuales donde alcanza valores de hasta 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y en la zona inmediatamente aguas abajo de la mina Los Mantos, donde la conductividad alcanza valores mayores a 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e incluso llegando casi a los 2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en un pozo, considerado un altísimo valor para ser un pozo de agua dulce.

6.2.3.3 Oxígeno Disuelto

La Figura 6.7 muestra la distribución del parámetro oxígeno disuelto (OD), medido en mg/l. En la figura se puede apreciar que de un ambiente relativamente reductor en las zonas altas de la cuenca y aguas arriba del pueblo de Punitaqui, se pasa a un ambiente oxidante aguas abajo de éste, en zona NW del área de estudio.

Notar la muy baja cantidad de OD medido en el pozo N° 7, esperable dada la gran cantidad de sulfatos medidos en el mismo. De esta forma, en este punto se favorecerá la presencia de especies reducidas de elementos.

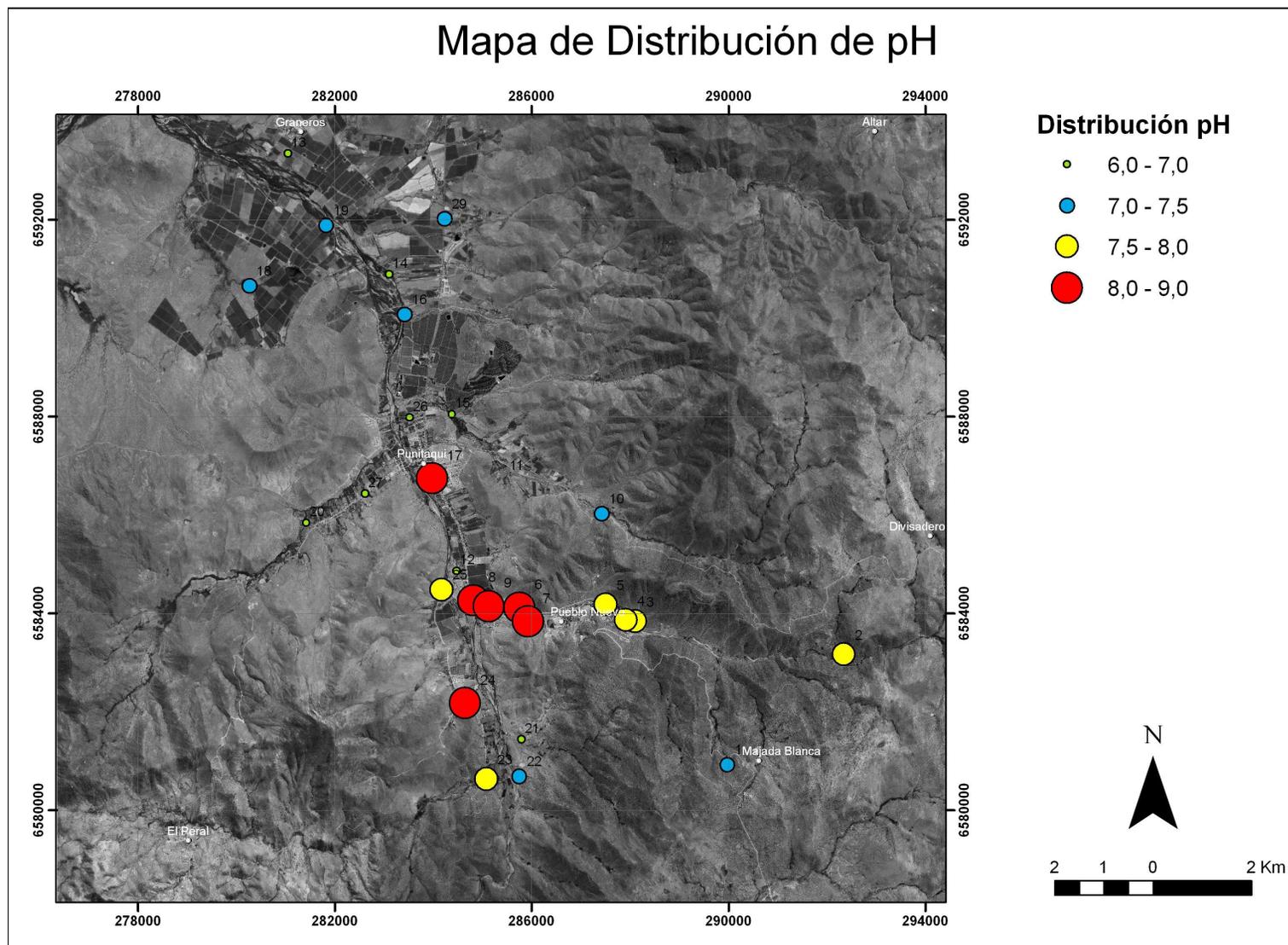


Figura 6.5. Mapa de distribución de pH para el área estudiada.

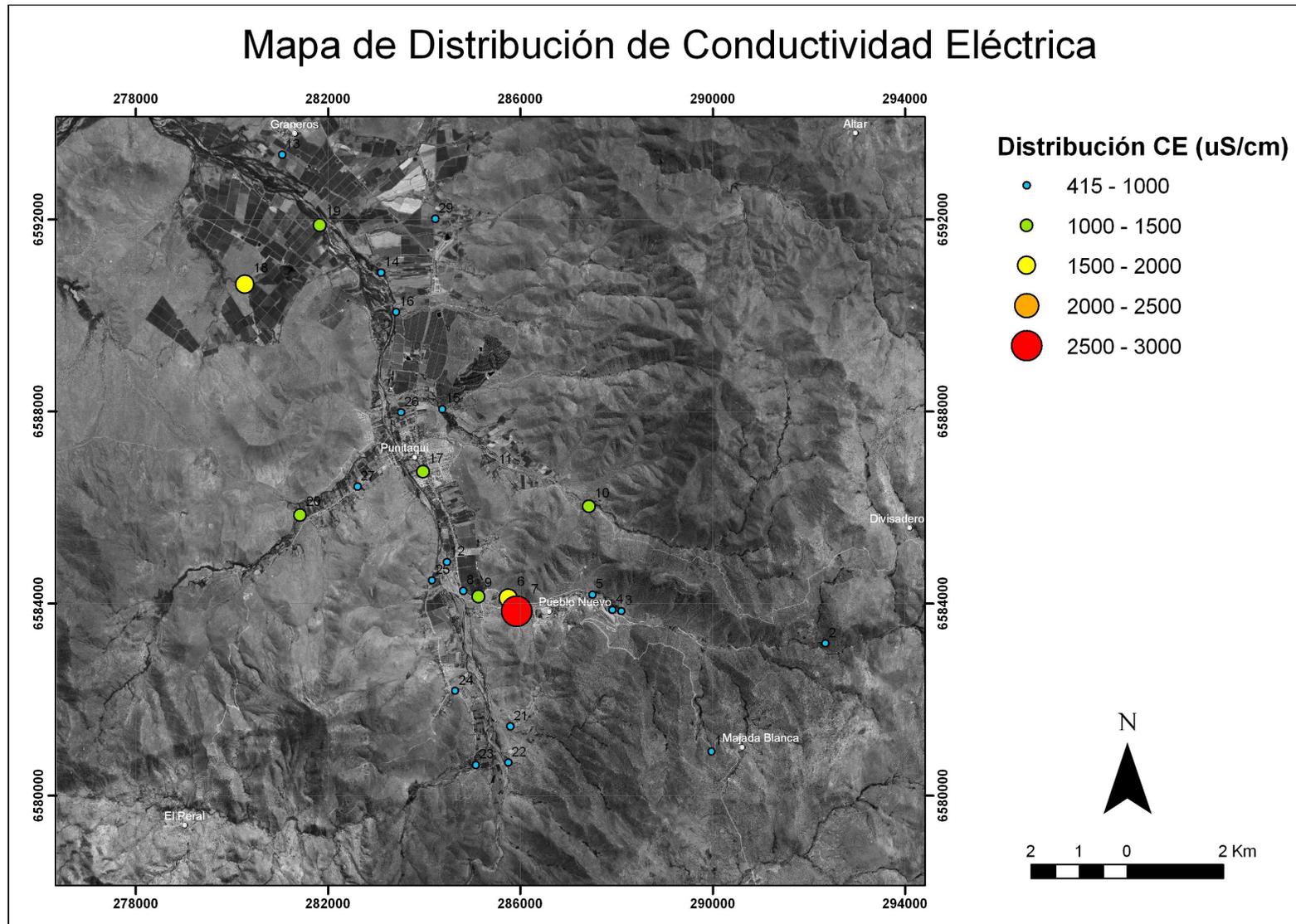


Figura 6.6. Mapa de distribución de CE para el área estudiada.

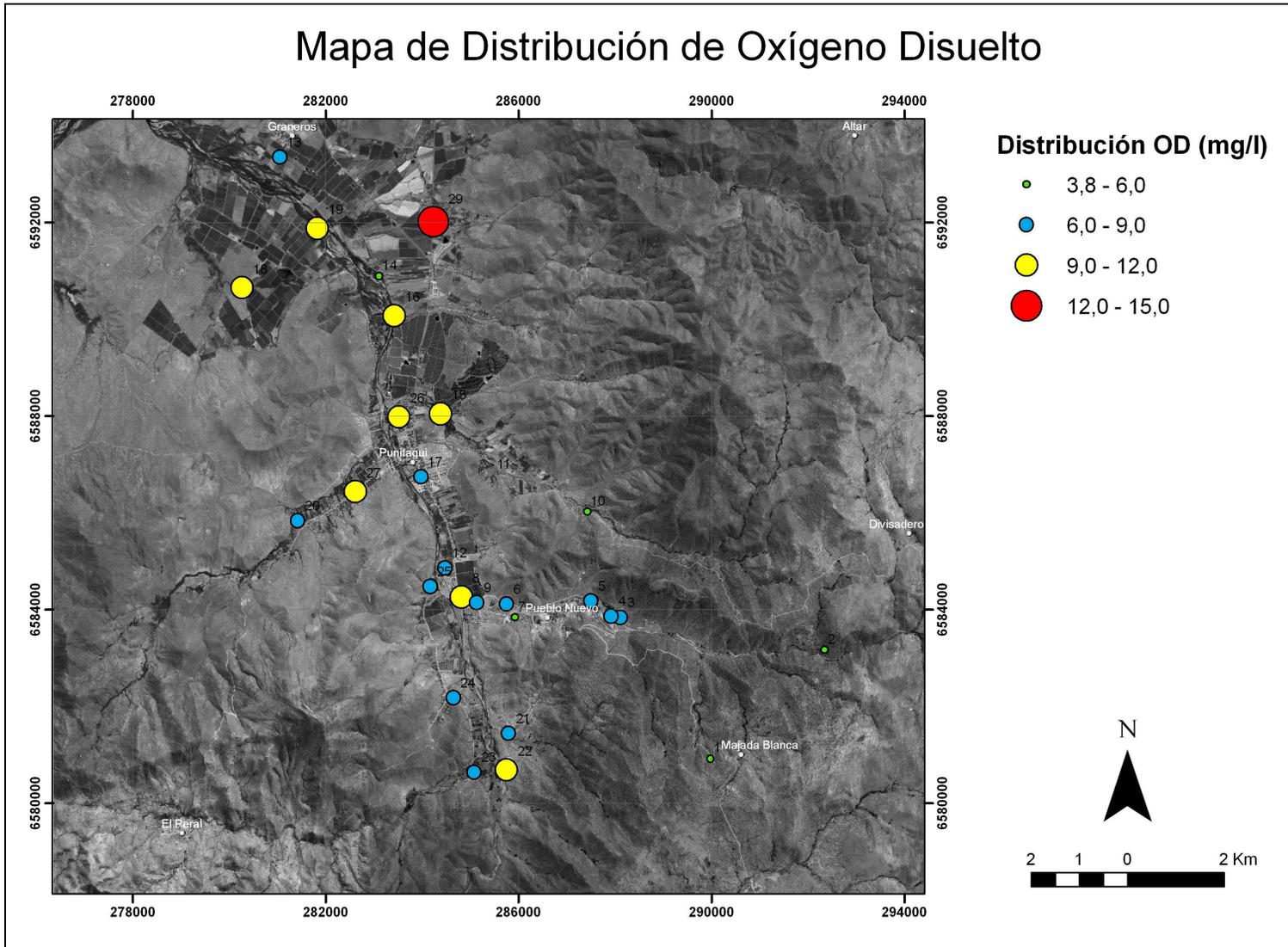


Figura 6.7. Mapa de distribución de OD para el área estudiada.

6.2.4 Elementos Traza o Metales Disueltos.

De los 16 elementos traza estudiados, 10 no superan el límite de detección del laboratorio, indicados en la Tabla 5.3. Estos elementos corresponden a Ag, Al, B, Cd, Co, Fe, Mo, Ni, Pb y Se. De los 6 elementos restantes, sólo el arsénico y zinc presentan todas las muestras sobre el límite de detección, mientras que los otros 4 (Cr, Cu, Hg y Mn) sólo presentan algunas muestras sobre dicho límite. La Tabla 6.3 muestra las cantidades medidas para estos 6 elementos mencionados.

Tabla 6.3. Elementos traza con muestras sobre el límite de detección (en negrita).

Nº Pozo	Elementos Traza (mg/l)					
	As	Cr	Cu	Hg	Mn	Zn
1	0,002	<0,01	<0,01	<0,001	<0,01	0,01
2	0,001	<0,01	<0,01	<0,001	<0,01	0,02
3	0,002	<0,01	<0,01	<0,001	<0,01	0,03
4	0,001	<0,01	<0,01	<0,001	<0,01	0,03
5	0,001	<0,01	<0,01	<0,001	<0,01	0,03
6	0,001	0,01	<0,01	0,001	<0,01	0,01
7	0,001	<0,01	<0,01	<0,001	<0,01	0,07
8	0,001	<0,01	<0,01	<0,001	<0,01	0,01
9	0,001	<0,01	<0,01	<0,001	<0,01	0,02
10	0,004	0,01	<0,01	<0,001	0,02	0,01
11	0,001	0,01	<0,01	<0,001	<0,01	0,01
12	0,002	0,01	<0,01	<0,001	<0,01	0,01
13	0,002	0,01	<0,01	<0,001	<0,01	0,01
14	0,002	<0,01	<0,01	<0,001	<0,01	0,01
15	0,002	0,01	<0,01	<0,001	<0,01	0,01
16	0,003	0,01	<0,01	<0,001	<0,01	0,01
17	0,002	<0,01	0,01	<0,001	<0,01	0,04
18	0,002	0,01	<0,01	<0,001	<0,01	0,02
19	0,001	<0,01	0,01	<0,001	<0,01	0,02
20	0,002	<0,01	<0,01	<0,001	<0,01	0,01
21	0,004	<0,01	<0,01	<0,001	<0,01	0,02
22	0,004	<0,01	<0,01	<0,001	<0,01	0,01
23	0,001	<0,01	<0,01	<0,001	<0,01	0,01
24	0,002	<0,01	<0,01	<0,001	<0,01	0,02
25	0,003	<0,01	<0,01	<0,001	<0,01	0,03
26	0,003	<0,01	<0,01	<0,001	<0,01	0,01
27	0,002	0,01	<0,01	<0,001	<0,01	0,01
29	0,005	0,01	<0,01	<0,001	<0,01	0,01

6.3 Comparación con las normas de agua chilenas

Se realizaron comparaciones de las químicas de agua obtenidas con las normas para agua chilenas, tanto la norma NCh. 409 para agua potable del año 2005, como la norma NCh. 1333 para riego, del año 1978. En la Tabla 6.4 se detallan los elementos considerados, y las concentraciones máximas permitidas para cada norma.

Tabla 6.4. Normas chilenas para agua potable y para riego.

Parámetro	Norma NCh 409 de agua potable límite máximo (ppm)	Norma NCh 1333 de riego límite máximo (ppm)
Ag	-	0,2
Al	-	5
As	0,01	0,05
B	-	0,75
Ba	-	4
Be	-	0,1
Cd	0,01	0,01
Cl	400	200
CN	0,05	0,2
Co	-	0,05
Cr	0,05	0,1
Cu	2	0,2
F	1,5	1
Fe	0,3	5
Hg	0,001	0,001
Li	-	2,5
Mg	125	-
Mn	0,1	0,2
Mo	-	0,01
Na (%)	-	35
Ni	-	0,2
NH3	1,5	-
NO ₃	50	10
NO ₂	0,05	1
Pb	0,05	5
Se	0,01	0,02
V	-	0,1
Zn	3	2
ph	6,5 - 8,5	5,5 - 9,0
SO ₄	500	250
TDS	1500	-

6.3.1 Norma NCh. 409 /Of. 84 de calidad de agua potable.

En la norma chilena NCh 409, original de 1984 y modificada en el año 2005, se incluyen cinco tipos de parámetros para evaluar la calidad de las aguas para su uso potable:

1. Tipo I: Parámetros microbiológicos y de turbiedad
2. Tipo II: Elementos o sustancias químicas de importancia para la salud
3. Tipo III: Elementos radioactivos
4. Tipo IV: Parámetros relativos a las características organolépticas
5. Tipo V: Parámetros de desinfección

Sin embargo, para efectos de este trabajo sólo se toman en consideración el tipo II y ciertos parámetros del tipo IV, pues ellos dan cuenta de la presencia de metales y otros términos relacionados con la geología del lugar. En el punto 3.1 del Anexo 3 se adjuntan todas las tablas comparativas realizadas entre los datos químicos de las aguas estudiadas con la norma NCh. 409. En total se estudiaron 17 parámetros de los 20 estipulados en la norma, sólo CN, F y NH₃ no fueron estudiados (Tabla 6.4).

En el punto anterior se determinó una nula o escasa presencia de metales disueltos en las aguas muestreadas, por lo que todos ellos se encuentran bajo el límite máximo que establece esta norma. Entre estos metales se encuentran: As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg (sólo el pozo 6 está en el límite máximo permitido), NO₃, Pb, Se y Zn.

De los pozos muestreados, son aquellos ubicados en el sector de Pueblo Nuevo (pozos 6 y 7) los que presentan más problemas con algunos parámetros de la norma. En las Tablas 6.5 y 6.6 se muestran dichos pozos con las sustancias que sobrepasan el límite máximo permitido por la norma NCh. 409. Además, en la tabla 6.7 se indican los pozos cuyo pH sobrepasa dicha norma.

Tabla 6.5. Parámetros del pozo N° 6 que sobrepasan los valores indicados por la norma NCh 409.

Pozo 6			
Parámetro	Cantidad medida	Límite máximo (mg/l)	Comparación
Hg (mg/l)	0,001	0,001	En el límite
SO ₄ ⁻² (mg/l)	600,0	500	Alto
pH	8,5	8,5	En el límite

Tabla 6.6. Parámetros del pozo N° 7 que sobrepasan los valores indicados por la norma NCh 409.

Pozo 7			
Parámetro	Cantidad medida	Límite máximo (mg/l)	Comparación
Mg (mg/l)	128,6	125	Alto
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	1550,0	500	Muy Alto
pH	8,5	8,5	En el límite
TDS (mg/l)	1979	1500	Alto

Tabla 6.7. Pozos con pH superior o en el límite establecido por la norma NCh 409

Pozo	pH	Límite máximo	Comparación
9	8,5	6,5 - 8,5	En el límite
17	8,7	6,5 - 8,5	Alto

6.3.2 Norma NCh. 1333 /Of. 78 para riego.

La actual Norma Chilena de Calidad de Agua para su uso en Riego, Of. 78, modificada en 1987, "Requisitos de Calidad del Agua para diferentes usos. Requisitos de Agua para Riego", al igual que su símil de agua potable, incluye numerosos parámetros. Sin embargo, para efectos de este estudio sólo se han analizado algunos de ellos, relacionados a la presencia de metales disueltos en el agua.

En el Anexo 3.2 se adjuntan las tablas comparativas de esta norma con los resultados obtenidos de los análisis químicos de las aguas estudiadas. En total se estudiaron 22 de los 27 parámetros establecidos por la norma (Tabla 6.4)

Nuevamente destaca en este análisis la nula presencia de metales disueltos, todos bajo el límite máximo establecido por la norma. Al igual que para el agua potable, el pozo 6 alcanza la concentración máxima permitida para Hg, mientras que el pozo 17, al centro de la localidad de Punitaqui alcanza valores por sobre la norma para los nitratos (Tabla 6.8).

La Norma NCh. 1333 permite una cantidad menor de SO₄ que la norma para agua potable presentada anteriormente (de hecho permite la mitad del valor), por lo que además de los pozos 6 y 7, superan el valor máximo permitido los pozos 8 y 9 (Tabla 6.9).

Tabla 6.8. Parámetros del pozo N° 17 que sobrepasan los valores indicados por la norma NCh 409.

Pozo 17			
Parámetro	Cantidad medida	Límite máximo (mg/l)	Comparación
N(NO ₃ ⁻) (mg/l)	12,994	10	Alto

Tabla 6.9. Pozos con valores de SO₄ superior al establecido por la norma NCh 409.

Pozo	SO ₄ ⁻² (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
6	600,0	250	Muy Alto
7	1550,0	250	Muy Alto
9	275,0	250	Alto

7. DISCUSIONES

7.1 Evolución de las aguas y detección de anomalías

La relación entre la elevación de los pozos muestreados (metros sobre el nivel del mar) con el nivel freático de cada uno, sugiere que la dirección de los flujos subterráneos es SSE- NW (Fig. 7.1), siguiendo así el mismo sentido que siguen las escorrentías superficiales correspondientes al Estero Punitaqui, las que finalmente desembocan en el Río Limarí.

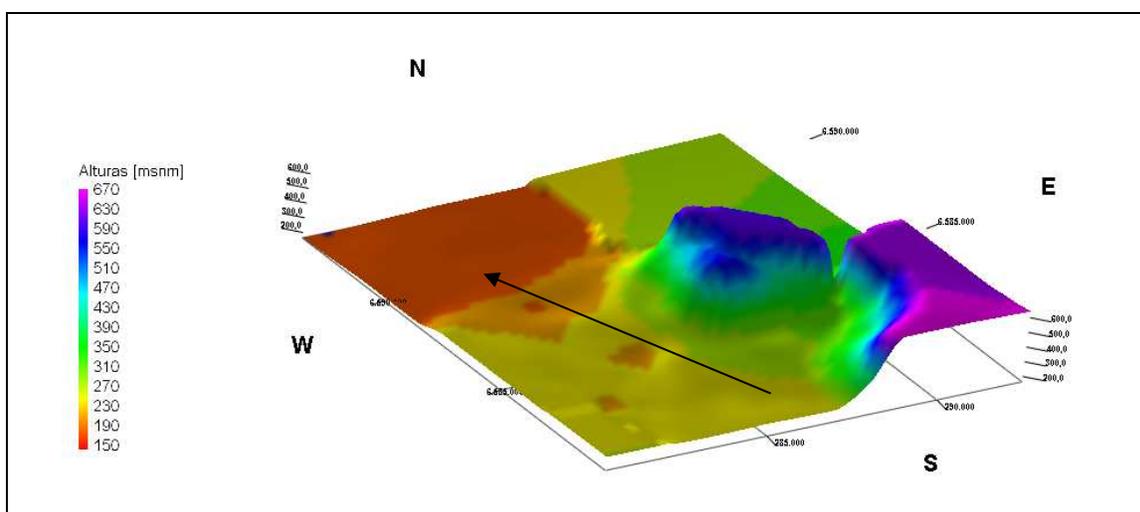


Figura 7.1. Dirección general de flujos subterráneos

Luego, los pozos ubicados en las zonas topográficamente altas (pozos 1 y 2), junto a aquellos que se encuentran aguas arriba de las zonas con actividad minera (pozos 3, 4, 5, 23 y 24) se consideran pozos con aguas al “inicio” de la evolución química de éstas, mientras que los pozos ubicados en la zona topográficamente baja, al NW de la zona de estudio (pozos 13 y 14), se consideran pozos al “final” de la evolución química de las aguas del acuífero subsuperficial. Esto concuerda con que la principal área de recarga del acuífero sean las zonas topográficamente altas ubicadas al E de la zona de estudio (Ingeniería y Geología Dos Ltda., 1995). Como todos los pozos nombrados son de composición bicarbonatada y cálcica a sódica, se infiere que el acuífero contiene aguas infiltradas recientemente y de circulación local, con poco tiempo de interacción con las rocas circundantes.

La zona inmediatamente aguas abajo de la mina Los Mantos, en el sector de Pueblo Nuevo, de composición sulfatada cálcica y con una cantidad de sales que sobrepasan notablemente a las concentraciones de los demás pozos estudiados, es considerada una zona anómala respecto de las zonas de recarga de aguas arriba. Esto último se aprecia mejor con el diagrama de Schoeller (1964), indicado en la Figura 7.2.

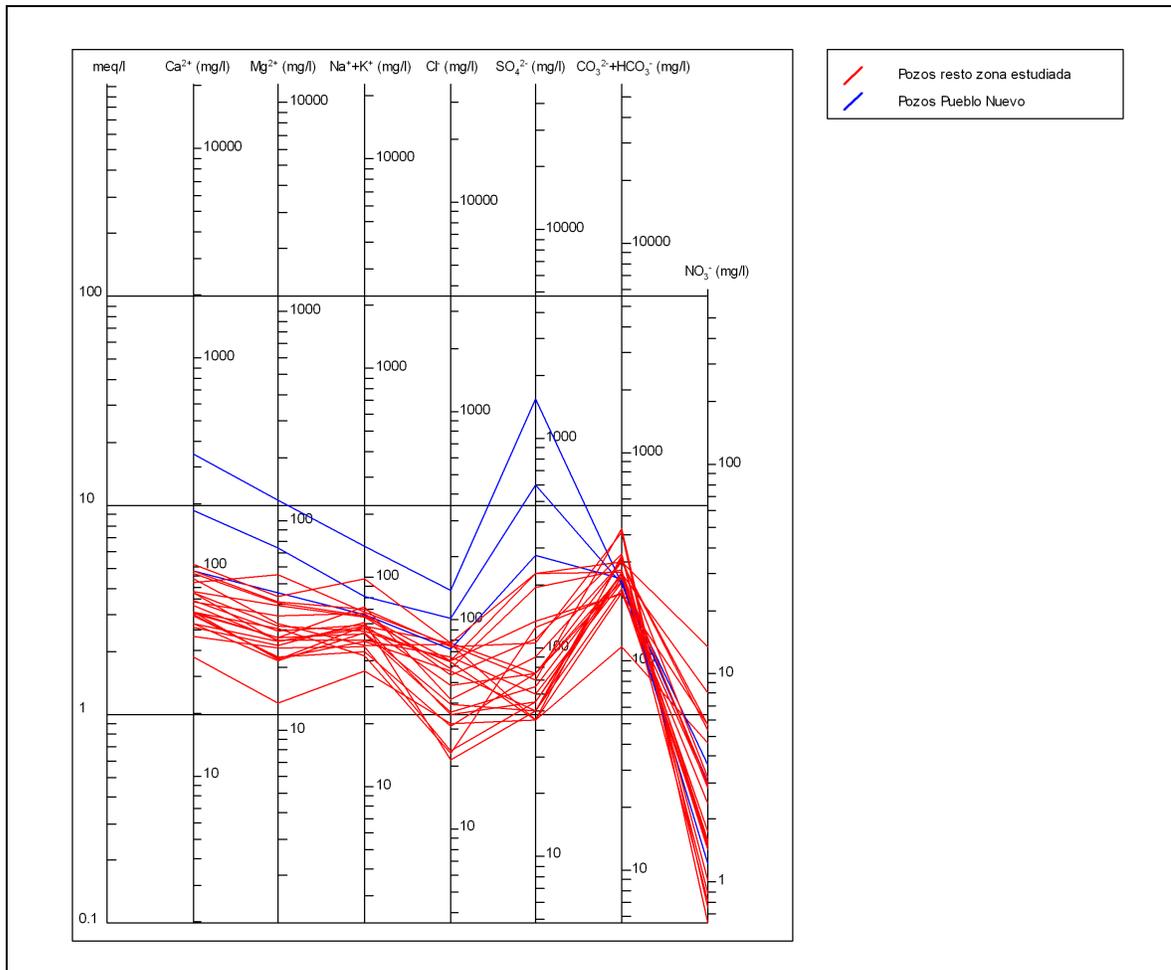


Figura 7.2. Diagrama de Schoeller para la zona de estudio.

Notar que las líneas en azul, correspondientes a pozos del sector de Pueblo Nuevo, presentan concentraciones muy superiores en casi todos los cationes y aniones mayores estudiados, exceptuando a los bicarbonatos.

7.2 Diagramas de Correlación

Los diagramas de correlación presentados en el punto 6.2.2, muestran que las concentraciones de sulfatos y sales (Na + Cl) son directamente proporcionales a las concentraciones calculadas de TDS. Por lo tanto se hace improbable la precipitación de minerales a partir de sulfatos (p. ej. Yeso), como sí ocurre en algunas zonas del norte de Chile, dentro de un clima hiperárido (Reich et al, 2008).

Sin embargo, del diagrama de Schoeller mostrado anteriormente se infiere que los altos valores de TDS calculados son principalmente por las altas concentraciones de sulfatos en las aguas.

7.3 Origen y Causas de anomalías en las aguas

De acuerdo a los puntos anteriores, la zona con anomalías químicas respecto del resto del área se ubica inmediatamente aguas abajo de la Mina Los Mantos, en el sector de Pueblo Nuevo. Las anomalías se refieren a la gran cantidad de sales que poseen las muestras de los pozos en aquella localidad, las cuales corresponden principalmente a sulfatos, probablemente con su origen en la oxidación de sulfuros existentes en la zona de falla Los Mantos. De esto último se puede inferir que la anómala concentración de sulfatos puede tener dos orígenes:

- Causas Naturales: debido a que la zona de falla, con rocas muy fracturadas, es un área donde ocurre una gran infiltración de aguas meteóricas que podrían oxidar a los sulfuros del yacimiento existente.
- Causas Antrópicas: debido a que actualmente la zona es explotada industrialmente por la Compañía Minera Punitaqui SCM, y los sulfatos existentes sean por la oxidación de la gran cantidad de sulfuros expuestos al ambiente subaéreo en el proceso de extracción realizado por la minera.

Las causas naturales son innegables. Al existir un yacimiento en la zona lo más probable es que aporte algún grado de contaminación, la que es acelerada por los procesos mineros existentes. Si bien no se puede determinar el grado de contaminación que aporta cada una de las fuentes contaminantes con los datos químicos que se tienen, sí se pueden hacer análisis básicos de manera indirecta. La mina El Delirio, ubicada a menos de 1 km al SW de la Mina Los Mantos y en medio de la zona de falla Los Mantos al igual que ésta, no es explotada industrialmente desde 1998 (Higueras et al., 2004), por lo que sus botaderos de estériles son

relativamente antiguos. Las aguas de los pozos ubicados inmediatamente aguas abajo de esta mina (pozos 21, 22 y 24), si bien son del tipo bicarbonatada sulfatada, poseen una cantidad mucho menor de sulfatos que los pozos ubicados aguas abajo de la mina Los Mantos. Esto quiere decir que aún estando en medio de la zona de falla Los Mantos, posee una relativamente baja cantidad de sulfatos.

Por lo tanto, la anómala concentración de sulfatos en el sector de Pueblo Nuevo respecto del resto de la zona de estudio podría tener un origen natural o antrópico, siendo un proceso acelerado por la actividad minera aguas arriba de éste. Consecuentemente, el diagrama de Piper presentado en la Figura 6.1, se puede subdividir en 3 zonas, como muestra la Figura 7.3

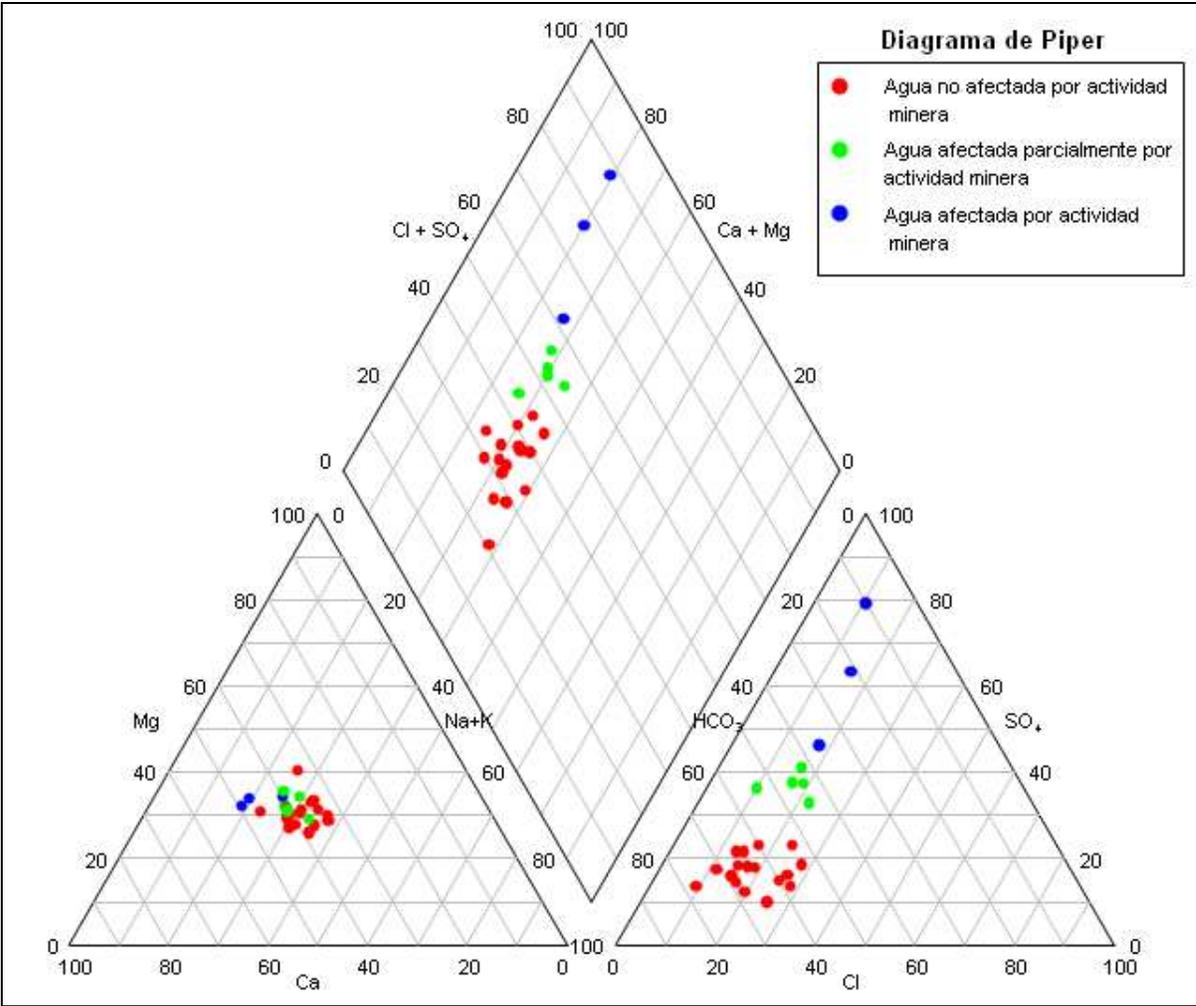
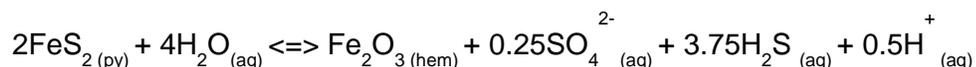


Figura 7.3. Diagrama de Piper zonado según el origen de los contaminantes.

7.4 Análisis de pH y Oxígeno Disuelto

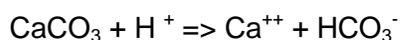
El pH levemente alcalino a neutro observado en casi toda el área de estudio es propia de aguas en equilibrio con rocas intrusivas del Batolito Illapel, litología dominante en toda la cuenca.

Las zonas con un pH anómalo respecto al resto del área de estudio, como el pozo 21 que posee un pH levemente ácido y con una gran cantidad de sulfatos, se debe justamente al origen de éstos mediante el proceso de oxidación de sulfuros, el que además acidifica el agua. Como ejemplo se dispone de la siguiente reacción:



Así, la natural oxidación de sulfuros genera sulfatos y acidifica el agua. Luego, para los pozos ubicados en Pueblo Nuevo, aguas abajo de la mina Los Mantos, debe ocurrir algún proceso antrópico que además de generar una gran cantidad de sulfatos por oxidación de sulfuros, alcaliniza las aguas.

Una explicación sería la utilización de cal para neutralizar las aguas. Esta es una práctica común utilizada para alcalinizar el drenaje ácido generado en los procesos de lixiviación, los cuales al filtrarse acidifican el suelo y consecuentemente lo inhabilitan para su uso en agricultura. La reacción que genera la introducción de cal (caliza molida), es la siguiente:



Esto explicaría el pH notablemente alcalino y la gran cantidad de sulfatos presentes en los pozos de Pueblo Nuevo, además de las altísimas concentraciones de Ca en estos pozos (Fig. 7.2).

La segunda explicación posible para la alta alcalinidad medida en dichas aguas reside en los procesos mineros de flotación, comúnmente utilizados para separar Cu del resto de los minerales presentes en el yacimiento. Para este proceso, realizado en piscinas de flotación, se requiere agua notablemente alcalina (pH sobre 10; Taggart, 1945). Si estas aguas son infiltradas sin un tratamiento previo podrían alcalinizar las aguas del acuífero donde se infiltran.

En el mismo sector de Pueblo Nuevo, dada la gran cantidad de sulfatos medidos en el agua se infiere un medio sólido muy oxidado, y consecuentemente una fase líquida reducida, lo que concuerda con la baja cantidad de oxígeno disuelto medido en el pozo N°7. Esta reducción de

las aguas subterráneas hace este sector potencialmente peligroso, ya que los metales pesados que están en su especie más estable en estado sólido (especie oxidada), podrán solubilizarse y tenderán a su especie más peligrosa para la salud humana (especie reducida). Tal es el caso del As, que de su especie sólida (Arsenato), muy estable e inofensiva, al diluirse tiende a su especie más peligrosa, Arsenito.

7.5 Elementos traza o Metales Disueltos

La nula o escasa presencia de metales disueltos en las aguas subterráneas de la cuenca de Punitaqui es concordante con datos de trabajos anteriores, donde se establece que estos metales (especialmente Cu y Hg) se encuentran en concentraciones altísimas sólo en suelos y sedimentos aguas abajo de la Mina Los Mantos, pero son inexistentes en las aguas superficiales (Higueras et al., 2004). Por lo tanto, se puede establecer una relación entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas en la cuenca del Estero Punitaqui.

El transporte de metales depende de la condiciones redox y del pH. El hecho de que hayan altas concentraciones de metales en sedimentos y bajas en el agua indican que las condiciones existentes no son las apropiadas para el transporte de metales, concordante con una fase líquida reducida, un ambiente oxidado, y un pH alcalino medido en las aguas subterráneas del sector de Pueblo Nuevo.

7.6 Elementos sobre las normas de aguas chilenas

Los únicos elementos o sustancias que se encuentran por sobre la norma Nch. 409 para agua potable corresponden a los sulfatos (SO_4^{2-}) y al magnesio (Mg^{++}), los cuales hacen que el TDS también se encuentre sobre dicha norma en un pozo (pozo 7). De estas sustancias, son los sulfatos los que más se alejan del límite máximo establecido por la norma, llegando incluso a triplicar este valor en el pozo N° 7.

Con respecto a la norma chilena de riego, NCh. 1333, los pozos del sector de Pueblo Nuevo presentan valores por sobre la norma para los sulfatos, llegando a valores extremadamente altos relativo al límite máximo establecida por la norma. Además, el pozo 17, ubicado en pleno centro de Punitaqui, posee valores de nitratos parcialmente elevados por sobre la norma.

Cabe señalar que estas sustancias sólo afectan a los pozos ubicados en Pueblo Nuevo, lo que indica una dispersión limitada de los contaminantes, siendo este dato concordante con lo establecido por Higuera et al (2004 y 2005), cuyos datos químicos de suelos, sedimentos y atmósfera indican una dispersión de contaminantes no mayor a los 2 km aguas abajo de la mina Los Mantos.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

Mediante un muestreo geoquímico realizado en aguas pertenecientes al acuífero subsuperficial de la cuenca del Estero Punitaqui, se han detectado zonas con distintas características físico químicas.

Se ha logrado determinar una zona con claras evidencias de una contaminación (natural o antrópica) por sustancias químicas, especialmente sulfatos (SO_4^-) y algunos elementos mayores como el magnesio (Mg^{++}). Esta zona corresponde al sector donde se ubica la localidad de Pueblo Nuevo, 2 km al SE del centro de Punitaqui, e inmediatamente aguas abajo de la mina Los Mantos, operada por la Compañía Minera Los Mantos de Punitaqui SCM. Las aguas asociadas a estos pozos son del tipo sulfatadas cálcicas, a diferencia del resto de los pozos estudiados en la cuenca, los que son del tipo bicarbonatados calco – sódicos, y algunos pozos parcialmente contaminados, cuyas aguas son del tipo bicarbonatadas sulfatadas calco-sódicas. Los tipos de agua dan cuenta de un acuífero superficial, con infiltración relativamente reciente.

Con los datos químicos disponibles, no es posible discernir si el origen de estas anomalías es por causas naturales, antrópicas, o ambas. Dada la presencia de los yacimientos de mercurio, oro y cobre, es innegable una contaminación natural, la que podría estar siendo acelerada por las faenas de la minera, exponiendo al ambiente subaéreo los sulfatos existentes en el yacimiento. Además, la actividad minera tiene responsabilidad en la notablemente alta alcalinidad de las aguas subterráneas en los pozos de Pueblo Nuevo, ya sea al utilizar cal para aumentar el pH de los drenajes altamente ácidos que se generan en los procesos de lixiviación para la obtención del Cu y Au explotados actualmente, o en infiltrar aguas altamente alcalinas provenientes del proceso de flotación.

Cabe señalar que la zona químicamente anómala es sumamente acotada, afectando a las aguas sólo hasta 2 km aguas abajo de la mina Los Mantos, aproximadamente. El resto del área de estudio posee aguas de muy buena calidad, sin contaminantes de origen químico. Podría inferirse entonces una importante componente natural en la anomalía detectada, dada lo acotada de la zona contaminada.

Con respecto a los metales disueltos (As, Hg, Cu, etc), su presencia es nula o escasa en la totalidad de la zona de estudio, incluyendo el área contaminada, según la técnica analítica

utilizada. Esto se da ya que las condiciones redox y de pH no son favorables para el transporte de metales en las aguas subterráneas de la cuenca del Estero Punitaqui. Se descarta así una posible contaminación por metales pesados. Sin embargo, dichas condiciones en la zona de Pueblo Nuevo podrían ayudar a solubilizar los metales que originalmente se encuentran en su estado sólido, y pasar a su especie más reducida, nociva para la salud humana.

Finalmente, la zona de anomalía hidroquímica posee valores de sulfatos muy por sobre las normas chilenas para agua potable y para agua de riego (NCh. 409 y NCh. 1333, respectivamente), mientras que el sector central de Punitaqui posee valores de nitratos levemente por sobre la norma chilena de riego NCh. 1333, probablemente por la gran actividad agrícola existente en la zona de estudio.

8.2 Recomendaciones

Dado que el área contaminada corresponde a una zona sumamente acotada, se recomienda clausurar todos los pozos y norias que se encuentran ubicados en el sector de Pueblo Nuevo. Para la obtención de agua en dicha localidad, se recomienda la construcción de un by-pass para extraer agua *aguas arriba* de la mina Los Mantos, y llevarla por medio de tuberías hasta Pueblo Nuevo.

Si bien no es posible determinar si los contaminantes son totalmente de origen natural o antrópico, sí se puede determinar algún grado de responsabilidad de la Compañía Minera Punitaqui SCM en la contaminación de las aguas subterráneas del sector de Pueblo Nuevo. Por esto se recomienda llevar una fiscalización sobre sus métodos de control de desechos mineros, tanto en sus drenajes ácidos como en la alcalinidad del agua que se desecha del proceso de flotación. En este mismo tema, cabe destacar que gracias al trabajo en terreno que se realizó para esta memoria, se logró comprobar la existencia de pozos no inscritos (extracciones de agua no autorizadas) por parte de la minera y de la inexistencia de los estudios ambientales que la compañía debe hacer periódicamente. Los pozos mencionados fueron clausurados y la Compañía Minera Punitaqui SCM se encuentra en proceso de sanción por parte de la CONAMA.

Por otra lado, se recomienda también realizar estudios que investiguen sobre otros tipos de contaminantes que puedan influir en la calidad de las aguas subterráneas de Punitaqui. De los

posibles contaminantes, dado el carácter agrícola de la zona, se destacan aquellos de origen biológico.

Por último, como uno de los fines de este estudio era constituir una línea base para próximos trabajos, se recomienda realizar periódicamente mediciones químicas (ojalá mediciones estacionales), con el fin de detectar y controlar posibles contaminantes que puedan aparecer con el paso del tiempo.

9. REFERENCIAS

Adriasola, A. 1997. Relación entre estructura y mineralización en el distrito minero Los Mantos de Punitaqui. Memoria de Título. Departamento de Geología, Universidad de Chile. 149 p y anexos. Santiago, Chile.

Aguirre, L., Egert, E. 1965. Cuadrángulo Quebrada Marquesa, Provincia de Coquimbo. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, N° 15. 92p.

Aguirre, L., Egert, E. 1970. Cuadrángulo Lambert, Provincia de Coquimbo. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, N° 23. Santiago, Chile.

Cade-Idepe Consultoría en Ingeniería, 2004. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, "Cuenca del río Limarí". Gobierno de Chile Ministerio de Obras Públicas Dirección General de Aguas.

Corvalán, J. 1966. Fauna de las calizas del área del Reloj al sur de Ovalle. Inst. Invest. Geol., informe inédito, Santiago, Chile.

Custodio, E. 1965. Notas sobre hidroquímica. Comisaría de aguas del Pirineo Oriental y Servicio Geológico de Obras Públicas. Barcelona. 103 págs.

Custodio, E., Llamas, M.R. 1976. Hidrología Subterránea. Ed. Omega S.A, Primera Edición. Barcelona.

Gana, P. 1991. Mapa Geológico de la Cordillera de la Costa entre La Serena y Quebrada El Teniente, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Documentos de Trabajo, No 3, escala 1:100.000. Santiago.

Hem, J. 1985. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2254.

Higueras, P., Oyarzun, R., Oyarzún, J., Maturana, H., Lillo, J., Morata, D. 2004. Environmental assessment of copper-gold-mercury minino in the Andacollo and Punitaqui districts, northern Chile. Applied Geochemistry 19, 1855-1864.

Higueras, P., Oyarzun, R., Lillo, J., Oyarzún, J., Maturana, H. 2005. Atmospheric mercury data for the Coquimbo region, Chile: influence of mineral deposits and metal recovery practices. *Applied Geochemistry* 39, 7587-7596.

Ingeniería y Geología Dos Ltda., 1995. Estudio "Hidrogeología preliminar cuenca del estero Punitaqui": resumen, 10 p. Ingeniería y Geología Dos Ltda., Santiago, Chile.

Kolodijajnaia, A. 1962. Influence of the chemical composition of atmospheric precipitations on sea-littorals upon karst formation. *Int. Geological Congress, Atenas. Greek Inst. Geology and Subsurface Research, Atenas, 1964.* págs 249-255.

Levi, B., Nyström, J.O., Thiele, R., Aberg, G. 1987. Geochemical polarities in Mesozoic – Tertiary volcanic rocks from the Andes in central Chile and tectonic implications. *J. South American Geology.* 1, p. 63-74.

Matveyev, A. y Bashmakova, O. 1967. Chemical composition of atmospheric precipitation in some regions of the URSS. *Soviet Hydrology: Selected papers nº5.* págs. 480-491.

Mpodozis, C., Moscoso, R. 1988. Estilos Estructurales en el Norte Chico de Chile (28°S – 31°S), Regiones de Atacama y Coquimbo. *Revista Geológica de Chile, Vol 15, Nº2.*

MWH Montgomery Watson Harza, 2005. Estudio Hidrológico de la cuenca del Estero Los Mantos. Santiago, Chile.

Oyarzún J., Oyarzún R., Pavicic, S. 2001. Estudio prospectivo en un distrito de Cu-Au-Hg asociado a zona de cizalla: Punitaqui, Chile. *Boletín Geológico y Minero, Vol. 112, Núm. 2,* pp 75-84.

Pavicic, S. 1998. Geología distrital escala 1:10.000 del distrito minero Los Mantos de Punitaqui. Informe inédito. Proy. FONDEF, 60p., mapas y anexos.

Pineda, G. 1996. Geología del área central-norte de la provincia del Elqui, entre las coordenadas 29°45'-30° lat. Sur y 70°39'-71°05' long. Oeste. Memoria de Título, Geólogo (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología, 114 p.

Piper, A. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. *Trans. Am. Geophysics Un* 25: 914-928.

Reich, M., Palacios, C., Parada, M.A., Fehn, U., Cameron, E.M., Leybourne, M.I., Zúñiga, A. 2008. Atacamite formation by deep saline waters in copper deposits from the Atacama Desert, Chile: evidence from fluid inclusions, groundwater geochemistry, TEM, and ^{36}Cl data. *Miner Deposita* 43: 663-675 pp.

Rivano, S., Sepúlveda, P., Hervé, M., Puig, A. 1985. Geocronología K-Ar de las rocas intrusivas entre los 31°-32° LS., *Rev. Geol. Chile*, N°24, pp 63-74.

Rodier, J. 1981. *Análisis de las Aguas, Aguas Naturales, Aguas Residuales, Agua de Mar.* Ediciones Omega, Barcelona, 1059 p.

Schoeller, H. 1962. *Les eaux souterraines.* Masson, Paris. Capítulo 7, págs. 257-387.

Schoeller, H. 1964. La classification géochimique des eaux. IASH. General Assembly of Berkeley 1964. Pub 64, páginas 16-24.

Stiff, H. A. 1951. The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. *Journal of Petrology Technol.* 3: 15-17.

Taggart, A.F. 1945. *Handbook of Mineral Dressing,* John Wiley, New York, USA.

Thomas, H. 1967. *Geología de la Hoja Ovalle y Carta Geológica (1:250.000).* Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín N° 23, 58 p. Santiago, Chile.

Veit, H. 1996. Southern Westerlies durin Holocene deduced from geomorphological and pedological studies in Norte Chico, northern Chile. *Palaeogeogr. Palaeocl. Palaeoecol.* 123, 107-119.

ANEXOS

ANEXO 1

A continuación se presentan las características físico químicas de cada pozo, además de los resultados de los análisis químicos para cada muestra de agua.

Tabla A1.1 Coordenadas de los pozos y sus parámetros físico químicos

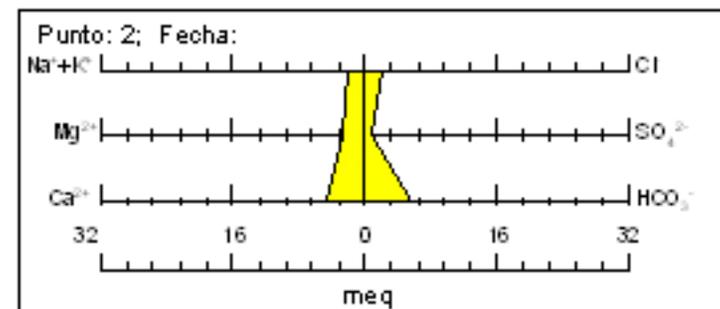
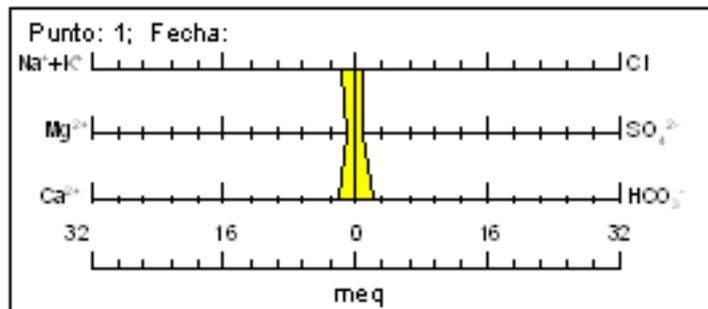
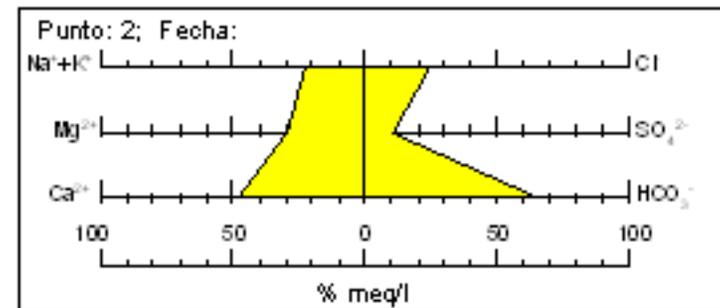
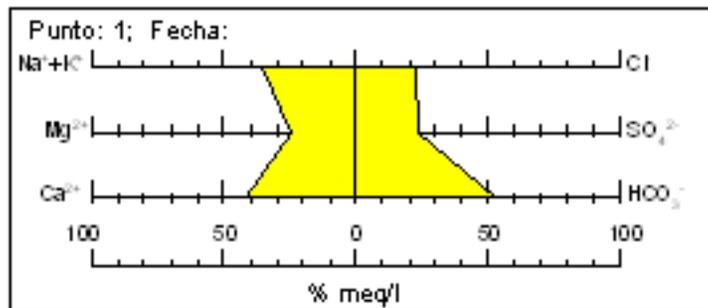
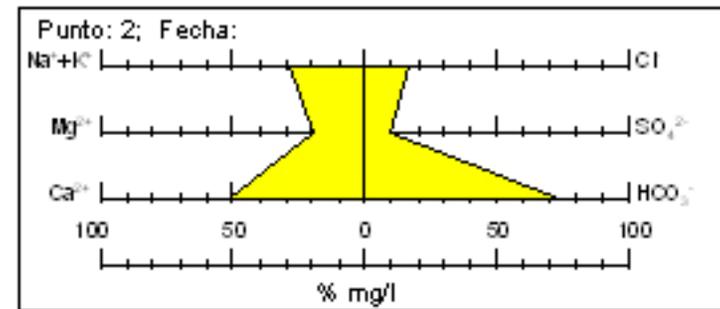
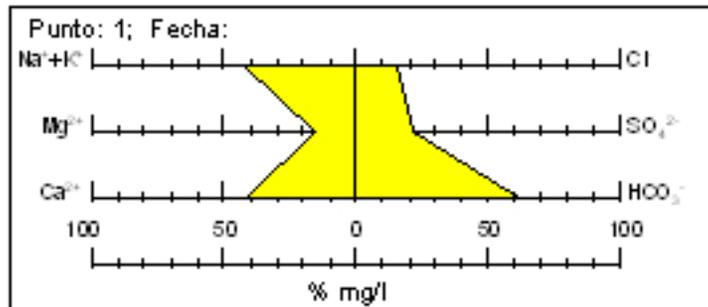
Nº Pozo	Coordenadas		Parámetros medidos en terreno				
	UTM Norte	UTM Este	ph	CE (uS/cm)	Tº (°C)	OD (mg/l)	N. Estatico (m)
1	6580928	289981	7,3	415	18,60	5,70	5,9
2	6583174	292347	7,8	819	14,40	5,90	1,3
3	6583849	288106	7,7	701	20,90	8,40	-
4	6583874	287916	7,9	640	21,40	8,25	-
5	6584188	287501	7,5	785	21,07	7,40	-
6	6584121	285747	8,5	1580	19,60	7,09	9,4
7	6583845	285918	8,5	2740	17,95	3,80	3,9
8	6584272	284810	8,2	981	19,94	9,19	5,6
9	6584153	285127	8,5	1043	20,23	7,09	6,0
10	6586024	287424	7,1	1015	15,42	5,90	3,3
11	6586861	285554	-	-	-	-	8,3
12	6584870	284469	6,8	600	19,30	8,20	6,1
13	6593354	281044	6,8	811	19,20	8,10	4,3
14	6590899	283100	7,0	877	17,60	5,13	4,3
15	6588055	284379	7,0	651	18,20	9,11	3,2
16	6590078	283418	7,1	740	20,50	10,40	4,0
17	6586747	283969	8,7	1187	17,35	7,86	5,4
18	6590655	280258	7,1	1800	18,90	10,60	8,8
19	6591890	281825	7,3	1066	19,70	10,80	11,6
20	6585849	281415	6,7	1007	17,34	8,84	2,8
21	6581443	285788	6,1	815	21,79	7,12	16,0
22	6580693	285748	7,3	652	20,16	9,17	8,4
23	6580646	285074	7,7	672	21,37	8,80	3,5
24	6582184	284642	8,3	630	18,66	8,39	9,6
25	6584488	284159	7,9	639	19,66	8,67	7,2
26	6587985	283515	7,0	838	19,75	10,73	7,7
27	6586442	282606	7,0	602	21,24	10,60	10,0
29	6592021	284227	7,3	648	22,00	13,40	25,0

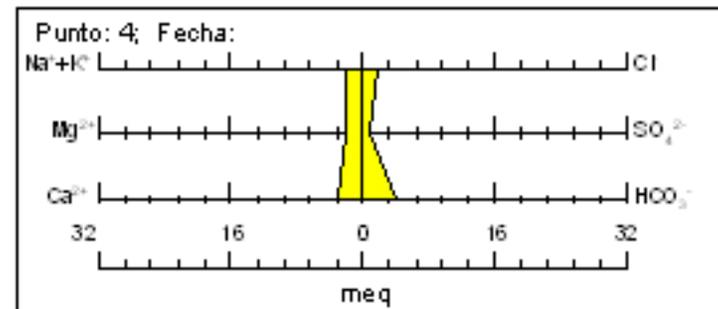
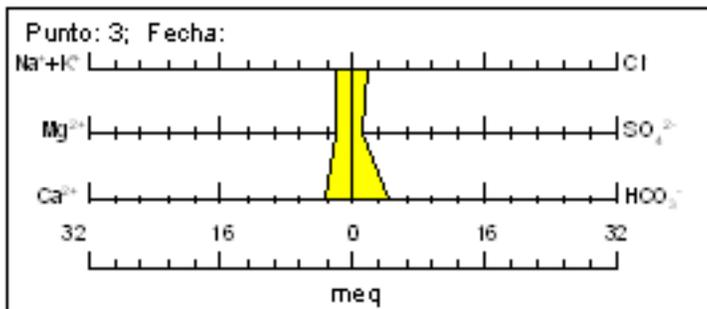
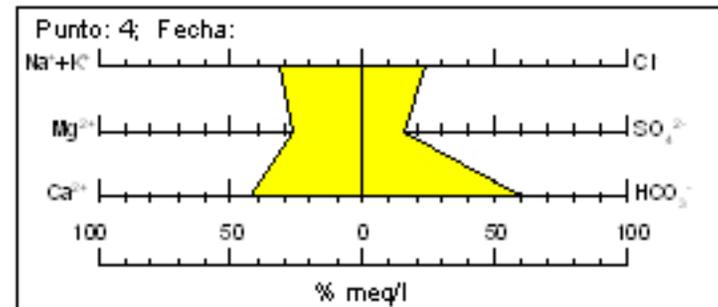
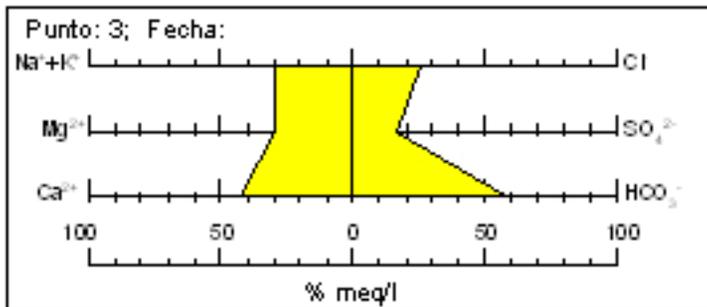
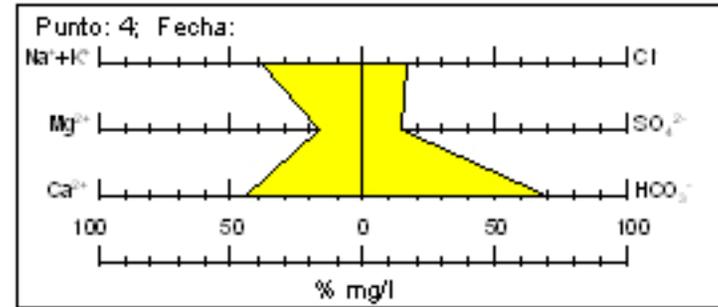
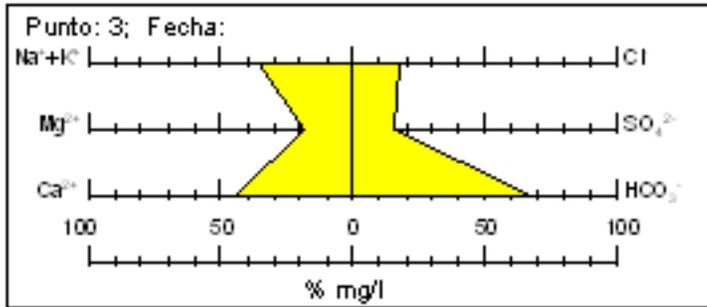
Tabla A1.2 Concentraciones de elementos mayores en cada pozo

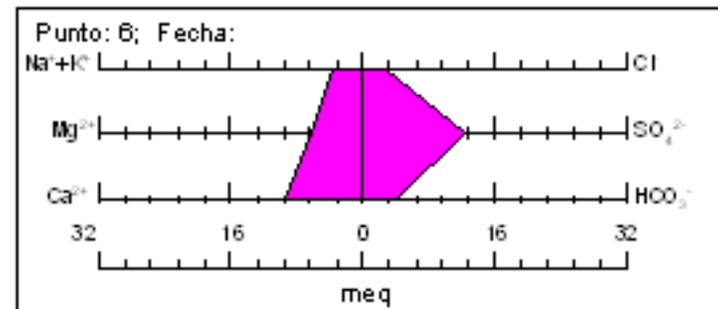
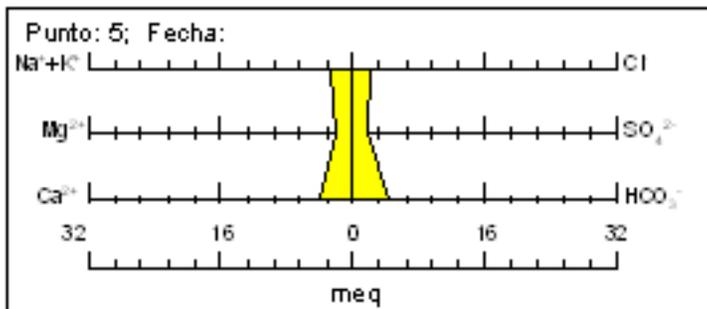
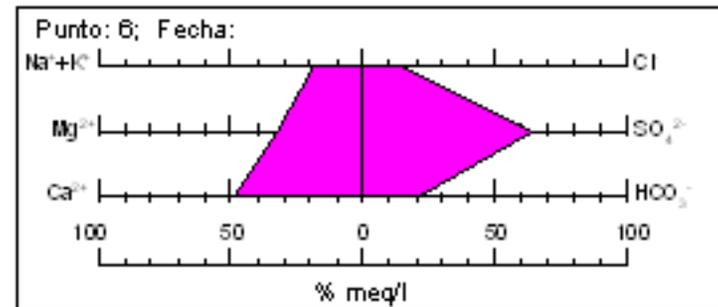
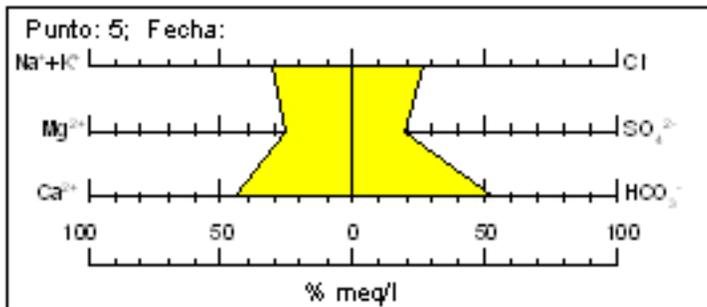
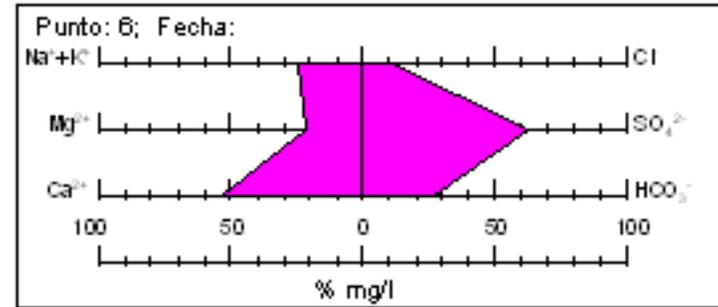
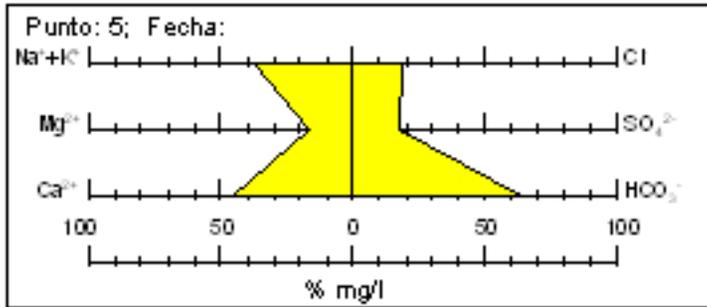
Nº Pozo	Cationes Mayores (mg/l)				Aniones Mayores (mg/l)			Nutrientes (mg/l)
	K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	SO ₄ ⁻²	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	N(NO ₃)
1	3,4	35,2	37,7	13,7	45,0	31,8	128	4,542
2	0,6	48,6	89,6	33,2	45,0	76,7	350	0,867
3	2,4	50,6	66,7	27,5	60,0	66,8	261	1,690
4	2,3	49,7	60,4	22,5	50,0	57,4	244	1,453
5	3,6	58,8	76,4	26,9	75,0	78,3	266	1,491
6	3,8	81,8	188,1	76,0	600,0	101,5	256	3,546
7	5,4	142,6	354,1	128,6	1550,0	140,0	257	2,962
8	1,9	67,3	93,8	41,4	225,0	63,5	290	1,530
9	1,7	67,7	97,5	46,2	275,0	72,5	271	1,201
10	3,7	70,8	97,5	42,0	105,0	75,0	454	0,109
11	2,4	55,1	54,3	22,0	50,0	39,3	293	2,745
12	3,1	65,3	77,6	40,3	195,0	59,0	299	0,788
13	2,8	72,9	61,0	28,4	90,0	42,1	329	5,194
14	4,4	67,0	69,3	36,0	110,0	55,0	354	0,997
15	3,1	43,7	59,4	23,0	75,0	31,0	281	1,390
16	3,6	53,9	62,1	28,4	65,0	36,4	287	7,879
17	5,5	98,7	103,6	44,5	225,0	77,9	329	12,994
18	9,6	19,0	143,7	54,8	250,0	3217,6	384	3,673
19	3,0	22,2	64,5	37,4	155,0	95,9	336	4,463
20	1,7	69,5	85,8	56,5	70,0	75,3	472	0,739
21	3,5	55,7	75,8	31,9	135,0	63,6	231	5,490
22	4,6	56,4	54,3	27,1	45,0	62,9	233	2,824
23	6,0	50,6	59,5	34,0	350,0	43,5	281	1,600
24	2,3	42,4	62,0	31,3	125,0	23,1	232	2,330
25	2,1	59,8	62,0	22,3	55,0	35,3	292	1,536
26	4,8	58,8	70,0	30,4	75,0	48,9	329	5,510
27	2,4	46,8	46,9	25,3	55,0	23,8	275	2,923
29	0,9	62,4	52,2	25,9	50,0	21,4	342	3,061

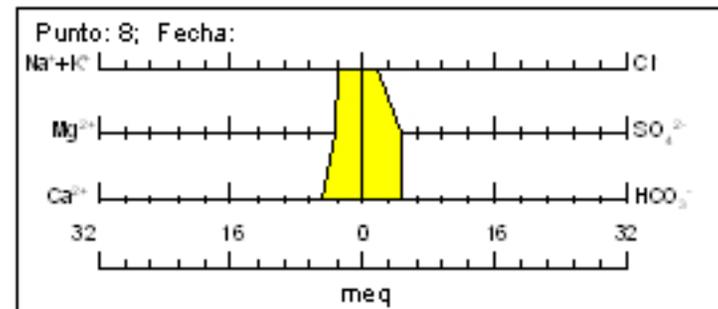
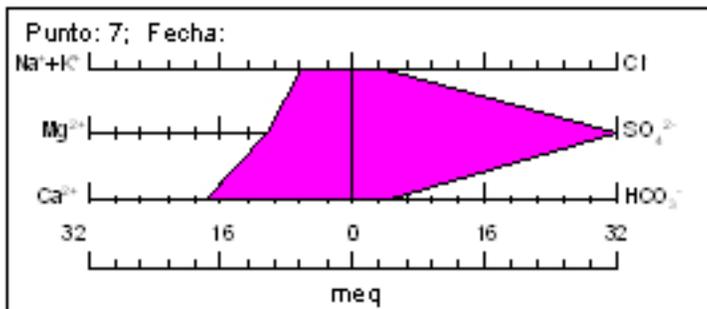
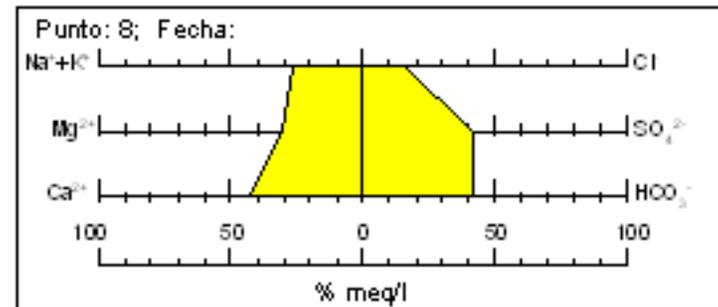
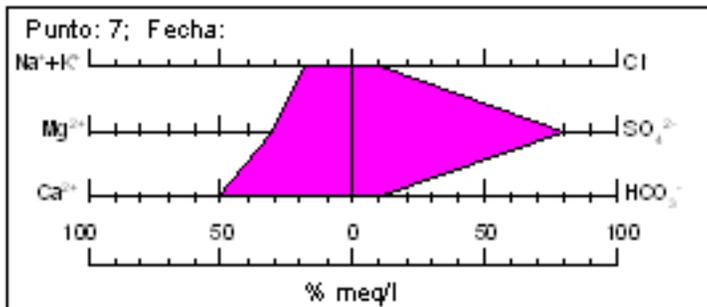
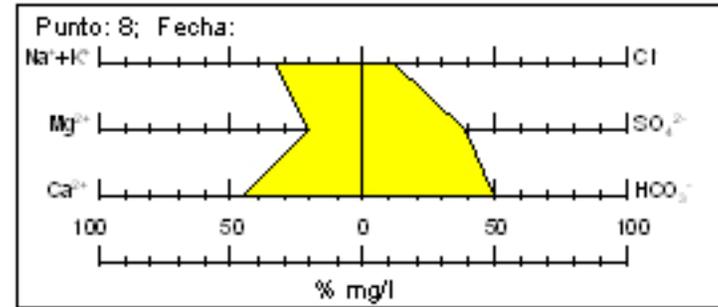
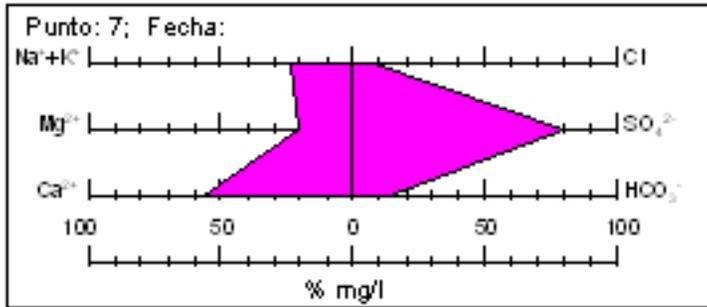
ANEXO 2

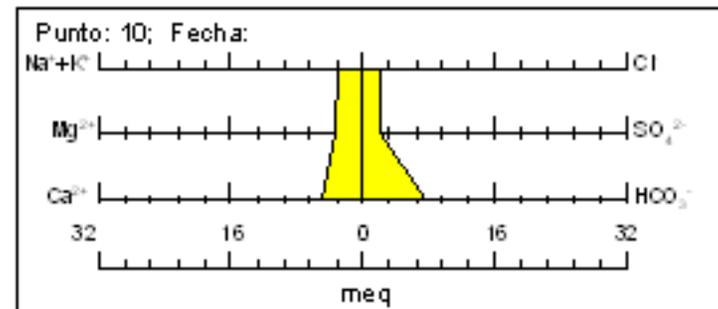
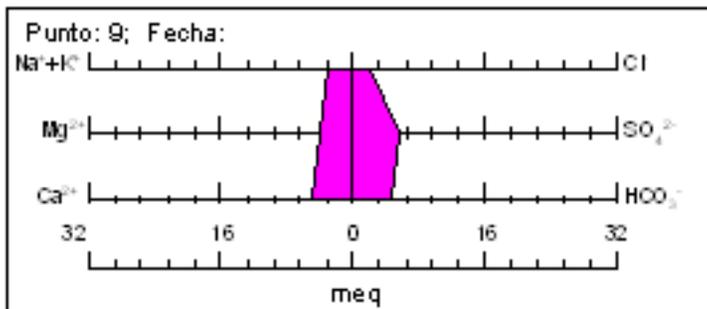
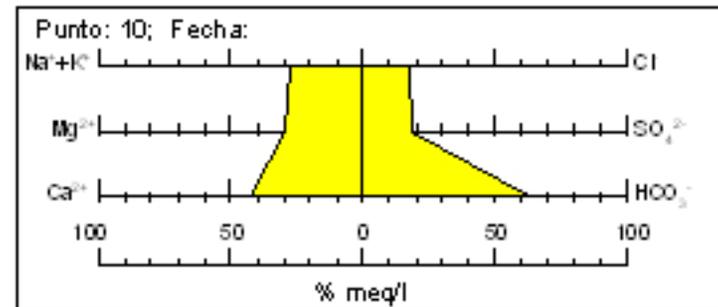
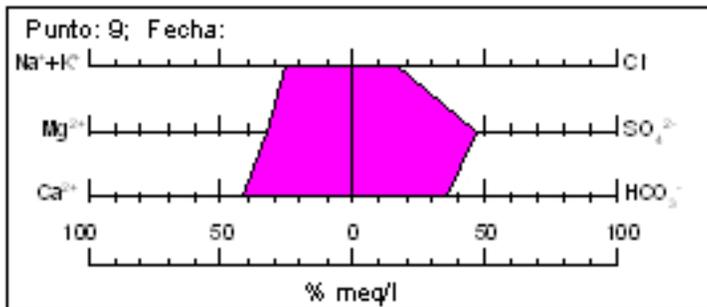
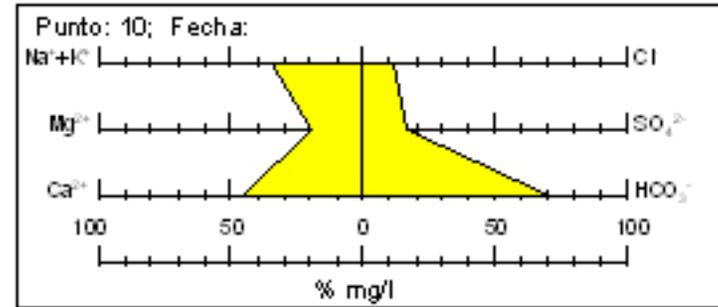
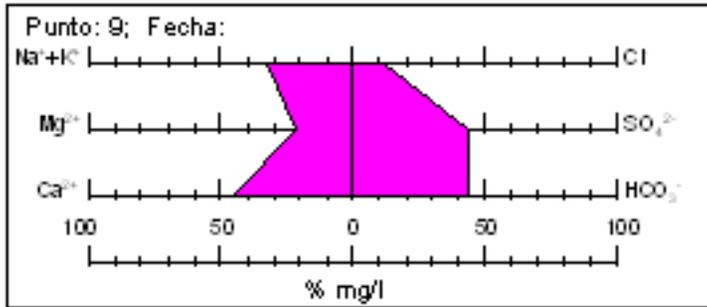
Diagramas de Stiff

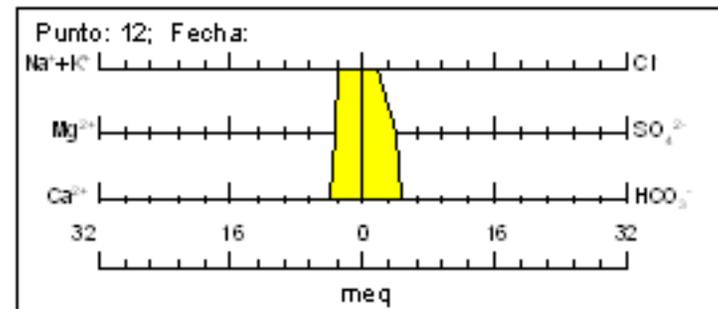
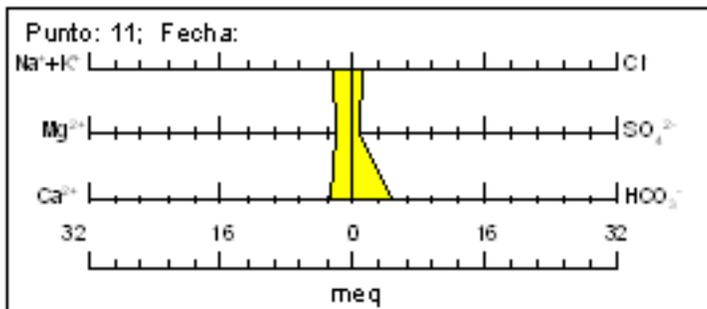
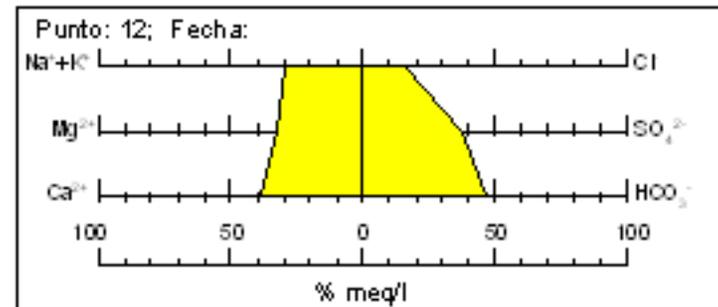
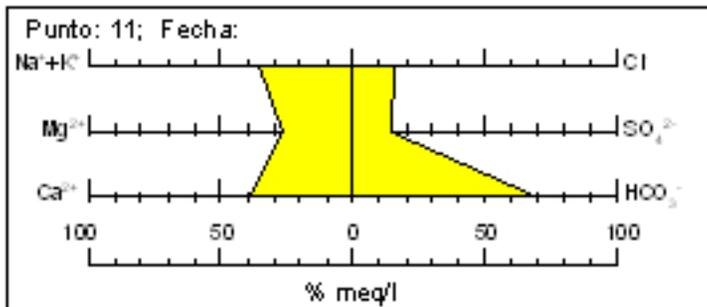
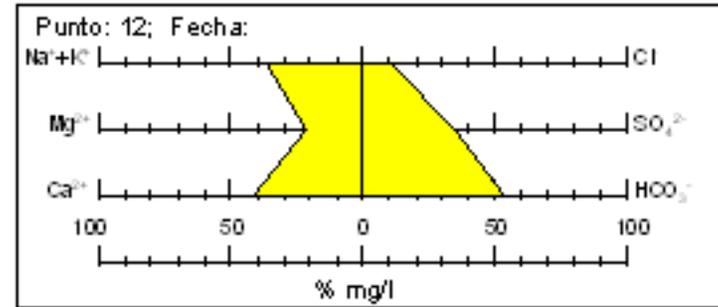
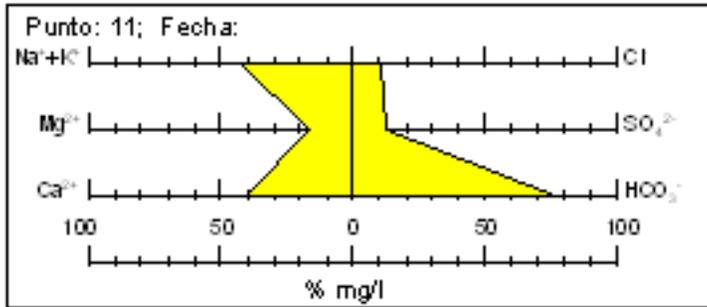


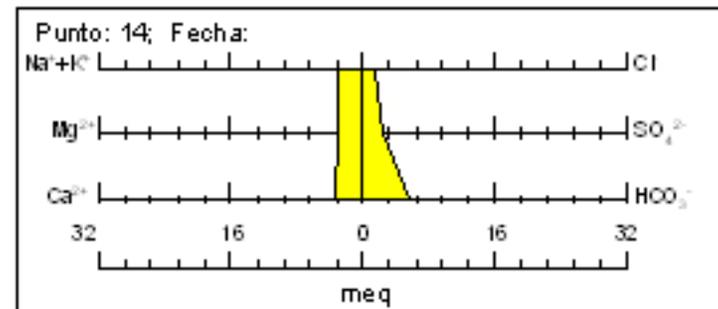
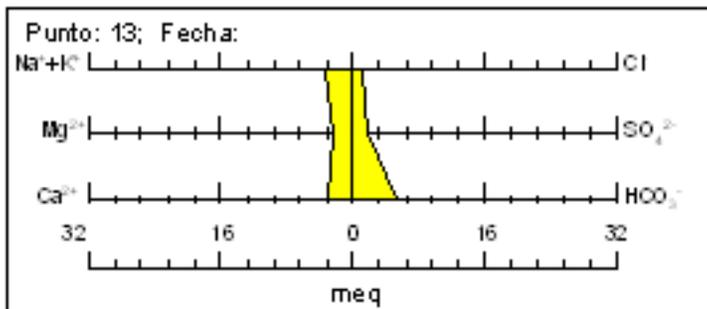
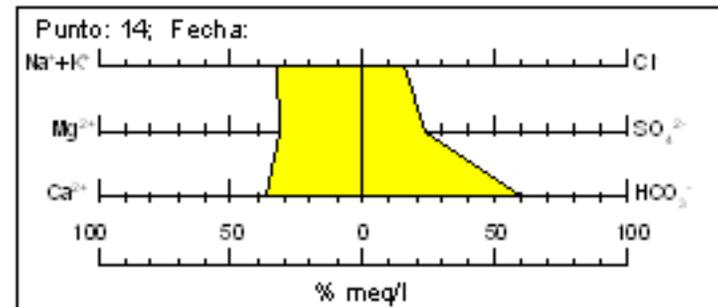
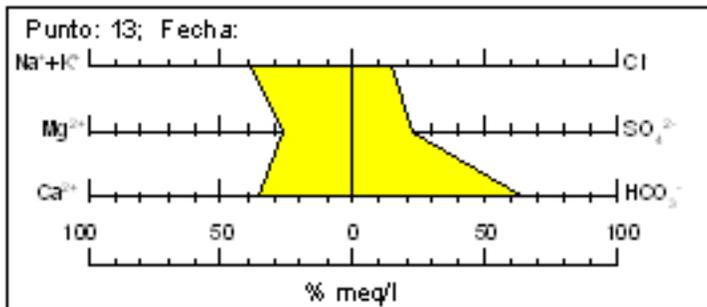
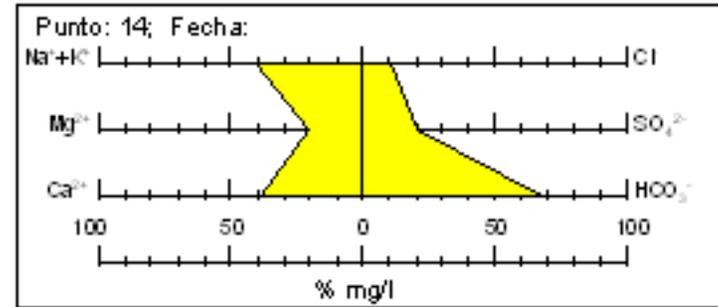
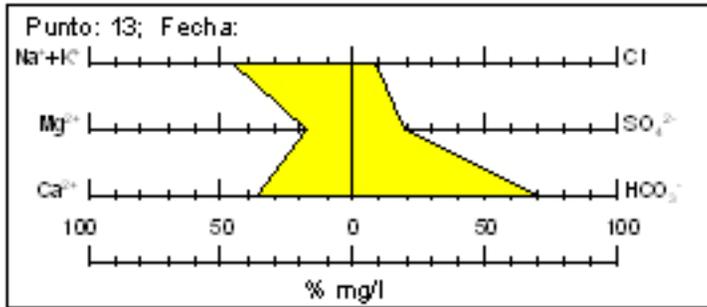


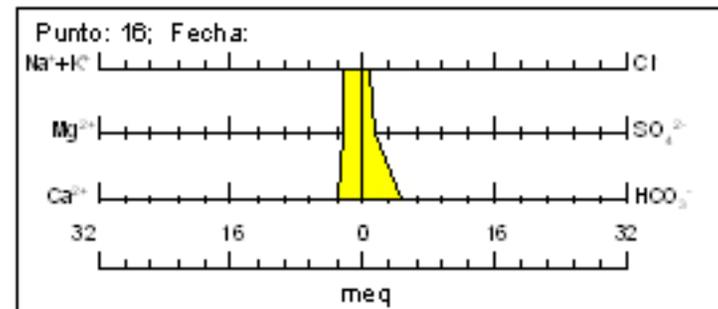
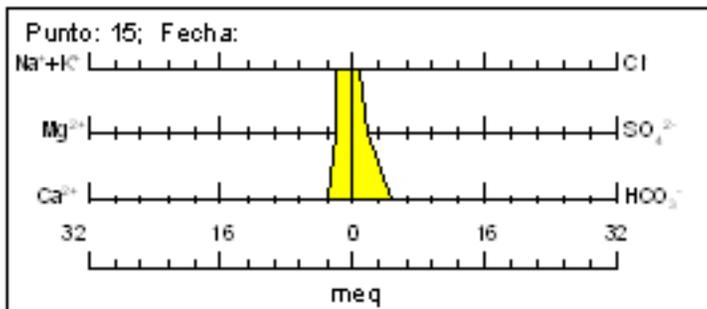
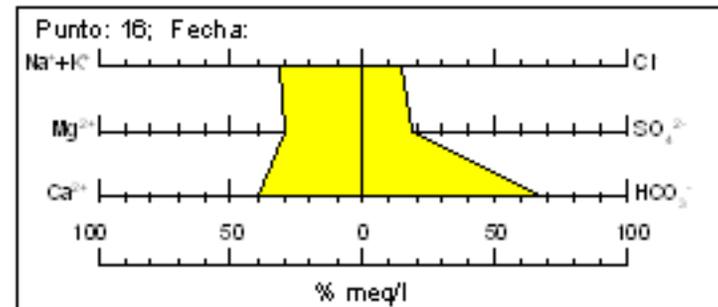
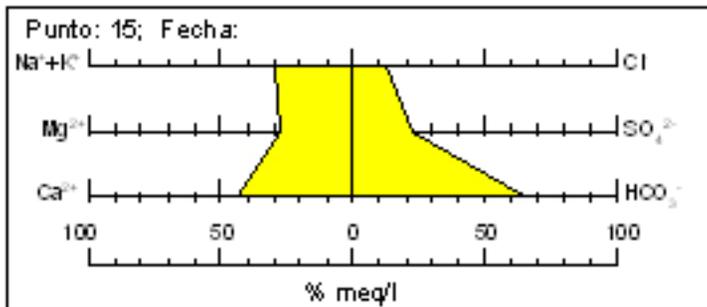
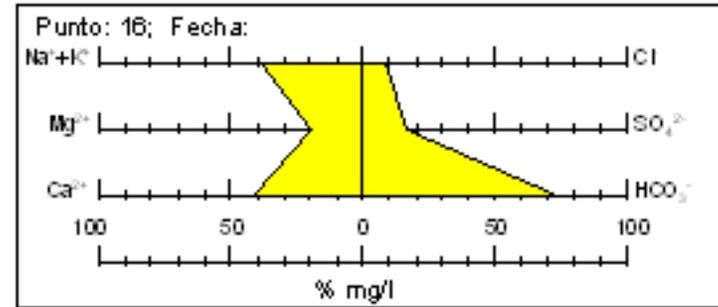
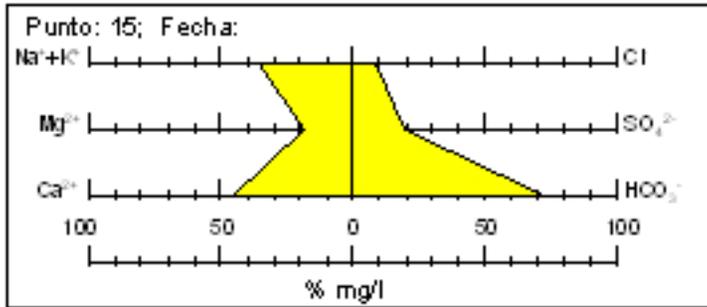


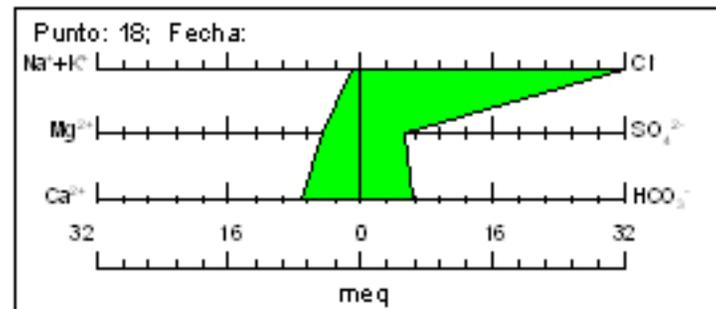
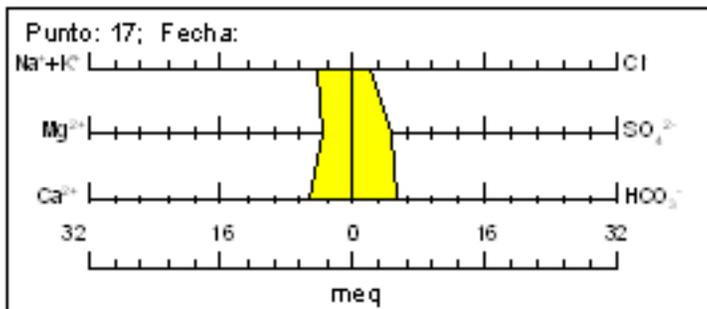
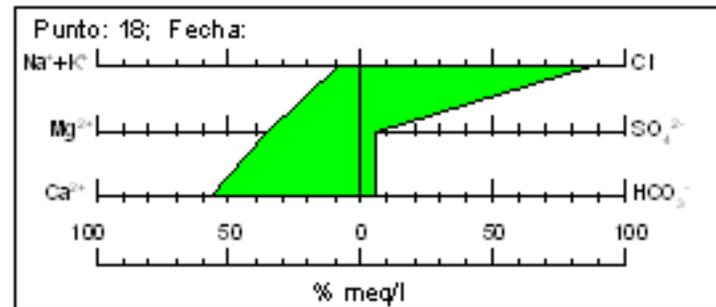
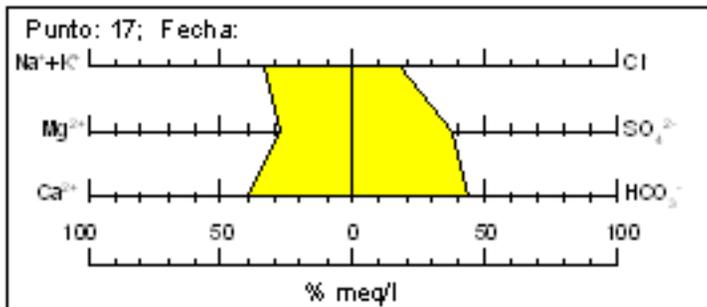
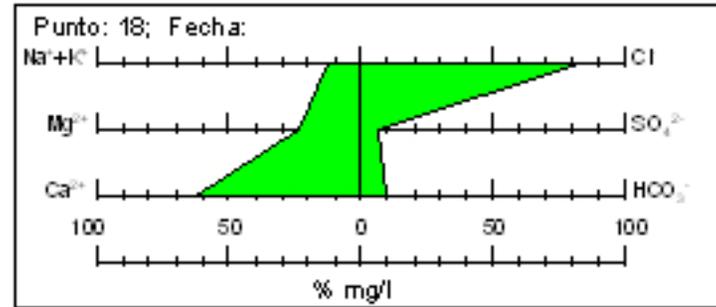
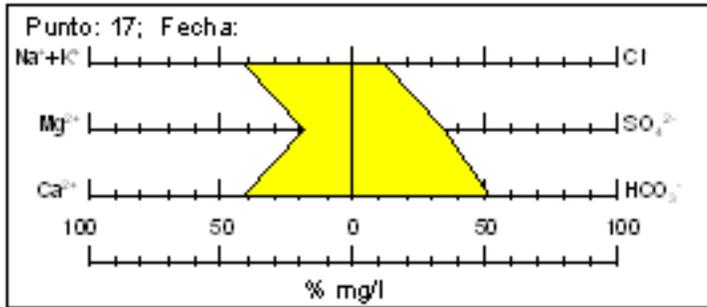


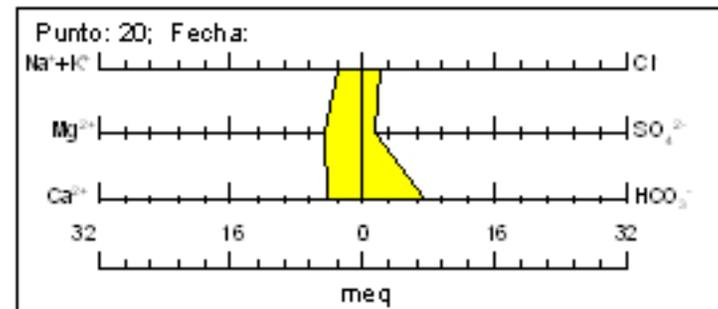
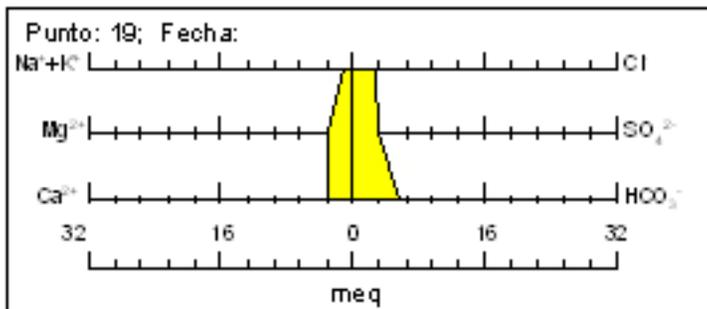
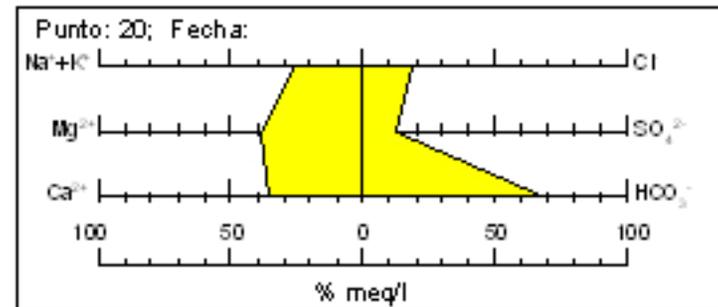
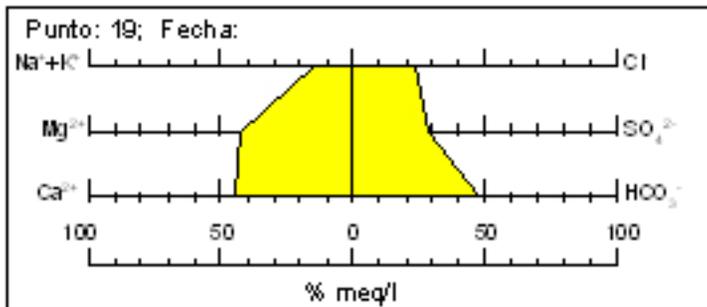
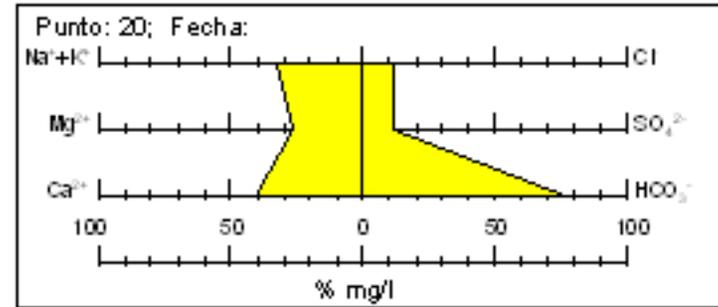
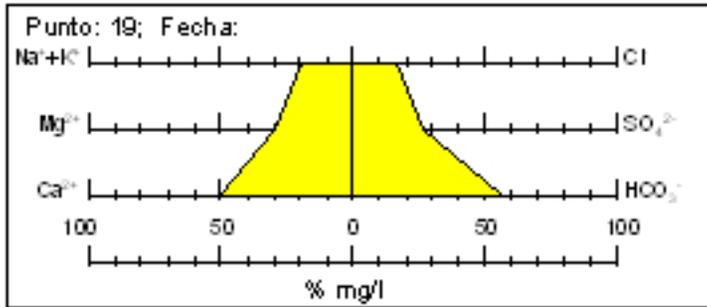


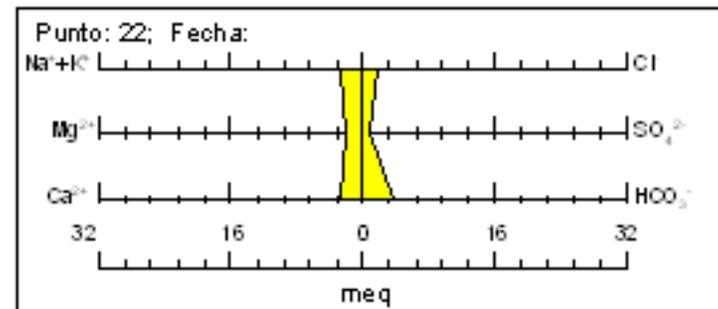
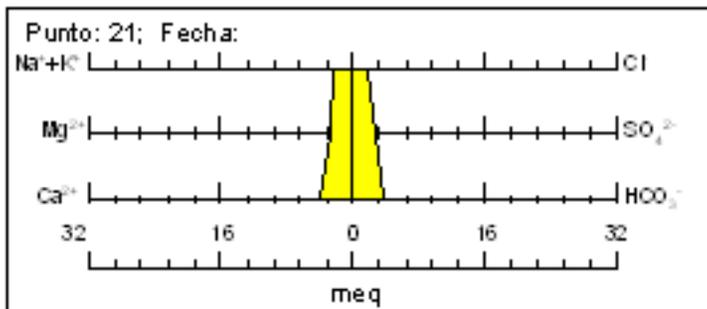
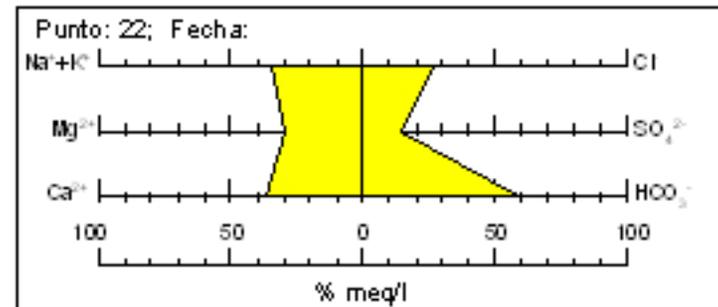
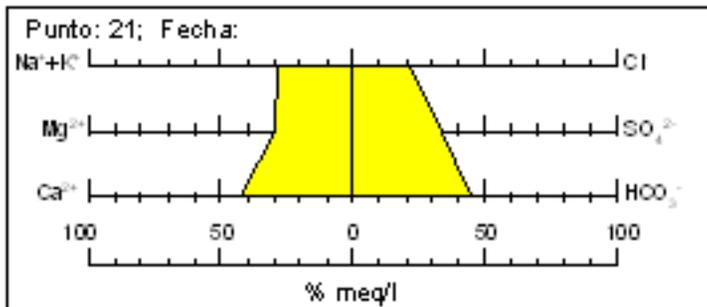
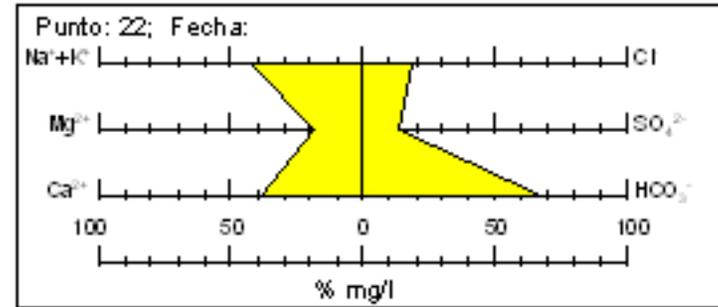
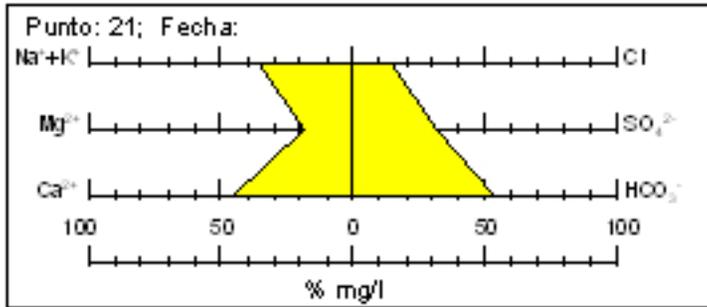


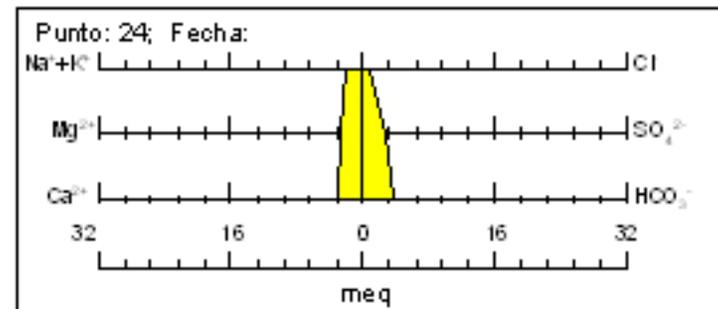
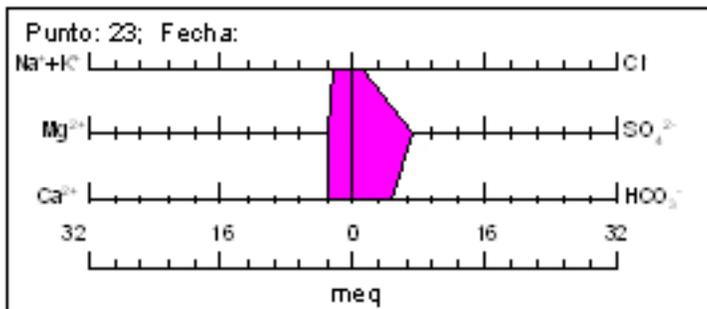
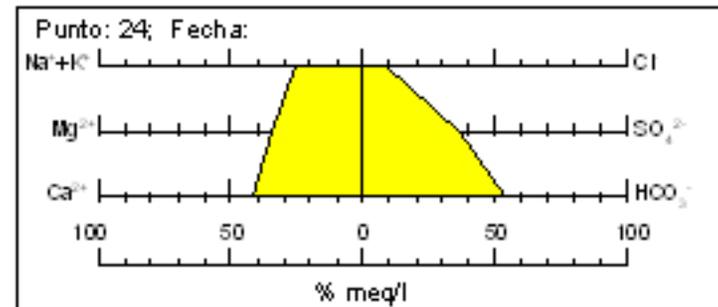
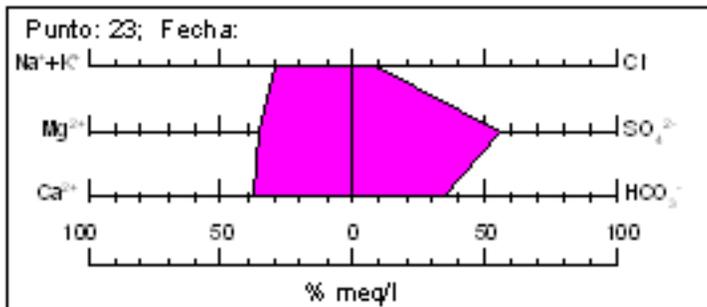
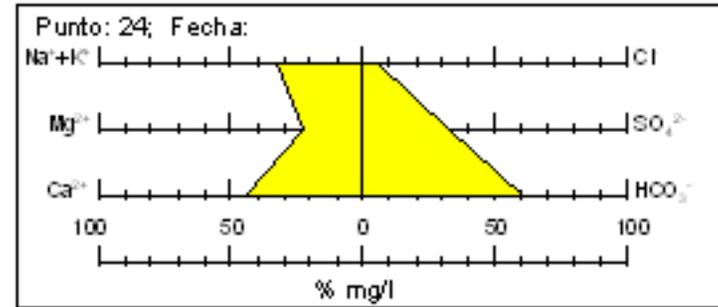
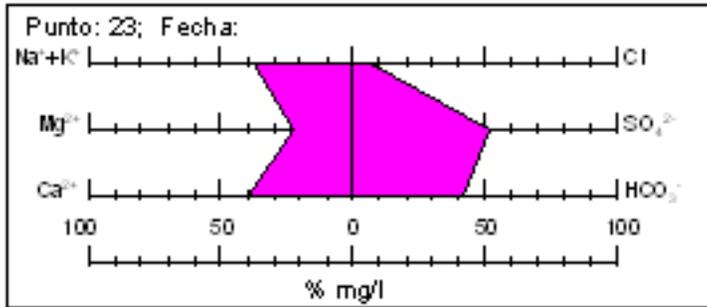


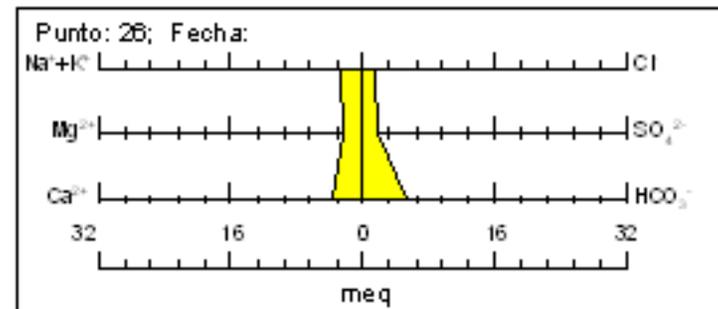
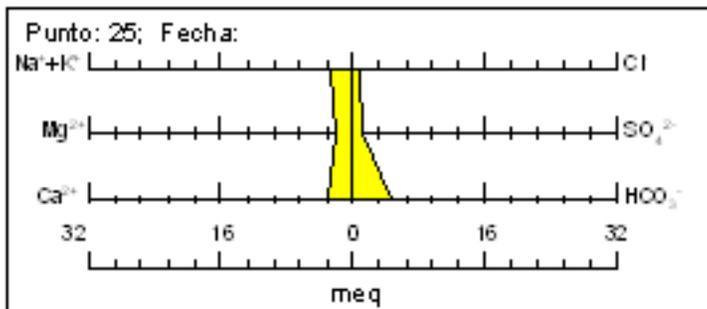
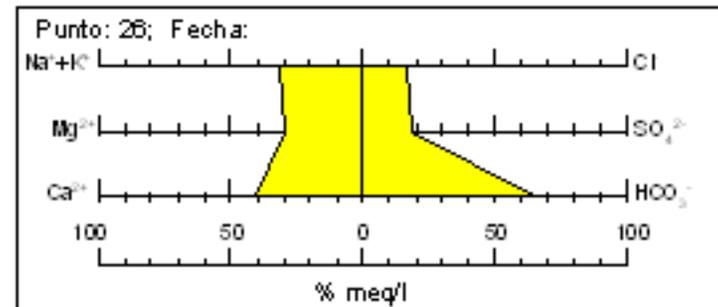
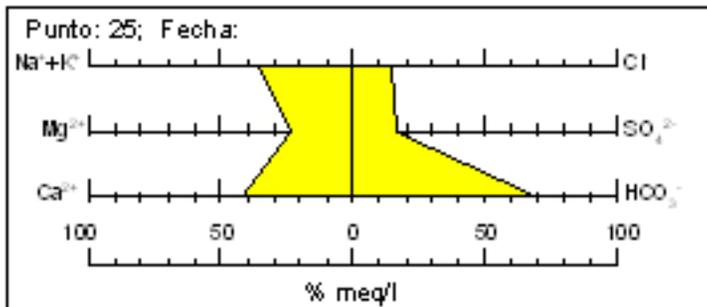
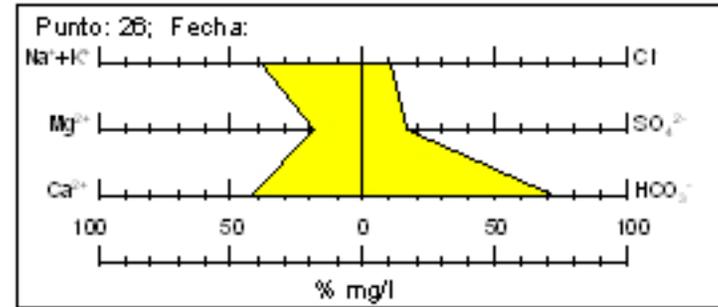
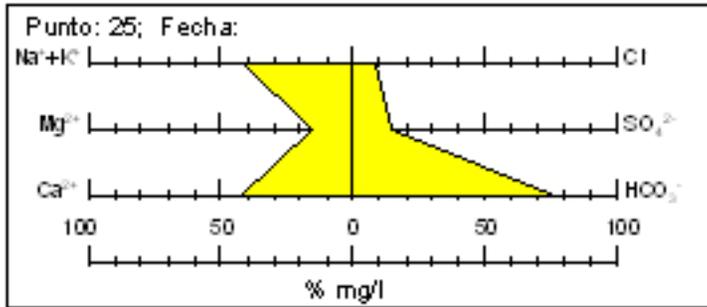


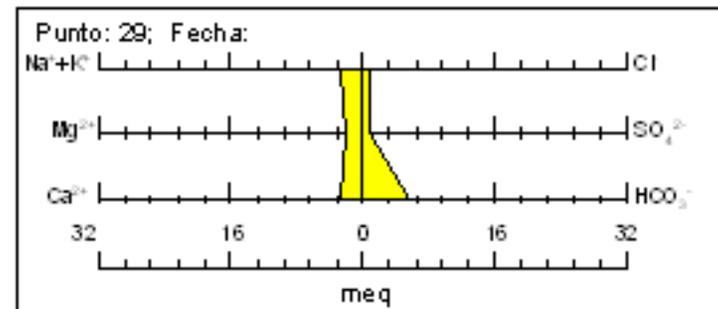
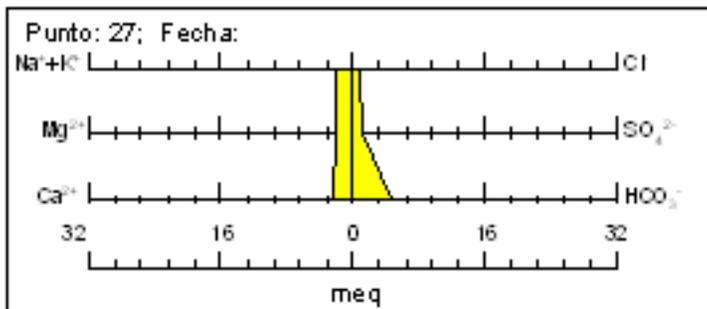
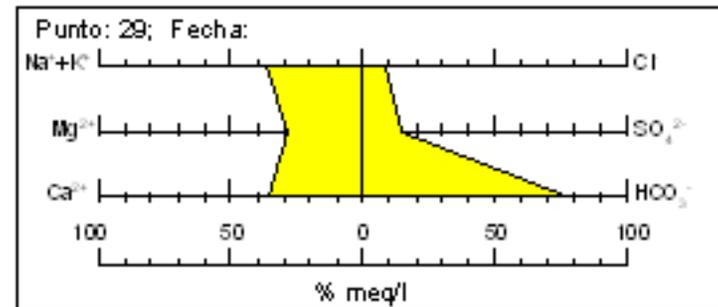
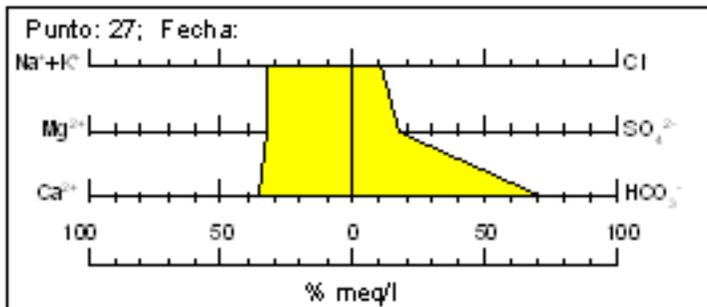
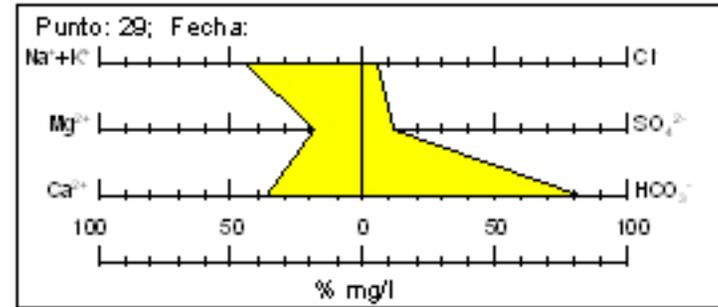
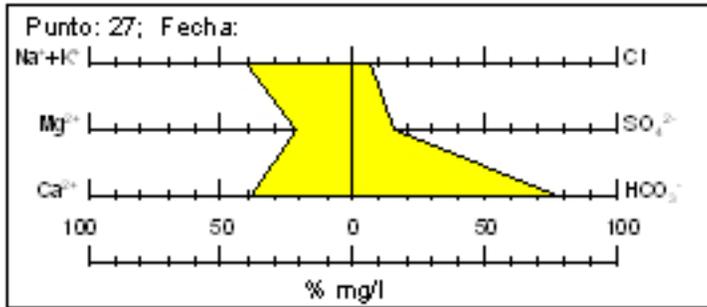












ANEXO 3

3.1 Comparación Norma Agua Potable NCh 409

Pozo	As (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	0,002	0,01	Normal
2	0,001	0,01	Normal
3	0,002	0,01	Normal
4	0,001	0,01	Normal
5	0,001	0,01	Normal
6	0,001	0,01	Normal
7	0,001	0,01	Normal
8	0,001	0,01	Normal
9	0,001	0,01	Normal
10	0,004	0,01	Normal
11	0,001	0,01	Normal
12	0,002	0,01	Normal
13	0,002	0,01	Normal
14	0,002	0,01	Normal
15	0,002	0,01	Normal
16	0,003	0,01	Normal
17	0,002	0,01	Normal
18	0,002	0,01	Normal
19	0,001	0,01	Normal
20	0,002	0,01	Normal
21	0,004	0,01	Normal
22	0,004	0,01	Normal
23	0,001	0,01	Normal
24	0,002	0,01	Normal
25	0,003	0,01	Normal
26	0,003	0,01	Normal
27	0,002	0,01	Normal
29	0,005	0,01	Normal

Pozo	Cd (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	<0,01	0,01	Normal
2	<0,01	0,01	Normal
3	<0,01	0,01	Normal
4	<0,01	0,01	Normal
5	<0,01	0,01	Normal
6	<0,01	0,01	Normal
7	<0,01	0,01	Normal
8	<0,01	0,01	Normal
9	<0,01	0,01	Normal
10	<0,01	0,01	Normal
11	<0,01	0,01	Normal
12	<0,01	0,01	Normal
13	<0,01	0,01	Normal
14	<0,01	0,01	Normal
15	<0,01	0,01	Normal
16	<0,01	0,01	Normal
17	<0,01	0,01	Normal
18	<0,01	0,01	Normal
19	<0,01	0,01	Normal
20	<0,01	0,01	Normal
21	<0,01	0,01	Normal
22	<0,01	0,01	Normal
23	<0,01	0,01	Normal
24	<0,01	0,01	Normal
25	<0,01	0,01	Normal
26	<0,01	0,01	Normal
27	<0,01	0,01	Normal
29	<0,01	0,01	Normal

Pozo	Cl ⁻ (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	31,8	400	Normal
2	76,7	400	Normal
3	66,8	400	Normal
4	57,4	400	Normal
5	78,3	400	Normal
6	101,5	400	Normal
7	140,0	400	Normal
8	63,5	400	Normal
9	72,5	400	Normal
10	75,0	400	Normal
11	39,3	400	Normal
12	59,0	400	Normal
13	42,1	400	Normal
14	55,0	400	Normal
15	31,0	400	Normal
16	36,4	400	Normal
17	77,9	400	Normal
18	3217,6	400	Alto
19	95,9	400	Normal
20	75,3	400	Normal
21	63,6	400	Normal
22	62,9	400	Normal
23	43,5	400	Normal
24	23,1	400	Normal
25	35,3	400	Normal
26	48,9	400	Normal
27	23,8	400	Normal
29	21,4	400	Normal

Pozo	Cr (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	<0,01	0,05	Normal
2	<0,01	0,05	Normal
3	<0,01	0,05	Normal
4	<0,01	0,05	Normal
5	<0,01	0,05	Normal
6	0,01	0,05	Normal
7	<0,01	0,05	Normal
8	<0,01	0,05	Normal
9	<0,01	0,05	Normal
10	0,01	0,05	Normal
11	0,01	0,05	Normal
12	0,01	0,05	Normal
13	0,01	0,05	Normal
14	<0,01	0,05	Normal
15	0,01	0,05	Normal
16	0,01	0,05	Normal
17	<0,01	0,05	Normal
18	0,01	0,05	Normal
19	<0,01	0,05	Normal
20	<0,01	0,05	Normal
21	<0,01	0,05	Normal
22	<0,01	0,05	Normal
23	<0,01	0,05	Normal
24	<0,01	0,05	Normal
25	<0,01	0,05	Normal
26	<0,01	0,05	Normal
27	0,01	0,05	Normal
29	0,01	0,05	Normal

Pozo	Cu (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	<0,01	2	Normal
2	<0,01	2	Normal
3	<0,01	2	Normal
4	<0,01	2	Normal
5	<0,01	2	Normal
6	<0,01	2	Normal
7	<0,01	2	Normal
8	<0,01	2	Normal
9	<0,01	2	Normal
10	<0,01	2	Normal
11	<0,01	2	Normal
12	<0,01	2	Normal
13	<0,01	2	Normal
14	<0,01	2	Normal
15	<0,01	2	Normal
16	<0,01	2	Normal
17	0,01	2	Normal
18	<0,01	2	Normal
19	0,01	2	Normal
20	<0,01	2	Normal
21	<0,01	2	Normal
22	<0,01	2	Normal
23	<0,01	2	Normal
24	<0,01	2	Normal
25	<0,01	2	Normal
26	<0,01	2	Normal
27	<0,01	2	Normal
29	<0,01	2	Normal

Pozo	Fe (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	<0,03	0,3	Normal
2	<0,03	0,3	Normal
3	<0,03	0,3	Normal
4	<0,03	0,3	Normal
5	<0,03	0,3	Normal
6	<0,03	0,3	Normal
7	<0,03	0,3	Normal
8	<0,03	0,3	Normal
9	<0,03	0,3	Normal
10	<0,03	0,3	Normal
11	<0,03	0,3	Normal
12	<0,03	0,3	Normal
13	<0,03	0,3	Normal
14	<0,03	0,3	Normal
15	<0,03	0,3	Normal
16	<0,03	0,3	Normal
17	<0,03	0,3	Normal
18	<0,03	0,3	Normal
19	<0,03	0,3	Normal
20	<0,03	0,3	Normal
21	<0,03	0,3	Normal
22	<0,03	0,3	Normal
23	<0,03	0,3	Normal
24	<0,03	0,3	Normal
25	<0,03	0,3	Normal
26	<0,03	0,3	Normal
27	<0,03	0,3	Normal
29	<0,03	0,3	Normal

Pozo	Hg (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	<0,001	0,001	Normal
2	<0,001	0,001	Normal
3	<0,001	0,001	Normal
4	<0,001	0,001	Normal
5	<0,001	0,001	Normal
6	0,001	0,001	En el límite
7	<0,001	0,001	Normal
8	<0,001	0,001	Normal
9	<0,001	0,001	Normal
10	<0,001	0,001	Normal
11	<0,001	0,001	Normal
12	<0,001	0,001	Normal
13	<0,001	0,001	Normal
14	<0,001	0,001	Normal
15	<0,001	0,001	Normal
16	<0,001	0,001	Normal
17	<0,001	0,001	Normal
18	<0,001	0,001	Normal
19	<0,001	0,001	Normal
20	<0,001	0,001	Normal
21	<0,001	0,001	Normal
22	<0,001	0,001	Normal
23	<0,001	0,001	Normal
24	<0,001	0,001	Normal
25	<0,001	0,001	Normal
26	<0,001	0,001	Normal
27	<0,001	0,001	Normal
29	<0,001	0,001	Normal

Pozo	Mg (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	13,7	125	Normal
2	33,2	125	Normal
3	27,5	125	Normal
4	22,5	125	Normal
5	26,9	125	Normal
6	76,0	125	Normal
7	128,6	125	Alto
8	41,4	125	Normal
9	46,2	125	Normal
10	42,0	125	Normal
11	22,0	125	Normal
12	40,3	125	Normal
13	28,4	125	Normal
14	36,0	125	Normal
15	23,0	125	Normal
16	28,4	125	Normal
17	44,5	125	Normal
18	54,8	125	Normal
19	37,4	125	Normal
20	56,5	125	Normal
21	31,9	125	Normal
22	27,1	125	Normal
23	34,0	125	Normal
24	31,3	125	Normal
25	22,3	125	Normal
26	30,4	125	Normal
27	25,3	125	Normal
29	25,9	125	Normal

Pozo	Mn (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	<0,01	0,1	Normal
2	<0,01	0,1	Normal
3	<0,01	0,1	Normal
4	<0,01	0,1	Normal
5	<0,01	0,1	Normal
6	<0,01	0,1	Normal
7	<0,01	0,1	Normal
8	<0,01	0,1	Normal
9	<0,01	0,1	Normal
10	0,02	0,1	Normal
11	<0,01	0,1	Normal
12	<0,01	0,1	Normal
13	<0,01	0,1	Normal
14	<0,01	0,1	Normal
15	<0,01	0,1	Normal
16	<0,01	0,1	Normal
17	<0,01	0,1	Normal
18	<0,01	0,1	Normal
19	<0,01	0,1	Normal
20	<0,01	0,1	Normal
21	<0,01	0,1	Normal
22	<0,01	0,1	Normal
23	<0,01	0,1	Normal
24	<0,01	0,1	Normal
25	<0,01	0,1	Normal
26	<0,01	0,1	Normal
27	<0,01	0,1	Normal
29	<0,01	0,1	Normal

Pozo	N(NO ₃) (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	4,542	50	Normal
2	0,867	50	Normal
3	1,690	50	Normal
4	1,453	50	Normal
5	1,491	50	Normal
6	3,546	50	Normal
7	2,962	50	Normal
8	1,530	50	Normal
9	1,201	50	Normal
10	0,109	50	Normal
11	2,745	50	Normal
12	0,788	50	Normal
13	5,194	50	Normal
14	0,997	50	Normal
15	1,390	50	Normal
16	7,879	50	Normal
17	12,994	50	Normal
18	3,673	50	Normal
19	4,463	50	Normal
20	0,739	50	Normal
21	5,490	50	Normal
22	2,824	50	Normal
23	1,600	50	Normal
24	2,330	50	Normal
25	1,536	50	Normal
26	5,510	50	Normal
27	2,923	50	Normal
29	3,061	50	Normal

Pozo	Pb (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	<0,05	0,05	Normal
2	<0,05	0,05	Normal
3	<0,05	0,05	Normal
4	<0,05	0,05	Normal
5	<0,05	0,05	Normal
6	<0,05	0,05	Normal
7	<0,05	0,05	Normal
8	<0,05	0,05	Normal
9	<0,05	0,05	Normal
10	<0,05	0,05	Normal
11	<0,05	0,05	Normal
12	<0,05	0,05	Normal
13	<0,05	0,05	Normal
14	<0,05	0,05	Normal
15	<0,05	0,05	Normal
16	<0,05	0,05	Normal
17	<0,05	0,05	Normal
18	<0,05	0,05	Normal
19	<0,05	0,05	Normal
20	<0,05	0,05	Normal
21	<0,05	0,05	Normal
22	<0,05	0,05	Normal
23	<0,05	0,05	Normal
24	<0,05	0,05	Normal
25	<0,05	0,05	Normal
26	<0,05	0,05	Normal
27	<0,05	0,05	Normal
29	<0,05	0,05	Normal

Pozo	Se (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	<0,001	0,01	Normal
2	<0,001	0,01	Normal
3	<0,001	0,01	Normal
4	<0,001	0,01	Normal
5	<0,001	0,01	Normal
6	<0,001	0,01	Normal
7	<0,001	0,01	Normal
8	<0,001	0,01	Normal
9	<0,001	0,01	Normal
10	<0,001	0,01	Normal
11	<0,001	0,01	Normal
12	<0,001	0,01	Normal
13	<0,001	0,01	Normal
14	<0,001	0,01	Normal
15	<0,001	0,01	Normal
16	<0,001	0,01	Normal
17	<0,001	0,01	Normal
18	<0,001	0,01	Normal
19	<0,001	0,01	Normal
20	<0,001	0,01	Normal
21	<0,001	0,01	Normal
22	<0,001	0,01	Normal
23	<0,001	0,01	Normal
24	<0,001	0,01	Normal
25	<0,001	0,01	Normal
26	<0,001	0,01	Normal
27	<0,001	0,01	Normal
29	<0,001	0,01	Normal

Pozo	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	45,0	500	Normal
2	45,0	500	Normal
3	60,0	500	Normal
4	50,0	500	Normal
5	75,0	500	Normal
6	600,0	500	Alto
7	1550,0	500	Muy Alto
8	225,0	500	Normal
9	275,0	500	Normal
10	105,0	500	Normal
11	50,0	500	Normal
12	195,0	500	Normal
13	90,0	500	Normal
14	110,0	500	Normal
15	75,0	500	Normal
16	65,0	500	Normal
17	225,0	500	Normal
18	250,0	500	Normal
19	155,0	500	Normal
20	70,0	500	Normal
21	135,0	500	Normal
22	45,0	500	Normal
23	350,0	500	Normal
24	125,0	500	Normal
25	55,0	500	Normal
26	75,0	500	Normal
27	55,0	500	Normal
29	50,0	500	Normal

Pozo	Zn (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	0,01	3	Normal
2	0,02	3	Normal
3	0,03	3	Normal
4	0,03	3	Normal
5	0,03	3	Normal
6	0,01	3	Normal
7	0,07	3	Normal
8	0,01	3	Normal
9	0,02	3	Normal
10	0,01	3	Normal
11	0,01	3	Normal
12	0,01	3	Normal
13	0,01	3	Normal
14	0,01	3	Normal
15	0,01	3	Normal
16	0,01	3	Normal
17	0,04	3	Normal
18	0,02	3	Normal
19	0,02	3	Normal
20	0,01	3	Normal
21	0,02	3	Normal
22	0,01	3	Normal
23	0,01	3	Normal
24	0,02	3	Normal
25	0,03	3	Normal
26	0,01	3	Normal
27	0,01	3	Normal
29	0,01	3	Normal

Pozo	ph	Límite máximo	Comparación
1	7,3	6,5 - 8,5	Normal
2	7,8	6,5 - 8,5	Normal
3	7,7	6,5 - 8,5	Normal
4	7,9	6,5 - 8,5	Normal
5	7,5	6,5 - 8,5	Normal
6	8,5	6,5 - 8,5	En el límite
7	8,5	6,5 - 8,5	En el límite
8	8,2	6,5 - 8,5	Normal
9	8,5	6,5 - 8,5	En el límite
10	7,1	6,5 - 8,5	Normal
11	-	6,5 - 8,5	Normal
12	6,8	6,5 - 8,5	Normal
13	6,8	6,5 - 8,5	Normal
14	7,0	6,5 - 8,5	Normal
15	7,0	6,5 - 8,5	Normal
16	7,1	6,5 - 8,5	Normal
17	8,7	6,5 - 8,5	Alto
18	7,1	6,5 - 8,5	Normal
19	7,3	6,5 - 8,5	Normal
20	6,7	6,5 - 8,5	Normal
21	6,1	6,5 - 8,5	Normal
22	7,3	6,5 - 8,5	Normal
23	7,7	6,5 - 8,5	Normal
24	8,3	6,5 - 8,5	Normal
25	7,9	6,5 - 8,5	Normal
26	7,0	6,5 - 8,5	Normal
27	7,0	6,5 - 8,5	Normal
29	7,3	6,5 - 8,5	Normal

Pozo	CE(uS/cm)	TDS (mg/l)	Límite máximo TDS (mg/l)	Comparación
1	415	255	1500	Normal
2	819	455	1500	Normal
3	701	409	1500	Normal
4	640	370	1500	Normal
5	785	471	1500	Normal
6	1580	1087	1500	Normal
7	2740	1979	1500	Alto
8	981	610	1500	Normal
9	1043	667	1500	Normal
10	1015	554	1500	Normal
11			1500	-
12	600	312	1500	Normal
13	811	459	1500	Normal
14	877	498	1500	Normal
15	651	360	1500	Normal
16	740	426	1500	Normal
17	1187	749	1500	Normal
18	1800	1193	1500	Normal
19	1066	652	1500	Normal
20	1007	539	1500	Normal
21	815	511	1500	Normal
22	652	385	1500	Normal
23	672	376	1500	Normal
24	630	369	1500	Normal
25	639	346	1500	Normal
26	838	480	1500	Normal
27	602	326	1500	Normal
29	648	327	1500	Normal

3.2 Comparación Norma Riego NCh 1333

Pozo	Ag (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	<0,01	0,2	Normal
2	<0,01	0,2	Normal
3	<0,01	0,2	Normal
4	<0,01	0,2	Normal
5	<0,01	0,2	Normal
6	<0,01	0,2	Normal
7	<0,01	0,2	Normal
8	<0,01	0,2	Normal
9	<0,01	0,2	Normal
10	<0,01	0,2	Normal
11	<0,01	0,2	Normal
12	<0,01	0,2	Normal
13	<0,01	0,2	Normal
14	<0,01	0,2	Normal
15	<0,01	0,2	Normal
16	<0,01	0,2	Normal
17	<0,01	0,2	Normal
18	<0,01	0,2	Normal
19	<0,01	0,2	Normal
20	<0,01	0,2	Normal
21	<0,01	0,2	Normal
22	<0,01	0,2	Normal
23	<0,01	0,2	Normal
24	<0,01	0,2	Normal
25	<0,01	0,2	Normal
26	<0,01	0,2	Normal
27	<0,01	0,2	Normal
29	<0,01	0,2	Normal

Pozo	Al (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	<0,03	5	Normal
2	<0,03	5	Normal
3	<0,03	5	Normal
4	<0,03	5	Normal
5	<0,03	5	Normal
6	<0,03	5	Normal
7	<0,03	5	Normal
8	<0,03	5	Normal
9	<0,03	5	Normal
10	<0,03	5	Normal
11	<0,03	5	Normal
12	<0,03	5	Normal
13	<0,03	5	Normal
14	<0,03	5	Normal
15	<0,03	5	Normal
16	<0,03	5	Normal
17	<0,03	5	Normal
18	<0,03	5	Normal
19	<0,03	5	Normal
20	<0,03	5	Normal
21	<0,03	5	Normal
22	<0,03	5	Normal
23	<0,03	5	Normal
24	0,03	5	Normal
25	0,03	5	Normal
26	<0,03	5	Normal
27	<0,03	5	Normal
29	<0,03	5	Normal

Pozo	As (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	0,002	0,05	Normal
2	0,001	0,05	Normal
3	0,002	0,05	Normal
4	0,001	0,05	Normal
5	0,001	0,05	Normal
6	0,001	0,05	Normal
7	0,001	0,05	Normal
8	0,001	0,05	Normal
9	0,001	0,05	Normal
10	0,004	0,05	Normal
11	0,001	0,05	Normal
12	0,002	0,05	Normal
13	0,002	0,05	Normal
14	0,002	0,05	Normal
15	0,002	0,05	Normal
16	0,003	0,05	Normal
17	0,002	0,05	Normal
18	0,002	0,05	Normal
19	0,001	0,05	Normal
20	0,002	0,05	Normal
21	0,004	0,05	Normal
22	0,004	0,05	Normal
23	0,001	0,05	Normal
24	0,002	0,05	Normal
25	0,003	0,05	Normal
26	0,003	0,05	Normal
27	0,002	0,05	Normal
29	0,005	0,05	Normal

Pozo	B (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	<1	0,75	No se puede comparar
2	<1	0,75	No se puede comparar
3	<1	0,75	No se puede comparar
4	<1	0,75	No se puede comparar
5	<1	0,75	No se puede comparar
6	<1	0,75	No se puede comparar
7	<1	0,75	No se puede comparar
8	<1	0,75	No se puede comparar
9	<1	0,75	No se puede comparar
10	<1	0,75	No se puede comparar
11	<1	0,75	No se puede comparar
12	<1	0,75	No se puede comparar
13	<1	0,75	No se puede comparar
14	<1	0,75	No se puede comparar
15	<1	0,75	No se puede comparar
16	<1	0,75	No se puede comparar
17	<1	0,75	No se puede comparar
18	<1	0,75	No se puede comparar
19	<1	0,75	No se puede comparar
20	<1	0,75	No se puede comparar
21	<1	0,75	No se puede comparar
22	<1	0,75	No se puede comparar
23	<1	0,75	No se puede comparar
24	<1	0,75	No se puede comparar
25	<1	0,75	No se puede comparar
26	<1	0,75	No se puede comparar
27	<1	0,75	No se puede comparar
29	<1	0,75	No se puede comparar

Pozo	Cd (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	<0,01	0,01	Normal
2	<0,01	0,01	Normal
3	<0,01	0,01	Normal
4	<0,01	0,01	Normal
5	<0,01	0,01	Normal
6	<0,01	0,01	Normal
7	<0,01	0,01	Normal
8	<0,01	0,01	Normal
9	<0,01	0,01	Normal
10	<0,01	0,01	Normal
11	<0,01	0,01	Normal
12	<0,01	0,01	Normal
13	<0,01	0,01	Normal
14	<0,01	0,01	Normal
15	<0,01	0,01	Normal
16	<0,01	0,01	Normal
17	<0,01	0,01	Normal
18	<0,01	0,01	Normal
19	<0,01	0,01	Normal
20	<0,01	0,01	Normal
21	<0,01	0,01	Normal
22	<0,01	0,01	Normal
23	<0,01	0,01	Normal
24	<0,01	0,01	Normal
25	<0,01	0,01	Normal
26	<0,01	0,01	Normal
27	<0,01	0,01	Normal
29	<0,01	0,01	Normal

Pozo	Cl ⁻ (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	31,8	200	Normal
2	76,7	200	Normal
3	66,8	200	Normal
4	57,4	200	Normal
5	78,3	200	Normal
6	101,5	200	Normal
7	140,0	200	Normal
8	63,5	200	Normal
9	72,5	200	Normal
10	75,0	200	Normal
11	39,3	200	Normal
12	59,0	200	Normal
13	42,1	200	Normal
14	55,0	200	Normal
15	31,0	200	Normal
16	36,4	200	Normal
17	77,9	200	Normal
18	3217,6	200	Muy Alto
19	95,9	200	Normal
20	75,3	200	Normal
21	63,6	200	Normal
22	62,9	200	Normal
23	43,5	200	Normal
24	23,1	200	Normal
25	35,3	200	Normal
26	48,9	200	Normal
27	23,8	200	Normal
29	21,4	200	Normal

Pozo	Co (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	<0,01	0,05	Normal
2	<0,01	0,05	Normal
3	<0,01	0,05	Normal
4	<0,01	0,05	Normal
5	<0,01	0,05	Normal
6	<0,01	0,05	Normal
7	<0,01	0,05	Normal
8	<0,01	0,05	Normal
9	<0,01	0,05	Normal
10	<0,01	0,05	Normal
11	<0,01	0,05	Normal
12	<0,01	0,05	Normal
13	<0,01	0,05	Normal
14	<0,01	0,05	Normal
15	<0,01	0,05	Normal
16	<0,01	0,05	Normal
17	<0,01	0,05	Normal
18	<0,01	0,05	Normal
19	<0,01	0,05	Normal
20	<0,01	0,05	Normal
21	<0,01	0,05	Normal
22	<0,01	0,05	Normal
23	<0,01	0,05	Normal
24	<0,01	0,05	Normal
25	<0,01	0,05	Normal
26	<0,01	0,05	Normal
27	<0,01	0,05	Normal
29	<0,01	0,05	Normal

Pozo	Cr (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	<0,01	0,1	Normal
2	<0,01	0,1	Normal
3	<0,01	0,1	Normal
4	<0,01	0,1	Normal
5	<0,01	0,1	Normal
6	0,01	0,1	Normal
7	<0,01	0,1	Normal
8	<0,01	0,1	Normal
9	<0,01	0,1	Normal
10	0,01	0,1	Normal
11	0,01	0,1	Normal
12	0,01	0,1	Normal
13	0,01	0,1	Normal
14	<0,01	0,1	Normal
15	0,01	0,1	Normal
16	0,01	0,1	Normal
17	<0,01	0,1	Normal
18	0,01	0,1	Normal
19	<0,01	0,1	Normal
20	<0,01	0,1	Normal
21	<0,01	0,1	Normal
22	<0,01	0,1	Normal
23	<0,01	0,1	Normal
24	<0,01	0,1	Normal
25	<0,01	0,1	Normal
26	<0,01	0,1	Normal
27	0,01	0,1	Normal
29	0,01	0,1	Normal

Pozo	Cu (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	<0,01	0,2	Normal
2	<0,01	0,2	Normal
3	<0,01	0,2	Normal
4	<0,01	0,2	Normal
5	<0,01	0,2	Normal
6	<0,01	0,2	Normal
7	<0,01	0,2	Normal
8	<0,01	0,2	Normal
9	<0,01	0,2	Normal
10	<0,01	0,2	Normal
11	<0,01	0,2	Normal
12	<0,01	0,2	Normal
13	<0,01	0,2	Normal
14	<0,01	0,2	Normal
15	<0,01	0,2	Normal
16	<0,01	0,2	Normal
17	0,01	0,2	Normal
18	<0,01	0,2	Normal
19	0,01	0,2	Normal
20	<0,01	0,2	Normal
21	<0,01	0,2	Normal
22	<0,01	0,2	Normal
23	<0,01	0,2	Normal
24	<0,01	0,2	Normal
25	<0,01	0,2	Normal
26	<0,01	0,2	Normal
27	<0,01	0,2	Normal
29	<0,01	0,2	Normal

Pozo	Fe (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	<0,03	5	Normal
2	<0,03	5	Normal
3	<0,03	5	Normal
4	<0,03	5	Normal
5	<0,03	5	Normal
6	<0,03	5	Normal
7	<0,03	5	Normal
8	<0,03	5	Normal
9	<0,03	5	Normal
10	<0,03	5	Normal
11	<0,03	5	Normal
12	<0,03	5	Normal
13	<0,03	5	Normal
14	<0,03	5	Normal
15	<0,03	5	Normal
16	<0,03	5	Normal
17	<0,03	5	Normal
18	<0,03	5	Normal
19	<0,03	5	Normal
20	<0,03	5	Normal
21	<0,03	5	Normal
22	<0,03	5	Normal
23	<0,03	5	Normal
24	<0,03	5	Normal
25	<0,03	5	Normal
26	<0,03	5	Normal
27	<0,03	5	Normal
29	<0,03	5	Normal

Pozo	Hg (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	<0,001	0,001	Normal
2	<0,001	0,001	Normal
3	<0,001	0,001	Normal
4	<0,001	0,001	Normal
5	<0,001	0,001	Normal
6	0,001	0,001	En el límite
7	<0,001	0,001	Normal
8	<0,001	0,001	Normal
9	<0,001	0,001	Normal
10	<0,001	0,001	Normal
11	<0,001	0,001	Normal
12	<0,001	0,001	Normal
13	<0,001	0,001	Normal
14	<0,001	0,001	Normal
15	<0,001	0,001	Normal
16	<0,001	0,001	Normal
17	<0,001	0,001	Normal
18	<0,001	0,001	Normal
19	<0,001	0,001	Normal
20	<0,001	0,001	Normal
21	<0,001	0,001	Normal
22	<0,001	0,001	Normal
23	<0,001	0,001	Normal
24	<0,001	0,001	Normal
25	<0,001	0,001	Normal
26	<0,001	0,001	Normal
27	<0,001	0,001	Normal
29	<0,001	0,001	Normal

Pozo	Mn (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	<0,01	0,2	Normal
2	<0,01	0,2	Normal
3	<0,01	0,2	Normal
4	<0,01	0,2	Normal
5	<0,01	0,2	Normal
6	<0,01	0,2	Normal
7	<0,01	0,2	Normal
8	<0,01	0,2	Normal
9	<0,01	0,2	Normal
10	0,02	0,2	Normal
11	<0,01	0,2	Normal
12	<0,01	0,2	Normal
13	<0,01	0,2	Normal
14	<0,01	0,2	Normal
15	<0,01	0,2	Normal
16	<0,01	0,2	Normal
17	<0,01	0,2	Normal
18	<0,01	0,2	Normal
19	<0,01	0,2	Normal
20	<0,01	0,2	Normal
21	<0,01	0,2	Normal
22	<0,01	0,2	Normal
23	<0,01	0,2	Normal
24	<0,01	0,2	Normal
25	<0,01	0,2	Normal
26	<0,01	0,2	Normal
27	<0,01	0,2	Normal
29	<0,01	0,2	Normal

Pozo	Mo (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	<0,05	0,01	No se puede comparar
2	<0,05	0,01	No se puede comparar
3	<0,05	0,01	No se puede comparar
4	<0,05	0,01	No se puede comparar
5	<0,05	0,01	No se puede comparar
6	<0,05	0,01	No se puede comparar
7	<0,05	0,01	No se puede comparar
8	<0,05	0,01	No se puede comparar
9	<0,05	0,01	No se puede comparar
10	<0,05	0,01	No se puede comparar
11	<0,05	0,01	No se puede comparar
12	<0,05	0,01	No se puede comparar
13	<0,05	0,01	No se puede comparar
14	<0,05	0,01	No se puede comparar
15	<0,05	0,01	No se puede comparar
16	<0,05	0,01	No se puede comparar
17	<0,05	0,01	No se puede comparar
18	<0,05	0,01	No se puede comparar
19	<0,05	0,01	No se puede comparar
20	<0,05	0,01	No se puede comparar
21	<0,05	0,01	No se puede comparar
22	<0,05	0,01	No se puede comparar
23	<0,05	0,01	No se puede comparar
24	<0,05	0,01	No se puede comparar
25	<0,05	0,01	No se puede comparar
26	<0,05	0,01	No se puede comparar
27	<0,05	0,01	No se puede comparar
29	<0,05	0,01	No se puede comparar

Pozo	Na (% meq)	Límite máximo (%)	Comparación
1	33,1	35	Normal
2	22,7	35	Normal
3	28,0	35	Normal
4	30,5	35	Normal
5	29,5	35	Normal
6	18,4	35	Normal
7	17,9	35	Normal
8	26,5	35	Normal
9	25,3	35	Normal
10	26,8	35	Normal
11	34,4	35	Normal
12	28,1	35	Normal
13	36,8	35	Normal
14	30,9	35	Normal
15	27,8	35	Normal
16	29,8	35	Normal
17	32,4	35	Normal
18	6,5	35	Normal
19	13,1	35	Normal
20	25,2	35	Normal
21	27,2	35	Normal
22	32,7	35	Normal
23	27,1	35	Normal
24	24,4	35	Normal
25	34,3	35	Normal
26	29,5	35	Normal
27	31,2	35	Normal
29	36,3	35	Alto

Pozo	Ni (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	<0,02	0,2	Normal
2	<0,02	0,2	Normal
3	<0,02	0,2	Normal
4	<0,02	0,2	Normal
5	<0,02	0,2	Normal
6	<0,02	0,2	Normal
7	<0,02	0,2	Normal
8	<0,02	0,2	Normal
9	<0,02	0,2	Normal
10	<0,02	0,2	Normal
11	<0,02	0,2	Normal
12	<0,02	0,2	Normal
13	<0,02	0,2	Normal
14	<0,02	0,2	Normal
15	<0,02	0,2	Normal
16	<0,02	0,2	Normal
17	<0,02	0,2	Normal
18	<0,02	0,2	Normal
19	<0,02	0,2	Normal
20	<0,02	0,2	Normal
21	<0,02	0,2	Normal
22	<0,02	0,2	Normal
23	<0,02	0,2	Normal
24	<0,02	0,2	Normal
25	<0,02	0,2	Normal
26	<0,02	0,2	Normal
27	<0,02	0,2	Normal
29	<0,02	0,2	Normal

Pozo	N(NO ₃ ⁻) (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	4,542	10	Normal
2	0,867	10	Normal
3	1,690	10	Normal
4	1,453	10	Normal
5	1,491	10	Normal
6	3,546	10	Normal
7	2,962	10	Normal
8	1,530	10	Normal
9	1,201	10	Normal
10	0,109	10	Normal
11	2,745	10	Normal
12	0,788	10	Normal
13	5,194	10	Normal
14	0,997	10	Normal
15	1,390	10	Normal
16	7,879	10	Normal
17	12,994	10	Alto
18	3,673	10	Normal
19	4,463	10	Normal
20	0,739	10	Normal
21	5,490	10	Normal
22	2,824	10	Normal
23	1,600	10	Normal
24	2,330	10	Normal
25	1,536	10	Normal
26	5,510	10	Normal
27	2,923	10	Normal
29	3,061	10	Normal

Pozo	Pb (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	<0,05	5	Normal
2	<0,05	5	Normal
3	<0,05	5	Normal
4	<0,05	5	Normal
5	<0,05	5	Normal
6	<0,05	5	Normal
7	<0,05	5	Normal
8	<0,05	5	Normal
9	<0,05	5	Normal
10	<0,05	5	Normal
11	<0,05	5	Normal
12	<0,05	5	Normal
13	<0,05	5	Normal
14	<0,05	5	Normal
15	<0,05	5	Normal
16	<0,05	5	Normal
17	<0,05	5	Normal
18	<0,05	5	Normal
19	<0,05	5	Normal
20	<0,05	5	Normal
21	<0,05	5	Normal
22	<0,05	5	Normal
23	<0,05	5	Normal
24	<0,05	5	Normal
25	<0,05	5	Normal
26	<0,05	5	Normal
27	<0,05	5	Normal
29	<0,05	5	Normal

Pozo	Se (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	<0,001	0,02	Normal
2	<0,001	0,02	Normal
3	<0,001	0,02	Normal
4	<0,001	0,02	Normal
5	<0,001	0,02	Normal
6	<0,001	0,02	Normal
7	<0,001	0,02	Normal
8	<0,001	0,02	Normal
9	<0,001	0,02	Normal
10	<0,001	0,02	Normal
11	<0,001	0,02	Normal
12	<0,001	0,02	Normal
13	<0,001	0,02	Normal
14	<0,001	0,02	Normal
15	<0,001	0,02	Normal
16	<0,001	0,02	Normal
17	<0,001	0,02	Normal
18	<0,001	0,02	Normal
19	<0,001	0,02	Normal
20	<0,001	0,02	Normal
21	<0,001	0,02	Normal
22	<0,001	0,02	Normal
23	<0,001	0,02	Normal
24	<0,001	0,02	Normal
25	<0,001	0,02	Normal
26	<0,001	0,02	Normal
27	<0,001	0,02	Normal
29	<0,001	0,02	Normal

Pozo	SO ₄ ⁻² (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	45,0	250	Normal
2	45,0	250	Normal
3	60,0	250	Normal
4	50,0	250	Normal
5	75,0	250	Normal
6	600,0	250	Alto
7	1550,0	250	Muy Alto
8	225,0	250	Normal
9	275,0	250	Alto
10	105,0	250	Normal
11	50,0	250	Normal
12	195,0	250	Normal
13	90,0	250	Normal
14	110,0	250	Normal
15	75,0	250	Normal
16	65,0	250	Normal
17	225,0	250	Normal
18	250,0	250	En el límite
19	155,0	250	Normal
20	70,0	250	Normal
21	135,0	250	Normal
22	45,0	250	Normal
23	350,0	250	Alto
24	125,0	250	Normal
25	55,0	250	Normal
26	75,0	250	Normal
27	55,0	250	Normal
29	50,0	250	Normal

Pozo	Zn (mg/l)	Límite máximo (mg/l)	Comparación
1	0,01	2	Normal
2	0,02	2	Normal
3	0,03	2	Normal
4	0,03	2	Normal
5	0,03	2	Normal
6	0,01	2	Normal
7	0,07	2	Normal
8	0,01	2	Normal
9	0,02	2	Normal
10	0,01	2	Normal
11	0,01	2	Normal
12	0,01	2	Normal
13	0,01	2	Normal
14	0,01	2	Normal
15	0,01	2	Normal
16	0,01	2	Normal
17	0,04	2	Normal
18	0,02	2	Normal
19	0,02	2	Normal
20	0,01	2	Normal
21	0,02	2	Normal
22	0,01	2	Normal
23	0,01	2	Normal
24	0,02	2	Normal
25	0,03	2	Normal
26	0,01	2	Normal
27	0,01	2	Normal
29	0,01	2	Normal

Pozo	ph	Límite máximo	Comparación
1	7,3	5,5 - 9,0	Normal
2	7,8	5,5 - 9,0	Normal
3	7,7	5,5 - 9,0	Normal
4	7,9	5,5 - 9,0	Normal
5	7,5	5,5 - 9,0	Normal
6	8,5	5,5 - 9,0	Normal
7	8,5	5,5 - 9,0	Normal
8	8,2	5,5 - 9,0	Normal
9	8,5	5,5 - 9,0	Normal
10	7,1	5,5 - 9,0	Normal
11	-	5,5 - 9,0	
12	6,8	5,5 - 9,0	Normal
13	6,8	5,5 - 9,0	Normal
14	7,0	5,5 - 9,0	Normal
15	7,0	5,5 - 9,0	Normal
16	7,1	5,5 - 9,0	Normal
17	8,7	5,5 - 9,0	Normal
18	7,1	5,5 - 9,0	Normal
19	7,3	5,5 - 9,0	Normal
20	6,7	5,5 - 9,0	Normal
21	6,1	5,5 - 9,0	Normal
22	7,3	5,5 - 9,0	Normal
23	7,7	5,5 - 9,0	Normal
24	8,3	5,5 - 9,0	Normal
25	7,9	5,5 - 9,0	Normal
26	7,0	5,5 - 9,0	Normal
27	7,0	5,5 - 9,0	Normal
29	7,3	5,5 - 9,0	Normal