

**Ministerio de Desarrollo Sostenible  
y Medio Ambiente**

**Secretaría Nacional de Minería**

**Proyecto Piloto Oruro**

**IMPACTO DE LA CONTAMINACION  
MINERA E INDUSTRIAL  
SOBRE AGUAS SUBTERRÁNEAS**



**SWEDISH  
GEOLOGICAL AB**  
ENVIRONMENTAL SERVICES

Date: December 1996  
ID: R-Bo-E-9.45-9702-PPO 9616

**Ministerio de Desarrollo Sostenible  
y Medio Ambiente  
Secretaría Nacional de Minería**

**Proyecto Piloto Oruro**

**IMPACTO DE LA CONTAMINACION  
MINERA E INDUSTRIAL  
SOBRE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**IMPACTO DE LA CONTAMINACION  
MINERA E INDUSTRIAL  
SOBRE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**Proyecto Piloto Oruro**

**Ministerio de Desarrollo Sostenible  
y Medio Ambiente  
Secretaría Nacional de Minería**

**Swedish Geological AB**

## Resumen

El objetivo general del "Proyecto Piloto Oruro" (PPO) es elaborar un Plan Maestro Ambiental, orientado hacia los sectores minero e industrial del área de Oruro. El presente informe describe las investigaciones sobre la calidad del agua en acuíferos profundos y el patrón de distribución de acidez y metales contaminantes disueltos en el agua poco profunda subsuperficial en los acuíferos no confinados dentro del área de investigación del PPO y en el canal fluvial de Huanuni, todas partes del Componente 4 del Programa. El estudio de los acuíferos subterráneos comprende los principales acuíferos de Oruro y Vinto utilizados para agua potable.

Los acuíferos profundos de Challapampa y Vinto han sido caracterizados por investigaciones geológicas y geoquímicas. Los resultados indican la consistencia entre los datos hidrogeológicos y geoquímicos que hicieron posible cuantificar la contaminación presente del agua subterránea y elaborar una evaluación de riesgos con miras a los efectos futuros. El estudio hidrogeológico comprende el establecimiento de un modelo de flujo de agua subterránea para el acuífero principal con evaluación de las características hidráulicas como transmisividad, presiones piezométricas, recarga y condiciones límite. Se realizó un estudio del balance hídrico con ayuda de modelación numérica. El estudio geoquímico comprende la recolección de 57 muestras de agua que fueron analizadas por los elementos importantes, metales pesados y metaloides, así como por los isótopos estables de oxígeno y azufre. Se evaluaron el equilibrio mineral y la distribución geoquímica y junto con los resultados hidrogeológicos forman un modelo conceptual integrado.

Los principales recursos de agua subterránea de Oruro están localizados al noreste de Oruro en Challa Pampa y al este de Oruro cerca a Vinto. En Challa Pampa se utilizan unos 150 L/s y en Vinto unos 3-5 L/s de agua potable, de varios acuíferos semiconsolidados y consolidados hasta una profundidad aproximada de 100 m. Los acuíferos están estratificados formando capas más o menos horizontales separadas por capas poco permeables con arcilla y limo. Las zonas dominantes de recarga están situadas a los pies de la Cordillera Oriental al este, particularmente en la desembocadura de los principales valles que ingresan al Altiplano. Durante

regímenes de lluvias fuertes, cuando el agua inunda el Altiplano, se produce alguna recarga directamente sobre la planicie - por lo menos en los acuíferos poco profundos.

El flujo regional de agua subterránea hacia Challa Pampa se mueve principalmente desde el norte. Antes de iniciarse su utilización a principios de los 70, se encontró en Challa Pampa, agua subterránea artesiana. La situación presente ha cambiado debido a la extracción de agua subterránea y a que la presión piezométrica ha descendido 4-5 m en áreas extensas. El campo de pozos de Challa Pampa ha creado una depresión de agua subterránea, lo que implica que el agua subterránea del este del acuífero de Caracollo no fluye fuera del área. La gradiente del agua subterránea justo al norte de Oruro indica que la dirección del flujo es hacia los pozos de extracción de Challa Pampa. En Vinto la dirección del flujo subterráneo es de este a oeste, cambiando posteriormente hacia el sur. El sistema de aguas subterráneas en Vinto parece menos afectado por la extracción de agua. Esto se confirma por las relaciones de isótopos estables.

La química del agua muestra una gran variación, desde agua de alta calidad en algunas de las áreas de recarga, hasta agua superficial y subterránea extremadamente pobre en la ciudad de Oruro, y el drenaje de ácido de roca (DAR) y las descargas de la mina de San José. El DAR, aguas sanitarias y de escurrimiento son llevadas por un río abierto regulado al este de la ciudad, hacia el lago Uru Uru al sur. Varias fuentes de contaminación están también localizadas en Vinto. Consiguientemente, cerca a los acuíferos principales de agua subterránea de Oruro existen varias fuentes potenciales de contaminación, que presentan serios riesgos para la calidad del agua potable. Al norte de Oruro, nunca se concluyó un pozo de extracción y dos pozos fueron cerrados debido a la mala calidad del agua. Pese a que el agua contaminada puede ser rastreada hasta el área este de Oruro, el agua potable de Challa Pampa podría verse afectada con hasta 1 a 2 % de agua contaminada. El agua subterránea al este de Oruro podría incluir hasta 40 a 50 % de DAR.

El estudio de los acuíferos poco profundos, en el área del PPO, comprenden investigaciones de unos 130 pozos y análisis químicos de 60 muestras de agua. En algunas áreas se encontraron altas concentraciones de arsénico, azufre y antimonio, que exceden los estándares.

---

El estudio del flujo de agua subsuperficial en el río Huanuni se dirigió a la caracterización del flujo y cargas de contaminantes de un río típicamente afectado por actividades mineras.

# Indice

Resumen	i	
Tabla de contenido	iv	
<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Acuíferos profundos de Oruro y Vinto</b>	<b>3</b>
2.1	Recursos de aguas subterráneas	3
2.2	Objetivos y Alcance	5
2.3	Condiciones Geológicas e hidrogeológicas	6
2.3.1	Geología del área	6
2.3.2	Hidrogeología del área	7
2.4	Investigaciones	11
2.4.1	Datos hidráulicos existentes	11
2.4.2	Inventario	12
2.4.3	Perforación de nuevos pozos	12
2.4.4	Investigación hidráulica en los pozos	12
2.4.5	Datos geoquímicos existentes	14
2.4.6	Descripción geoquímica del área de Oruro y San José	15
2.4.7	Muestreo de aguas para análisis químico e isotópico	16
2.4.8	Muestreo y técnica analítica	17
2.5	Escenario hidrogeológico	19
2.5.1	Niveles piezométricos y dirección del flujo	19
2.5.2	Recarga del agua subterránea	22
2.5.3	Descarga de aguas subterráneas	22
2.5.4	Caracterización hidráulica de los acuíferos	22
2.5.5	Balace hídrico	23
2.5.6	Modelado numérico de aguas subterráneas	24
2.6	Descripción geoquímica	30
2.6.1	Aguas de Paria - grupo 1	30
2.6.2	Aguas geotermales - grupo 2	31
2.6.3	Aguas de Challa Pampa - grupo 3	31
2.6.4	Aguas reductoras al norte de Oruro - grupo 4	33
2.6.5	Aguas subterráneas relacionadas con DAR - grupo 5	35
2.6.6	Aguas de Vinto - grupo 6	38
2.6.7	Aguas de Orenco - grupo 7	40
2.7	Interpretación geoquímica	41
2.7.1	Química de elementos principales y equilibrio mineral	41
2.7.2	Distribuciones de metales pesados y metaloides (elementos traza)	53
2.7.3	Isótopos de oxígeno	56

	2.7.4 Isótopos de azufre	59
	2.7.5 Sinopsis y comentarios sobre la evaluación geoquímica	64
3	Inventario de la calidad de acuíferos subsuperficiales	65
	3.1 Introducción	65
	3.2 Concentraciones de Arsénico y sulfatos en los acuíferos subsuperficiales	66
	3.3 Concentracones de antimonio en acuíferos subsuperficiales	69
4	Flujo subsuperficial en el valle del río Huanuni	71
	4.1 Concentraciones de fondo	71
	4.2 Impacto de actividades mineras y de beneficio sobre las concentraciones	76
	4.3 Impacto de actividades mineras y de beneficio sobre las cargas contaminantes	81
5	Conclusiones	83
	Referencias	88

## Apéndice

- A Loggin de pozos
- B Resultados de análisis
- C Distribución de elementos

# 1 Introducción

El objetivo global del PPO es elaborar un **Plan Maestro Ambiental**, orientado hacia los sectores minero e industrial de Oruro. Este plan debe servir como base para la incorporación de criterios ambientales en la planificación y para la promoción de una gestión ambiental sólida en los sectores minero e industrial, de acuerdo con el principio del desarrollo sostenible. El proyecto dará énfasis a las acciones orientadas a aumentar la productividad y promover el desarrollo de los sectores productivos arriba mencionados, tan importantes para el país, considerando un desarrollo equilibrado compatible con políticas de protección del medio ambiente.

Los objetivos y el alcance general del trabajo del proyecto están definidos en los Términos de Referencia, adjuntos como apéndice al contrato firmado el 9 de Marzo de 1994, entre el Ministerio de Desarrollo Sostenible y el Medio Ambiente (MDSMA), la Secretaría Nacional de Minería (SNM) y el Swedish Geological AB (SGAB).

Las actividades del PPO están regidas por un **Programa Detallado de Trabajo** que fue presentado y aprobado por el MDSMA y el SNM en Junio 1994. El presente informe cubre principalmente las actividades del Componente 4 del Programa.

El presente informe comprende las descripciones de los acuíferos profundos de Oruro y Vinto (Capítulo 2), los acuíferos poco profundos en el área del PPO (Capítulo 3) y del flujo subsuperficial del río Huanuni (Capítulo 4). Los principales resultados del estudio se presentan en el Capítulo 5.

Este informe fue preparado y editado por Ulf Sundquist (BERGAB-Consulting Geologists), quien fue también responsable de las investigaciones hidrogeológicas y análisis de los acuíferos subterráneos. El muestreo de agua y la interpretación geoquímica fue realizada por Peter Torssander, y el modelado de aguas subterráneas por Bengt Åhlén (ambos de BERGAB). Sven Hammarbäck fue responsable de las investigaciones sobre acuíferos poco profundos y Pavel Adamek del río Hanuni (ambos de SGAB). Pavel Adamek, Sven Hammarbäck y José

Córdova (PPO) proporcionaron apoyo general y científico. El trabajo principal de campo fue realizado por Alberto Saavedra (PPO).

## 2 Acuíferos profundos de Oruro y Vinto

### 2.1 Recursos de Aguas Subterráneas

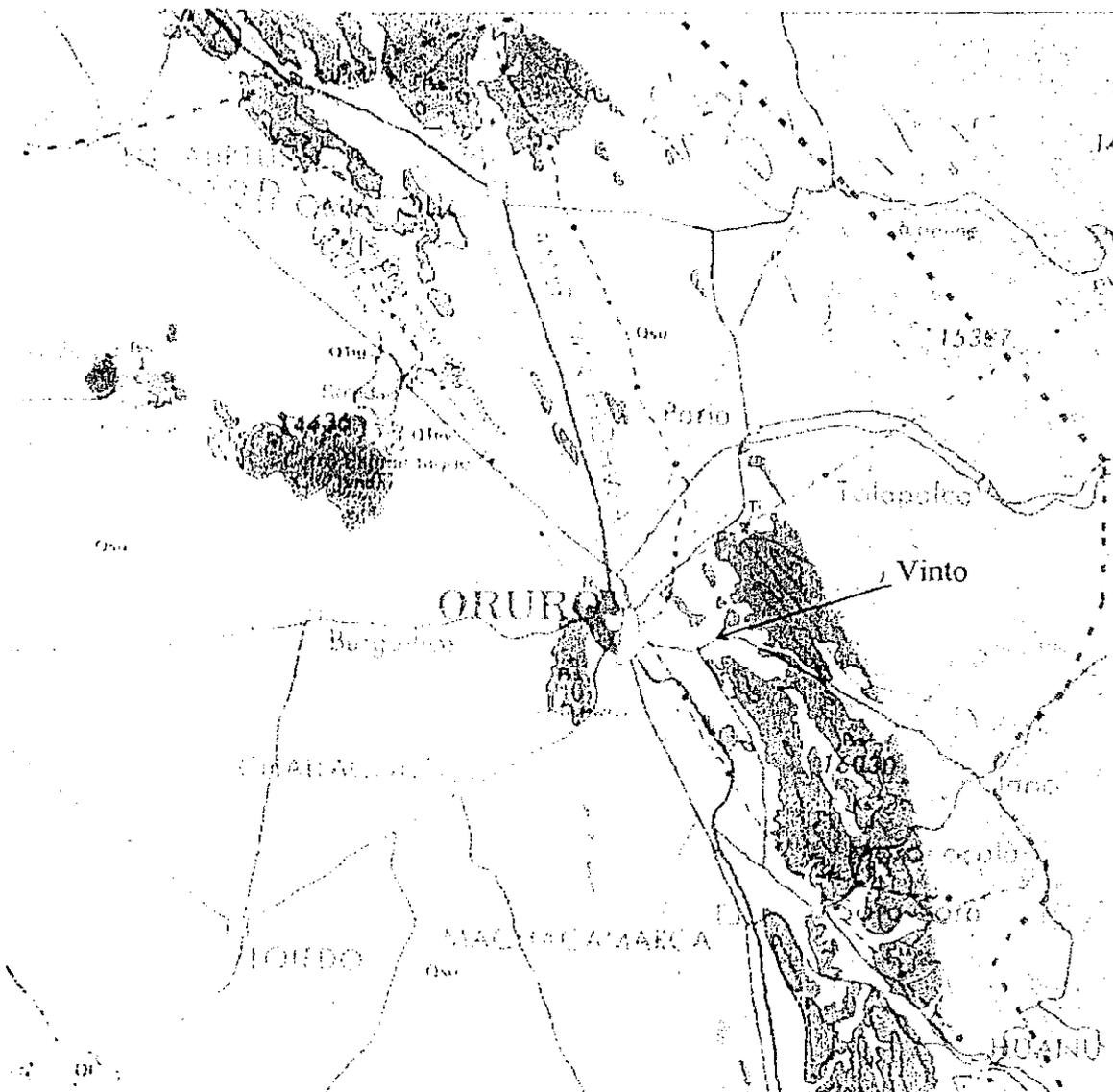
Los principales recursos de agua subterránea en el área estudiada (ver *Figura 2.1.1*) están localizados dentro de la cuenca Caracollo - Oruro- Poopó que contienen sedimentos Cuaternarios depositados durante los tres periodos lacustres. Sobre la base de definiciones hidrogeológicas, la cuenca está dividida en varias sub-cuencas de las cuales, al presente estudio solamente le concierne la sub-cuenca que se extiende desde Caracollo en el norte hasta Challa Pampa y Challa Pampita en el sur y una segunda sub-cuenca desde Oruro-Vinto hacia el norte hasta el Lago Uru Uru en el sur. La definición de las distintas sub-cuencas es aproximada y puede asumirse que las diferentes sub-cuencas pueden estar más o menos interconectadas hidráulicamente. En este informe, los dos acuíferos principales son referidos como el acuífero de Challa Pampa y el de Vinto.

El acuífero de Challa Pampa, situado al nordeste de Oruro, comprende los principales recursos de agua subterránea de la región de Oruro. El acuífero de Challa Pampa actualmente provee a Oruro con un 90 % (unos 150 L/s) del suministro de agua potable de 5 pozos de Challa Pampa y Challa Pampita. Los primeros pozos de extracción fueron construidos alrededor de 1973 y están localizados en Challa Pampita. Aproximadamente 10 años después, cuatro nuevos pozos fueron perforados más al norte en Challa Pampa. Durante 1996 se construyeron nuevos pozos de extracción y observación en Challa Pampa. A la redacción del presente informe los pozos aún no habían sido conectados al sistema de distribución.

El resto del agua (25 L/s) para Oruro es tomada de vertientes provenientes de fallas en Cala Cala, 15 km al este de Oruro.

En el área de Vinto, por lo menos tres pozos perforados suministran al área con unos 3-5 L/s. El agua es utilizada por plantas industriales locales y pequeñas comunidades. El agua se extrae también de varios pozos excavados.

Dentro del área, extensivas actividades industriales y mineras se constituyen en fuentes potenciales importantes de contaminación del agua subterránea. Sin embargo, la extensión total de la contaminación es poco conocida. Algunos pozos de extracción al sur y oeste del actual campo de pozos de Challa Fampa han sido cerrados debido a la baja calidad del agua. Un punto principal del programa hidrogeológico del PPO es aclarar el estado químico actual y realizar una evaluación de riesgos con respecto a la contaminación de las aguas potables.



*Figura 2.1.1 Mapa geológico del área de Oruro. El estudio de los acuíferos profundos de aguas subterráneas en el área, utilizados actualmente para la extracción de agua potable; la subcuenca de Caracollo y Oruro y el acuífero de Vinto representan la parte superior de una subcuenca que se extiende al sud del Lago Uru Uru y posiblemente también más al sud. La línea punteada roja representa el límite oriental del área de proyecto PPO. (Modificado después del Mapa Geológico del Altiplano y la Cordillera Occidental, Bolivia, Departamento de Interior de los EE.UU., Investigación Geológica de EE.UU., 1992).*

## 2.2 Objetivos y Alcance

La meta principal de este estudio fue rastrear el drenaje de ácido de mina sobre la planicie de Oruro y determinar el riesgo potencial de la dispersión de residuos mineros en los pozos utilizados para suministro de agua. Este estudio comprende el establecimiento de un modelo de flujo geohidrológico del área y un análisis extensivo de las condiciones geoquímicas e isotópicas del agua subterránea y agua contaminada. Los objetivos específicos fueron:

1. Identificar claramente la dirección del flujo del agua subterránea,
2. Determinar las fuentes de agua y su suministro accesible,
3. Caracterizar la química de las aguas subterráneas,
4. Evaluar la contaminación presente y la contaminación posible futura por metales tóxicos en el sistema de aguas subterráneas. La evaluación debe ser realizada con respecto al balance de aguas, uso de las aguas subterráneas y eliminación de residuos del drenaje de mina en el área.

En este estudio se recolectaron datos hidrogeológicos y geoquímicos, analizados y compilados en un modelo conceptual integrado. La investigación fue dividida en las siguientes actividades principales:

1. Análisis de datos existentes,
2. Investigación hidráulica de los pozos existentes,
3. Perforación de nuevos pozos de investigación e investigaciones hidráulicas,
4. Recolección y análisis de agua por químicos y relaciones de isótopos estables.
5. Evaluación de datos hidrogeológicos y geoquímicos, trabajo de modelado
6. Evaluación de riesgos con referencia a los recursos hídricos y a la futura calidad del agua.

La parte hidrogeológica del estudio, destinada a caracterizar los principales acuíferos, aclara las presiones piezométricas - por lo tanto definen las direcciones del flujo y las gradientes hidráulicas actuales. El balance de aguas del sistema fue estudiado a fin de suministrar datos de fondo para la interpretación química y la carga hidráulica sobre los acuíferos. El estudio

del balance de aguas fue llevado a cabo con un modelo numérico de flujo de aguas subterráneas.

El estudio geoquímico comprendió la investigación de los isótopos de azufre y oxígeno, y concentraciones de elementos principales y trazas. Las distribuciones de elementos principales y trazas fueron estudiadas para caracterizar las aguas subterráneas y determinar la contaminación de metales tóxicos en las aguas. Los isótopos de oxígeno en el agua fueron estudiados para distinguir los diferentes tipos de agua y el área de recarga. Se usaron los isótopos de azufre para determinar la fuente del azufre y los procesos geoquímicos que tienen una influencia sobre los compuestos de azufre. Más aún, los sulfatos en el agua subterránea y superficial son considerados como "conservadores" debido a sus bajas posibilidades de adsorción en la zona saturada, su poca afinidad por partículas en asentamiento y, por lo tanto, representa la máxima vía de dispersión para los elementos que se originan en el DAR (aunque la concentración de sulfatos en algunas aguas dependa de la solubilidad del sulfato de calcio). En contraste, muchos elementos traza altamente reactivos a partículas, están controlados por distintas solubilidades de minerales y por lo tanto, no se dispersan en el mismo grado que el sulfato. Estos se encuentran principalmente en suelos y sedimentos. Se considera que estos elementos constituyen una serie de elementos no-conservadores, emitidos como consecuencia de la actividad minera y del DAR.

## **2.3 Condiciones Geológicas e hidrogeológicas**

### **2.3.1 Geología del área**

El área de Oruro está localizada en el Altiplano central. El Altiplano es una planicie a gran altura (3660 a 3805 msnm) y una cuenca entre montañas, cercada por la Cordillera Occidental en el oeste y la Cordillera Oriental en el este. La Cordillera Oriental está formada por sedimentos siliclásticos marinos Ordovícicos a Devónicos, con sedimentos plegados, formados en un ambiente de contra-arco, y sedimentos continentales Cretáceos a Terciarios. Durante la actividad intrusiva y volcánica del Mioceno se produjeron domos intrusivos y grandes placas de ignimbrita. El complejo de Oruro es un complejo de domo de flujo dacítico con yacimientos de Sn-Ag-polimetálicos encajonados por dacitas, brechas y sedimentos Paleozoicos.

Durante el glacial Cuaternario los procesos lacustres, fluviales y eólicos estuvieron en actividad, formando sedimentos. Notablemente, los depósitos lacustres, que corresponden al desarrollo de grandes lagos interglaciares, cubren la mayor parte del Altiplano. Estos lagos podían alcanzar un alto grado de salinidad, por ejemplo el lago Tauca (10640-12360 BP) alcanzó una salinidad de unos 40 g/L. A los pies de los cerros de la Cordillera Oriental existen sedimentos glacio-fluviales, asociados con erosión de las montañas del Paleozoico, llanuras inundadas y corrientes entrecruzadas.

Los principales minerales industriales en el área consisten en costras calcáreas y costras de sal formadas durante los procesos lacustres recientes. Hay ocurrencias menores de mineralizaciones de sulfuros en todo el sector oriental del área de Oruro, aparte del yacimiento polimetálico de estaño-plata explotado en San José (Oruro) y el yacimiento de sulfuros masivo de Au-Ag-Cu en el área de la Joya.

### 2.3.2 Hidrogeología del área

El Altiplano forma una cuenca extensa de formaciones sedimentarias compuestas por un sistema complejo de sedimentos del Cuaternario, principalmente yacimientos fluviales, lacustres y glaciales (grava, arena, limo y arcilla). Este estudio se enfoca sobre la sub-cuenca de Caracollo que es una parte hidráulicamente semi-aislada del Altiplano. La cuenca está bordeada al este y norte por la cadena montañosa de la Cordillera Oriental y al oeste por una cadena montañosa menor del Paleozoico que se extiende 10 km al norte de Oruro y aún más al norte.

En la parte central de la sub-cuenca de Caracollo (es decir, el acuífero de Challa Pampa), el espesor de las capas sedimentarias alcanza a 80-125 m. Los acuíferos están estratificados formando capas/lentes más o menos horizontales con conexiones hidráulicas verticales y horizontales variadas. La actual profundidad del nivel freático es escasa, máximo de unos cuantos metros. Por debajo de estos acuíferos, en su mayoría no confinados, la cuenca contiene aparentemente 2-3 acuíferos semi-confinados o confinados que son la fuente de agua potable para la ciudad de Oruro y Vinto.



Figura 2.2.1 Geología del área (de Mapas Temáticos de Recursos Minerales de Bolivia, Hoja Uncia, Publicación SGB Serie II-MTB-2C, Geobol y Swedish Geological AB, 1995)

Rojo	= limo, arena, arcilla	Lila	= arenisca grano medio
Amarillo	= arena silicea	Violeta	= arenisca grano fino
Amarillo (o)	= grava, arena	Rojo (v)	= rocas volcánicas
Verde	= basalto	Blanco	= otros tipos de roca

En Challa Pampa, los acuíferos principales pueden ser encontrados a una profundidad aproximada de 2-15 m (libre), 18-28 m (semi-confinado), 40-52 m y 58-62 m (confinados). Se pueden esperar otros acuíferos a mayores profundidades. Al este de Oruro, hacia Vinto, el acuífero utilizado es bastante poco profundo; 5-25 m por debajo de la superficie.

La zona de recarga dominante está situada a los pies de los cerros de la Cordillera Oriental, particularmente en la desembocadura de los valles principales hacia el Altiplano. Los ríos y corrientes menores han formado abanicos aluviales disectados por canales y lentes con sedimentos más gruesos de río tales como arena guijarrosa y gravas lenticulares. Estas capas altamente permeables están delimitadas vertical y horizontalmente por depósitos de limo y arcilla. Los ríos más importantes con respecto a la recarga de los acuíferos de Challa Pampa y Vinto son el Río Paria y Río Sepulturas, respectivamente. Durante lluvias fuertes y alto flujo en los ríos, eventos que inundan el Altiplano, se puede esperar alguna recarga directa sobre la planicie - por lo menos en los acuíferos menos profundos.

El flujo regional de agua subterránea es del norte y este hacia el sur-sudoeste, hacia las áreas del Lago Uru Uru y Poopó, ubicadas al Sur de Oruro. Antes de la extracción de agua subterránea en Challa Pampa, el nivel piezométrico era considerablemente más alto que lo que se observa hoy en día. Hace 25 a 30 años varios de los pozos desplegaban condiciones surgentes con niveles que alcanzaban típicamente 1-2 m por encima de la superficie del suelo. Los niveles actuales son de 2-5 m por debajo de la superficie. Una disminución significativa del nivel piezométrico también está documentada en Orenco, aproximadamente a 5 km al NNE del campo de pozos de Challa Pampa. En un pozo (BP 104), localizado al noroeste del campo de pozos, todavía prevalece la condición surgente. En Vinto, el flujo es generalmente hacia el oeste, después de ello cambia hacia el sur. En Vinto no se han documentado pozos artesianos.

Las investigaciones hidrogeológicas realizadas en el área han sido un tanto limitadas, ver *Sección 2.4.1*. La mayor parte de la información no estuvo disponible para este estudio. Como una base para la investigación hidrogeológica realizada dentro del presente estudio, se hicieron investigaciones extensivas de campo, ver *Capítulo 3*.

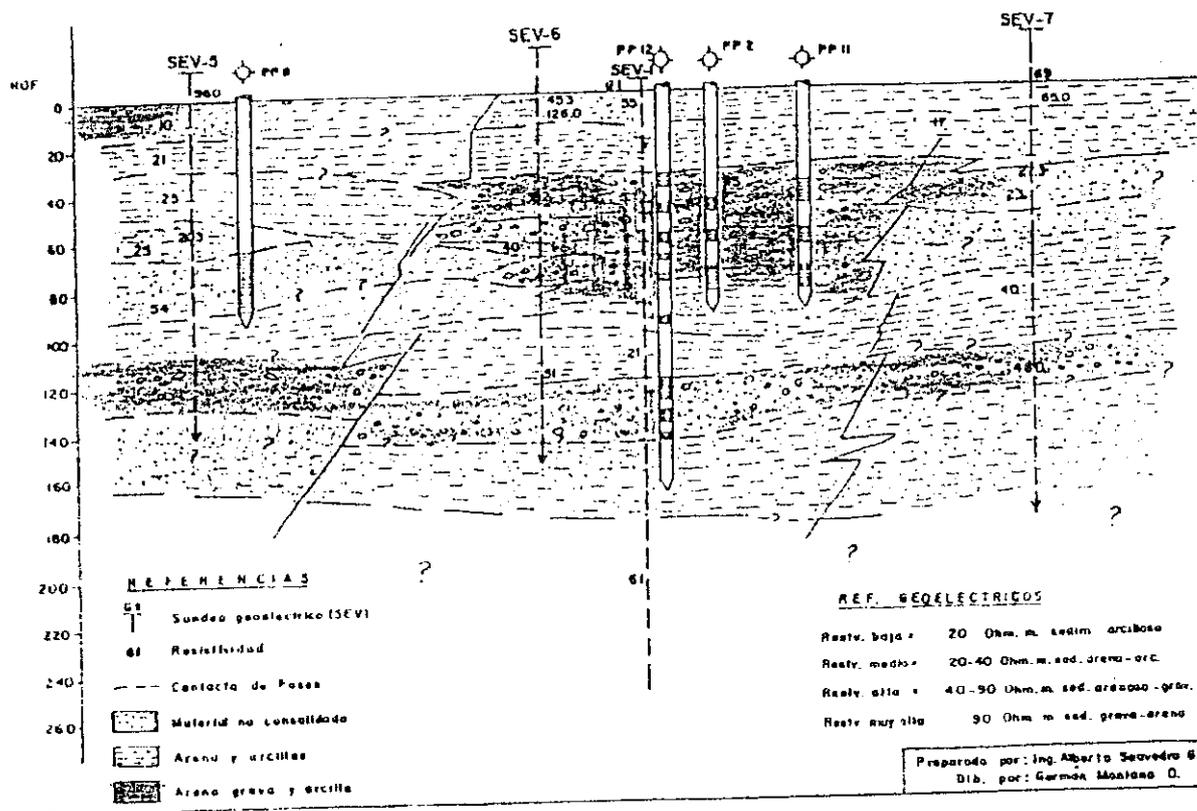


Figura 2.3.1 Correlación litología de Chaila Pampa (Saavedra, 1993)

## 2.4 Investigaciones

### 2.4.1 Datos hidráulicos existentes

A la fecha se dispone de un volumen bastante limitado de datos hidráulicos para análisis. Desde el aspecto hidrogeológico, los acuíferos mejor conocidos son los de Challa Pampa y Challa Pampita en la sub-cuenca Caracollo-Oruro, investigados por sondeo vertical eléctrico y más de 20 pozos de exploración, monitoreo y producción. Algunas investigaciones fueron también realizadas en la sub-cuenca entre Oruro y Vinto. En 1996 se realizaron investigaciones y perforaciones adicionales en Challa Pampa. Lamentablemente, los datos han sido clasificados y siendo sólo parcialmente disponibles para este estudio.

Los siguientes informes se tomaron como referencia bibliográfica:

COMIBOL Y SGAB, 1995: Auditoría ambiental de la mina de San José.

Consortio SCIDE-GEOBOL; 1981: Informe final, Proyecto de investigación y verificación de fuentes de abastecimiento de agua para la ciudad de Oruro (parcialmente), 1981.

GEOBOL-NN.UU., 1969-1973: Prospección geoeléctrica de la parte sur de la sub-cuenca Caracollo- Oruro.

MDSMA, SNM & SGAB, 1996: Proyecto Piloto Oruro, Hidrología del área del PPO.

Saavedra, 1993: Proyecto agua y saneamiento Oruro, Naciones Unidas - P.N.U.D., Proyecto pozos de investigación Cala Caja - Oruro, Servicio Geológico de Bolivia, Depto. De Hidrogeología.

SeLA: entrevistando al personal de SeLA

SeLA: varios registros

#### **2.4.2 Inventario**

El PPO llevó a cabo un extenso programa de inventario. Este tenía por meta la identificación de cada uno de los pozos principales excavados y perforados en el área y documentar datos típicos de pozos tales como tipo, profundidad, uso, calidad del agua (pH, conductividad eléctrica), capacidad, etc. Algunos de los pozos inventariados fueron incluidos en el presente estudio.

#### **2.4.3 Perforación de nuevos pozos**

Seis nuevos pozos fueron construidos al este de Oruro y en Paria a fin de complementar la red de pozos existentes. Los nuevos pozos fueron construidos mediante perforación rotativa y el uso de lodo. La profundidad típica de los pozos es de 30-50 m. Se colocaron filtros en los pozos a las profundidades que representan capas permeables que fueron identificadas mediante clasificación ocular. La parte menos profunda de los pozos fue protegida de la entrada de agua superficial mediante sellado con arcilla.

#### **2.4.4 Investigación hidráulica en los pozos**

Los objetivos de la investigación hidráulica en los pozos han sido definir y caracterizar el comportamiento hidráulico de los pozos a fin de obtener datos de fondo para evaluar el sistema de flujo de las aguas subterráneas y apoyar la interpretación de los datos químicos e isotópicos. Las siguientes investigaciones fueron hechas en distintas extensiones:

- mediciones del nivel del agua
- pruebas hidráulicas del pozo
- registro de pozos
- limpieza

las mediciones del nivel del agua fueron usadas para establecer un mapa de los niveles piezométricos del agua en el área bajo investigación. Las mediciones fueron realizadas en más de 60 pozos durante Junio-Diciembre 1996. El nivelado de altura de pozo fue realizado por el PPO.

las pruebas hidráulicas de los pozos comprenden métodos como ser pruebas de pulso, pruebas de bombeo y enjuague por aire. El objetivo principal de las pruebas fue determinar los valores de transmisividad. La selección de los métodos se basó en los objetivos y en los pre-requisitos técnicos e hidráulicos. Para pozos de alta capacidad se usaron principalmente pruebas de bombeo y para pozos de baja capacidad se usaron pruebas de pulso. El enjuague por aire fue usado principalmente para limpieza, pero en algunos casos pudo usarse para obtener estimados aproximados de la transmisividad. Las pruebas fueron realizadas y analizadas como sigue:

prueba de bombeo: una bomba sumergible de 4" fue colocada en profundidad y accionada por un generador eléctrico portátil. La capacidad típica del sistema era de aproximadamente 1 l/s. El agua fue conducida a la superficie mediante un tubo de plástico de 1". El caudal podía ser regulado mediante una válvula en la superficie. El ritmo de descarga fue medido por cronómetro y balde. El análisis siguió la referencia de Earlougher (Avances en Análisis de Pruebas de Pozos, 1977) y el Manual de Análisis de Pozos de Dowell Schlumberger. En algunos casos la prueba fue realizada como parte de la limpieza del pozo.

prueba de pulso: el nivel piezométrico del pozo fue elevado o bajado instantáneamente y la respuesta fue analizada de acuerdo a Cooper et al. (1967) dando como resultado los valores de transmisividad.

enjuague por aire: el pozo fue enjuagado con aire de una compresora con el propósito de enjuagar o limpiar el pozo y/o determinar la capacidad del flujo. En base a la relación entre la capacidad de flujo y depresión, se calculó la capacidad específica y se estimó un valor aproximado de la transmisividad. La recuperación después de comple-

tar el enjuague por aire, se usó ocasionalmente para un buen cálculo de la transmisividad.

el registro de pozos fue realizado en 20 de ellos y comprendió la medición de la temperatura, pH y la conductividad eléctrica del fluido del pozo. La medición fue llevada a cabo mediante el empleo del registrador de orificios perforados Aqualog SS-200. Cuando fue posible, se realizó el registro después de activar hidráulicamente el pozo mediante bombeo o enjuague por aire. Debe tomarse en cuenta que la metodología de registro implica que no se permite que el sensor de pH se estabilice, consiguientemente los valores recogidos deben ser tomados como estimados aproximados. Los valores de conductividad eléctrica fueron convertidos a una temperatura de referencia de 25°C. Los resultados están compilados en el Apéndice A.

Los objetivos del registro fueron investigar el estado químico del agua usada para la interpretación de la función hidráulica del pozo y para apoyar la interpretación geoquímica.

la limpieza fue realizada en cada pozo nuevo a fin de eliminar los sedimentos finos del agua. En pozos antiguos que no habían sido usados por mucho tiempo, la limpieza fue hecha a fin de reemplazar agua estancada con agua nueva de los acuíferos. Se empleó enjuague por aire o bombeo en la actividad de limpieza.

#### 2.4.5 Datos geoquímicos existentes

Para el análisis se encontró un volumen bastante limitado de datos geoquímicos ya existentes ver la recopilación descrita a continuación:

1. Coudrain-Ribstein, Olive, Quintanilla, Sondag, Cahuaya. Salinidad y dinámica isotópica de los recursos de agua subterránea en el Altiplano Boliviano, Artículo de una presentación al seminario TRACARIO de al AIEI-AISH, Agosto 1994, Viena. En impresión en Proc. AISH, 1995.

2. Lizarazu, Aranyossy, Orsag, Salazar. Estudio isotópico de la cuenca de Oruro-Caracollo (Bolivia), Reimpresión de Técnicas de isótopos en el desarrollo de recursos de agua, IAEA, Viena, 1987.
3. SeLA, distintos registros
4. Auditoría Ambiental de la mina San José, SGAB, 1995.

#### 2.4.6 Descripción geoquímica del área de Oruro y San José

Investigaciones previas (Auditoría Ambiental de San José) y el muestreo realizado por el PPO demuestran que las condiciones geoquímicas al interior del área de Oruro y San José son muy complejas y heterogéneas, con niveles de algunos metales tóxicos externadamente altos. Si bien determinados niveles variaban entre muestreos, valores como 60 mg/L As, 8 mg/L Cd y 50 mg/L Pb claramente ilustran la gravedad de la situación (Ver PPO 9612, Sección 4.2).

El sistema de drenaje de San José en el nivel 500 m de la mina es complicado. el agua de distintos niveles es recolectada y bombeada finalmente para descarga en el "nivel cero" (+3800). Parece ser que se extrae una considerable cantidad de agua de los niveles inferiores. El agua de mina presenta características químicas distintas dependiendo de su origen al interior de la mina. Luego de la descarga en el nivel cero, el agua fluye por un canal abierto (ver *Figura 2.4.1*) una corta distancia hasta que alcanza los desmontes de San José, de donde fluye aguas abajo sin ningún control, hasta alcanzar un canal abierto de concreto al pie del desmonte. Durante el flujo por el desmonte, alrededor de 25 % del agua se pierde en el desmonte y en el suelo. A través de la ciudad de Oruro, el agua se vierte a un canal cubierto y emerge hacia el este de la ciudad donde alcanza un río fuertemente regulado. En su paso por la ciudad, el DAR, se mezcla con aguas sanitarias y pluviales. En Oruro se presentan varias otras fuentes de DAR., pero la descarga de la mina San José es la más importante. Durante la operación de la mina se descargaban alrededor de 1100 m<sup>3</sup>/día, a razón de 18 L/s, durante 17 horas. En la actualidad, la descarga total aproximada es de 800 m<sup>3</sup>/día, en pocas horas. Sin el bombeo del DAR, no existiría descarga alguna.



*Figura 2.4.1 Descarga de DAR en canal abierto originada en el nivel cero (+3800) de San José*

#### **2.4.7 Muestreo de agua para análisis químico e isotópico**

Los lugares de muestreo fueron seleccionados para cubrir el mayor alcance posible, la ubicación geográfica y los tipos de agua presentes y química del agua; para conseguir información de todos los componentes importantes del sistema de aguas subterráneas. Debido a que la química del agua muestra una gran variación entre las aguas naturales superficiales y subterráneas, y las aguas relacionadas con el drenaje ácido de roca, las aguas muestreadas fueron divididas en siete grupos, sobre la base de su ubicación geográfica y sus características químicas. Los grupos establecidos son:

- 1 Aguas de Paria. En el área se muestrearon aguas superficiales y subterráneas, por considerar a Paria como una posible zona de recarga del acuífero de Challa Pampa. El área está ubicada al nordeste de Oruro, a los pies de la Cordillera Oriental.

2. Aguas geotermales. A los pies de la Cordillera Oriental se encuentran vertientes termales que fueron muestreadas para evaluar su influencia sobre las aguas subterráneas y para obtener valores de fondo sobre la química de las aguas sometidas a la interacción del agua y el bedrock en la vecindad del Altiplano.
3. Aguas de Challa Pampa. Pozos de producción y de observación de Challa Pampa y Challa Pampita al nordeste de Oruro. El agua es empleada como agua dulce potable en la ciudad de Oruro.
4. Aguas reductoras al nordeste de Oruro. Localizadas justo al nordeste de Oruro se encuentran presentes unas pocos pozos con aguas reductoras. Se las considera en un grupo debido a la química específica inducida por las condiciones reductoras.
5. Aguas del drenaje ácido de roca (DAR). Se muestreó en las faldas de las colinas de Oruro y pozos situados cerca al canal cubierto justo a la salida de la ciudad. Estas aguas están más o menos afectadas por el drenaje ácido de la mina.
6. Aguas de Vinto. A este grupo pertenecen todas las aguas muestreadas en el área de Vinto, incluyendo las aguas de la zona de recarga de la Cordillera Oriental, (también agua de las vertientes frías de Cala Cala) y el Río Sepulturas, las áreas que rodean la planta de Vinto y los pozos localizados en la planicie al oeste de Vinto.
7. Aguas de Orenco. Al norte de Paria cerca a unos 20 km de Challa Pampa, esta área fue seleccionada para muestreo de aguas porque toda el área al norte de Paria fue considerada como posible área de recarga para el acuífero de aguas subterráneas de Challa Pampa.

#### 2.4.8 Muestreo y técnica analítica

Las aguas superficiales, subterráneas y geotermales han sido recolectadas en varios sitios del Altiplano Boliviano entre Oruro y Caracollo en Junio, 1996. En octubre de 1996 se realizó

una segunda campaña de muestreo complementario. Las muestras recolectadas por cationes principales, silicio, azufre y elementos traza fueron filtradas inmediatamente a través de un filtro de membrana de 0.45  $\mu\text{m}$  y acidificadas en el campo con ácido nítrico Suprapuro Merck® y almacenadas en botellas lavadas con ácido. Las muestras para determinación de aniones fueron recolectadas en botellas de 100 mL. Las muestras para análisis de isótopos de oxígeno fueron recolectadas en botellas de plástico de 50 mL y selladas hasta ser analizadas. Las muestras para análisis de isótopos de azufre fueron recolectadas en botellas de 0.5 a 2 L dependiendo del tipo de agua y procesadas inmediatamente en Bolivia en columnas de intercambio de iones.

La conductividad y el pH fueron medidos directamente en el campo. Los cationes principales, Si y S fueron analizados mediante Espectrometría de Plasma Acoplada Inductivamente con gas Ar (ICP-AES). Los elementos traza fueron analizados con ICP-MS, todos los análisis por plasma fueron realizados por SGAB en Luleå. El sulfato y el cloruro fueron analizados con cromatografía de iones y la alcalinidad fue analizada mediante titulación en el Departamento de Geología y Geoquímica de la Universidad de Estocolmo.

Las determinaciones de isótopos de oxígeno fueron realizadas por equilibrio del agua con gas  $\text{CO}_2$  a 25°C. El  $\text{CO}_2$  fue medido en un espectrómetro de masa Micromass 903. Los sulfatos del agua fueron colectados y purificados en una resina de intercambio de aniones fuertemente básica (tipo Dowex 1-AX8). Esta resina fue eluída con una solución de 0.5 M NaCl. Se añadió  $\text{BaCl}_2$  (ac) al eluyente y se precipitó  $\text{BaSO}_4$ , que fue secado y pesado. En caso de una alta concentración de cloruro (alta conductividad), se omitió el intercambio de iones y el sulfato fue precipitado directamente del agua con  $\text{BaCl}_2$  (ac) después de diluir con agua desionizada. El  $\text{BaSO}_4$  fue mezclado completamente con un gran exceso de una mezcla 1:1 de cuarzo y  $\text{V}_2\text{O}_5$  y quemado al vacío a 900°C. El gas de  $\text{SO}_2$  resultante fue analizado con un Micromass 602 modernizado y totalmente reconstruido en el Laboratorio de Geología de Isótopos, en el Museo de Historia Natural de Estocolmo.

Las composiciones de isótopos de oxígeno y de azufre se definen como una desviación en % de la razón  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  o  $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$  entre una muestra y un patrón, y expresada en la notación  $\delta$ -convencional. Las razones de isótopos de oxígeno son determinadas en relación al SMOW

de la parte norte de la cuenca es totalmente extraída por los pozos productores de SeLA. En áreas adascentes al oeste y al sur tienen lugar flujos de compensación.

Anteriores datos del acuífero Vinto (Oruro) no indican condición artesianas alguna. La situación actual muestra presiones de unos 5 m por debajo de la superficie del terreno con una dirección de flujo resultante del este hacia el oeste y después hacia el sur. Cantidades de agua menores se extraen de 2-3 pozos productores pero la recuperación es rápida y no se hallan áreas de baja presión permanente.

En la ciudad de Oruro, el agua subterránea fluye colina abajo, siguiendo más o menos el perfil del suelo. En la planicie al este de Oruro, se puede asumir que el flujo del agua subterránea se desvía hacia Challa Pampa al norte y Vinto Pampa al sur. En base a datos de presión de agua subterránea y requisitos hidrogeológicos, concluimos que el flujo de agua subterránea entre los dos acuíferos principales de Challa Pampa/Challa Pampita y Vinto es inexistente o muy pequeño.

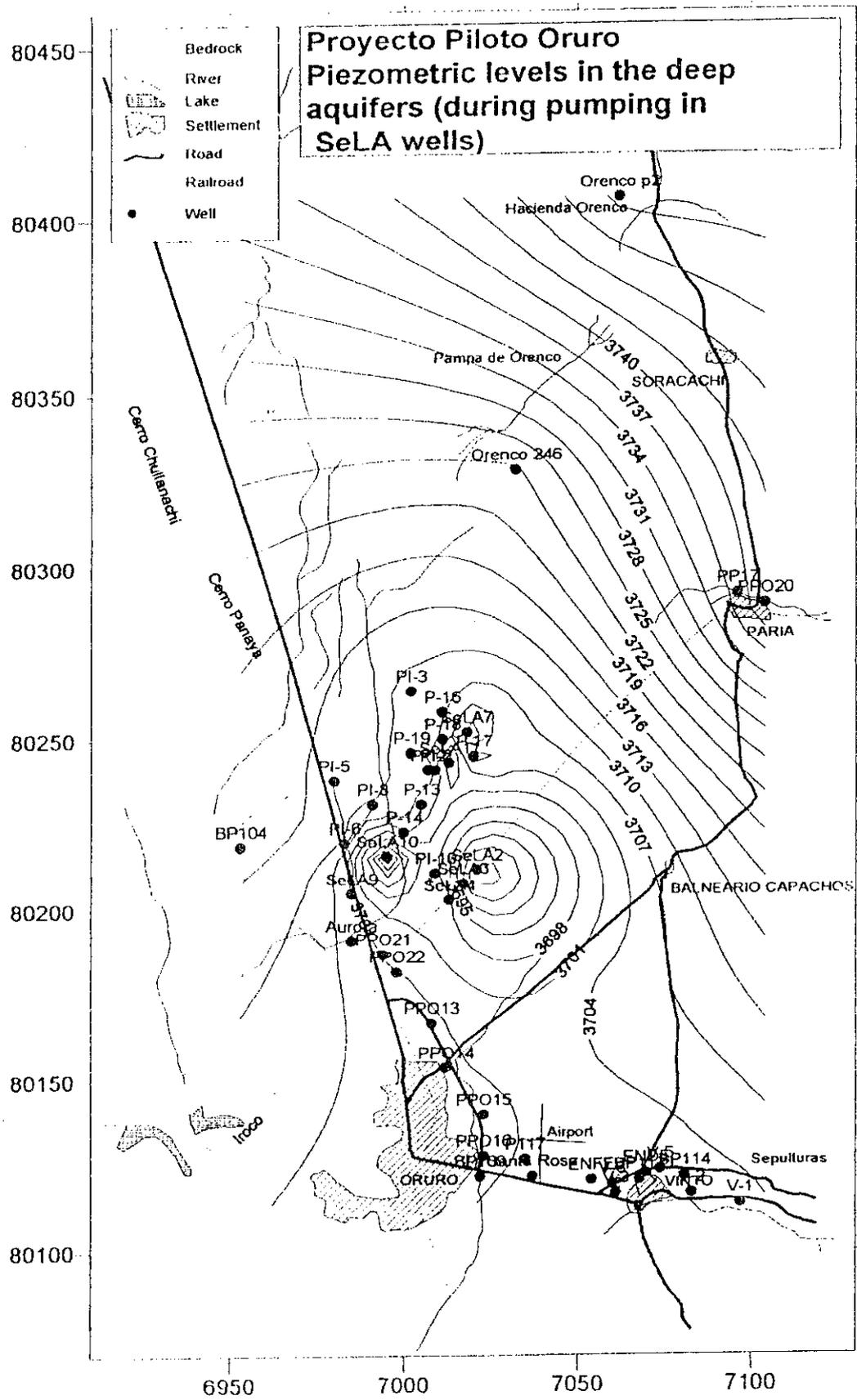


Figura 2.5.1 Cabezal piezométrico cuando se bombean los pozos de extracción de SeLA (compilado de datos de junio-diciembre 1996).

### 2.5.2 Recarga del agua subterránea

La recarga más importante de los acuíferos de Challa Pampa y Vinto se produce a lo largo del límite oriental de la cuenca, dependiendo localmente del flujo de agua superficial y subterránea en valles más amplios que infiltran en lentes irregulares de depósitos aluviales de grava y arena (depósito de paleocanales) y en los conos aluviales que bordean la cuenca (ver *Figura 2.5.1*). Más aún, alguna recarga menor de acuíferos poco profundos puede generarse directamente al centro de la cuenca por infiltración de agua superficial cuando el área se inunda durante la estación húmeda.

Al límite oriental de los sedimentos del Paleozoico se encuentran varias vertientes, algunas de ellas descargan agua geotermal. En alguna medida, estas vertientes se asocian a fallas mayores en el basamento y se puede asumir que contribuyen con cierta recarga a profundidad. También se indicó la existencia de recarga de agua geotermal en horizontes profundos de la parte central de los acuíferos de Challa Pampa.

### 2.5.3 Descarga de aguas subterráneas

La descarga dominante de agua de la cuenca es por evapotranspiración, flujo superficial y el empleo de agua potable para Oruro y Vinto. También se presenta alguna descarga de agua subterránea mediante flujo subsuperficial, especialmente en los acuíferos de Vinto.

### 2.5.4 Caracterización hidráulica de los acuíferos

Los acuíferos de la sub-cuenca se encuentran penetrados por numerosos pozos construidos durante los últimos 25 años para diferentes propósitos. A fin de evaluar las características hidráulicas (transmisividad) de los acuíferos, se utilizaron distintos tipos de pruebas hidráulicas de pozos. Los datos disponibles indican que la transmisividad característica está en el orden de  $1-5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ . El área, justo al este de Oruro, parece tener una transmisividad más baja.

### 2.5.5 Balance hídrico

El cálculo del balance hídrico para un sistema de agua subterránea requiere de datos que pueden ser determinados con precisión variada. Un balance de agua para un sistema de agua subterránea bien definido se expresa como

$$P - E = R_S + R_G + dM/dt$$

donde

P = precipitación

E = evapotranspiración

R<sub>S</sub> = escurrimiento superficial

R<sub>G</sub> = escurrimiento de agua subterránea

dM/dt = cambio en el depósito

El principio en que se basa la expresión del balance, es que la recarga es igual a la descarga si no se asume ningún cambio en el depósito.

En estudios anteriores (1973 y 1981) se presentan cálculos de balance hídrico, estimando el flujo de agua subterránea y el potencial de recarga. La recarga de agua subterránea generada de la precipitación en la parte de la sub-cuenca de Caracollo cubierta por sedimentos fue estimada en unos 10 millones de m<sup>3</sup> por año (300 L/s). Adicionalmente se presumió, sin cuantificar, una recarga generada en el flujo superficial de ríos y vertientes. La descarga de agua subterránea fuera de la sub-cuenca en la época de un estudio previo de balance hídrico (1973) era la extracción de agua de tres pozos y el flujo de salida natural al norte de Oruro, la descarga por los pozos era de 0.7 millones de m<sup>3</sup> al año (22 L/s) y la salida natural de agua subterránea fuera de la cuenca se calculó en 1-2 millones de m<sup>3</sup> por año (30-60 L/s). Consiguientemente, la recarga teórica era mucho mayor que la descarga de agua subterránea calculada y se puede concluir que los cálculos disponibles sufrían de incertidumbres significativas.

La situación hoy en día es que los cinco pozos de producción en Challa Pampa y Challa Pampita han creado un área de baja presión y ningún agua subterránea fluye fuera de la cuenca. La descarga está alrededor de 150 L/s. Como resultado del bombeo el nivel del agua ha caído por lo menos 4-5 m en grandes áreas. Esta situación probablemente ha aumentado la recarga de agua subterránea.

A fin de estudiar las características hidráulicas del agua subterránea, se estableció un modelo numérico de flujo de agua subterránea. Se debe enfatizar que el modelo está basado en datos bastante inciertos y que el trabajo debe ser visto como un modelado genérico.

### 2.5.6 Modelado numérico de aguas subterráneas

El objetivo del modelado de aguas subterráneas era de analizar el sistema de flujo del agua subterránea en términos de la transmisividad y el balance de aguas. La transmisividad característica del acuífero fue compilada de datos de investigaciones previas y de pruebas realizadas dentro de este estudio. El modelado fue realizado siguiendo los siguientes pasos:

1. Simulación de la situación actual con los pozos de extracción en Challa Pampa y Challa Pampita en uso. Las presiones piezométricas calculadas fueron comparadas con las mediciones hechas el otoño de 1996. (*Figura 2.5.1*)
2. Simulación de condiciones naturales sin presencia de pozos de extracción. Las presiones piezométricas calculadas fueron comparadas con datos que describen la situación a principios de los años 70.

El parámetro de recarga en el modelo se basó en los valores de "flujo base" estimado en el reporte concerniente a la Hidrología del área del PPO (1996). Como un valor inicial se seleccionó 40 mm por m<sup>2</sup> por año. Las áreas de recarga en el modelo fueron seleccionadas en base al mapa geológico (*Figura 2.3.1*) asumiéndose recargas elevadas en áreas donde los ríos principales ingresan a la cuenca. Para el área aguas arriba de Challapampa se seleccionó como recarga total 139 L/s (c. 60 % del flujo base). Para el área de Vinto y el Río Sepulturas el valor correspondiente fue 15 L/s. El valor de transmisividad característico del acuífero fue

estimado en base a datos disponibles de una serie de pruebas hidráulicas. Como valor inicial se seleccionó una transmisividad de  $3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .

La primera calibración indicaba que la transmisividad seleccionada era muy alta, resultando en valores muy bajos de presiones piezométricas aguas arriba de Challapampa. Cuando la transmisividad fue reducida a  $2.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , los niveles calculados eran parecidos a los niveles medidos (Figura 2.5.2). Al este de Oruro se desarrolló una divisoria de aguas subterráneas y se podía observar un cono de depresión debido a la extracción de 150 L/s en los pozos de producción de SeLA.

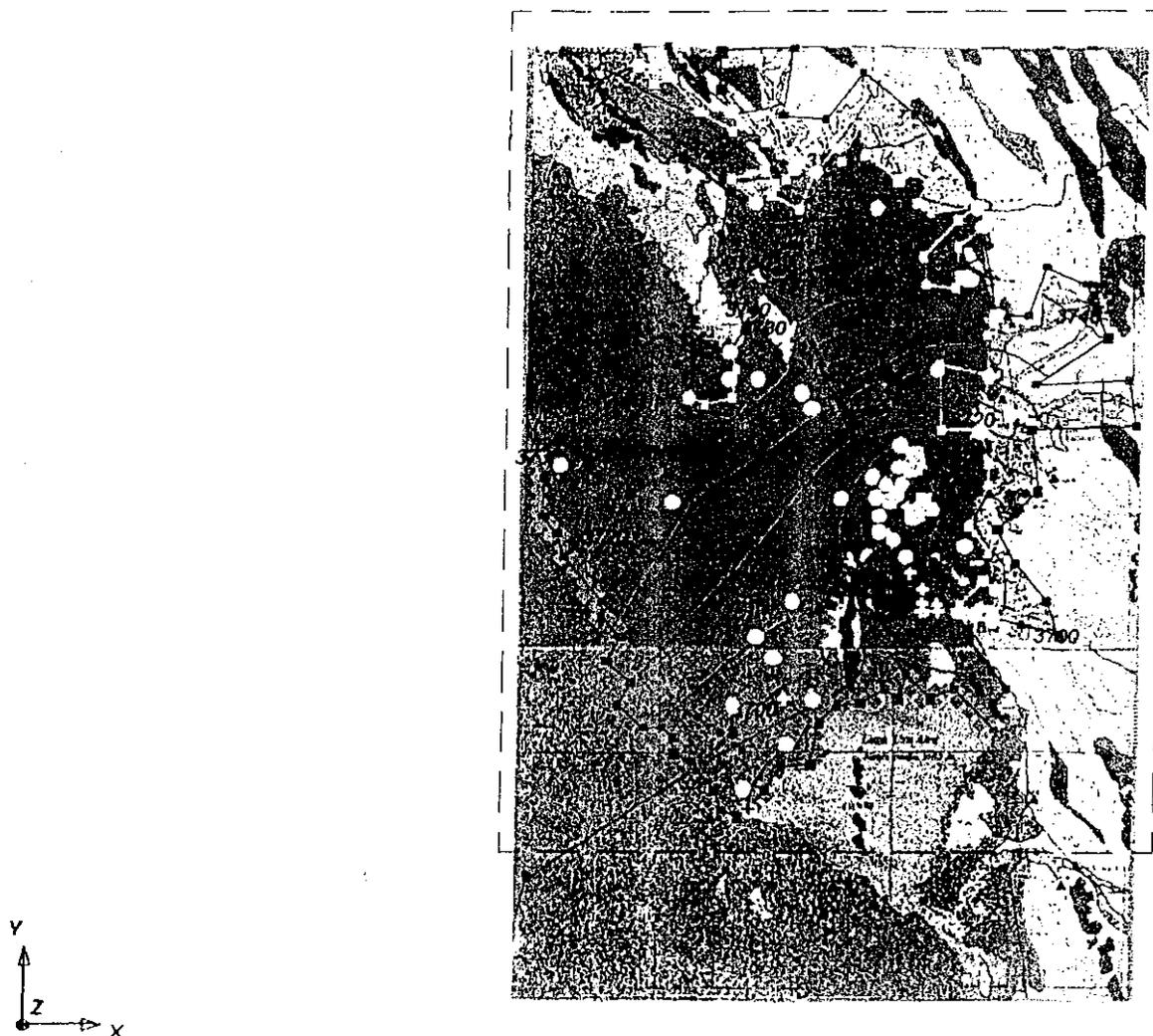


Figura 2.5.2 Niveles de agua calculados asumiendo una recarga total de 139 L/s aguas arriba de Challapampa, una descarga debida al bombeo de 150 L/s en Challapampa y una transmisividad de  $2.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .

En la fase siguiente a la calibración no se tomaron en cuenta los pozos de producción de SeLA. Los niveles piezométricos calculados entonces eran muy elevados. Esto estaba en concordancia con las restricciones de flujo al norte de Oruro que fueran supuestas en el modelo conceptual. Los análisis mostraron que la única explicación plausible para la diferencia mostrada entre los resultados calculados y los datos calibrados, es que el sistema de flujo debió haber cambiado después del inicio de la extracción de agua.

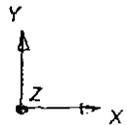
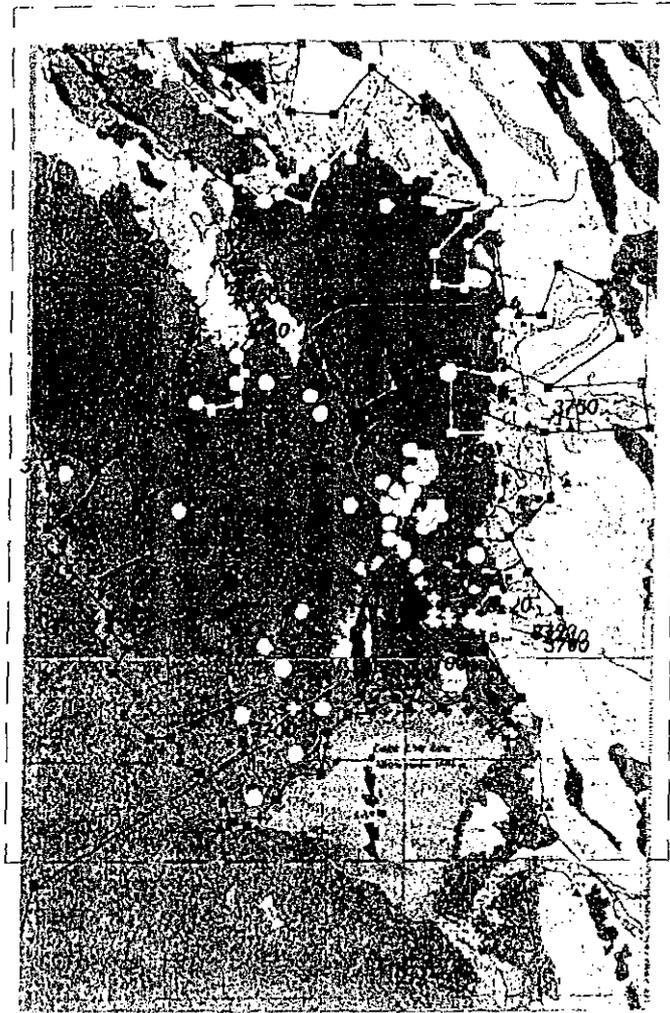
En la calibración final se redujo la recarga hasta calcular presiones razonables (*Figura 2.5.3*). Esto se logró con una recarga de 50 % del valor inicial de recarga (correspondiente a unos 70 L/s). La situación descrita indica que hay más agua disponible para extracción que antes. Esta situación se explica por las siguientes razones:

1. La recarga de aguas subterráneas se incrementó debido a las bajas presiones piezométricas en el acuífero. Este efecto fue estudiado en otros proyectos y es aceptable. En efecto, la recarga de aguas subterráneas es muy limitada en condiciones artesianas.
2. Antes que la extracción de aguas subterráneas en Challpampa comience, se documentaron condiciones artesianas en el acuífero. Las presiones artesianas favorecen el desarrollo de vertientes a lo largo del borde de la cuenca y flujo vertical hacia acuíferos poco profundos (e inclusive de los sistemas superficiales de agua). De esta manera se desahogaba el acuífero más profundo.

Sin embargo, juzgamos que 70 L/s es una cantidad muy elevada para explicarla por la reducción de descargas y la pérdida por vertientes frías. Debido a incertidumbres en el conjunto de datos, no se realizó un afinado adicional del modelo variando la transmisividad, la recarga o introduciendo cambios en el modelo conceptual.

En el modelamiento de estado estacionario descrito arriba, se asume que la recarga se distribuye durante todo el año. A fin de estudiar la sensibilidad del acuífero a cambios mayores en el balance de agua, la recarga en el modelo fue totalmente cortada por un año y el coeficiente de almacenamiento se estimó en  $1 \times 10^{-3}$ . El modelamiento transiente resultó en

una depresión del orden de 3-5 m en la sub-cuenca Caracollo - Oruro. La depresión calculada en el campo de pozos de Challapampa fue menor a 1 m, obviamente limitada por el ingreso de agua subterránea de las grandes áreas al oeste. De acuerdo con esto, los acuíferos profundos no son muy sensitivos a cambios en la recarga. Esta situación se respalda también en las observaciones de niveles de agua que muestran cambios muy pequeños a lo largo del año (a pesar de que los niveles están afectados por mareas terrestres). Sin embargo, debe notarse que el coeficiente de almacenamiento puede ser muy alto, lo que tendría un alto impacto en los resultados del modelamiento. Para los acuíferos superficiales los cambios en los niveles de agua durante el año son mucho mayores, presumiblemente entre 5-10 m.



*Figura 2.5.3 Niveles de aguas subterráneas calculados asumiendo una recarga total de 79 L/s aguas arriba de Challapampa, sin descarga debida al bombeo en Challapampa y con una transmisividad de  $2.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .*

En el estudio de Lizarazu et al. (1987) la velocidad de flujo en el acuífero fue estimada en la base de actividad de  $^{14}\text{C}$  en 1 m/a. Utilizando datos hidráulicos, la velocidad de flujo calculada fue de unos 30-40 m/a. Basados en el último intervalo de velocidad, el tiempo de transporte de Paria al campo de pozos de Challapampa es alrededor de 250 a 330 años, y de las áreas contaminadas alrededor de Oruro hasta Challapampa de unos 100 años. Sin embargo, en base a los datos geológicos de la región norte de Oruro, el área de flujo parece ser más delgada comparada con las partes centrales de Challapampa, y consecuentemente el tiempo de transporte es mucho menor, probablemente entre 10 y 30 años.

Seguendo el trabajo de modelamiento se logró identificar un número de características disponibles en la base de datos.

1. Distribución de transmisividad en la cuenca
2. Distribución de presiones piezométricas en la parte oeste del modelo
3. Características hidráulicas de los límites oeste y noroeste
4. Datos básicos para calibración de otras situaciones hidráulicas
5. Parámetros de transporte

El modelamiento indica que el arreglo del balance de agua fue bastante preciso. Cambios menores en la distribución de la transmisividad y los valores de recarga podrían mejorar el resultado de la calibración. Sin embargo, el estudio de sensibilidad realizado muestra claramente que la recarga actual está en el mismo orden que la descarga en los pozos de producción de Challapampa. Un mayor ritmo de descarga crearía presiones piezométricas menores en el acuífero e incrementarían el flujo de aguas subterráneas de áreas adyacentes a Oruro y del este.

Si se mejora la base de datos, el modelado de aguas subterráneas será un instrumento valioso para:

- desarrollar un análisis de sensibilidad para estudiar las condiciones hidráulicas y el potencial del acuífero
- estudiar las consecuencias de diferentes posiciones de pozos de extracción y diferentes ritmos de descarga
- calcular el tiempo de transporte de la contaminación
- generar bases para la toma de decisiones en la gestión de aguas subterráneas.

## 2.6 Descripción geoquímica

Todos los resultados químicos e isotópicos encontrados se muestran en el *Apéndice B*. La diversidad química de estas aguas es muy grande, ejemplificada por la variación del cloruro entre 10 mg/L y 40,000 mg/L. La variación de los isótopos de oxígeno y azufre es también bastante grande. A fin de estructurar los datos químicos, los cocientes químicos e isotópicos se presentan en los grupos geográficos y químicos definidos. Para la ubicación de los puntos de muestreo ver las Figuras que siguen y el *Apéndice C*.

### 2.6.1 Aguas de Paria - grupo 1

El área de Paria es considerada como posible área de recarga para las aguas de Challa Pampa. Este grupo contiene muestras de un agua subterránea poco profunda (PPO 20) y una profunda (PP17) y dos de aguas superficiales del Río Paria (*Tabla 2.6.1*). La composición química e isotópica del agua subterránea profunda es diferente de las otras que tienen entre ellas una composición más similar. El agua en PP 17 tiene temperatura y salinidad mayores y una composición isotópica de oxígeno mucho más baja (-17 ‰) en comparación con las otras muestras de agua (entre -13.25 y -13.66 ‰). Los valores  $\delta^{34}\text{S}$  para las aguas de este grupo están entre +2.3 y +4.3 ‰ aparte del PP 17 que tiene un valor  $\delta^{34}\text{S}$  de +23.4 ‰ y una concentración de sulfatos mucho más baja que las otras muestras de agua. Las concentraciones de elementos traza son bajas, solamente la concentración de Sb en el Río Paria 1 es mayor que la norma para agua potable (5  $\mu\text{g}$  por la OMS). Es relevante hacer notar que esta agua superficial también tiene 90  $\mu\text{g}/\text{L}$  de Zn.

Tabla 2.6.1 Agua muestreada en Paria

	Muestra	Temperatura C	pH	Conductividad eléctrica mS/m	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta^{34}\text{S}$ ‰
PPO 20	BOL 01	15.0	6.8	124	-13.27	4.3
PP 17	BOL 02	19.7	7.1	197	-17.01	23.4
Río Paria 1	BOL 03	13.0	8.3	50	-13.25	4.0
Río Paria 2	BOL 04	10.7	8.5	60	-13.66	2.3

### 2.6.2 Aguas geotermales - grupo 2

Se muestrearon dos aguas geotermales en el límite oriental de la sub-cuenca Caracollo-Oruro; las aguas termales de Obrajes y Soracachi (Tabla 2.6.2). No fue muestreada el agua termal dell Balneario de Capachos. La química de las aguas termales es bastante similar, con una temperatura de descarga de unos 70°C (las fuentes de Obrajes fueron muestreadas de la descarga del área geotermal y no en la fuente de descarga más caliente). Típica para aguas termales, el agua tiene una alcalinidad alta y concnentraciones relativamente bajas de Ca y bastante altas de Si. Los valores  $\delta^{18}\text{O}$  de estas aguas son de +19.2 y +24.2 ‰ respectivamente. Las concentraciones de elementos traza son bajas, solamente los niveles de Sb son más altos que el valor recomendado.

Tabla 2.6.2 Agua geotermal muestreada

	Muestra	Temperatura C	pH	Conductividad eléctrica mS/m	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta^{34}\text{S}$ ‰
Obrajes	BOL 05	31	6.7	198	-15.27	19.2
Soracachi	BOL 06	70	7.0	266	-15.36	24.2

### 2.6.3 Aguas de Challa Pampa - grupo 3

Este grupo comprende once muestras de agua de pozos excavados y perforados en Challa Pampa y Challa Pampita (Tabla 2.6.3). Estas aguas son algo similares químicamente y la

mayor parte de las muestras de agua tienen una composición de isótopos de oxígeno relativamente homogénea. El agua obtenida de SeLA 10 es una excepción en la química con temperatura (cerca a 32°C), alcalinidad y salinidad mucho mayores que las otras. El valor  $\delta^{18}\text{O}$  para el SeLA 10 fue, sin embargo, similar a las otras muestras de agua de Challa Pampa; entre -13 y -14 ‰. Los valores  $\delta^{18}\text{O}$  de las otras aguas de los pozos de SeLA 2, 3 y 4 (Challa Pampita) son ligeramente más altos, de -14.2 a -14.5 ‰.

Los once pozos tienen distintas profundidades y estado hidráulico; la mayor parte de los pozos que pertenecen a SeLA y el BP 104 (artesiano) fluían continuamente, mientras que PI-3, PI-5 y SeLA 04 no estaban en uso, pero fueron bombeados antes de muestrear. La muestra de Canllapata fue tomada de un pozo excavado poco profundo.

Tabla 2.6.3 Aguas muestreadas de Challa Pampa

	Muestra	Temperatura C	pH	Conductividad eléctrica mS/m	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta^{34}\text{S}$ ‰
Canlla Pata	BOL 07	13.0	8.3	150	-13.30	1.4
SeLA 02	BOL 18	14.4	7.7	132	-14.25	3.8
SeLA 03	BOL 19	14.0	7.7	162	-14.48	5.8
SeLA 04	BOL 30	12.7	7.2	119	-14.20	14.6
SeLA 07	BOL 17	16.1	7.7	93	-13.61	3.8
SeLA 09	BOL 09	15.2	7.8	105	-13.54	9.1
SeLA 10	BOL 16	31.8	7.0	323	-13.96	9.5
SeLA 11	BOL 20	15.4	7.8	101	-13.61	6.1
PI-3	BOL 21	13.8	7.9	117	-13.81	2.2
PI-5	BOL 42	15.2	7.4	112	-13.50	4.6
BP 104	BOL 43	14.2	7.5	110	-13.58	8.5

Las aguas de Challa Pampa muestran una variación química e isotópica distribuida geográficamente. La concentración de cloruro aumenta hacia el este y sur mientras que la concentración de sulfato generalmente disminuye hacia el este y sur. Los valores  $\delta^{34}\text{S}$  (ver *Figura 2.6.1*) aumentan con la disminución del sulfato, hecho ejemplificado con las aguas de un pozo excavado en Canllapata (+1.4 ‰) y PI-3 (+2.2 ‰) en las aguas de PI-5 y BP 104 con

valores  $\delta^{34}\text{S}$  de +14.6 y +8.5 ‰, respectivamente. La gradiente de  $\delta^{34}\text{S}$  entre SeLA 07, 11 y 09 es similar a como se describe arriba. Hacia el sur, también hallamos similares datos sobre isótopos de S: los valores  $\delta^{34}\text{S}$  de los pozos SeLA 07 y SeLA 02 son de +3.8 ‰ y los valores  $\delta^{34}\text{S}$  del sulfato de las muestras SeLA 11 y SeLA 03 son de alrededor de +6 ‰.

Es de destacar que el valor  $\delta^{34}\text{S}$  del sulfato en SeLA 04 es bastante pesado (+14.6 ‰). Esta agua es también la única agua en Challa Pampa donde los valores de cualquier elemento traza eran más altos que la norma para agua potable; se encontró alrededor de 450  $\mu\text{g/L}$  de Fe (la norma es de 300  $\mu\text{g/L}$  según la OMS).

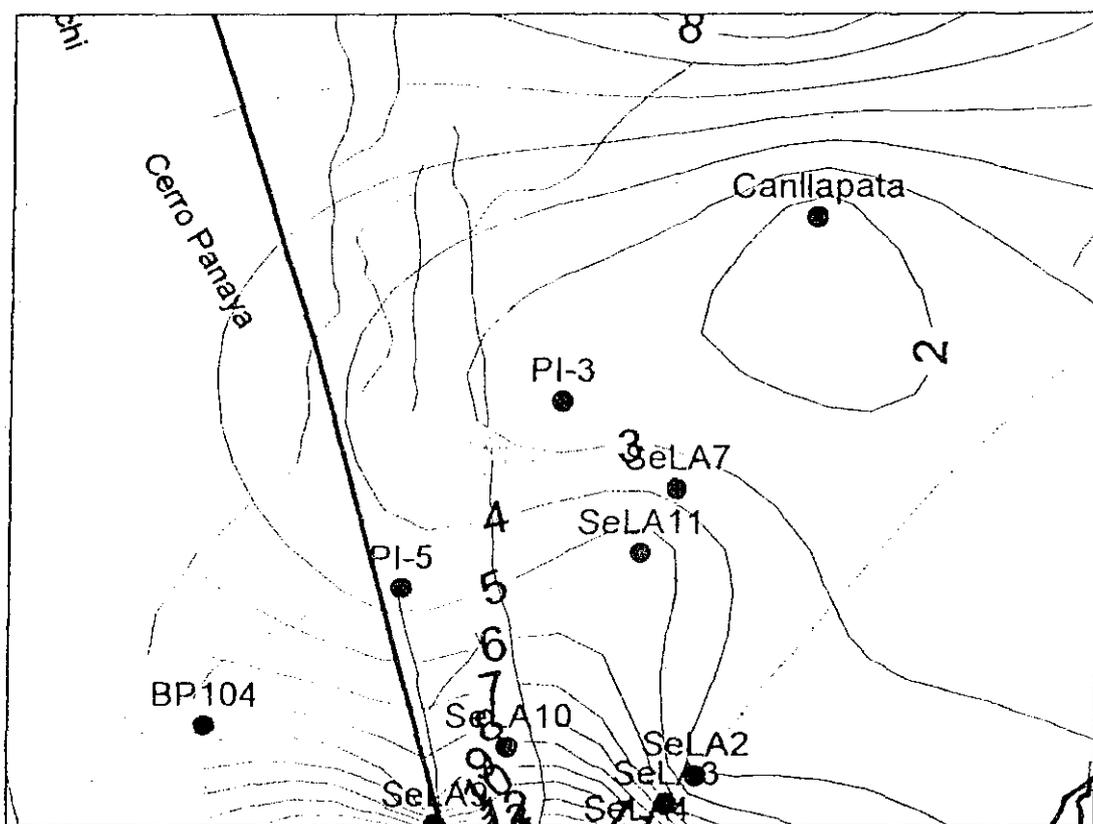


Figura 2.6.1 Distribución de  $\delta^{34}\text{S}$  en el agua muestreada en Challa Pampa (valores en ‰).

#### 2.6.4 Aguas reductoras al norte de Oruro - grupo 4

Cuatro de las muestras de agua en este estudio tienen una composición de isótopos de azufre bastante pesada; muestras de Aurora, PPO 21 y PPO 22 (Tabla 2.6.4). Para todas las muestras

los valores  $\delta^{34}\text{S}$  están por encima de +20 ‰, siendo el  $\delta^{34}\text{S}$  para sulfato en la Aurora, el extremo; +33.9 ‰.

Las aguas también tienen una concentración baja de sulfato, pese al hecho de que la conductividad y salinidad son altas. En forma interesante, las concentraciones de Ba en el agua de estos pozos son muy altas. Es de notar que en la vecindad de estos pozos están localizados los pozos SeLA 9 y SeLA 4 (ambos en el grupo de Challa Pampa) con valores  $\delta^{34}\text{S}$  relativamente altos, y un olor a sulfuro algo desagradable. La composición de isótopos de oxígeno en las aguas de estos pozos es bastante homogénea, los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  son de -14.5 ‰ en el PPO 21 y -14.9 ‰ en los otros.

*Tabla 2.6.4 Agua reductora muestreada al norte de Oruro*

	Muestra	Temperatura C	pH	Conductividad eléctrica mS/m	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta^{34}\text{S}$ ‰
Aurora	BOL 08	13.8	6.8	785	-14.92	33.9
PPO 21	BOL 51	15.8	6.8	492	-14.53	22.1
PPO 22	BOL 29	14.9	6.6	165	-14.84	19.7
PPO 22	BOL 52	13.6	7.1	118	-14.87	20.8

Las concentraciones de elementos traza en el agua subterránea son bajas en el PPO 22, pero comparativamente altas en el agua subterránea de Aurora y especialmente del PPO 21, excediendo en 10 veces las normas de la OMS para Fe (en ambas aguas) y en 2-3 veces para Al, As, Cd, Pb y Zn.

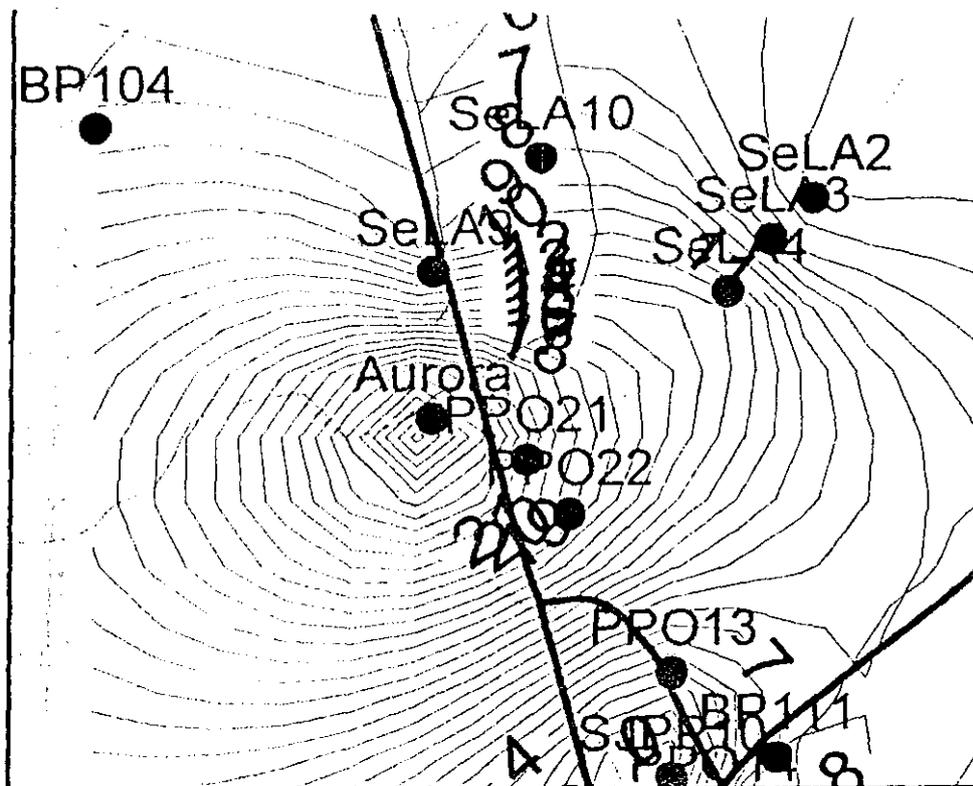


Figura 2.6.2 Distribución de  $\delta^{34}\text{S}$  en el agua muestreada al norte de Oruro (valores en ‰).

### 2.6.5 Aguas subterráneas relacionadas con DAR - grupo 5

Este grupo comprende 17 muestras de once diferentes puntos de muestreo (Tabla 2.6.5). Los duplicados fueron muestreados en dos diferentes ocasiones en junio y octubre de 1996 (excepto el PPO 16 donde ambas muestras fueron tomadas en junio). El agua más concentrada hallada en este estudio es el Drenaje Ácido de Mina San José (DAMSJ) con unos 90 g/L en TDS de los cuales unos 35000 mg/L son cloruro, 7500 mg/L sulfato y tiene concentraciones extremadamente altas de elementos traza; unos 2 g/L de Fe, 400 mg/L de Al y uno 30 mg/L de Pb y As solamente para nombrar unos cuantos. Solamente Mn, Ba, Hg y Si tienen concentraciones más altas en cualquiera de las otras aguas. Esta agua de color limón brillante tenía un pH bajo de alrededor de 1.

Tabla 2.6.5 Aguas muestreadas de San José

	Muestra	Temperatura C	pH	Conductividad eléctrica mS/m	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta^{34}\text{S}$ ‰
	SJAMD BOL 28	15.8	1.8	13350	-13.60	-0.5
	SJAMD BOL 57	17.3	1.6	>2000	-13.88	-0.5
	SJPPO 01 BOL 24	15.5	3.2	1525	-14.25	-2.2
	SJPPO 01 BOL 56	18.6	4.2	1560	-14.25	-2.3
	SJPPO 07 BOL 26	16.6	6.1	658	-14.44	-0.1
	SJPPO 07 BOL 55	13.5	6.7	1856	--	--
	SJPPO 10 BOL 27	14.9	6.6	1800	-14.48	-3.9
	SJPPO 10 BOL 54	13.5	6.7	1856	-14.46	-3.7
	BP 111 BOL 31	14.8	6.8	6300	-12.02	8.4
	BP 111 BOL 47	16.0	6.5	>2000	-11.92	8.3
	PPO 13 BOL 33	13.7	7.3	5100	-12.10	3.3
	PPO 14 BOL 32	14.5	7.1	6150	-12.90	7.1
	PPO 14 BOL 50	16.1	6.6	>2000	-12.88	7.8
	PPO 15 BOL 11	14.7	7.4	1050	-15.13	5.9
	PPO 16 BOL 10	14.5	7.2	595	-12.69	1.7
	PPO 16 BOL 23	13.2	7.1	613	-14.21	2.6
	BP 109 BOL 25	16.4	6.5	247	-14.60	3.4

Más abajo en las laderas del cerro las aguas se tornan menos ácidas y las concentraciones de elementos disminuyen por dilución. Sin embargo, en la planicie al este de Oruro, el agua mostró un incremento en salinidad y conductividad, pero considerablemente más alcalinidad y  $\text{HCO}_3^-$ . Más al sur, los dos pozos PPO 15 y PPO 16 mostraron agua menos salina con un contenido relativamente bajo de sulfato.

Las aguas muestreadas en dos ocasiones tienen una química remarcadamente diferente entre las dos campañas de muestreo, pero sus composiciones isotópicas son similares. Esto es probablemente un efecto de la variación en la química del agua de descarga de la mina y la variación de las influencias de otras aguas en el área.



de unos -12 ‰. También la primera muestra del PPO 16 era pesada (antes de soplar con aire el pozo) pero la segunda fue de -14.2 ‰.

La concentración de elementos traza es extrema en las aguas en las laderas del cerro como se dijo antes, pero también se exceden los valores recomendados en las aguas de la pampa de Oruro particularmente en el Pb, así como en unos pocos otros elementos, que ocasionalmente muestran concentraciones más altas.

#### 2.6.6 Aguas de Vinto - grupo 6

En el área de Vinto, incluyendo vertientes frías, aguas superficiales y subterráneas como también aguas contaminadas, se tomaron 16 muestras de agua (*Tabla 2.6.6*). Las aguas de Vinto pueden ser seguidas desde el área de recarga, las vertientes frías de Cala Cala y el Río Sepulturas, hasta el agua de procesos de la fábrica (PW) hasta Santa Rosa y el Aeropuerto (PP 117). Las fundiciones de Vinto descargan algo de agua de proceso con elevadas concentraciones de Sb y Zn. Estas aguas se evaporan o percolan en las aguas subterráneas. Ver mayores detalles en el informe PPO 9612.

Las aguas de Vinto son relativamente diluidas, generalmente las muestras aguas subterráneas mostraron la conductividad y salinidad más bajas de todas las muestras de aguas subterráneas, pero claramente más altas en las aguas de más al oeste y especialmente en el pozo profundo BP 114. El agua de este pozo es también marcadamente diferente de todas las demás aguas en su valor de  $\delta^{18}\text{O}$  (-16.7 ‰ en promedio), solamente comparables con el agua subterránea profunda de Paria (PP 17). Se encontró que el agua PW estaba contaminada aunque el valor de TDS no es marcadamente alto - pero el pH era de 2.4, consiguientemente la alcalinidad es cero y con concentraciones marcadamente más altas de metales que cualquier otra agua en Vinto. Se presume que el agua de la fundición de Vinto tiene grandes variaciones químicas.

Tabla 2.6.6 Aguas muestreadas de Vinto

	Muestra	Temperatura <i>C</i>	pH	Conductividad eléctrica <i>mS/m</i>	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta^{34}\text{S}$ ‰
Cala Cala	BOL 22	14.7	6.6	10	-15.53	5.1
Sepulturas	BOL 14	15.2	7.5	101	-9.43	3.0
Río Sepult	BOL 15	14.7	9.1	45	-14.60	2.9
MW-1	BOL 38	15.0	7.6	70	-13.47	3.3
MW-2	BOL 37	16.6	7.3	52	-13.74	1.4
MW-3	BOL 40	12.5	7.2	178	-13.58	1.7
BP 112	BOL 35	15.0	6.4	79	-14.16	1.5
BP 112	BOL 49	16.3	7.7	76	---	---
BP 114	BOL 34	15.8	6.8	770	-16.97	20.5
BP 114	BOL 53	15.7	7.1	691	-16.46	16.7
ENDE	BOL 36	11.7	7.0	174	-14.04	2.5
ENAF	BOL 39	8.8	7.2	66	-14.10	1.0
PW Vinto	BOL 41	22.0	2.4	270	-13.39	-1.6
PP 117	BOL 12	14.5	7.2	158	-14.36	2.3
Santa Rosa	BOL 13	16.4	7.3	229	-14.40	0.7
Conpac	BOL 48	---	7.5	69	-14.17	2.3

Las composiciones de isótopos de oxígeno en el área de Vinto estuvieron entre -13.5 y -14.5 ‰. El área de recarga presentó valores  $\delta^{18}\text{O}$  en aumento desde Cala Cala con -15.5 ‰ hasta el Río Sepulturas con -14.6 ‰. Los valores de  $\delta^{34}\text{S}$  varían desde Cala Cala con +5.1 ‰ hasta PW-VI con -1.6 ‰ a valores de  $\delta^{34}\text{S}$  con unos +2 ‰ antes que el flujo de agua gire hacia el sur. Notablemente el agua profunda del BP 114 muestra valores  $\delta^{34}\text{S}$  diferentes entre las ocasiones de muestreo; 20.5 y 16.7 ‰.

Las concentraciones de elementos traza en estas aguas son relativamente moderadas pero la mayoría de las muestras de agua contienen demasiado Sb, y los pozos MW y PW-VI demasiado As (notar que MW3 tiene por encima de 80  $\mu\text{g/L}$  de As y el MW2 135  $\mu\text{g/L}$  de Sb).

### 2.6.7 Aguas de Orenco - grupo 7

Tres muestras de agua fueron recolectadas durante la segunda campaña de muestreo (Tabla 2.6.7). El punto de muestreo de Orenco es una fuente de agua fría en una fisura de roca. El agua es muy fresca, con baja salinidad, conductividad y concentraciones de elementos traza, alta alcalinidad, valores bajos de  $\delta^{18}\text{O}$  (-14 a -15 ‰) y valores  $\delta^{34}\text{S}$  alrededor de +6.5 ‰ aunque el agua que se presume más profunda (BOL 44) presentó un valor  $\delta^{34}\text{S}$  de casi +12 ‰.

Tabla 2.6.7 Agua muestreada en Orenco

	Muestra	Temperatura C	pH	Conductividad eléctrica mS/m	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta^{34}\text{S}$ ‰
Orenco 246	BOL 44	16.6	7.1	64	-14.17	11.8
Orenco P2	BOL 45	14.7	7.7	64	-15.03	6.3
Orenco sp	BOL 46	16.3	6.8	58	-14.99	6.5

El Altiplano Central tiene un clima árido con precipitaciones pluviales de temporada. Después de la época de lluvias, las aguas superficiales y aguas subterráneas poco profundas se evaporan dejando atrás algunas sales disueltas de ya sea la misma lluvia o de reacciones con rocas de silicatos. Entonces cuando una tormenta de lluvia o la temporada de lluvias llega (y las aguas subterráneas están recargadas), las sales altamente solubles son disueltas rápidamente mientras que otras lo son lentamente. Por lo tanto, el agua tendrá un aumento en cloruro proporcionalmente más alto que en sulfato, ya que la halita es más soluble y más rápidamente disuelta que el yeso. El suministro atmosférico de sal marina en el área debe ser considerado como bajo, por la ubicación del área y su gran altitud. Consiguientemente, la concentración relativamente alta de sólidos disueltos en las aguas superficiales se explica por reacciones de silicato como intemperización de feldespato y disolución de sales evaporíticas. Notar la diferencia de casi 10 veces en la concentración de Cl entre las aguas del Río Sepulturas, Cala Cala y el Río Paria. Las aguas subterráneas de salinidad media o alta también se explican por un proceso similar, una evaporación continua y más importante, la disolución de halita y una intemperización continua de plagioclasas durante el paso del flujo. Las aguas subterráneas de Challa Parmpa aumentan en su concentración de Na y Cl en dirección sureste, en conjunción con un área de recarga al norte y noreste. Esto se ilustra por la distribución geográfica de Na y Cl (*Figuras. 2.7.2 y 2.7.3*).

Normalmente se utiliza el ploteo logarítmico con referencia de la concentración de Cl para demostrar los efectos de la evaporación. El cloruro no es eliminado o suministrado al agua en forma significativa por la interacción agua-roca y no es precipitado como sal hasta que llega a concentraciones muy altas, entonces la concentración de Cl en el agua indica la cantidad de evaporación que se ha producido desde que el agua empezó como lluvia. Si se grafica la concentración de cualquier otro ion versus la concentración de Cl, los efectos que la evaporación tenía sobre ese ion se tornan evidentes. En un diagrama log-log, la evaporación progresiva debería provocar que los puntos se grafiquen en una línea 1:1. La dilución progresiva de una salmuera debería graficarse en forma similar. La relación Na-Cl en la *Figura. 2.7.1* indica que la mayor parte de las aguas de los grupos 4 y 5 son diluidas del DAMSJ (el agua más concentrada) en más de dos órdenes de magnitud, sin que ocurran procesos en gran extensión. Esto implica que el drenaje ácido de la mina está ampliamente esparcido en la ladera del cerro y en la pampa de Oruro cerca a la ciudad.



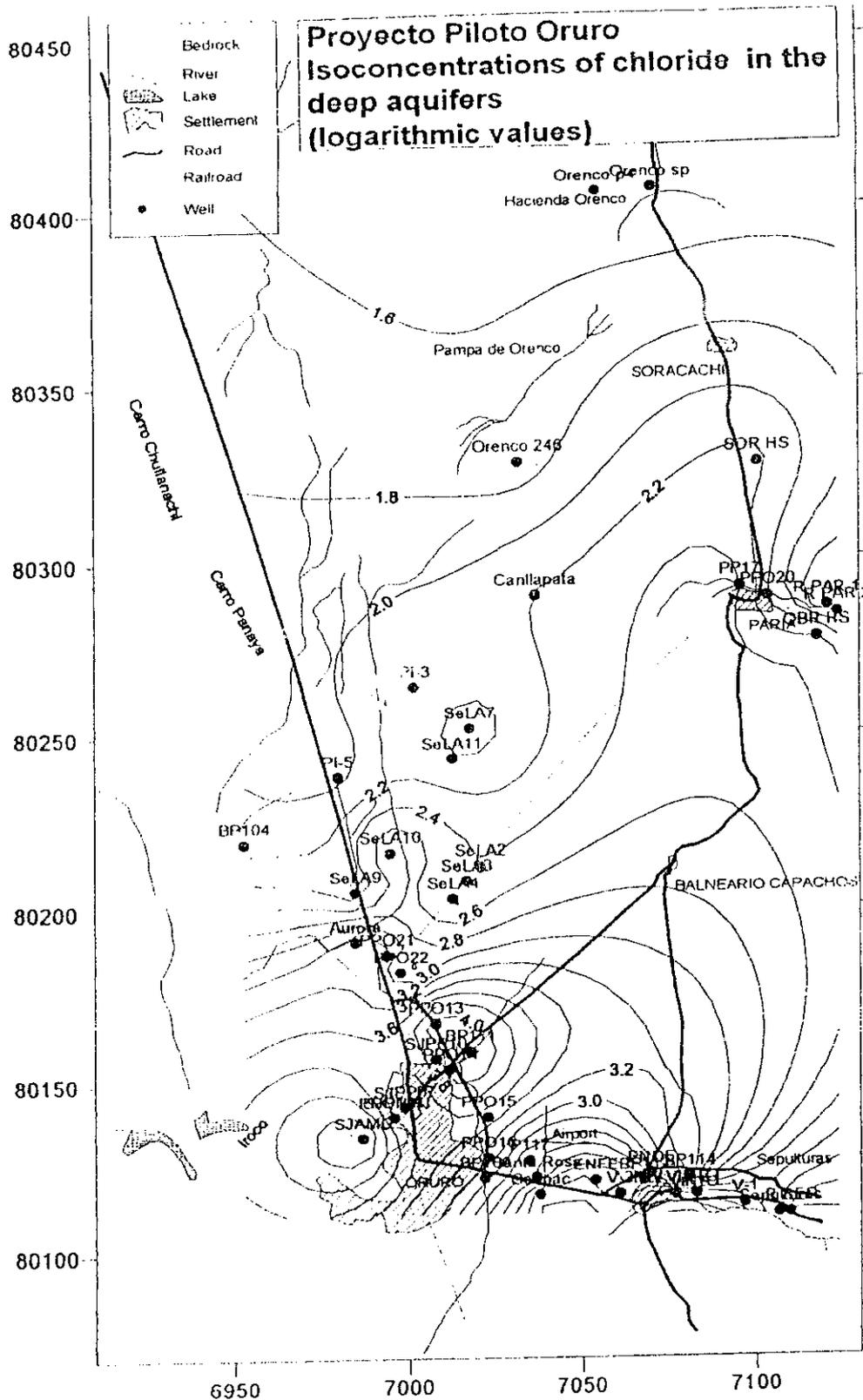


Figura 2.7.3 Distribución geográfica de Cl en mg/L en escala log.

El DAMSJ debe haber adquirido su salinidad por circulación de aguas profundas e interacción con sedimentos ricos en sales o costras de la cuenca. Las aguas geotermales también tienen una circulación más profunda en el bedrock. Tienen una fuente de azufre en sedimentos marinos (ver Sección 2.7.4); la concentración relativamente baja de cloruro en las aguas geotermales indican que los sedimentos marinos no son la fuente de la salinidad en el área de Oruro.

Las concentraciones de fluidos de la cuenca pueden ser evaluadas con un gráfico de  $Ca_{\text{exceso}} - Na_{\text{deficiencia}}$  (Davisson y Criss, 1996), debido a que los fluidos salinos de la cuenca con algún origen de agua de mar tenderán a enriquecer el Ca y agotar el Na debido a la interacción de agua-roca. El  $Ca_{\text{exceso}}$  y el  $Na_{\text{deficiencia}}$  son calculados con la razón de elementos respecto al cloruro en el agua de mar y definida como:

$$Ca_{\text{exceso}} = (Ca_{\text{medido}} - ((Ca/Cl)_{\text{am}} * Cl)) * 2/40.08$$

$$Na_{\text{deficiente}} = (((Ca/Cl)_{\text{am}} * Cl) - Na_{\text{medido}}) * 1/22.99$$

donde las concentraciones están en mg/L. Davisson y Criss (1996) hallaron que no solamente los fluidos sedimentarios de la cuenca pero también aguas subterráneas de las áreas del escudo se grafican en una línea con una pendiente de 1, sugiriendo que un Ca es intercambiado por dos Na. La albitización de las plagioclasas es la causa principal si se considera una reacción. La Figura 2.7.4 es un ploteo de agua del grupo 5, donde puede verse que sólo algunas muestras de agua presentan una disminución de Na, pero casi todas muestran un  $Ca_{\text{exceso}}$  positivo. Se encuentran valores de  $Na_{\text{deficiente}}$  muy negativos para algunas aguas del grupo 5, es decir, que muestran un exceso de Na que podría indicar la adición de alguna halita al agua en la dilución. Mediante cálculos de los valores de  $Na_{\text{deficiente}}$  asumiendo una disolución de la halita, se encuentra que todas las aguas aparte de las aguas salinas (en el grupo 5) han ganado Na mediante reacciones con roca estratificada, de acuerdo al hecho que el Na es liberado de la roca estratificada durante las reacciones con aguas diluidas pero removido de las aguas salinas. Las aguas geotermales son las más enriquecidas con Na (Apendice B y Figura 2.7.1). Otra característica típica de las aguas geotermales es la baja

concentración de Mg y Ca debido a reacciones con minerales de arcilla y la solubilidad retrógrada de la calcita.

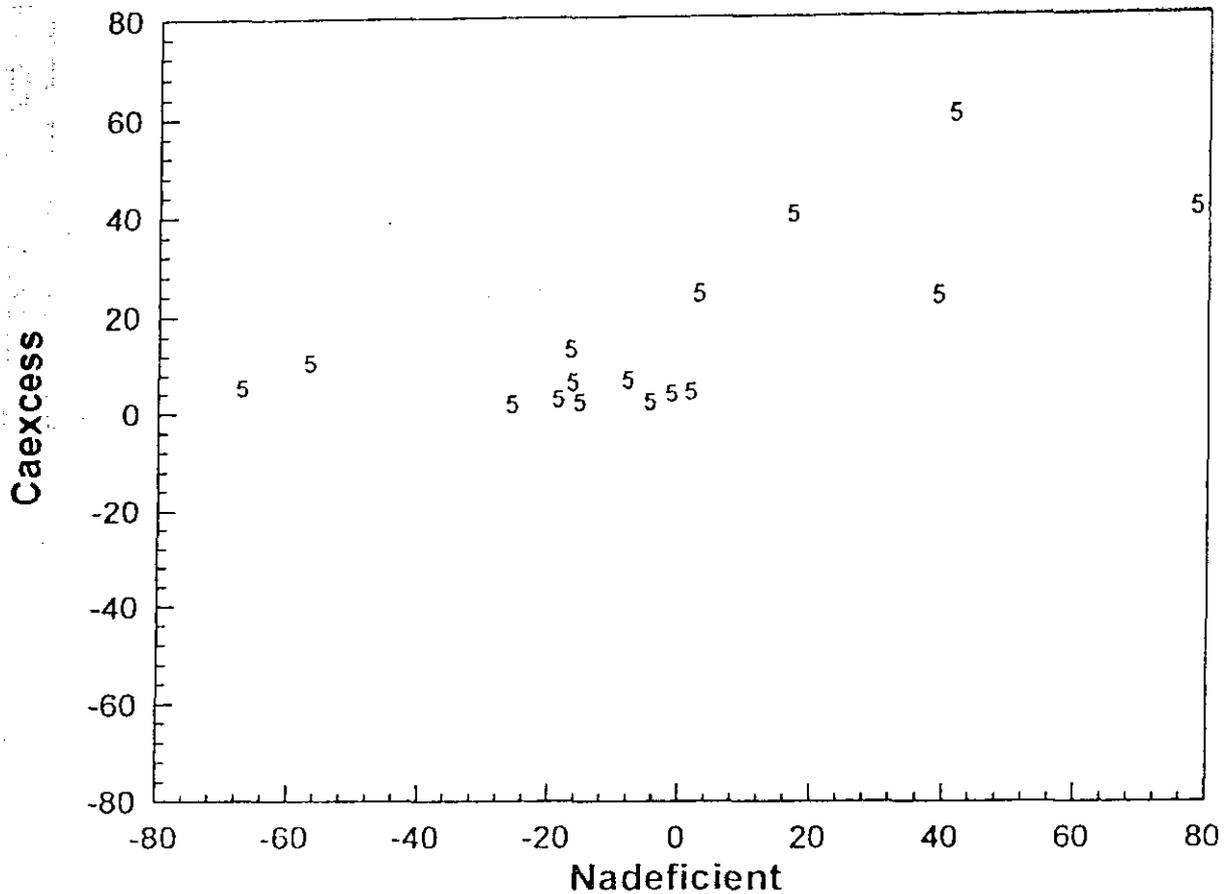


Figura 2.7.4 Valores de  $Na_{\text{deficiente}}$  vs  $Ca_{\text{exceso}}$  para aguas de DAR (grupo 5).

En varias muestras de agua se calcularon índices de saturación con fases minerales (Figura 2.7.5). Casi todas las aguas están en equilibrio con respecto a la calcita, las excepciones son principalmente las aguas ácidas con un pH demasiado bajo para que esto sea posible. Sin embargo, la saturación de yeso se alcanza solamente en las muestras de aguas ácidas (DAMSJ y SJPP0 01, las aguas en la parte superior de la ladera del cerro), pero está cercana a la saturación en las otras aguas en la ladera del cerro y las aguas en la pampa (BP 111, PPO 13, PPO 14, SJPP 10 y SJPP 7). La calcita está subsaturada en las aguas en la ladera del cerro y en SJPP0 10 pero saturada en las otras aguas del grupo 5 en la planicie.

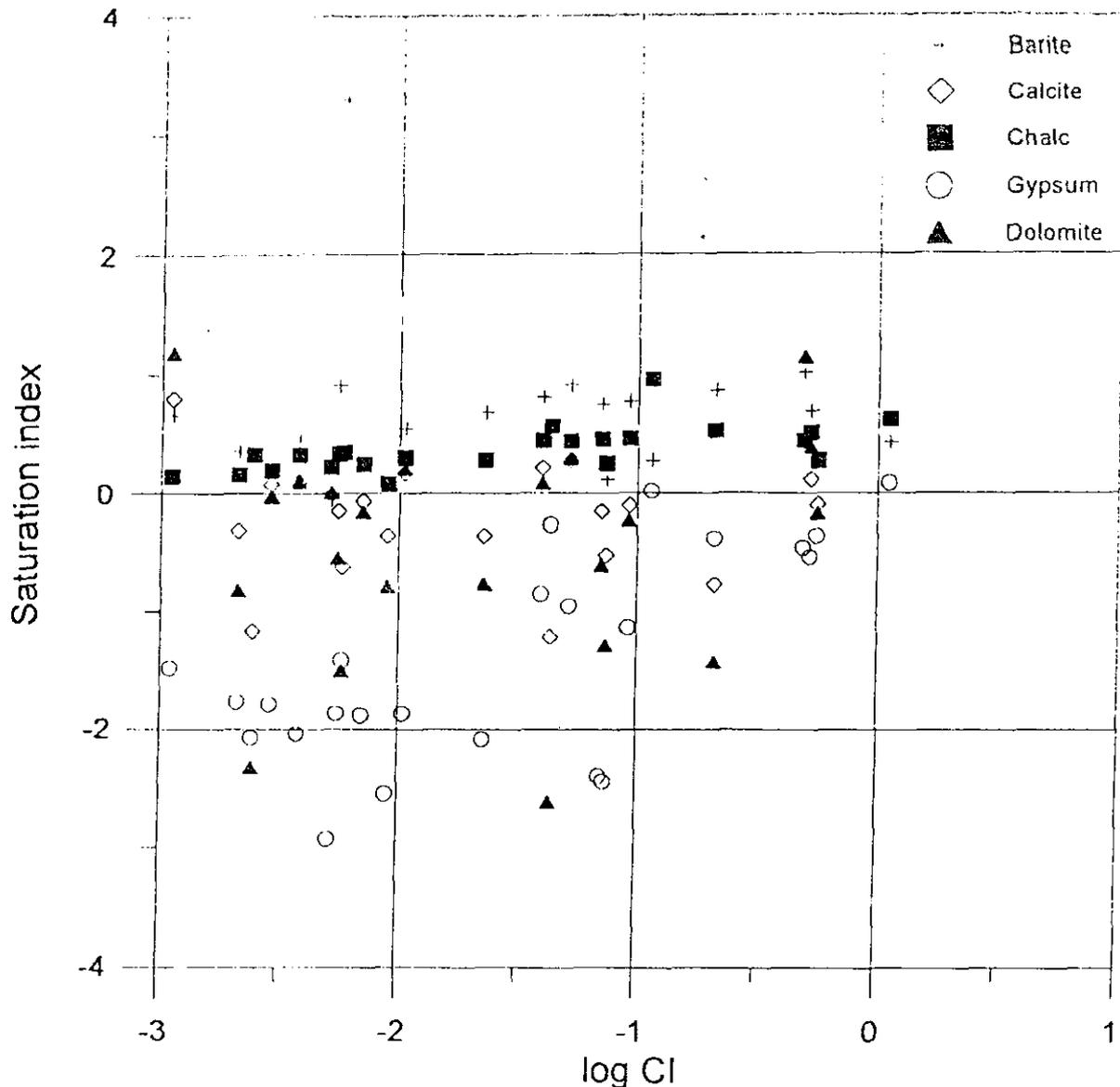


Figura 2.7.5. Índice de saturación para algunos minerales en una serie de muestras de agua en el área. Log. para CI (en moles/L) es plotado respecto del IAP/K calculado para calcita, yeso, dolomita, calcedonia y baritina.

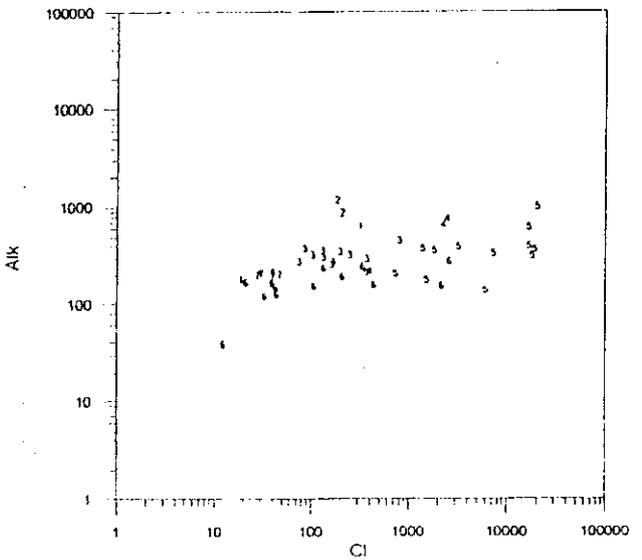
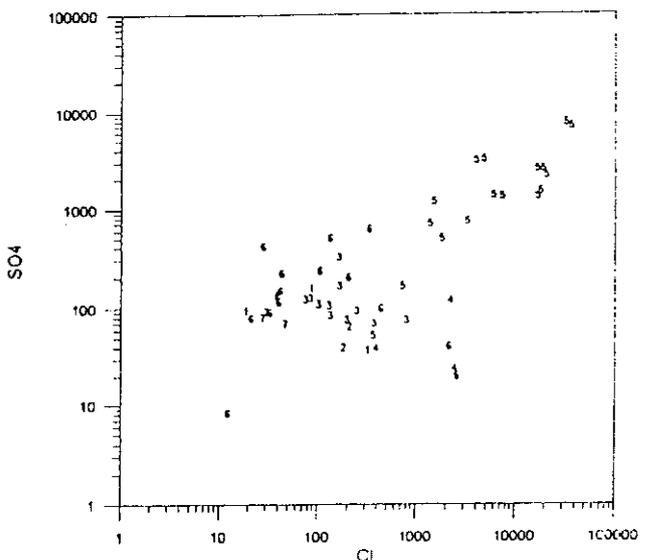
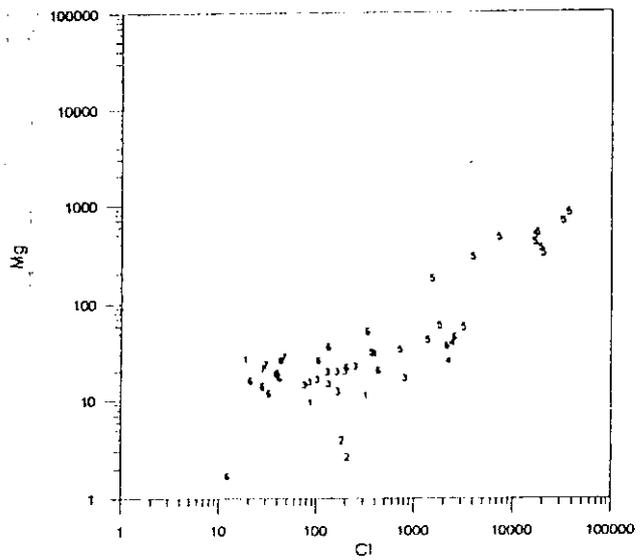
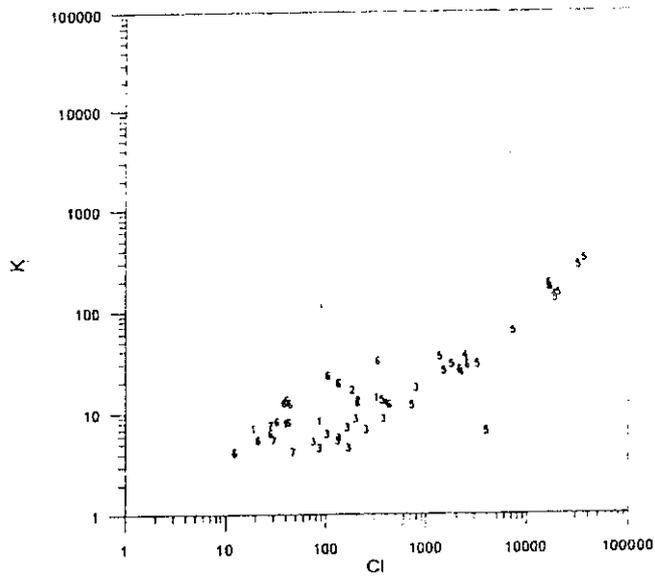
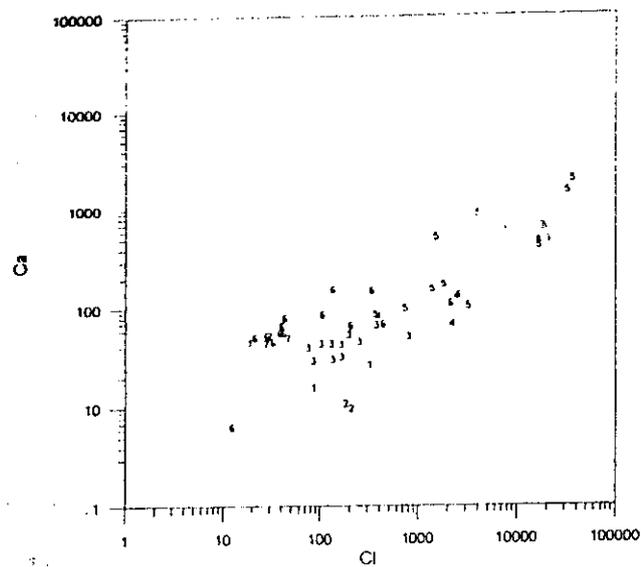
Cuando la mina estuvo en producción, el operador intentó sin éxito, incrementar el pH del agua por adición periódica de cal en el foso de la estación de bombeo dentro de la mina. El resultado principal de este tratamiento fue una extensa precipitación de yeso en las paredes del canal y solamente un incremento temporal y ligero del pH. Tanto las paredes del canal y el foso de San José están cubiertos por yeso, en concordancia con los cálculos.

Todas las aguas subterráneas están saturadas o ligeramente sobresaturadas con calcedonia, indicando que puede alcanzarse el equilibrio con sílice amorfo. La dolomita muestra tanto

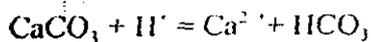
una subsaturación y una sobresaturación, la última puede deberse a una cinética de formación de calcita (precipitación). La baritina muestra una sobresaturación en todas las muestras calculadas pero la concentración de Ba es alta si la concentración de  $\text{SO}_4$  es baja. Al parecer la concentración de Ba es controlada por la concentración del  $\text{SO}_4$  y la solubilidad de la baritina.

Puede usarse la correlación entre el Cl y la mayor parte de otros elementos principales para evaluar la química general del agua. *Figura. 2.7.6 a-e* ( $\log \text{Cl}$  vs.  $\log \text{Ca}$ ,  $\log \text{Mg}$ ,  $\log \text{K}$ ,  $\log \text{SO}_4$  y  $\log$  alcalinidad) muestra que en general para estos elementos, existe una desviación de la pendiente de casi 1:1 obtenida para Na y Cl. Ya que el incremento para las aguas diluidas se debe a la disolución de la halita, es posible que otros elementos en estas aguas muestren una pendiente mucho más baja. Sin embargo, para las aguas del grupo 5, se espera que esta pendiente sea cerca a 1. El potasio disminuye en forma similar al Cl para las aguas de drenaje ácido de mina del grupo 5 (*Figura. 2.7.6 c*). La alcalinidad generalmente no está cambiando en absoluto con la salinidad debido a la saturación de calcita, con la excepción de las aguas ácidas que no tienen ninguna alcalinidad (*Figura. 2.7.6 e*).

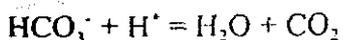
El sulfato muestra una distribución diferente para las aguas del grupo 5 (*Figura. 2.7.6 d*): dilución simple del DAMSJ para SJPP 10, PPO 15 y PPO 16, menor decremento de  $\text{SO}_4$  en comparación con el Cl para las aguas más cerca a la descarga de San José en la ladera del cerro (SJPP 01 y SJPP 07) pero mayor decremento para las otras aguas en la pampa (BP111, PPO 13 y PPO 14). El magnesio muestra una dilución simple para la mayor parte de las aguas del grupo 5 pero un menor decremento significativo para las aguas en la ladera del cerro (SJPP 10, SJPP 01 y SJPP 07); (*Figura. 2.7.6 b*). Por último, el Ca en las aguas del grupo 5 decrece menos comparado con el cloruro durante la dilución del DAR en las aguas en la ladera del cerro (SJPP 10, SJPP 01 y SJPP 07), pero muestra un mayor decremento en las aguas de la planicie (*Figura. 2.7.6 a*). La concentración de Ca y Mg muestra una correlación extremadamente buena para todas las aguas y las aguas del grupo 5, fuera de las aguas en la planicie, que muestran un Mg incrementado en comparación con el Ca (*Figura. 2.7.7*). El pH de estas aguas cambia de ácido a casi neutro en el flujo de la ladera del cerro a la planicie al este de Oruro.



(ver explicación en la página siguiente)



y



La reducción bacterial de sulfato y la descomposición de materia orgánica aumenta la alcalinidad hasta alcanzar la saturación con calcita, y ésta precipita. El resultado en las aguas en la pampa es la disminución de Ca y SO<sub>4</sub>. El Mg debería estar aún alto, debido a que la cinética de la formación de dolomita es tan lenta. La precipitación de yeso resulta en cambios químicos idénticos pero no es favorecida por los cálculos ya que el yeso en estas aguas está subsaturado. El proceso de intercambio de iones entre el Ca y el Na probablemente contribuye también a la disminución de Ca, el Na mostró ligeros incrementos y valores negativos de Na<sub>deficiente</sub> para las aguas en la pampa.

Las aguas del área de Vinto son considerablemente más diluidas. Las aguas superficiales o subsuperficiales muestran incrementos de sulfato pero no de cloruro en dirección oeste. Cerca a Oruro, el agua se torna más rica en Cl y se indica que hay mezcla con el agua subterránea de Oruro (agua diluida del grupo 5), debido a que, ambos SO<sub>4</sub> y Cl, aumentan proporcionalmente (Figura.2.7.3 y 2.7.8).

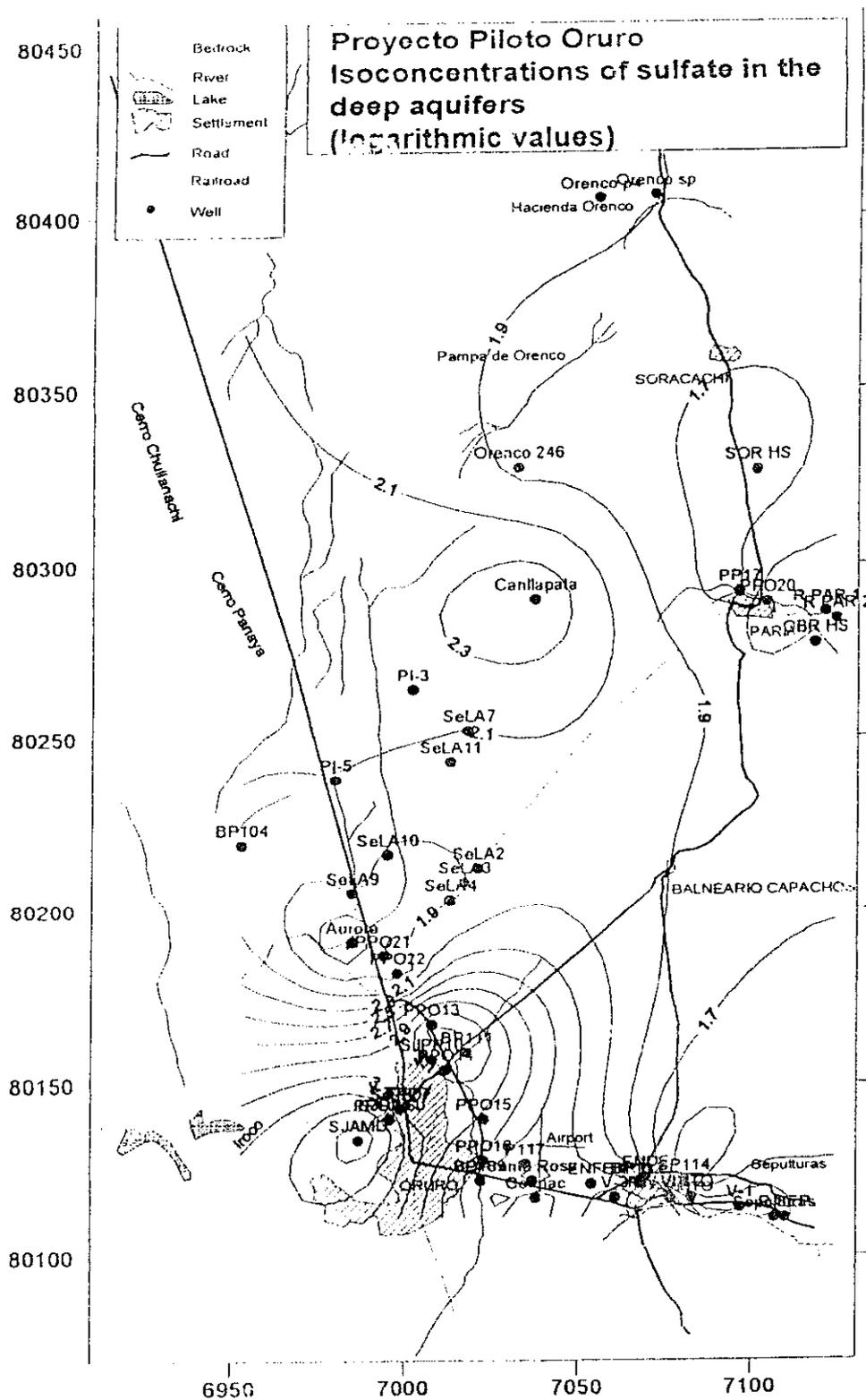
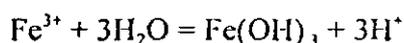


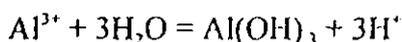
Figura 2.7.8 Distribución geográfica de  $SO_4$  en mg/L planteada en escala log.

### 2.7.2 Distribuciones de metales pesados y metaloides (elementos traza)

La concentración de elementos traza en las aguas subterráneas estudiadas es mucho más baja de lo esperado considerando los aportes por el DAR. La causa más probable es la adsorción o coprecipitación en fase sólida. La adsorción de metales de transición en óxidos e hidróxidos de aluminio, hierro y manganeso es virtualmente inexistente a pH bajo, pero muy fuerte a pH alto. La adsorción es tan efectiva que los óxidos de hierro y manganeso son usados como depuradores en tratamiento de aguas residuales. La adsorción de un metal específico ocurre en un rango de pH estrecho, diferente para cada metal. Por ejemplo, el Cd requiere de un pH más alto que el Cu o el Pb. Durante el flujo ladera abajo, el agua de DAMSJ oxigenada reacciona con carbonatos y el pH se eleva. A medida que el pH sube, ocurre la precipitación de hidróxidos de hierro y aluminio. Estas reacciones también generan un pH menor generando mayor disolución de carbonato sólido, las reacciones son las siguientes:



y



Casi todo el Al y el Fe se precipitan y los metales pesados son adsorbidos y coprecipitados, y por lo tanto limitados por las condiciones de pH casi neutro en el agua subterránea. Esto se ve claramente en el *Apéndice B* donde algunas concentraciones de metales pesados en la DAMSJ disminuyen sólo ligeramente hacia el SJPP0 01 (pH aún bajo), pero casi desaparecen en el siguiente punto de muestreo SJPP0 07 (aunque el Cl también disminuye en un orden de magnitud, los metales pesados realmente se convierten en elementos traza).

Para cualquier cálculo que implique equilibrio químico y toxicidad, es esencial conocer la especiación del elemento en cuestión. En general, el equilibrio de solubilidad da los límites superiores de las concentraciones de los metales pesados disueltos. Cuando se observan grandes sobresaturaciones, significa que el metal se compleja, de modo que la actividad del ion libre del metal es baja pero la concentración es alta. A menudo se observa que la toxicidad de un metal está relacionada a su estado como ion libre y no como un complejo orgánico estable como un quelato. Por lo tanto, una solución con una concentración de Cu de 10 mg/L, donde

el Cu está complejado en 99 % con ligantes orgánicos, es menos tóxica que una solución con una concentración de Cu de 0.5 mg/L si el Cu está como ion libre. En la siguiente interpretación, la concentración y valores límite de los elementos traza, se consideran como de iones libres, debido a que los valores límite están dados como concentraciones.

La distribución de metales pesados y metaloides se evalúa por elemento (*Apéndice B*) y no por grupos de aguas. Las distribuciones geográficas de los elementos traza se muestran en el *Apéndice C*. Algunos elementos como Fe, Cu y Zn son elementos esenciales pero se tornan tóxicos en concentraciones muy altas y, por supuesto, tienen normas recomendadas para las concentraciones límite.

*Hierro (Fe)*: El estándar boliviano para la concentración de hierro en agua potable es de 0.3 mg/L. Las concentraciones de hierro son considerablemente altas en la mayoría de las aguas del grupo 5 y en el agua de proceso ácida de Vinto (PW VI). La concentración de Fe en las aguas del grupo 5 disminuye hacia la pampa, de acuerdo con una precipitación progresiva del hidróxido de hierro. Tres aguas; Aurora, BP 114 VI y PPO 21, muestran una elevada concentración de Fe entre 4 y 50 mg/L, debido a que el estado de oxidación es reductor y favorece la formación de  $Fe^{2+}$  que es mucho más soluble que  $Fe^{3+}$  si el sulfuro está presente sólo en pequeñas cantidades.

*Aluminio (Al)*: Las concentraciones de aluminio son extremadamente altas en las aguas ácidas del grupo 5, de 310 - 463 mg/L, y altas en PW VI (2 mg/L) y ligeramente mayores que el estándar sugerido de unos 50  $\mu$ g/L en unas cuantas aguas del grupo 5. Generalmente, el contenido de Al es finalmente controlado por la solubilidad de la gibsita en agua, pese a que la jurbanita puede ser la fase sólida controlante en aguas ácidas.

*Manganeso (Mn)*: La disminución del Mn, durante el flujo agua por la ladera del cerro, de las aguas del grupo 5, es proporcionalmente menor cuando se compara con la del Al y del Fe. Evidentemente, el Mn no precipita tan rápidamente como el hierro o el aluminio. Esto implica que no todo el Mn está formando  $MnO_2$ , una cantidad apreciable de Mn está en el estado de  $Mn^{2+}$ . En el agua subterránea recolectada en SeLA 9 se observa un valor comparativamente alto.

*Plata (Ag)*: Casi todas las aguas tienen una concentración de Ag menor a  $1\mu\text{g/L}$  y casi la mitad de ellas menos que el límite de detección ( $0.05\mu\text{g/L}$ ). El agua DAMSJ muestra una concentración de  $500\mu\text{g/L}$  y solamente la otra agua ácida y las aguas con alto contenido de cloruro en la planicie tienen concentraciones de unos  $5\mu\text{g/L}$ , indicando que pequeñas cantidades de Ag se mantienen en solución en aguas ácidas o como un complejo de cloruro en las aguas neutras.

*Arsénico (As)*: Los estándares sugeridos para la concentración de As en agua potable son de  $50\mu\text{g/L}$  (Bolivia) y  $10\mu\text{g/L}$  (OMS). Todas las muestras de agua tomadas de los pozos de agua potable del acuífero de Challa Pampa revelan valores de arsénico inferiores a  $4\mu\text{g/L}$ . La mayoría de las muestras restantes fueron analizadas con límites de detección más altos que los valores estándar. El DAMSJ contiene unos  $30\text{mg/L}$ , 60 veces más que el agua ácida PW ( $462\mu\text{g/L}$ ). Varias de las muestras de Vinto tienen un alto contenido de As entre  $10$  y  $80\mu\text{g/L}$ . Con mayor probabilidad, las concentraciones en las aguas del grupo 5 son más altas que el límite de la OMS. La disminución presumiblemente rápida del As disuelto depende de la inmovilización del arseniato en los hidróxidos de hierro y manganeso.

*Bario (Ba)*: La concentración de Ba está un tanto anticorrelacionada con el contenido de sulfato, como se mencionó anteriormente. Típicamente, la concentración más alta de Ba es hallada en las aguas de reducción que carecen de sulfato.

*Cadmio (Cd)*: La concentración de Cd es solamente más alta que los estándares (Bolivia =  $5\mu\text{g/L}$ , OMS =  $3\mu\text{g/L}$ ) en las aguas del grupo 5 comparada con zinc (Zn) que tiene una tasa de disminución similar. Debe notarse que la ingestión recomendada de Cd tiene un máximo de  $0.2 - 0.4\text{mg/semana}$  (OMS).

*Cobre (Cu)*: El estándar para la concentración de Cu es de  $50\mu\text{g/L}$  (Bolivia), superado solamente por las aguas ácidas de San José y en la ladera del cerro. La tasa de declinación es más alta que del Zn y que del Cd. El Cu es, por tanto, adsorbido más rápidamente que estos elementos, pero más lentamente que el plomo (Pb), como se espera en teoría. El estándar de este último es menor que las concentraciones observadas en las aguas del grupo 5 (Bolivia =  $50\mu\text{g/L}$ , OMS =  $10\mu\text{g/L}$ ).

*Mercurio (Hg):* La concentración de Hg es siempre menor que el límite establecido por la OMS: 1 µg/L. El valor máximo hallado es cuatro veces mayor que el límite. Una de las muestras de agua del SJPP07 (256 µg/L) es muy alta. Sin embargo, el laboratorio rechaza un análisis erróneo.

*Antimonio (Sb):* Este elemento tiene un estándar de 10 µg/L. Los valores encontrados en la mayoría de las muestras de Vinto pero no en todas. Para mayor información ver el Capítulo 4 en el Informe PPO 9612.

*Estroncio (Sr):* Este elemento exhibe una distribución que se diferencia de la concentración de Sr en las aguas del grupo 5 es marcadamente diferente en comparación con otros elementos. La concentración de Sr está relacionada con el Sr añadido a las aguas debido a una disolución del carbonato.

### 2.7.3 Isótopos de oxígeno

Generalmente, la composición de los isótopos de oxígeno de las aguas subterráneas refleja la composición de isótopos de oxígeno en la zona de recarga. El desplazamiento de agua en los suelos dispersos; las señales de isótopos contenidos en el suministro de agua muestran distinciones entre sistemas por lo tanto implican que la composición de los isótopos de oxígeno es significativamente diferente.

Los presentes resultados del estudio de isótopos de oxígeno se muestran en los anexos de los valores de  $\delta^{18}O$  y la concentración de cloruro.

la vecindad de la Cordillera posiblemente descargan aguas con valores  $\delta^{18}\text{O}$  más bajos, debido a que la recarga del agua hacia los acuíferos más profundos ocurre a una mayor altitud. Más aún, aguas con valores  $\delta^{18}\text{O}$  más ligeros que  $-15\text{‰}$  (aguas geotermales y agua de la vertiente fría de Cala Cala) sugieren un origen a una mayor altitud, y en el caso de las aguas termales, una circulación de agua profunda en el bedrock. Las aguas geotermales aparentemente tienen poco efecto sobre las aguas del área.

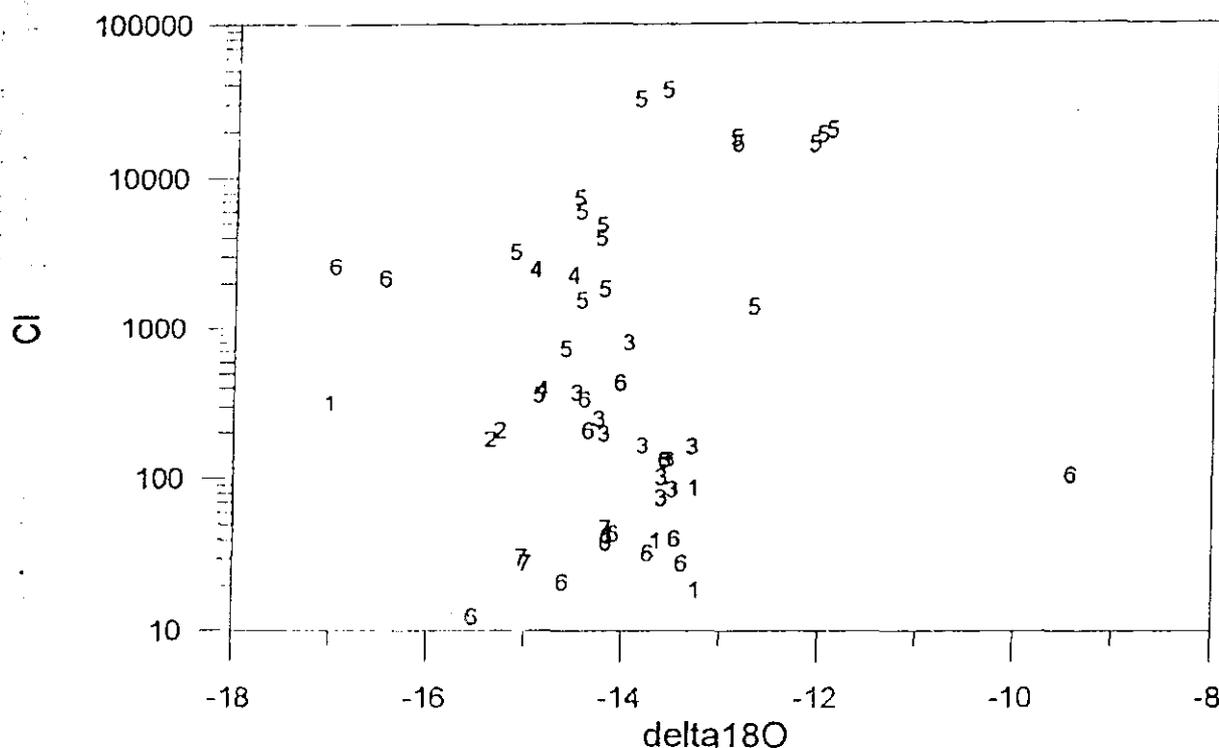


Figura 2.7.9 Valor de  $\delta^{18}\text{O}$  vs. concentración de Cl en aguas muestreadas. Nótese que la composición isotópica de oxígeno de los acuíferos superficiales y sub superficiales de Orenco grupo 7) y Paria (grupo 1) con valores de  $\delta^{18}\text{O}$  entre  $-15$  y  $-13\text{‰}$  cubre el rango para todas las muestras de agua en el área de descarga de Challapampa.

Las aguas descritas líneas arriba son claramente diferentes del resto, que pueden ser divididas en dos grupos en base a la salinidad. El grupo de salinidad baja a moderada tiene un rango estrecho entre  $-15\text{‰}$  y  $-13\text{‰}$  y consiste en agua del grupo Vinto y Challa Pampa como también las posibles áreas de recarga (Paria, Orenco y Río Sepulturas). Por lo tanto, todo el rango de valores  $\delta^{18}\text{O}$  para las aguas de Vinto y Challa Pampa son cubiertas por el rango  $\delta^{18}\text{O}$ , determinado para el agua de las áreas de recarga. Consiguientemente, en base a los

isótopos de oxígeno, se sugiere que el área de recarga del agua subterránea en la planicie de Oruro está en la Cordillera Oriental. Las aguas subterráneas de Vinto se recargan al este, mientras que las aguas subterráneas de Challa Pampa lo hacen desde el norte y nordeste.

Todas las aguas del grupo de alta salinidad incluyen aguas del tipo de drenaje de mina (grupo 5) o aguas reductoras (grupo 4). La mayoría de las muestras tienen valores  $\delta^{18}\text{O}$  entre -15 ‰ y -14 ‰ y el DAMSJ valores  $\delta^{18}\text{O}$  cerca a -14 ‰, lo que implica para estas aguas un origen diferente a las aguas de Challa Pampa y Vinto. Se requiere una circulación profunda dentro del basamento volcánico Terciario en el Altiplano para obtener la alta salinidad.

La composición de isótopos de oxígeno completamente diferente de -13 ‰ a -12 ‰ que se encontró para muestras de aguas subterráneas de tres lugares permaneció similar durante las campañas de muestreo. Estas muestras pertenecen a las aguas del grupo 5 ubicadas en la pampa de Oruro, cerca a la salida del drenaje de mina (canal). No hay áreas de recarga con oxígeno tan pesado en el área. Estas aguas también tenían una mayor salinidad y razón  $\text{Cl}/\text{SO}_4$  que el DAMSJ y las aguas de la ladera del cerro (SJPP0 01 y SJPP0 07), en concordancia con el hecho de que los altos valores  $\delta^{18}\text{O}$  pueden alcanzarse mezclando agua ácida de mina con agua residual evaporada de la ciudad y de la pampa de Oruro. También los valores diferentes de  $\delta^{18}\text{O}$  obtenidos del PPO 16 apoyan esta interpretación, puesto que el enjuague con aire antes del muestreo pudo extraer del pozo el agua subterránea más evaporada, mezclada y alterada en mayor medida que el agua descargada posteriormente, que se interpreta como que consiste de DAR del sur y agua subterránea de Vinto proveniente del oeste.

Estos valores  $\delta^{18}\text{O}$  pesados sugieren además que el caudal de agua subterránea de Oruro en una dirección este debe ser comparativamente bajo y que el flujo de las aguas de Challa Pampa hacia el sur solamente puede ocurrir al este de BP 111 (si ocurriera). Por el contrario, los valores  $\delta^{18}\text{O}$  ligeros del agua reductora (Aurora, PPO 21 y PPO 22) sugieren que las aguas reductoras tienen origen similar pese a que estos pozos tienen profundidades y salinidades distintas. El agua subterránea de Challa Pampa no puede ser el agua fuente, porque los valores  $\delta^{18}\text{O}$ . Puesto que el agua subterránea de Challa Pampa casi limita el área de agua

reductora del norte y este, se sugiere que ésta se recarga con agua de drenaje de mina, debido a que ninguna otra agua en el área tiene un valor  $\delta^{18}\text{O}$  similar.

Todos estos resultados del estudio de isótopos de oxígeno generaron nuevas interrogantes sobre la recarga de aguas subterráneas y la dirección del flujo, o confirmaron estudios previos con isótopos estables ligeros (H, O) en el área (Lizarazu et al., 1987). El resultado previo, obtenido de la pampa de Oruro, basado en una investigación de algunas de las aguas perteneciendo a los grupos 1, 2, 3 y 5, sugiere la presencia de tres tipos de agua: a) agua del acuífero superficial a través de los conos aluviales al pie de la Cordillera Oriental hacia el este. b) aguas geotermales en los bordes de la cuenca sedimentaria al este y c) agua de circulación profunda a través del basamento volcánico Terciario emitida como drenaje ácido de mina de la Mina San José. Varias de las muestras de agua incluidas en el presente estudio ya fueron investigadas hace 10 años, y los resultados de isótopos de oxígeno son muy similares para casi todas las muestras, especialmente las aguas de Paria, los pozos en Challa Pampa y el agua influenciada por el drenaje de la mina de San José. Este resultado también impuso una otra interrogante sobre la utilización de las aguas subterráneas; hasta ahora no se han producido grandes cambios en el agua con respecto a su origen.

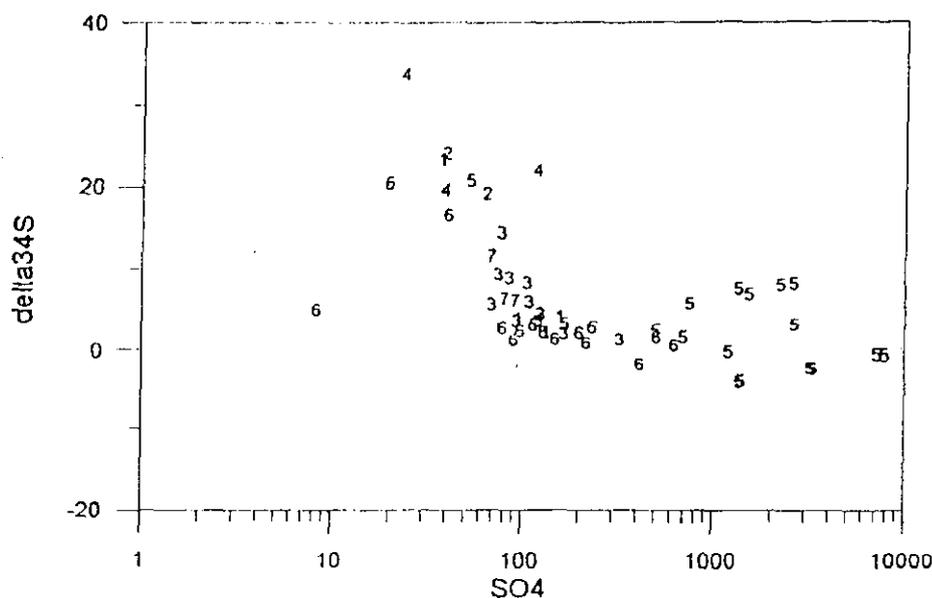
#### 2.7.4 Isótopos de azufre

Las distintas fuentes de azufre fueron también parcialmente identificadas en las aguas estudiadas. El agua del drenaje ácido de mina tiene una composición isotópica de azufre muy cercana a 0 ‰. Los sedimentos marinos presentes bajo los depósitos Cuaternarios muestran valores  $\delta^{34}\text{S}$  de unos +20 ‰. El sulfato en el agua geotermal probablemente adquirió su valor  $\delta^{34}\text{S}$  por la disolución de sulfato de los sedimentos marinos.

El área de recarga de Paria con aguas superficiales y aguas subsuperficiales tiene una química y composición isotópica muy similar a la de las aguas de Challa Pampa de acuíferos poco profundos, mientras que el sulfato de los pozos que descargan los acuíferos más profundos se torna más pesado (valores  $\delta^{34}\text{S}$  más positivos) al tiempo que la concentración de sulfato disminuye (*Figuras 2.7.10 y 2.7.11*). El agua de Paria debería aumentar su salinidad por

interacción con agua de poros de sedimentos marinos o directamente con sedimentos marinos (con "sulfato pesado"). Sin embargo, esto no se considera probable ya que las aguas tienen predominantemente alta concentración de Cl pero baja de  $\text{SO}_4$  (comparar con las aguas geotermales muestreadas) y la de Cl va aumentando a lo largo del flujo del agua subterránea, mientras el  $\text{SO}_4$  va disminuyendo (Figuras. 2.7.3 y 2.7.8). Una explicación más probable es la reducción bacteriana disimilatoria de sulfato (discutida en el párrafo que sigue) pero esto requeriría que uno de los acuíferos profundos se esté reduciendo. Este proceso puede ser identificado tanto en el agua Paria (PP 17), en las aguas reductoras al sud-oeste de Challa Pampa (Aurora, PPO 21 y PPO 22) y en Vinto (BP 114). Ambos procesos conducirían a disminuir el sulfato e incrementar el cloruro, debido a que el agua disolverá más y más cloruro a lo largo de su flujo. La dirección del flujo de agua subterránea es por lo tanto, más probable desde Paria y norte de Paria a los pies de la Cordillera Oriental, hacia el sud y el sudoeste.

a)



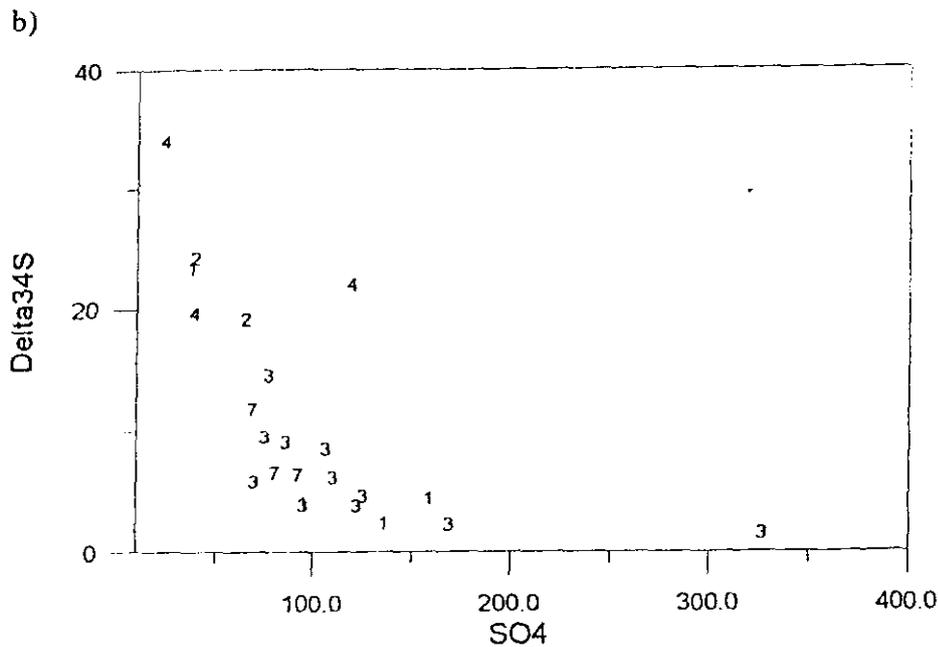


Figura 2.7.10 Concentración de sulfato vs. composición isotópica de azufre. a) Agua muestreadas con  $C_{SO_4}$  en escala log. b) aguas de los grupos 1, 2, 3, 4 y 7

El muy alto valor  $\delta^{34}S$  en el sulfato de Aurora no es explicable con una fuente de azufre diferente, puesto que todas las fuentes de azufre en el área tienen valores  $\delta^{34}S$  menores. La reducción bacteriana del sulfato es el único proceso que puede fraccionar los isótopos de azufre en cualquier medida en las condiciones de la superficie terrestre, es decir a temperaturas menores a  $50^{\circ}C$  (Van Stempvoort et al., 1990). Durante la reducción bacteriana de sulfato ocurre un enriquecimiento de  $^{32}S$  en el sulfuro de hidrógeno formado, lo que implica que el sulfato remanente será enriquecido con  $^{34}S$  en un mayor y mayor grado hasta que se alcance un estado estacionario (en tanto la reacción proceda y el sistema esté abierto). El sulfuro de hidrógeno reacciona con metales, predominantemente Fe y permanece bajo tierra en una fase sólida. La consecuencia es que la reducción bacteriana del sulfato es fácilmente identificada con una menor concentración de sulfato y valores  $\delta^{34}S$  más elevados.

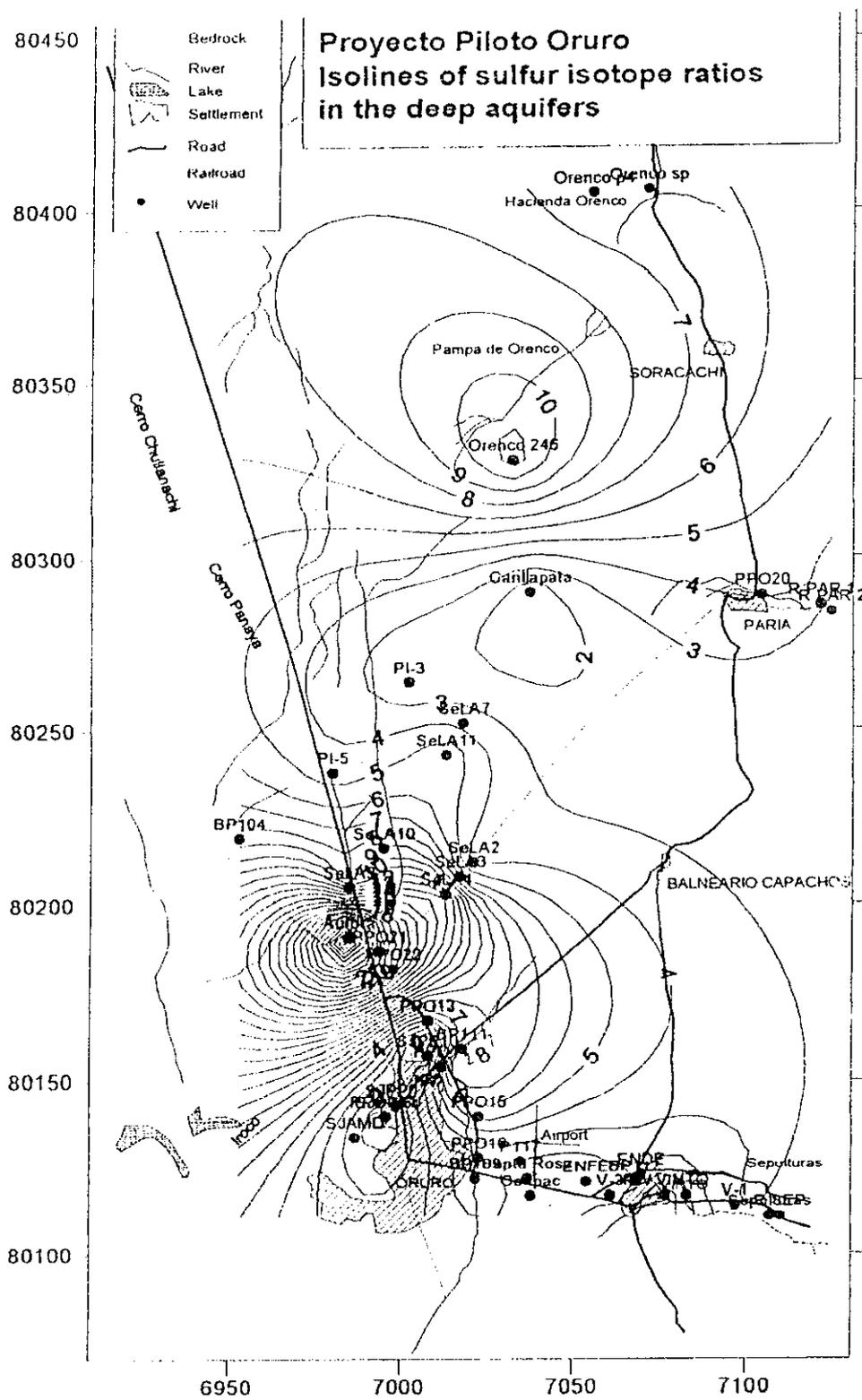


Figura 2.7.11. Distribución geográfica de isótopos de azufre en las aguas. No se incluyen las aguas reductoras de Paria y Vinto ni las aguas geotermales.

Esto está de acuerdo con la *Figura. 2.7.10*, gráfico de la concentración de sulfato versus el valor  $\delta^{34}\text{S}$ . Claramente existe una anti-correlación con algunas de las aguas y los valores  $\delta^{34}\text{S}$ . Al menos seis lugares diferentes en este estudio están afectados por reducción bacteriana de sulfato; algunas aguas del grupo 4, como Aurora, PPO 21 y PPO 22, pero también SeLA 04 en la vecindad de las aguas del grupo 4, PP 17 en Paria y BP 114 en Vinto. Todos estos pozos tienen un leve pero detectable olor a sulfuro de hidrógeno, y sus aguas tienen valores  $\delta^{34}\text{S}$  mucho más altos y concentraciones de sulfato más bajas que las otras muestras. Con condiciones reductoras en tantos diferentes lugares y con caudales presumiblemente bajos se indica que la reducción bacteriana puede estar ampliamente distribuida en los acuíferos profundos de modo que imperan condiciones reductoras en profundidad. Debe indicarse que las aguas reductoras son mezcladas con aguas más oxigenadas de los acuíferos menos profundos durante el uso.

Más aún, el cambio de valores  $\delta^{34}\text{S}$  del área de Paria hacia el sudoeste sobre Challa Pampa está en muy buena concordancia con los cálculos realizados asumiendo la reacción bacteriana con el sulfato. Estos cálculos han sido confirmados por el modelado NETPATH de SeLA 07 a SeLA 09 tomando en cuenta toda la química, así como las razones de isótopos. El mezclar agua de Aurora con SeLA 7 para formar el agua subterránea de SeLA 9, conduce también a resultados aceptables en base a los isótopos y a la química (reacciones de precipitación/disolución) si en SeLA 9 se mezcla menos del 1 % del agua de Aurora). Esto, sin embargo, no implica que prevalezcan condiciones de estancamiento. Si el sistema de agua subterránea en Aurora se considera cerrado, los cálculos sugieren que el valor de  $\delta^{34}\text{S}$  del sulfato en el agua será aún más alto que el encontrado actualmente; esto implicaría que el sistema es abierto, pero más probablemente que los flujos son bajos.

El rastro del drenaje ácido de la mina es seguido fácilmente por los isótopos de azufre desde la mina hasta la pampa de Oruro, allí, las razones de isótopos aumentan con la distancia desde la ciudad. El drenaje de la mina es mezclado con aguas servidas domésticas y se favorecen extremadamente las condiciones reductoras. Se sugiere la reducción bacteriana del sulfato. Los valores  $\delta^{34}\text{S}$  en el rastro hacia el sur sólo se afectan ligeramente (o nada) por reducción bacteriana de sulfato, ellos se parecen a los valores  $\delta^{34}\text{S}$  "normales" del DAR.

### 3 Inventario de la calidad de acuíferos subsuperficiales

#### 3.1 Introducción

A fin de estudiar la calidad de los acuíferos subsuperficiales en el área del proyecto se realizó un programa de muestreo en pozos escavados. Fueron inventariados cerca de 130 pozos y en ellos se midió pH, conductividad eléctrica y temperatura. Se describieron profundidad y condición de los pozos, así como el nivel estático y el agua muestreada para análisis químicos. La *Figura 3.1.1* muestra la distribución de los pozos investigados en el área del PPO.

Se determinó el uso predominante del agua. Los pozos fueron divididos en los siguientes subgrupos.

a) agua usada principalmente para consumo humano y

b) agua usada principalmente con fines de riego y para abreviar ganado

Cerca de 60 de las muestras de agua fueron analizadas (muestras de 44 pozos) y se suman en la *Tabla 3.1.1* con valores medios y rangos comparados con estándares bolivianos. Los únicos elementos que se encontraron en concentraciones de posible peligro para la salud humana fueron arsénico, azufre y antimonio.

*Figura 3.1.1* distribución de pozos excavados como parte del inventario de acuíferos subsuperficiales en el área del PPO.

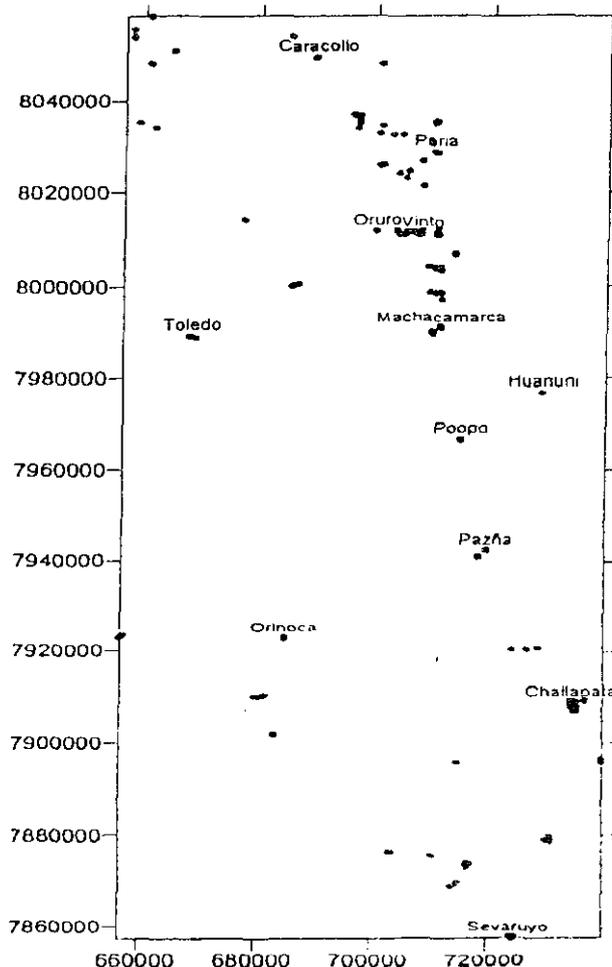


Tabla 3.1 Valores promedio y rangos para muestras de agua provenientes de pozos excavados dentro del área PPO. (Análisis: Svensk Grundämnesanalys AB)

Elemento	Fe	S	As	Cd	Cu	Mn	Ni	Pb	Sb	Sn	Zn
Unidad	mg/L	mg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
<b>Agua potable</b>											
Val. promedio (18 pozos)	0.38	44	198	0.11	3.76	45	9.3	2.5	5.1	0.2	175
<b>Rangos</b>											
Máx.	1.62	155	957	0.482	9.74	220	37.2	8.4	74	1.2	1630
Mín.	0.011	3.7	1.05	0.02	0.702	0.2	2.4	0.22	0.11	0.05	1.02
<b>Estándar boliviano *</b>	<b>0.30</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>5</b>	<b>50</b>	<b>500</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>10</b>	<b>2000</b>	<b>200</b>
<b>Agua para irrigación</b>											
Val. promedio (26 pozos)	0.50	89	279	0.26	4.3	167	10.6	3.3	13.2	-	42
<b>Rangos</b>											
Máx.	5.4	349	3000	1.52	15.6	1630	31.1	22.4	99	-	293
Mín.	0.01	9.7	0.31	0.02	0.5	0.2	2.6	0.1	0.1	-	1.9
<b>Estándar boliviano **</b>	<b>1.00</b>	<b>133</b>	<b>100</b>	<b>5</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>	<b>500</b>	<b>100</b>	<b>10</b>	<b>2000</b>	<b>5000</b>

\* = Clase A; agua para uso doméstico e industrial \*\* = Agua para uso doméstico después de tratamiento físico-químico o para irrigación de árboles y cosechas.

### 3.2 Concentraciones de Arsénico y sulfato en los acuíferos subsuperficiales

Las concentraciones de arsénico en los pozos utilizados principalmente para consumo humano se muestran en la *Figura 3.2.1*. La población de pozos fue clasificada de acuerdo a estándares internacionales y nacionales para arsénico en agua potable. El límite superior de 50 µg/L es el límite boliviano y 10 µg/L es la discutida recomendación de la OMS.

Elevados contenidos de arsénico pueden encontrarse en dos áreas, Toledo y Quillacas-Sevaruyo. Si bien no se verificó completamente, el alto nivel de As en Toledo se interpreta como resultado de un elevado fondo geoquímico en el bedrock y en el suelo. La alta concentración de As monitoreada en el río Desaguadero (ver detalles en PPO 9607) a la altura de Toledo se debe probablemente a descargas de agua subterránea en el río.

Además, se han documentado altas concentraciones de arsénico en nueve pozos excavados y en los ríos Sevaruyo y Marquez localizados en la parte sur del área investigada. La razón para los altos niveles de arsénico no está dilucidada, pero se anticipan elevadas concentraciones de fondo gequímico en la región.

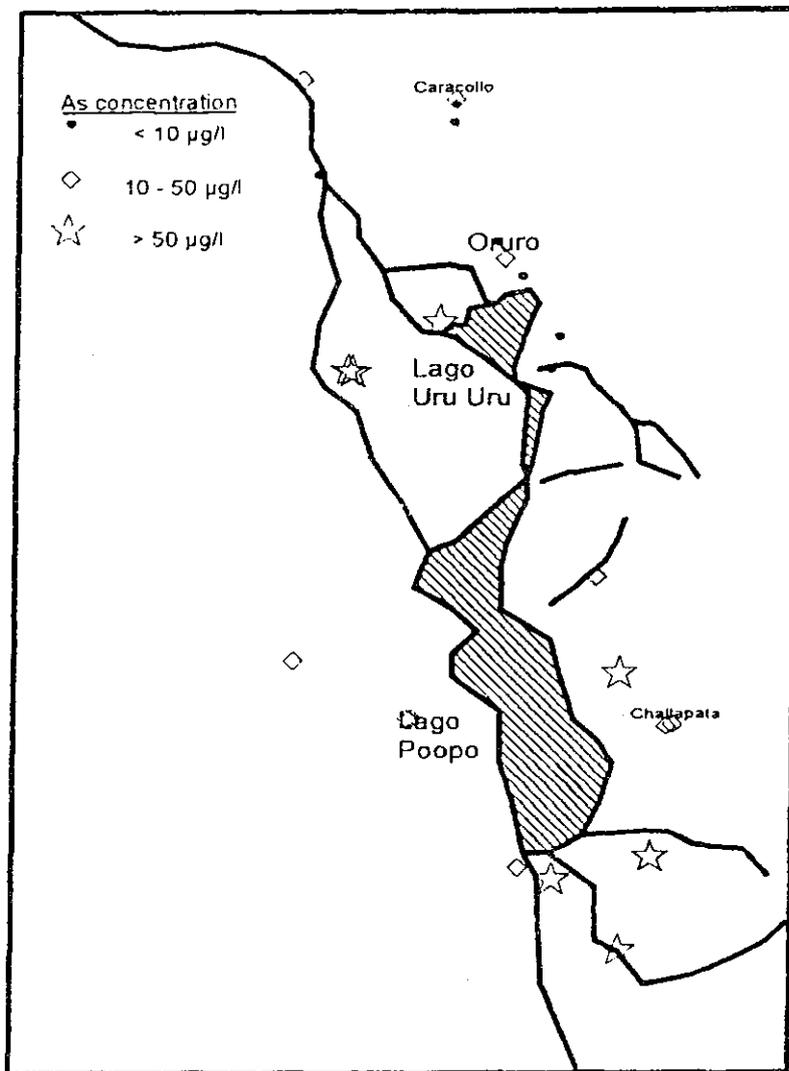


Figura 3.2.1 Gráfica de concentraciones de arsénico encontradas en pozos excavados en el área del PPO. Agua usada principalmente para consumo humano.

Las concentraciones de arsénico y los rangos hallados en las dos sub áreas, así como los valores estándar se encuentran en la *Tabla 3.2.1*. Los valores elevados encontrados deben ser de gran preocupación puesto que el valor máximo para Toledo es 15 veces mayor al estándar boliviano y el de Sevaruyo-Quillacas es seis veces mayor.

*Tabla 3.2.1 Valores promedio y rangos de arsénico en pozos excavados utilizados principalmente para consumo humano en el área de Toledo y Sevaruyo-Quillacas. (análisis de Svensk Grundämnesanalys AB)*

Subárea	Número de pozos	Valor promedio mg/L	Rangos mg/L
Toledo	5	463	121-957
Sevaruyo-Quillacas	5	181	33-299
Estándar boliviano para agua potable		50	
Recomendación de la OMS		10	

En las muestras de Toledo, el contenido de sulfato es alto, y algunas veces por encima del estándar boliviano de 300 mg/L (rango 39 - 465 mg/L).

El gráfico de la *figura 3.2.2* muestra el mismo patrón para pozos utilizados principalmente para irrigación. Las mismas áreas muestran se muestran con concentraciones de arsénico extremadamente altas. En la *Tabla 3.2.2* se presenta un sumario de los valores de concentración.

*Tabla 3.2.2 Valores promedio y rangos para arsénico en pozos excavados usados principalmente pra irrigación en Toledo y Sevaruyo-Quillacas. (Análisis realizados por Svensk Grundämnesanalys AB)*

Subárea	Número de pozos	Valor promedio mg/L	Rangos mg/L
Toledo	3	2103	1570-3000
Sevaruyo-Quillacas	4	130	66-224
Estándar boliviano para agua de riego			
Recomendación de la OMS		100	

Las muestras de Toledo muestran un contenido de sulfato de 400-900 mg/L

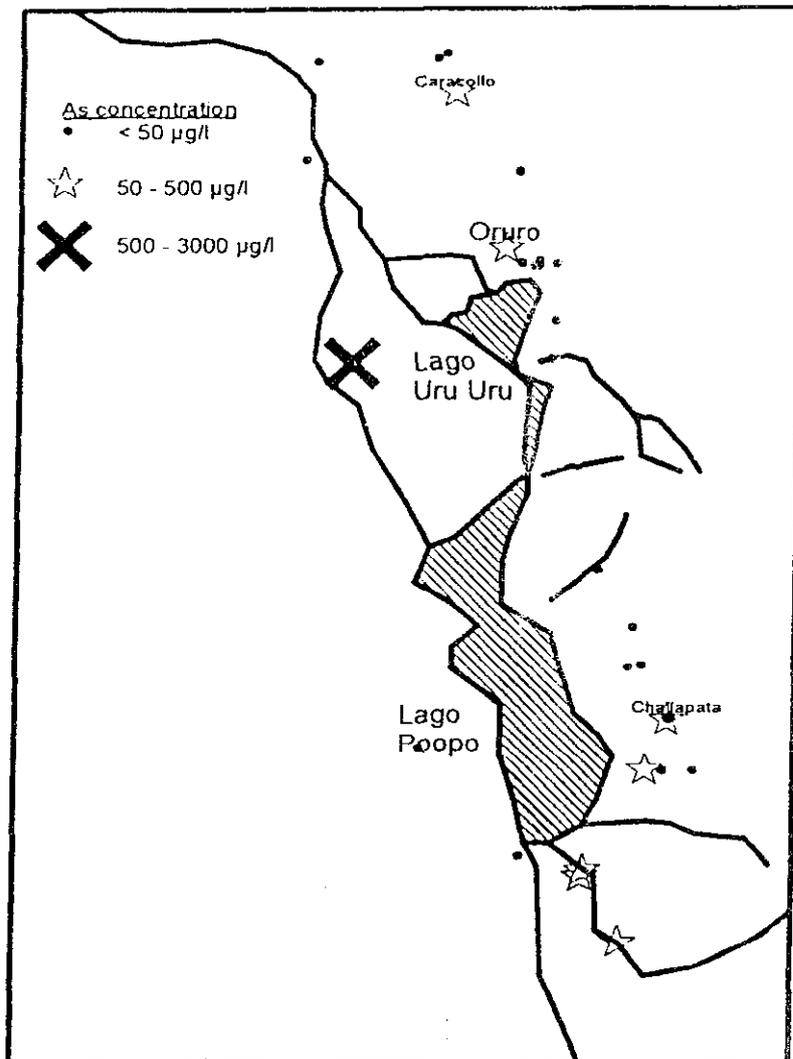


Figura 3.2.2 Gráfico de las concentraciones de arsénico encontradas en pozos excavados en el área del PPO. Agua usada principalmente para riego.

### 3.3 Concentraciones de antimonio en los acuíferos subsuperficiales

Se encontraron altas concentraciones de antimonio en muestras de agua de los acuíferos subsuperficiales principalmente en dos áreas: Vinto-Sepulturas y Huari-Challapata. El análisis de pazña mostró valores altos. La *Tabla 3.3.1* presenta un sumario de las concentraciones de antimonio encontradas.

Tabla 3.3.1 Valores promedio y rangos de antimonio de pozos excavados en ciertas subáreas. (análisis por Svensk Grundämnesanalys AB)

Subárea	Número de pozos	Valor promedio µg/L	Rangos µg/L
Vinto-Sepulturas	5	80	57.9-99.3
Huari-Challapata	4	47	10.8-63.8
Pazña	1	74	74
Estándar boliviano		10	10

La Figura 3.3.1 muestra un gráfico de valores de la concentración de antimonio en comparación con el estándar boliviano.

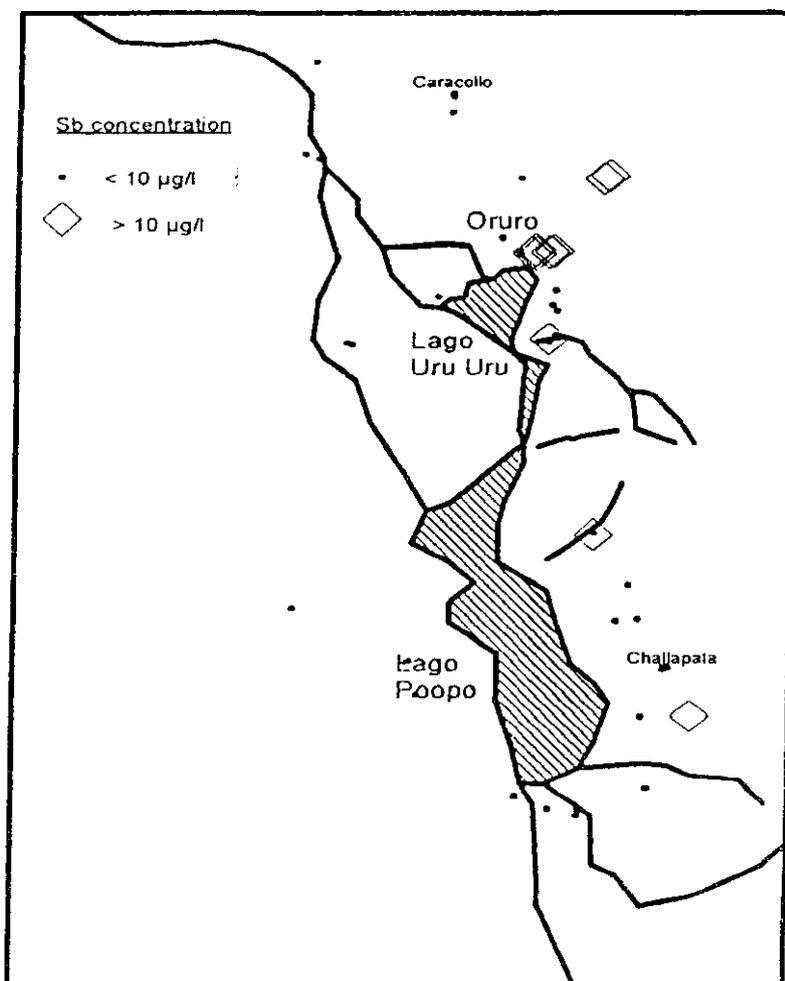


Figura 3.3.1 Concentraciones de antimonio en agua de pozos excavados en comparación con el estándar boliviano para agua potable y de riego

## 4. Flujo subsuperficial en el valle del río Huanuni

### 4.1 Concentraciones de fondo

La composición química de las aguas subterráneas en el flujo subsuperficial del valle del río Huanuni fue monitorerada en once pozos excavados, PE-1 al PE-11, y en siete pozos perforados, PPH-1 a PPH-8 (ver las ubicaciones en la *figura 4.1.1* y las principales características en la *Tabla 4.1.1*). Los pozos excavados tienen profundidades de 0.1 a 3.0 m por debajo del nivel de agua, y los pozos perforados se extienden hasta cerca de 10 m por debajo del nivel del agua.

Las concentraciones de fondo para metales en el agua subterránea del río del valle de Huanuni fueron monitoreadas en PE-1 (*Tabla 4.1.2* y en la *Tabla 4.1.3*), aguas arriba de la confluencia de los ríos Toco Toconi y Huanuni. El agua subterránea muestra bajos valores de pH (Promedio: 6.7, rango:5.8 a 8.2) en comparación con el agua superficial en el mismo lugar. Consecuentemente, el contenido de metales en el agua superficial es más elevado que en agua superficial. Sin embargo, está bastante por debajo de los estándares de agua potable, excepto para el hierro. Esto, nuevamente, puede explicarse por la derivación de metales de esquistos grafiticos que representan una porción substancial de la litología subyacente en el área de captación. La considerable variación en los valores de pH entre una muestra y otra se debe probablemente a las condiciones de precipitación variables. Cuando llueve, se espera que el pH del agua subterránea descienda, como resultado de una mayor infiltración con bajos valores de pH (el pH de la lluvia estándar es 5.7).

El agua subterránea en PE-2, ubicado justamente aguas abajo de la confluencia de los ríos Toco Toconi y Huanuni, tiene una composición similar a la de PE-1, con concentraciones algo más bajas que las aguas subterráneas de fondo del río Huanuni.

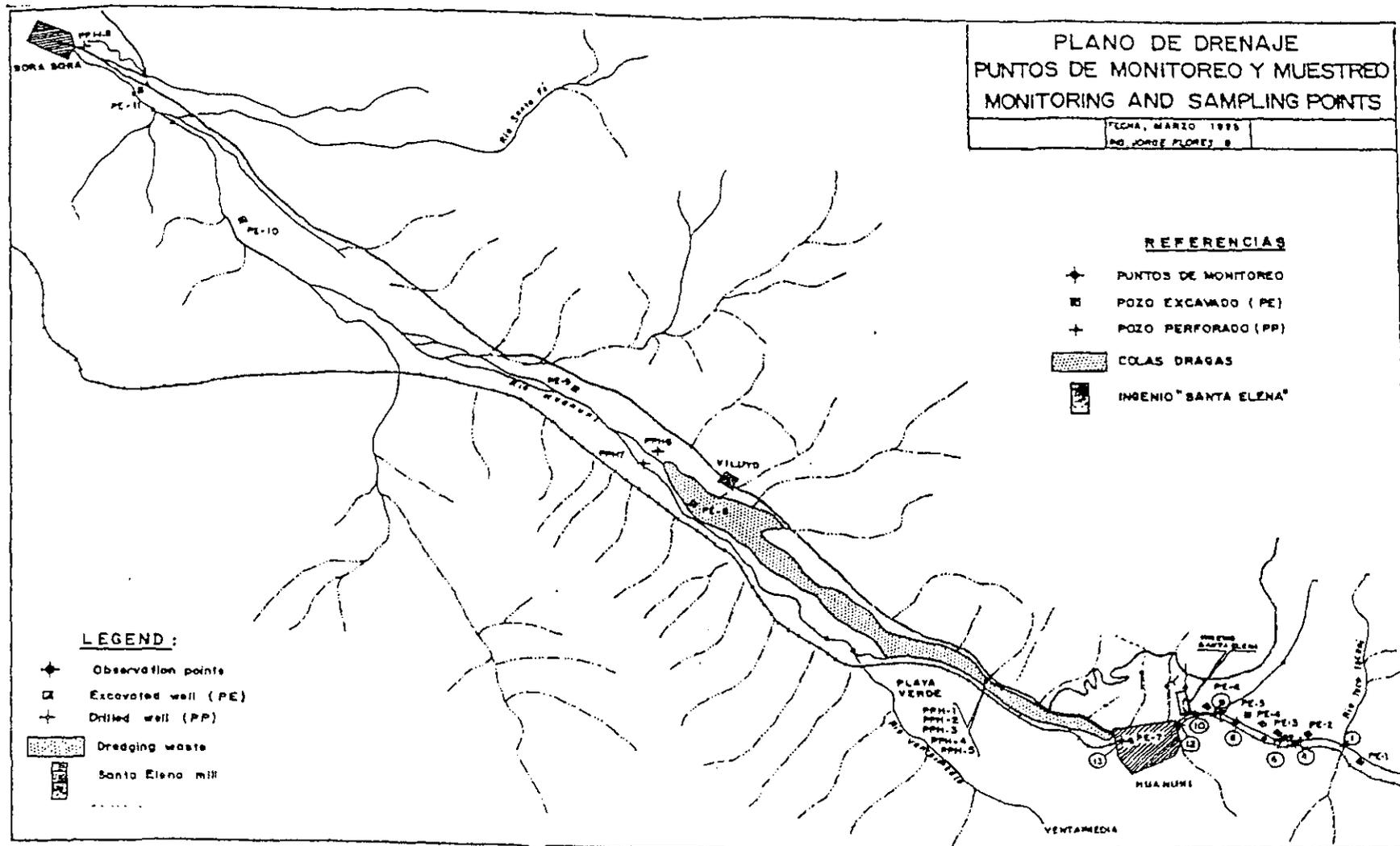


Figura 4.1.1

Mapa con pozos de monitoreo perforados y excavados en el valle del río Huanuni.

Tabla 4.1.1 Monitoreo Agua subterránea, en el lecho del río Huanuni, localización y características de pozos excavados y perforados.

No.	LOCALIZACIÓN *, TIPO DE POZO	CARACTERISTICAS	
		LITOLOGIA	TIPO DE AGUA
PE-1	-0.2 km, cercano al punto de Observación 1. Pozo excavado, de 1.7 m de profundidad	Arena aluvial y grava	Base; agua subterránea nivel en ~2.4 m
PE-2	0.7 km, en el punto de observación 4, pozo excavado, de 1.45 m de profundidad.	Grava aluvial	Base; agua subterránea nivel en ~1.2 m
PE-3	1.8 km, en el punto de observación 6, debajo las minas Pepitos y Rho, pozo excavado de 1.15 m de profundidad.	Grava, arena, colas antiguas y colas de cooperativistas	Contaminada; agua subterránea nivel de ~0,6 m
PE-4	1.25 km, pozo excavado de 1.2.m de profundidad	Grava, arena > colas de cooperativistas	Contaminada; agua subterránea nivel de 0,7 m
PE-5	1.55 km, Juancito, cercano al punto de observación 8, debajo la mina Paco (S) y los depósitos de Patiño (N). Excavación Pit 3.0 m de profundidad.	Grava, arena, >> colas de cooperativistas	Contaminada
PE-6	1.75 km, cercano al punto de observación 9, debajo los depósitos de Patiño, luego de la confluencia con la corriente del Convento. Pozo excavado de 1 m de profundidad.	Grava, arena y colas finas y colas arenas	Altamente contaminadas; agua subterránea nivel de ~0,5 m
PE-7	3.3 km, en la parte baja de la villa de Huanuni. En el punto de Observación 13, 1.3 km corriente abajo del Ingenio. Pozo excavado de 2.9 m de profundidad.	Grava, arena, colas arenosas, colas finas, limonita	Altamente Contaminada; agua subterránea nivel de ~2,4 m
PPH- 2	50 m aguas arriba del PPH-1. Pozo perforado de monitoreo 10.4 m de profundidad	Grava, arena, residuos de dragado, colas arenosas, asentados en esquistos.	Altamente contaminado, nivel piezometrico de ~0.2 m
PPH-1	5.2 km, centro de una sección que cruza el río, 3.2 km aguas abajo del ingenio. Pozo perforado de monitoreo de 10.9 m de profundidad.	Como arriba	Altamente contaminado, nivel piezometrico de ~0.7 m

No.	LOCALIZACION *, TIPO DE POZO	CARACTERISTICAS	
		LITOLOGIA	TIPO DE AGUA
PPH-3	33 m al sud oeste del PPH-1. Pozo perforado de monitoreo 10.9 m de profundidad.	Como arriba	Altamente contaminado, nivel piezometrico de ~0.6 m
PPH-4	34 m noreste del PPH-1 pozo perforado de monitoreo de 11.6 m de profundidad.	Asentados en esquistos	Altamente contaminado, nivel piezometrico de ~1.0 m
PPH-5	50 m aguas abajo del PPH. Pozo perforado de monitoreo 10.9 m de profundidad	Grava, arena, residuos de dragado, colas arenas, asentados en esquistos.	Altamente contaminado, nivel piezometrico de ~0.9 m
PPH-6 - PPH-8	Pozos de monitoreo entre Viluyo y Sora Sora	Grava y arena	Conataminado por colas arenas
PE-8	10.5 km, Viluyo, pozo excavado de 1.55 m de profundidad. 8.5 km, aguas abajo del ingenio.	Residuos de dragado, grava	Altamente contaminada; agua subterránea nivel de ~1.2 m
PE-9	13 km, pozo excavado de 2,4 m de profundidad, 11 km, aguas abajo del ingenio	Grava y arena	Altamente contaminada; agua subterránea nivel de ~2.3 m
PE-10	18.5 km; pozo excavado de 0.9 m de profundidad, 16.5 km aguas abajo del ingenio.	Grava y arena	Altamente contaminada; agua subterránea nivel de ~0.9 m
PE-11	20.8 km; rio Sora Sora, luego de la confluencia de los rios Huanuni y Santa Fe. Pozo excavado de 1.7 m	Parte de arriba: arena y colas finas, parte de abajo: gava	Altamente contaminada; agua subterránea nivel de ~1.0 m

\* La distancia "cero" es la confluencia de los rios Huanuni y Toco Toconi

Tabla 4.1.2 Concentración de ciertos elementos en agua de monitoreo de pozos perforados dentro del valle del río Huanuni. (análisis por Svensk Grundamnesanalys AB)

Pozo No	Coordenadas		Fe	S	As	Cd	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Sb	Sn	Zn
	W - E	N - S	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
PPH 1	7269	79780	444	595	3.4	822	2215	0.002	22115	517	4.7	6.3	0.9	54325
PPH 2	7269	79780	148	198	1.1	274	738	0.001	7372	172	1.6	2.1	0.3	18108
PPH 3	7269	79780	197	265	1.5	365	984	0.001	9829	230	2.1	2.8	0.4	24144
PPH 5	7269	79780	346	353	56.8	888	1296	0.001	13011	153	1.4	1.9	0.3	34130
PPH 6	7229	79824	610	559	131.1	1707	2040	0.000	20530	128	1.2	1.6	0.2	55491
PPH 7	7195	79862	23.3	301	8.2	428	1340	0.007	38500	426	46.3	0.5	0.1	19800
PPH 8	7160	79900	326	404	65.4	1008	1559	0.003	24014	236	16.3	1.3	0.2	36474

Tabla 4.1.3 Temperatura, pH, conductividad y concentraciones de ciertos elementos en las aguas subterráneas del valle del río Huanuni, el pH y la conductividad son valores significativos de los monitoreos 4-7. (Análisis por McAna Konsult, Sueca).

Pozo No	T °C	pH	Cond. µS/cm	SO <sub>4</sub> mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Mn mg/l	Fe mg/l	Cu mg/l	Zn mg/l	As µg/l	Cd µg/l	Pb µg/l	Hg ng/l
PE-1	9.9	6.7	256	46.1	25	9.5	0.084	0.69	0.008	0.034	1.8	0.47	1.5	<25
PE-2	11.4	6.8	242	59.0	24	9.5	<0.01	0.12	0.003	0.025	0.7	0.34	0.6	<25
PE-3	10.9	3.9	582	438.5	47	25	11.1	0.74	0.441	63.05	1.6	408	63.6	<25
PE-4	9.2	5.2	625	516.3	79	38	18.6	0.06	0.019	65.3	1.1	460	2.5	<25
PE-5	10.9	3.7	569	442.4	78	35	4.2	2.63	0.209	26.34	6.4	234	3.1	<25
PE-6	10.9	2.8	1462	1633	80	44	14.1	274	3.244	23.7	252	1203	1.7*	<25
PE-7	11.1	3.6	1733	1633	112	48	19.8	565	10.12	55.75	626	6295	2.2*	<25
PE-8	12.1	3.8	1620	1455	216	108	59.3	0.78	2.130	27.46	2.9	854	0.6*	<25
PE-9	12.4	3.6	1712	1484	192	96	45.6	1.79	3.348	30.54	6.0	864	0.16	<25
PE-10	11.1	4.0	1650	1129	226	109	14.2	0.83	0.213	31.05	1.2	647	0.5	<25
PE-11	11.1	3.5	2488	3088	196	87	31.2	0.24	1.335	206.3	3.5	1956	17.5	<25

\* Valor incierto, no hay un ejemplo de referencia disponible en este rango de concentración. Nota: La calidad de agua subterránea en PE-11 (Sora-Sora) es altamente influenciada por el influjo del agua subterránea de Santa Fe.

## 4.2 Impacto de actividades mineras y de beneficio sobre las concentraciones

El valor del pH de las aguas subterráneas cambia rápidamente cuando ingresa a áreas de actividades mineras de cooperativas. Desciende desde cerca a 6.7 hasta 3.7-3.9. El menor valor de pH fue registrado en PE-6, que es un pozo excavado de poca profundidad: 1 m. El pozo está ubicado en un aluvio mezclado con colas, erosionadas, probablemente, de un depósito del valle Convento. Adicionalmente, el pozo está localizado bajo grandes depósitos de residuos minerales (es decir, bajo la gradiente del flujo subsuperficial). El pH en el agua subterránea, aguas abajo del ingenio, bajando hacia PE-9, varía entre 3.2 y 3.8. En PE-10, 16,5 km aguas abajo del ingenio, el pH sube hasta 4.0. PE-11 está fuertemente influenciado por ingreso de agua subterránea proveniente del río Santa Fe y el pH baja a 3.5.

El contenido de sulfato se incrementa sucesivamente desde los valores de fondo en PE-1 hasta 3.2 km aguas abajo del ingenio, donde la concentración de sulfato empieza a decrecer lentamente. Este decrecimiento continúa hasta PE-10 y es seguido de un acusado aumento en el pueblo de Sora Sora (PE-11) cuando el agua subterránea se mezcla con el agua subterránea de Santa Fe.

El contenido de metales en el agua subterránea muestra distinta dependencia de la composición de los residuos mineros del lecho del río y sus alrededores. Los valores más altos de Pb y Zn se encontraron en PE-3 y PE-4, ubicados en la zona polimetálica (Ag-Pb-Zn) del depósito, cerca a las minas abandonadas Pepitos y Rho.

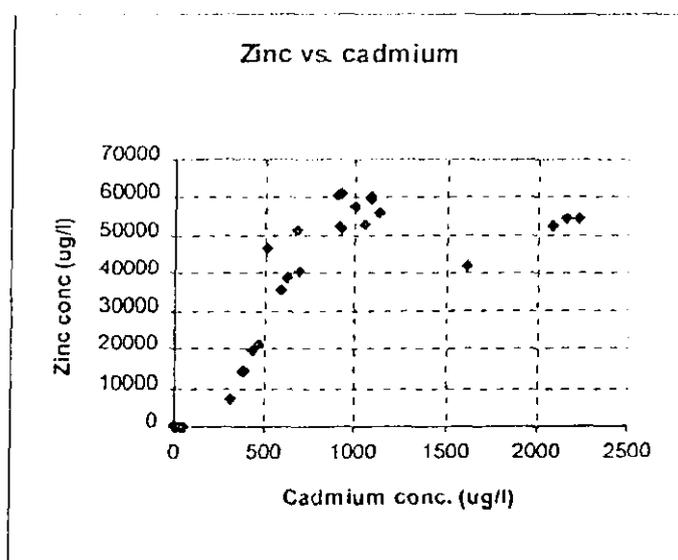
El agua subterránea en PE-6, aguas más abajo, tiene el menor valor de pH y contiene las segundas concentraciones más elevadas de Cu, As y Cd. Las más altas concentraciones de metales, incluyendo al Fe, se hallan en PE-7, aguas abajo del ingenio Santa Elena. Esto muestra que las descargas del ingenio, combinadas con el agua de mina, causan el mayor efecto en la concentración de Fe, Cu, Zn, As y Cd en el agua subterránea.

Se puede apreciar una repentina caída de Cu, As y Cd más allá de un punto a 1.3 km aguas abajo del ingenio. El contenido de Fe cae en forma abrupta luego de 3.5 km donde los valores casi se aproximan al nivel de fondo. El As también desciende hasta casi los niveles de fondo

luego de 3.5 km. Las investigaciones muestran que sólo Fe, As y Pb en el agua subterránea decrecen (temporalmente) a valores de fondo a alguna distancia del ingenio. Todos los metales, sin embargo, se incrementan dramáticamente después de la confluencia con el río Santa Fe (PE-11, cerca de 19 km aguas abajo del ingenio).

La elevada concentración de manganeso en los pozos perforados es de remarcar. Esto implica que las bacterias que viven de la oxidación del manganeso están ausentes del agua subterránea. Sin embargo, las bacterias podrían estar activas en tuberías y otros lugares aeróbicos después de bombear el pozo. Si es así, ocurre la precipitación de óxidos e hidróxidos de manganeso, lo que reduce la concentración del manganeso en el agua. También co-precipitará con algunos otros metales pesados. Existe una correlación positiva entre las concentraciones de manganeso y azufre (sulfato) en las aguas muestreadas que muestran que la lixiviación del manganeso está relacionada con la oxidación. Esta relación se hace más significativa cuando se estudia la correlación entre manganeso y zinc o cadmio, *Figura 4.2.1.*

El agua subterránea a lo largo del valle del río Huanuni tiene valores de pH menores que en el agua superficial, y las variaciones en el pH son asimismo menores en el agua subterránea.



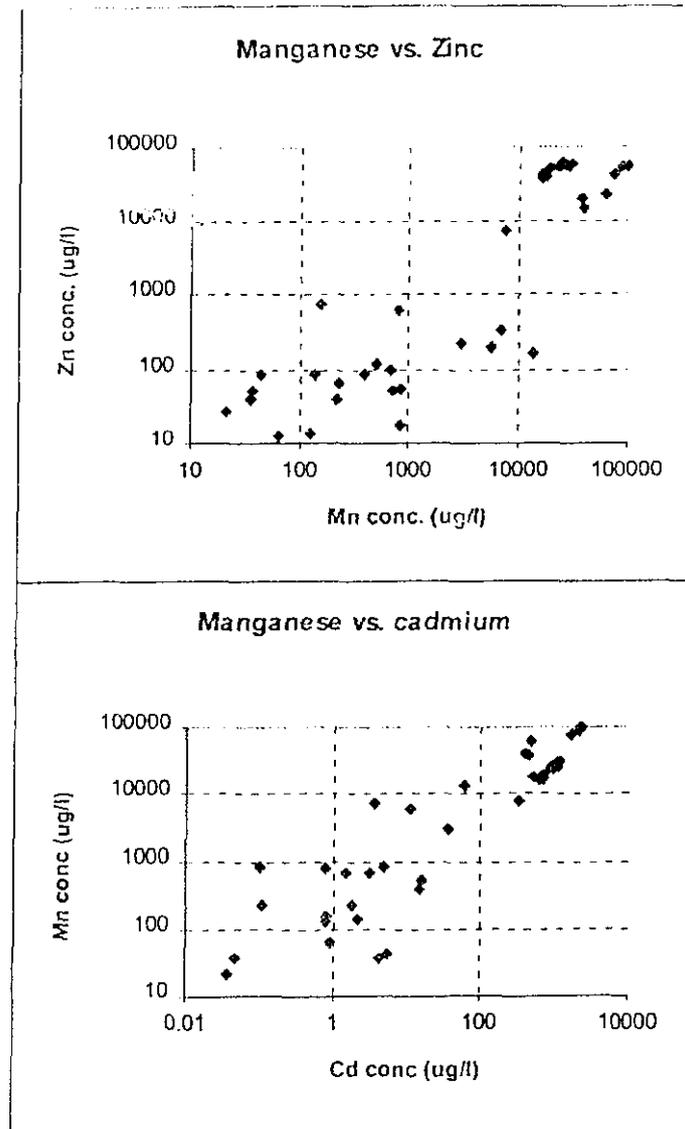


Figura 4.2.1 Correlación entre manganeso y zinc/cadmio, respectivamente

Generalmente, el agua subterránea contiene más sustancias disueltas y tiene mayor conductividad que el agua superficial, debido a que el tiempo de tránsito del agua subterránea, de la infiltración a la descarga en ríos, es mayor que para el escurrimiento superficial. Entonces, el agua subterránea tendrá más tiempo para disolver metales de la roca y del suelo por donde fluye. El agua subterránea tiene generalmente mayor conductividad y concentraciones de metales más elevadas que las aguas superficiales, ver la *Figura 4.2.2a* y la *Figura 4.2.2b*. Sin embargo, esto no es cierto para el caso del Pb y particularmente para el Sn, para los cuales las aguas superficiales tienen concentraciones mayores. Esto se debe evidentemente a la descarga del ingenio Santa Elena al río Huanuni. Las diferencias en concentraciones entre las aguas superficiales y subterráneas son más pronunciadas aguas abajo del ingenio.

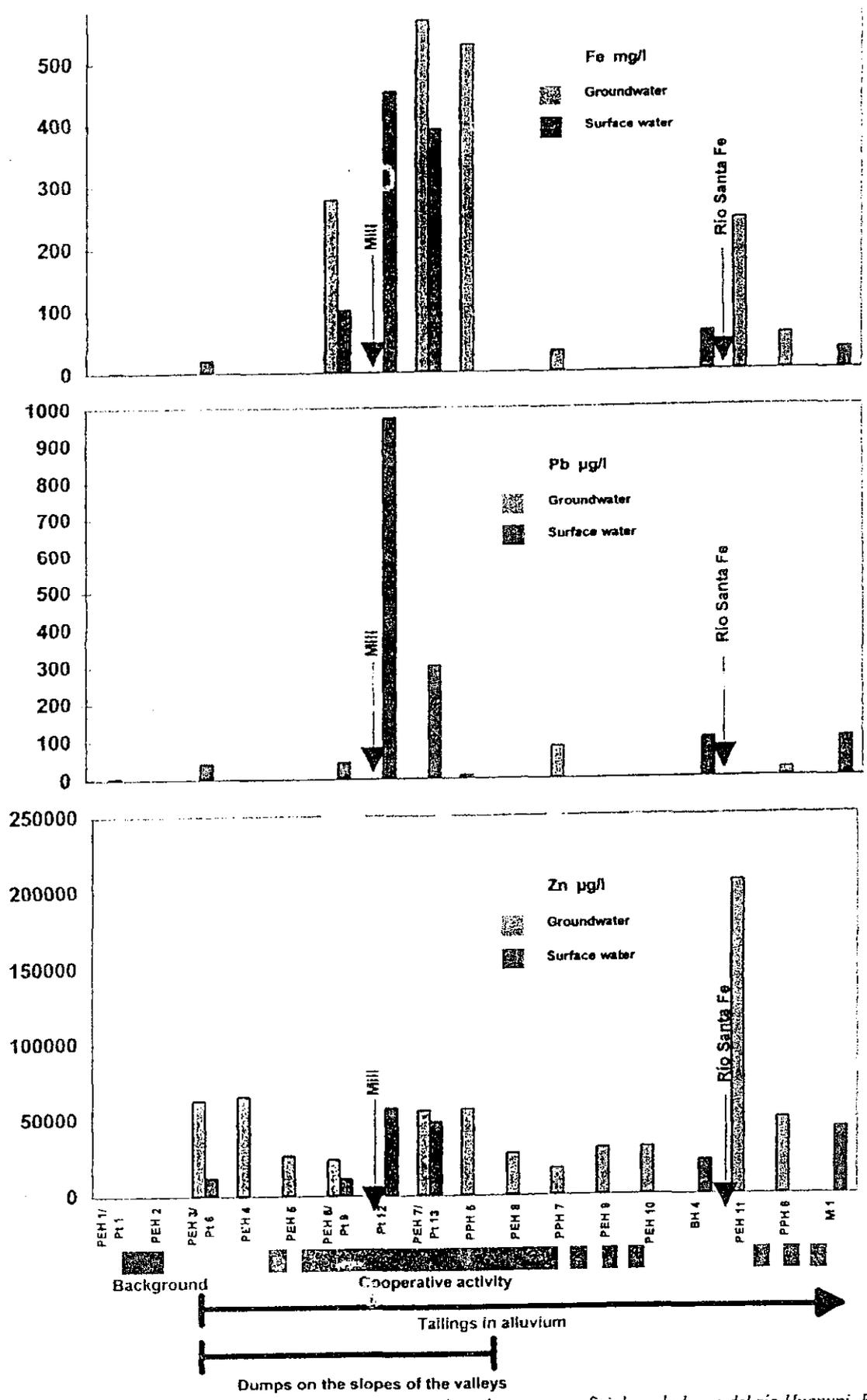


Figura 4.2.2b. Concentraciones de elementos en aguas subterráneas y superficiales a lo largo del río Huanuni, PPO. Para localizar los puntos de muestreo ver la Figura 4.1.1.

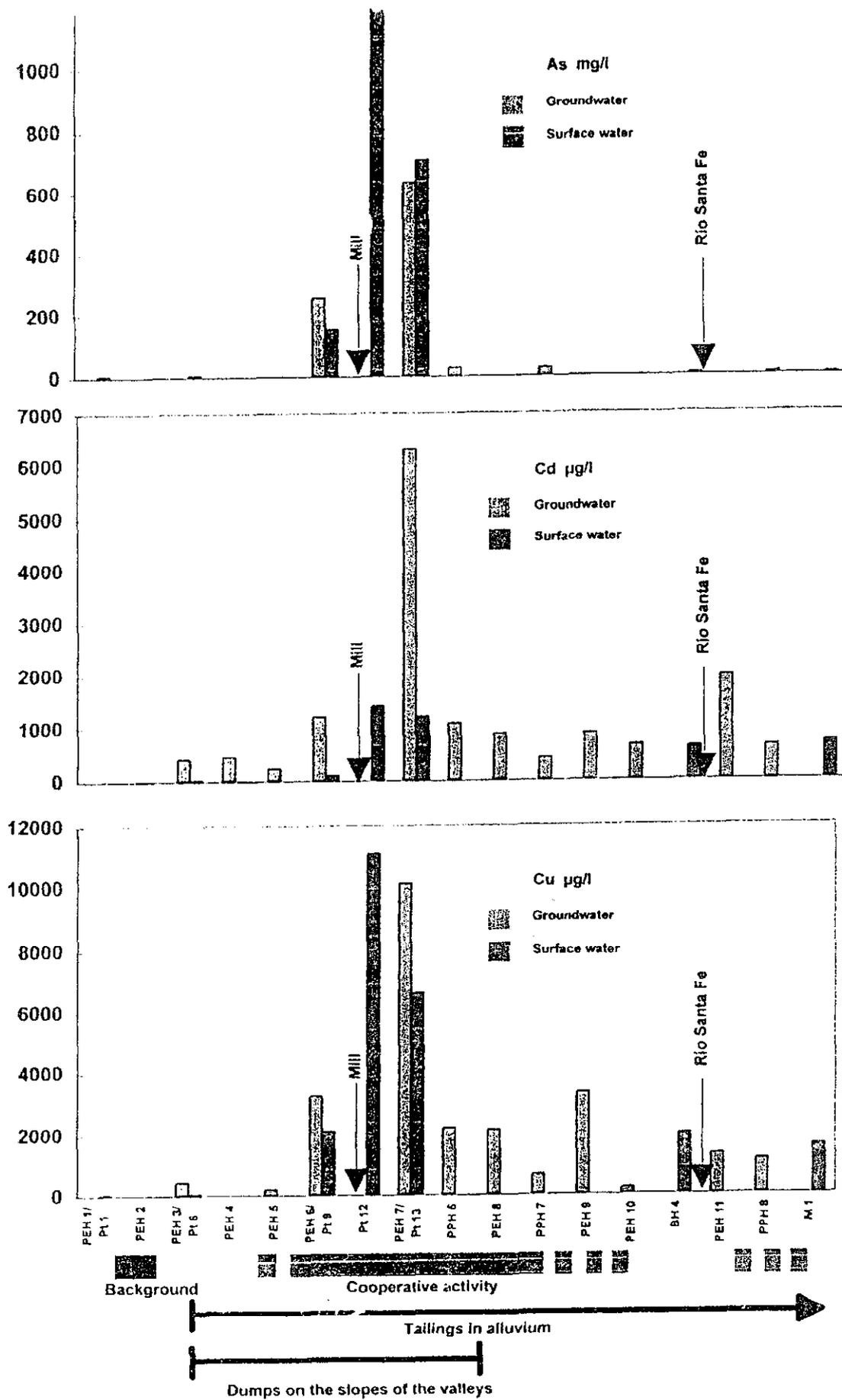


Figura 4.2.a. Concentraciones de elementos en aguas subterráneas y superficiales a lo largo del rio Iguanani, PPO. Para localizar los puntos de muestreo ver la Figura 4.1.1.

### 4.3 Impacto de actividades mineras y de beneficio sobre las cargas contaminantes

El transporte de metales en el agua subterránea del valle del río Huanuni fue calculado en una sección que cruza el valle a 3.2 km aguas abajo del ingenio Santa Elena, ver la *Tabla 4.3.1*. Se establecieron cinco pozos de monitoreo (PPH-1 a PPH-5, tres cruzando el valle y tres a lo largo del mismo) a fin de medir la conductividad hidráulica del aluvio, el nivel de agua subterránea y las concentraciones de metales. Las concentraciones de metales fueron analizadas en las muestras tomadas el 15 de noviembre y el 9 de marzo de 1995.

La conductividad hidráulica fue calculada de la distribución de tamaño de grano en  $2.3 \times 10^{-3}$  m/s y de los tests hidráulicos en  $3.0 \times 10^{-3}$  m/s. Los resultados de los tests hidráulicos deben ser considerados los más realistas. La gradiente hidráulica a lo largo del valle del río fue calculada como la media de dos mediciones de nivel de agua subterránea (28 de octubre y 8 de diciembre de 1994) en 0.0135 m/m. El área saturada de agua en la sección transversal fue determinada de los niveles de agua subterránea y profundidades totales en los pozos de monitoreo PPH-1, PPH-3 y PPH-4 en 1080 m<sup>2</sup>. En base a la información anterior, se evaluó el flujo de agua subterránea en el aluvio del río en 3780 m<sup>3</sup>/día. Se estimó el flujo de agua subterránea sólo para el inicio de la estación húmeda. Sin embargo, es probablemente bastante constante a lo largo del año, ya que el río Huanuni tiene flujo durante todo el año y es poco profundo. Por ello el nivel de agua subterránea no debería variar substancialmente.

Una comparación entre los valores de pH y conductividad medidos durante las estaciones seca y húmeda presentan solamente variaciones menores. Esto sugiere que la química del agua subterránea es bastante constante a lo largo del año. Los cálculos de transporte se basaron en valores medios de las concentraciones de metal monitoreadas en todos los pozos. Se realizó un cálculo alternativo excluyendo las mediciones en PPH-4 porque todos los valores de este pozo muestran desviaciones muy acentuadas, algo especialmente válido para el As. Las desviaciones en las concentraciones de metales en PPH-4 se explican en que el pozo fue perforado en depósitos consistentes mayormente de colas, mientras que los depósitos encontrados en las otras perforaciones consisten de una mezcla de arenas aluviales y gravas, gravas remanentes de dragado y varias colas de ingenio. El transporte de metal es sólo levemente menor (75-90 %) cuando se excluye el análisis de PPH-4, excepto para As que decrece en un factor de 10.

Fe y Zn son los metales principales transportados por el agua subterránea, junto con pequeñas cantidades de As y Pb, ver además la *Tabla 4.3.1*

*Tabla 4.3.1 Cargas (kg/día) de metales disueltos en aguas subterráneas, 3.2 km aguas abajo del ingenio Ssanta Elena (valores medios para el 15 de noviembre y el 9 de marzo de 1995). Análisis de MeAna Konsult, Suecia e IIMM, Oruro.*

	Fe	Cu	Zn	Sn	As	Cd	Pb
Todos los pozos	3010	7.5	255	15.8	0.28	5.5	0.005
Sin PPH-4	2545	5.7	217	6.8	0.03	3.3	0.006

## 5 Conclusiones

La investigación del impacto de contaminantes mineros e industriales sobre las aguas subterráneas comprende los estudios sobre los acuíferos profundos utilizados como fuente de agua potable para Oruro, los acuíferos poco profundos en el área del proyecto y el flujo subsuperficial en el valle del río Huanuni.

### Acuíferos profundos en Oruro

Los acuíferos profundos de Challa Pampa y Vinto han sido caracterizados mediante investigaciones hidrogeológicas y geoquímicas. Los resultados indican una consistencia entre los datos hidrogeológicos y geoquímicos que posibilitaron cuantificar la contaminación actual del agua subterránea y realizar una evaluación de riesgos con respecto a efectos futuros.

En base a datos hidrogeológicos se establecieron las distribuciones de presión piezométrica actual y anterior (por lo tanto la dirección del flujo del agua subterránea) y se ha aclarado la influencia de los pozos de producción de SeLA. La investigación geoquímica de los elementos principales y trazas, y de isótopos de oxígeno y azufre en el agua dio importante información respecto al agua de recarga, calidad de las aguas potables en Challa Pampa y Vinto y las fuentes contaminadas en Oruro y Vinto.

El estudio hidrogeológico, confirmado por la razón de isótopos de oxígeno en el agua, mostró que la recarga de agua subterránea en la sub-cuenca de Caracollo-Oruro ocurre principalmente a lo largo del límite este y norte, principalmente en conos aluviales al pie de la Cordillera Oriental y en paleocanales asociados con los ríos de Caracollo y Cayhuasi. La composición de isótopos de azufre y la química global de las aguas subterráneas confirman esta interpretación. La dirección principal del agua subterránea es de norte a sur y el agua en la sub-cuenca se descargaba anteriormente al norte de Oruro después giraba hacia el sur y hacia el área del Lago Uru Uru. Actualmente la producción de los pozos de SeLA han cambiado esta situación.

Antes que empezara la extracción de agua potable al inicio de los 70, la presión piezométrica en la sub-cuenca de Caracollo-Oruro era 4-5 m más alta que hoy en día. En Challa Pampa, prevalecían condiciones surgentes, posiblemente con un flujo menor de agua subterránea al este de Oruro en dirección sur y hacia el acuífero al oeste de Vinto. Al presente la extracción continua de agua en Challa Pampa (150 l/s) crea una aspiración adicional que evita que el agua subterránea descargue fuera del área. Más aún, la aspiración adicional afecta las áreas adyacentes en el sur y oeste que da lugar al ingreso de agua subterránea de estas áreas. Esto aumenta el riesgo de contaminación, ya que el agua subterránea en el área de Oruro contiene altas concentraciones de elementos tóxicos.

El agua en Oruro está afectada negativamente principalmente por la descarga de drenaje ácido de mina de San José, pero también agua sanitaria y de lixiviación de las colas de la mina. El drenaje ácido de la mina tiene una salinidad extremadamente alta y altas concentraciones de metales pesados y elementos tóxicos. Esta agua contaminada fluye por la ladera hacia la pampa al este de Oruro. Durante su recorrido los carbonatos se disuelven, los hidróxidos de hierro y aluminio se precipitan, conduciendo a una casi total deposición de metales pesados debajo de los terrenos de la ciudad, antes que el agua entre a la planicie. La deposición de metales debajo de Oruro es un peligro ambiental potencial. La dirección del flujo para el agua subterránea que ingresa a la pampa es tanto hacia el norte como hacia el sur. Las razones de isótopos de azufre sugieren que esta agua se torna rápidamente reductora después de ingresar a la planicie. Similarmente, las aguas al norte de Oruro son aguas reductoras, con un ofensivo olor a sulfuro y concentraciones de metales pesados relativamente bajas, debido a que precipitan como sulfuros. La química y las razones de isótopos indican que estas aguas reductoras al este y norte de Oruro están contaminadas de gran manera por residuos mineros y agua de drenaje.

La calidad química del agua subterránea potable en Challa Pampa es generalmente muy buena. La concentración de cloruro aumenta en la dirección del flujo, pero nunca llega a niveles altos, con excepción del agua subterránea más caliente de SeLA 10, que probablemente es influenciada por agua geotermal. Sin embargo, hay algunos pozos cerca a Oruro que muestran efectos de contaminación; SeLA 04 y SeLA 09 fueron clausurados por la baja

calidad de sus aguas - agua muestreada de SeLA 09 en 1995 (antes que el pozo fuese cerrado) mostraba altas concentraciones de hierro y arsénico. El agua en Aurora era tan mala que el pozo fue abandonado. En conclusión, el agua de mala calidad al norte de Oruro hasta ahora no ha afectado el agua en Challa Pampa - los cálculos y consideraciones geoquímicas indican que como máximo, el agua subterránea de Challa Pampa contiene 1-2 % del agua encontrada en Aurora. El registro continuo en SeLA 09 indica un agua con conductividad eléctrica relativamente alta a 17-30 m de profundidad (ver Apéndice A).

El acuífero de agua subterránea de Vinto tiene su recarga más septentrional en los sedimentos fluviales del Río Sepulturas. El acuífero es usado en menor grado (estimado en menos de 5 L/s) y no se ha identificado una aducción adicional permanente. El agua subterránea en el acuífero de Vinto fluye cerca de fuentes potenciales de contaminación en Oruro y Vinto. Empero, el estado químico del agua es generalmente bueno, con excepción del antimonio, que puede ser hallado en concentraciones por encima de los límites máximos recomendados.

La conclusión principal del presente estudio es que los recursos de agua subterránea disponibles en Challa Pampa son usados en un grado demasiado elevado y que las reservas obtenibles son bastante limitadas. Más aún, los alrededores de Oruro y Vinto constituyen fuentes importantes de contaminación que seriamente pueden afectar la calidad del agua subterránea en el futuro. Estos hallazgos conducen a las siguientes recomendaciones:

1. El acuífero de agua subterránea en Challa Pampa requiere ser protegido de riesgos de contaminación futura. Esto concierne las áreas de recarga y el área más próxima a Oruro. Esta recomendación involucra una protección directa de ciertas áreas como también una revisión de los planes de extracción de agua para Challa Pampa. Las decisiones deben estar basadas en un estudio de balance de aguas robusto. Las consecuencias posibles son el cierre de ciertos pozos y la explotación de nuevos recursos de agua subterránea.
2. La futura contaminación en curso del área de Oruro debe reducirse. Esta recomendación involucra la introducción de bombeo controlado de DAR y medidas que dismi-

nuyan la producción de agua lixiviada. Debe reducirse la producción de escurrimiento tóxico y agua sanitaria que se infiltra en el suelo.

3. Debe planificarse el uso futuro de los recursos hídricos. Esta recomendación involucra el uso de agua potable y agua para fines industriales y de irrigación. Las fuentes de agua de buena calidad son limitadas y deben minimizarse las pérdidas por a fugas.
4. Actualmente se utiliza el acuífero en Vinto en escala pequeña y se puede esperar una explotación más amplia. El área contiene varias fuentes de contaminación y debe elaborarse un plan de acción detallado para reducir futuros riesgos.

#### Acuíferos de agua subterránea poco profundos

El objetivo del estudio era clarificar la calidad del agua en los acuíferos poco profundos en el área del PPO. Se investigaron cerca de 130 pozos excavados y se analizaron 60 muestras por Fe, S y algunos elementos típicos. Las aguas fueron divididas en dos grupos respecto a su uso principal: agua para consumo humano y agua para irrigación y abrevado de ganado.

El resultado indica que para arsénico, azufre y antimonio, las elevadas concentraciones exceden el estándar. Los altos niveles de arsénico en los acuíferos poco profundos parecen ser el resultado de las elevadas concentraciones de fondo en el bedrock y en el suelo, así, en Toledo y en el área Quillacas-Sevaruyo, al sudeste del lago Poopó. Se encontraron altas concentraciones de antimonio en Vinto, Pazña y en la región Huari-Challapata.

La investigación debe ser considerada como un estudio documental, y un análisis más concluyente requiere de más puntos de muestreo y de la evaluación de las condiciones hidrológicas en cada pozo.

#### Flujo subsuperficial en el valle del río Huanuni.

Se estudiaron la composición química del agua subterránea y el flujo subsuperficial en el valle del río Huanuni, en una serie de pozos excavados y perforados. Se concluyó que las actividades mineras presentes y pasadas controlan completamente el estado químico del agua, así el contenido de metal muestra distinta dependencia de la composición de los residuos minerales en el lecho del río y sus alrededores. Las concentraciones de metal son extremadamente altas y en general la concentración de metales en las aguas subterráneas es mayor que en las aguas superficiales- excepción hecha del Pb y del Sn cuyas concentraciones son mayores que en las aguas superficiales.

El transporte de metales en las aguas subterráneas fue calculado en una sección a través del valle, unos km corriente abajo del ingenio Santa Elena. El cálculo demostró que los principales metales transportados en las aguas subterráneas son Fe (2500-3000 kg/día) y Zn (220-260 kg/día), junto con pequeñas porciones de Sn, Cu y Cd.

## Referencias

Cooper, H. H., Bredehoeft, J. D. And Papadopoulos I.S. Response of a finite diameter well to an instantaneous charge of water. *Water Resour. Res.*, 3, 263-269, 1967.

Davisson, M. and Criss, R., Na-Ca-Cl relations in basinal fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, 2743-2752, 1996.

Earlougher, R. C.. *Advances in Well Test Analysis*, SPE, New York, 1977.

Van Stempvoort, D. R., Reardon, E. J., & Fritz, P. Fractionation of sulfur and oxygen isotopes in sulfate by soil sorption. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54, 2817-2826, 1990.

Plummer L.N., Prestemon E.C. and Parkhurst D.L. An interactive code (NETPATH) for modelling net geochemical reactions along flow path. US Geological Survey, *Water Resources Investigations Report* 91, 4708, 1991.

## Apéndice A

### Loggin de pozos

## Registro continuo de pozos

Se llevó a cabo un registro continuo de pozos en 20 de ellos durante las actividades de campo de octubre de 1996. El objetivo del registro fue recolectar datos para la caracterización hidráulica de los pozos y para generar datos de apoyo para los análisis químicos.

Las mediciones fueron realizadas con el equipo de registro Aqualog SS-200 con sensores para medición de temperatura, pH y conductividad eléctrica del fluido del pozo. Para la medición de la profundidad se utilizó un transductor de presión. El valor medido de la conductividad fue ajustado a la temperatura de referencia de 25°C, aumiendo un cambio de 2.5 % en la conductividad por grado de temperatura.

En la mayor parte de los casos el registro fue efectuado después de cambiar el agua posiblemente estancada en el pozo con agua nueva, por medio de bombeo o enjuague del pozo inmediatamente antes del registro. En algunos casos ésto no fue posible, como en SeLA 09, BP 111, PI-6, PI-8, PI-10 y Orenco P2. En estos casos, el registro puede verse afectado por interacción química con el material del entubado.

Algunos datos de los orificios perforados registrados se compilan en la Tabla A-1 y los registros se indican en los siguientes gráficos:

Gráfico 1: Pozos en Challa Pampa y en Challa Pampita  
SeLA 04, SeLA 09, PI-2, PI-3, PI-5, PI-6, PI-8 y PI-10

Gráfico 2: Pozos cerca de Oruro  
AURORA, PPO 21, PPO22, PPO 13, PPO 15, PPO 16, y BP 111

Gráfico 3: Pozos en Vinto  
BP 112 y BP 114

Gráfico 4: Otros  
PP 17, Orenco 246 y Orenco p2

La mayor parte de los pozos contienen sedimentos finos a profundidad y consecuentemente sólo fue posible investigar los acuíferos menos profundos. En estos pozos, se generó agua bombeada a mayores profundidades, fluyendo verticalmente a la parte superior del pozo. Esto creó un tipo de agua químicamente bastante homogéneo.

El resultado del registro de orificios perforados en combinación con el resultado de las mediciones durante el bombeo fue usado para establecer un mapa de distribución de temperatura característica y conductividad eléctrica en el área.

*Tabla A-1 Características de pozos. Los valores de temperatura, pH y conductividad eléctrica representan las condiciones a unos 20-30 m de profundidad. Comentarios: B = bombeado inmediatamente antes del registro, F = enjuagado inmediatamente antes del registro, AB = bombeado anteriormente, AF = enjuagado anteriormente, N = no bombeado*

Pozo	Profundidad de entubado	Profundidad actual	Temperatura	pH	Conductividad eléctrica	Comentarios
			C		mS/m	
SeLA 04	80 m	75 m	14.8	7.6	90	B
SeLA 09	90 m	67 m	15.3	7.0	210	AB
PI-2	68 m	12 m	13.6	7.6	63	N
PI-3	90 m	67 m	14.2	7.7	93	B
PI-5	78 m	15 m	14.0	8.2	90	B
PI-6	83 m	50 m	15.7	7.0	98	N
PI-8	80 m	73 m	15.2	7.5	83	N
PI-10	80 m	62 m	14.4	8.7	87	N
AURORA	87 m	82 m	16.0	---	570	AB
PPO 21	30 m	25 m	15.0	7.1	140	AF
PPO 22	32 m	25 m	15.7	7.1	60	AF
PPO 13	28 m	26 m	15.3	7.0	745	F
PPO 15	18 m	18 m	14.5	7.4	470	F
PPO 16	32 m	32 m	14.8	6.9	140	F
BP 111	80 m	35 m	15.3	6.0	630	AF
BP 112	107 m	24 m	15.8	7.4	59	B
BP 114	103 m	20 m	16.7	5.2	200	B
PP 17	---	73 m	21.0	6.1	120	AB
Orengo 246	90 m	65 m	16.5	7.8	56	AB
Orengo p2	---	39 m	15.0	7.9	40	N

Favor notar que en el registro de Auror y PPO 22 el límite superior de la conductividad eléctrica se alcanzó a profundidad es decir los valores reales fueron mayores que los indicados en los gráficos.

Temperature (C)

14 16

pH

13 4 5 6 7 8 9 10 11

Elect. cond. (microhm)

100 200 300

(m)  
10



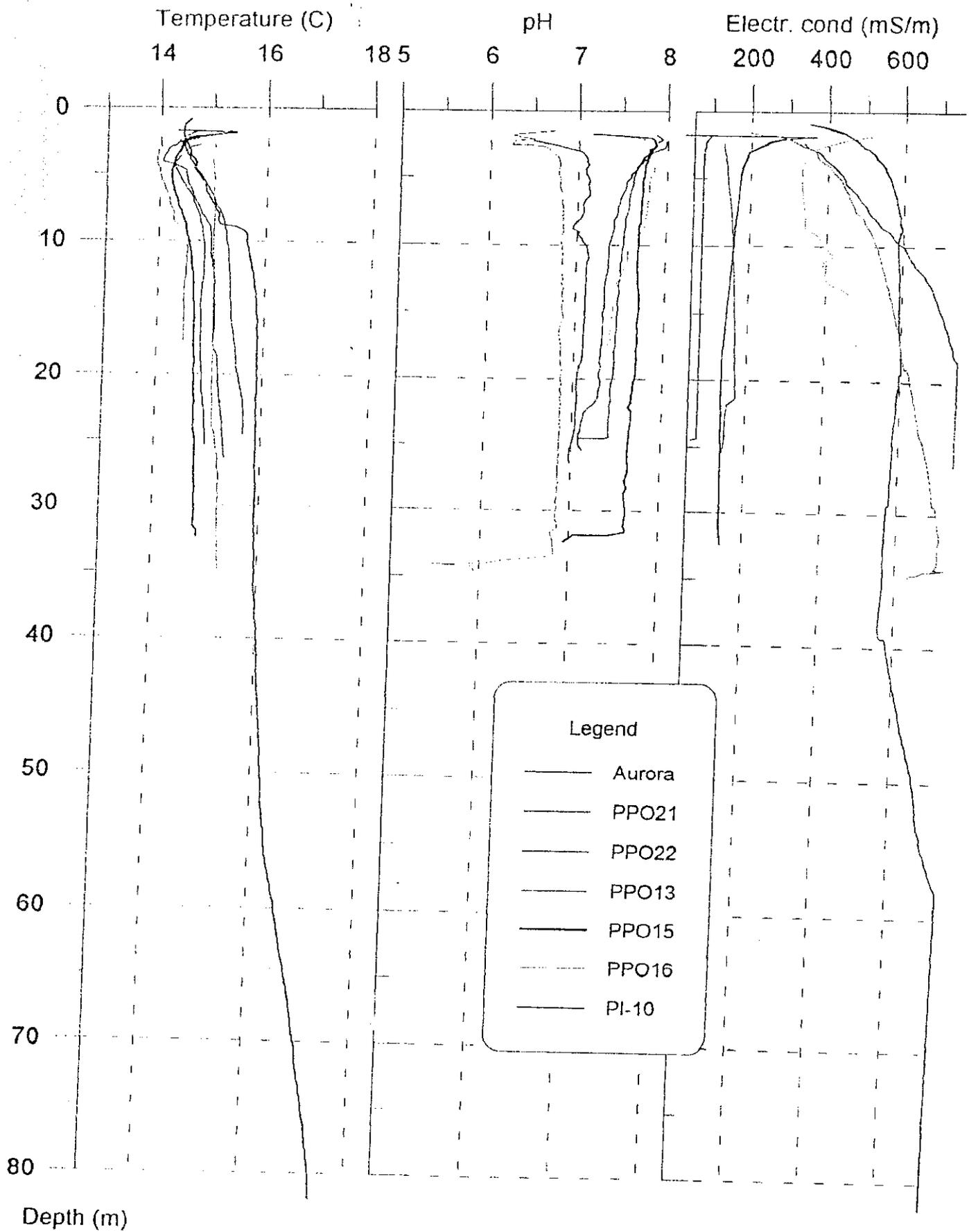
Legend

- PI-2
- SeLA-4
- SeLA-9
- PI-3

Legend

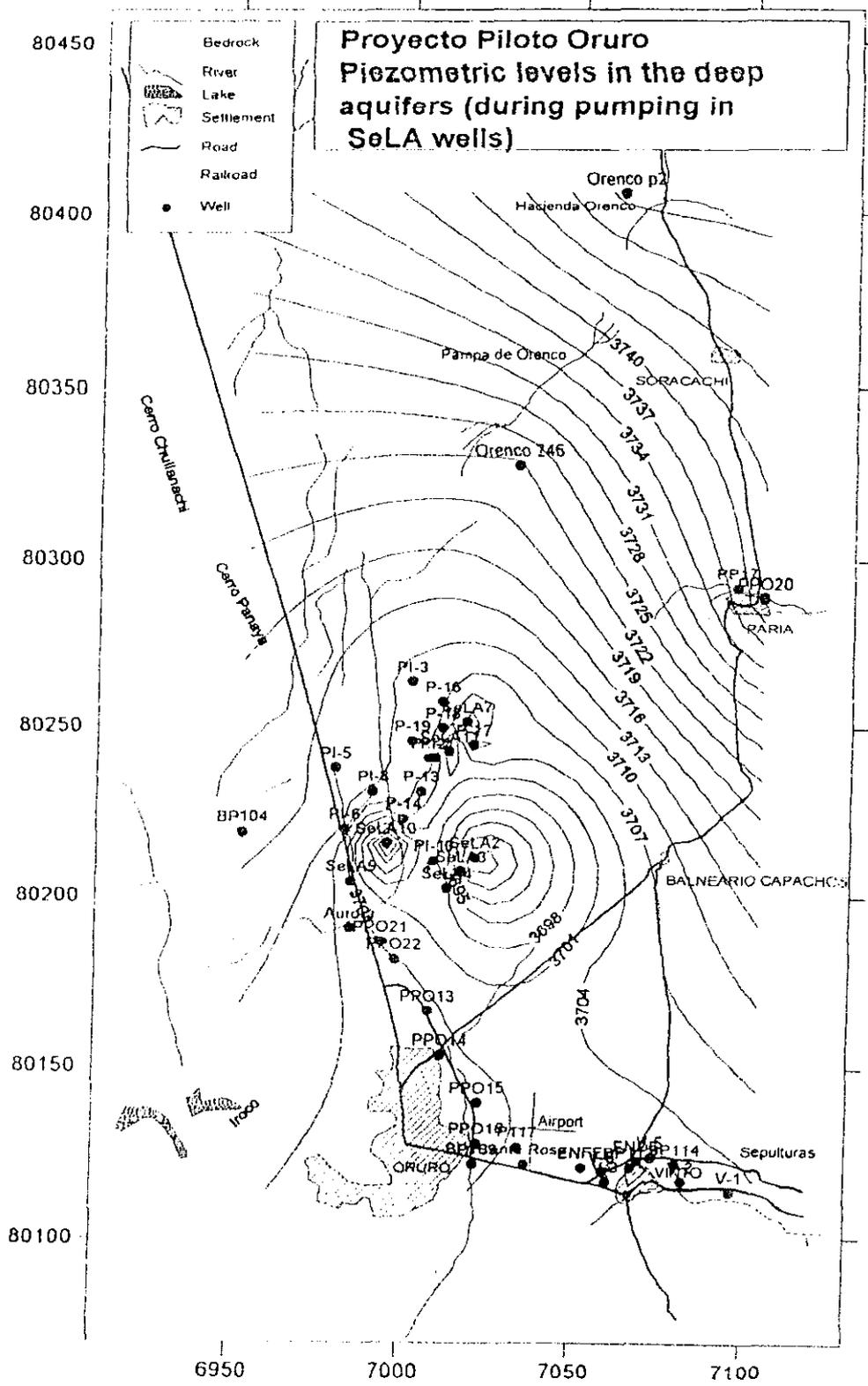
- PI-5
- PI-6
- PI-8
- PI-10

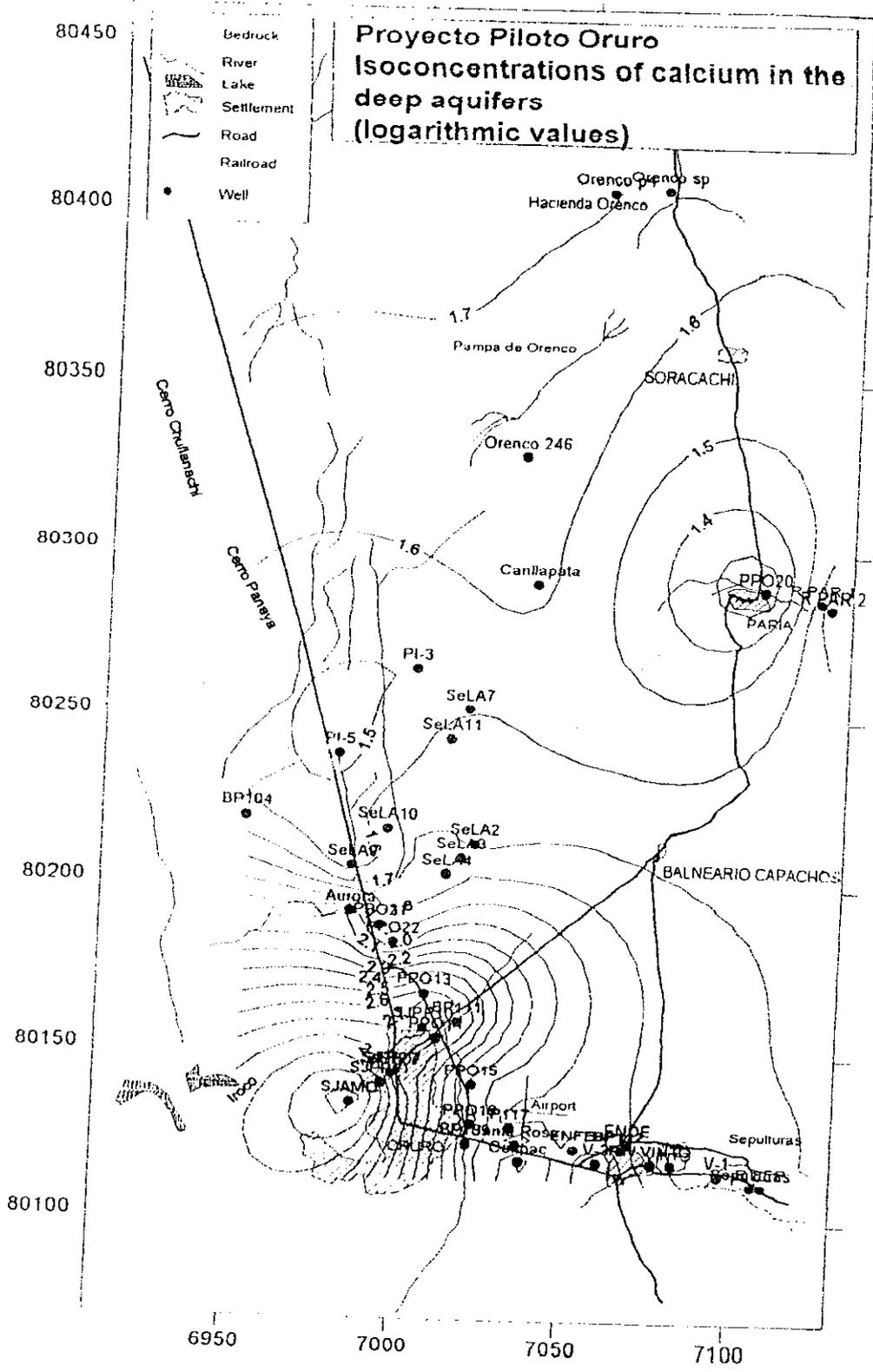
Depth (m)

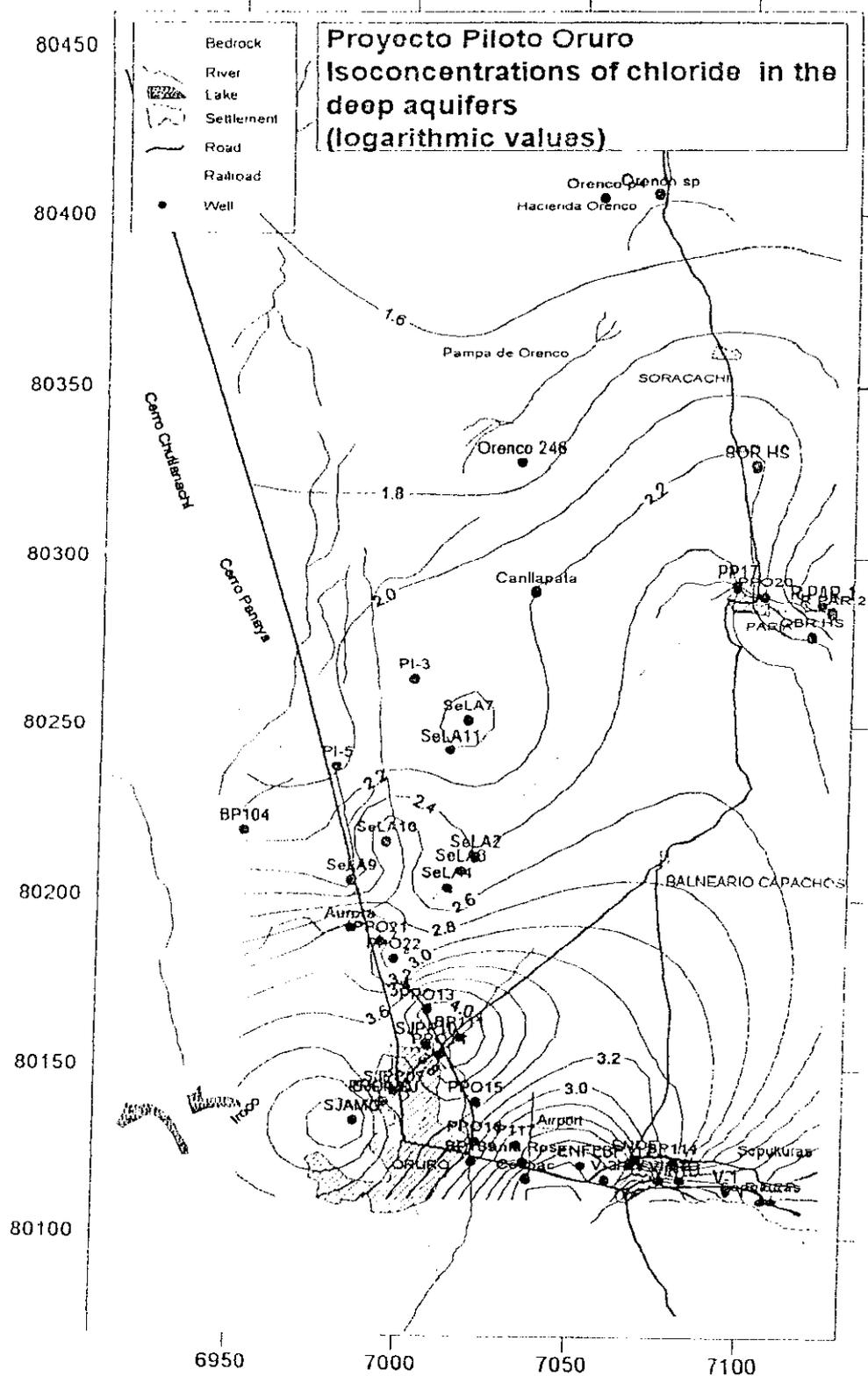


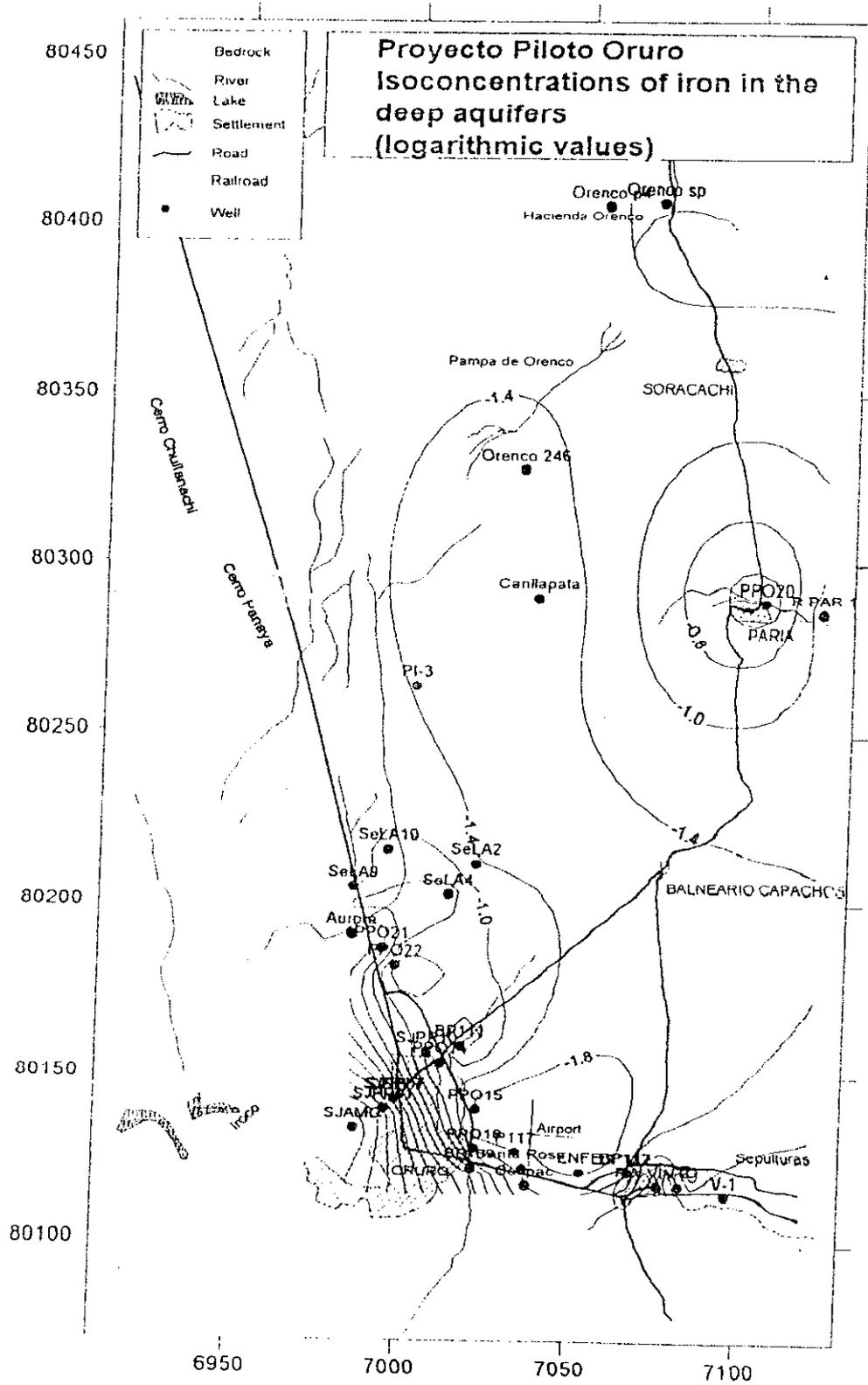


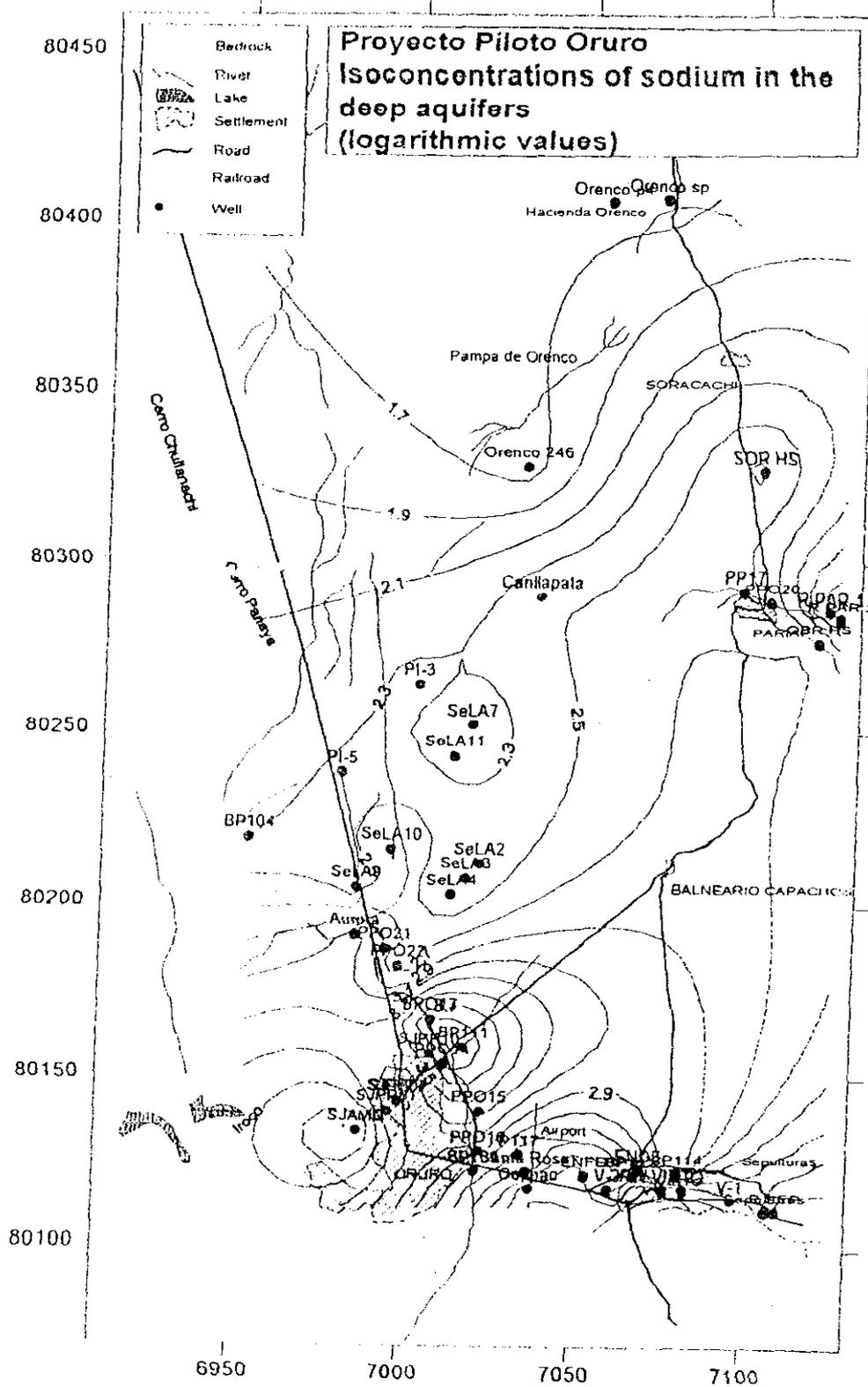






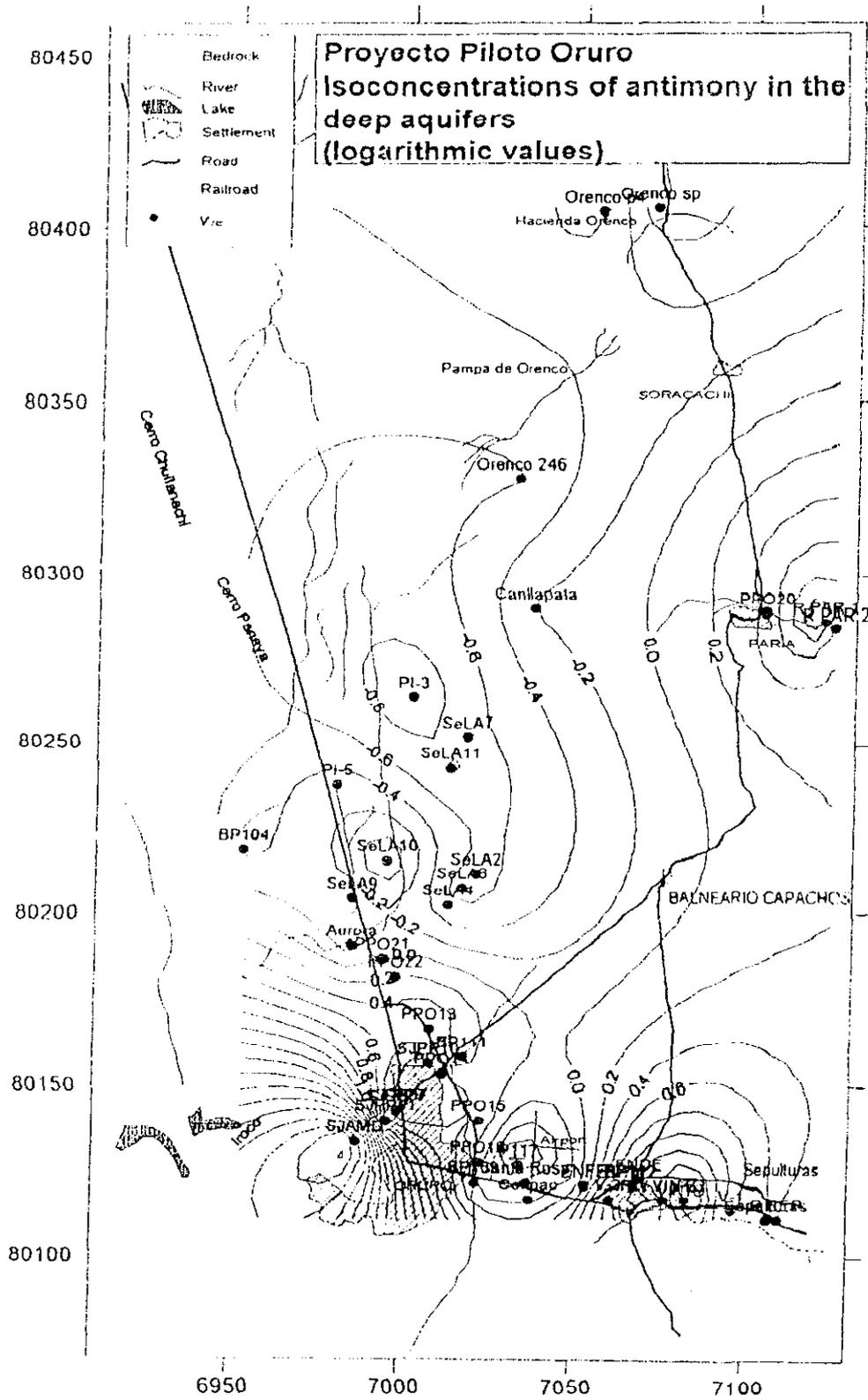




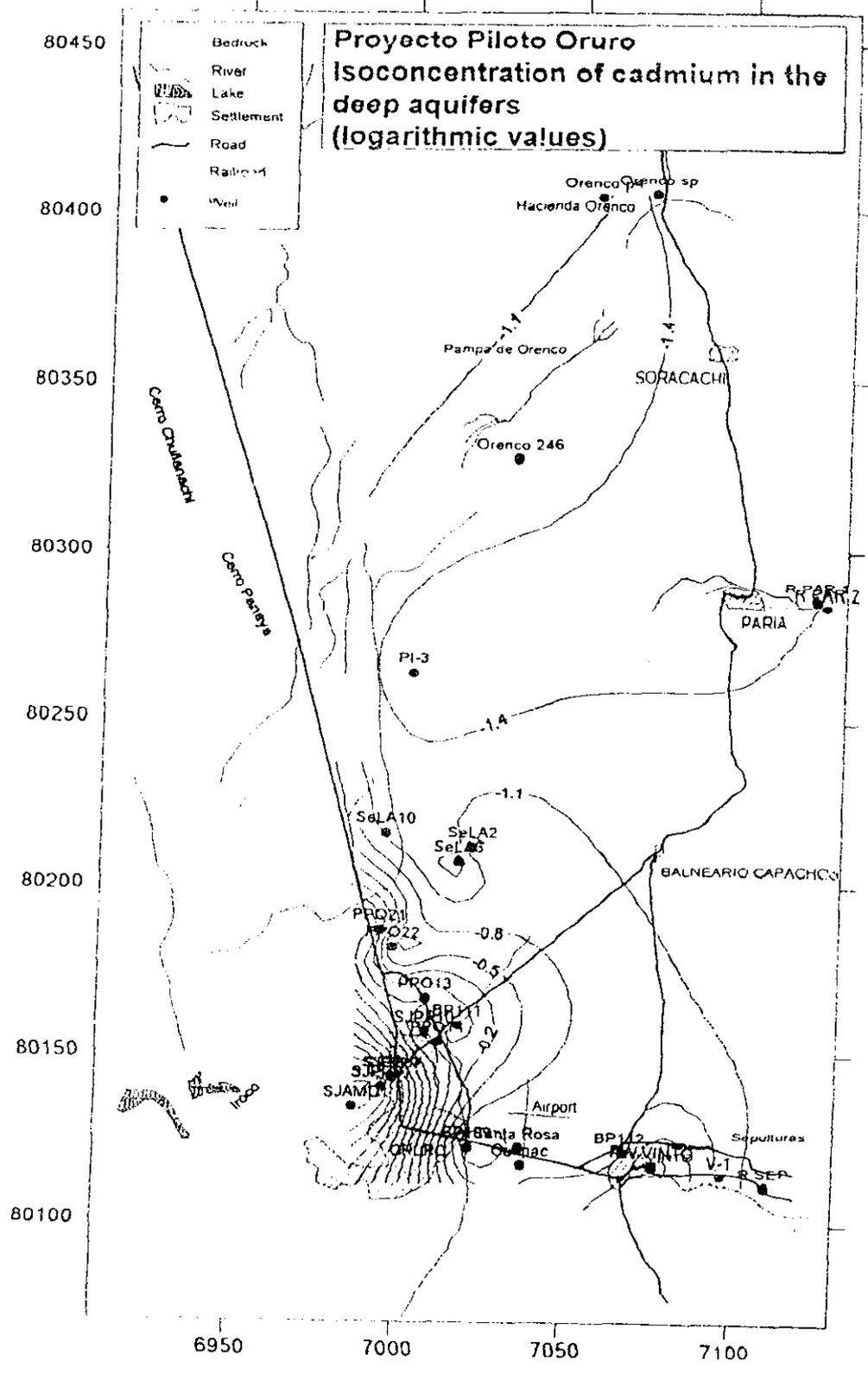


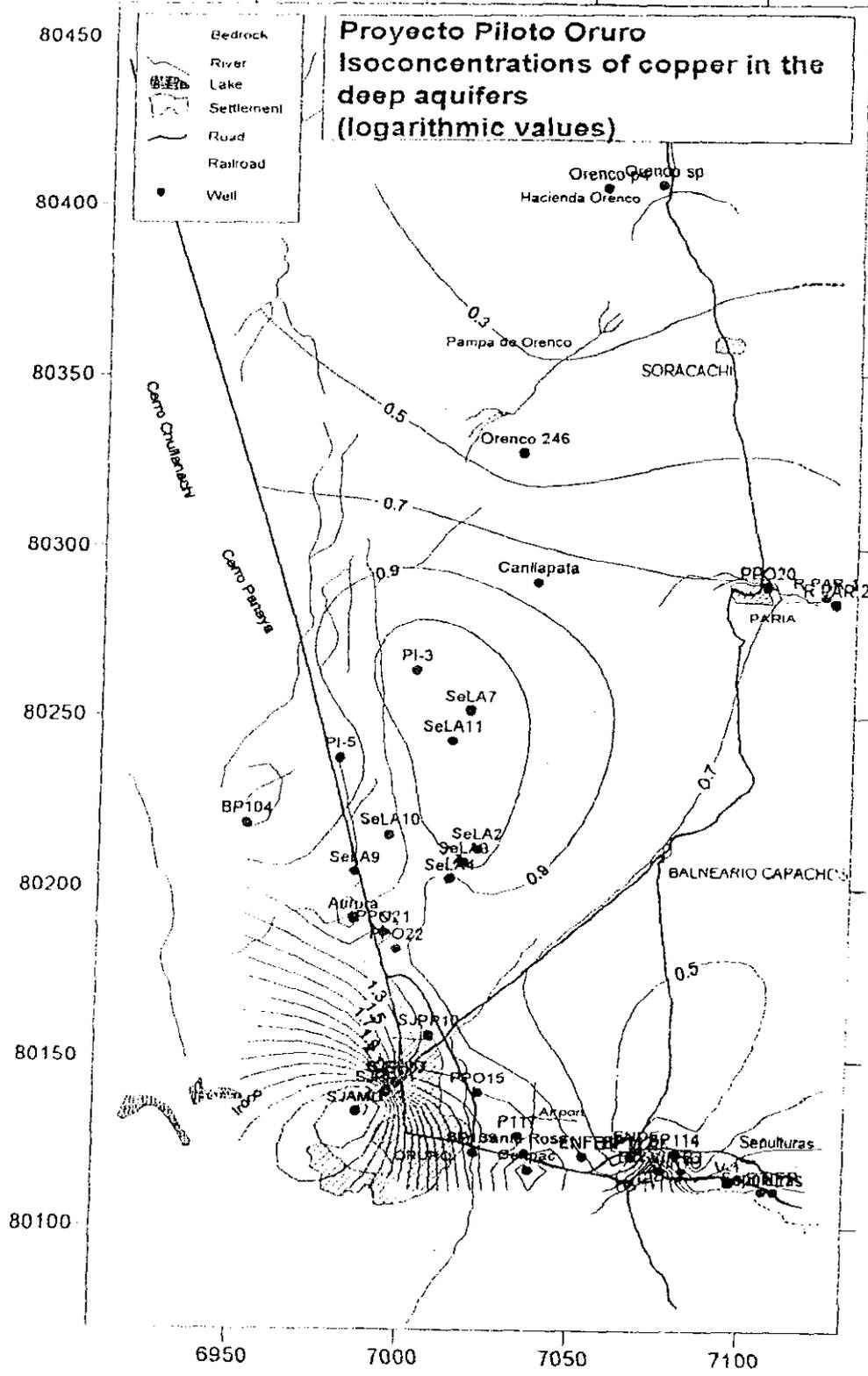






Ministerio de Recursos Naturales y Ambiente  
 Instituto Geológico y Minero de Bolivia

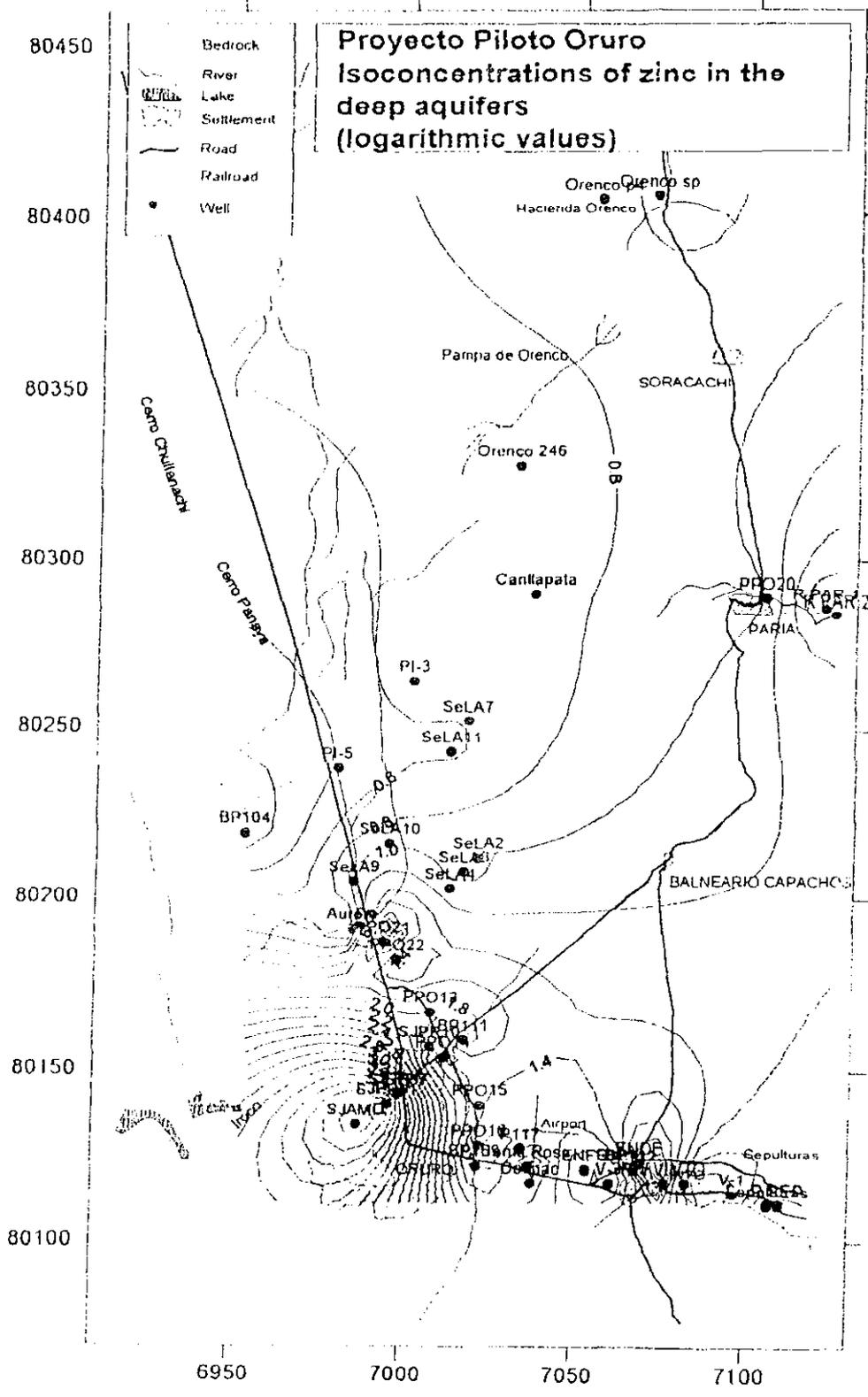












---

## **Apéndice B**

### **Resultados de análisis**



