

**Ministerio de Desarrollo Sostenible  
y Medio Ambiente**

**Secretaría Nacional de Minería**

**Proyecto Piloto Oruro**



**SWEDISH  
GEOLOGICAL AB**  
ENVIRONMENTAL SERVICES

**PPOe. - 002**

# IMPACTO DE LA MINERIA Y EL PROCESAMIENTO DE MINERALES EN CURSOS DE AGUA Y LAGOS

Proyecto Piloto Oruro

Ministerio de Desarrollo Sostenible  
y Medio Ambiente  
Secretaría Nacional de Minería

Swedish Geological AB



Date:  
ID:

December 1996  
R-Bo-E-9 45-9703-PPO 9612

2021

## CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>7</b>
<b>2 CONSIDERACIONES GENERALES</b>	<b>8</b>
2.1 Perfil de las fuentes de contaminación	8
2.2 División fisiográfica del área del PPO	8
2.2.1 Generalidades	8
2.2.2 Sub-cuenca del río Antequera	9
2.2.3 Sub-cuenca del río Santa Fe	13
2.2.4 Sub-cuenca del río Huanuni	13
2.2.5 Sub-cuenca del río Poopó	14
2.3 Sitios de muestreo y programas de monitoreo	14
<b>3. CONCENTRACIONES DE METALES Y CARGAS EN RIOS NO AFECTADOS POR LA MINERÍA NI EL PROCESAMIENTO DE MINERALES</b>	<b>20</b>
3.1 Generalidades	20
3.2 Resultados y discusión	20
<b>4 FUENTES PUNTUALES DE DESCARGAS LIQUIDAS DE LAS MINAS Y PLANTAS DE PROCESAMIENTO DE MINERALES</b>	<b>24</b>
4.1 Centro minero Huanuni	24
4.1.1 Agua de mina	24
4.1.2 Colas y agua de proceso descargadas en el río Huanuni desde el ingenio Santa Elena	27
4.1.3 Efluentes de las pequeñas minas inactivas	28
4.2 Agua de mina descargada de la mina San José	29
4.3 Centro minero Bolívar	32
4.4 Distrito Japo	33
4.5 Distrito Poopó	33
4.6 Fundiciones de Vinto	33
<b>5 CONCENTRACIONES Y CARGA DE METALES EN LOS RIOS QUE DRENAN LOS DISTRITOS MINEROS</b>	<b>37</b>
5.1 Flujo, pH y concentración de contaminantes en los ríos	37
5.1.1 Ritmo del flujo hidrico	37
5.1.2 Comportamiento del pH en los ríos	37
5.1.3 Concentración de contaminantes	40
5.2 Flujo de DAR	47
<b>6 INDICADORES BIOLÓGICOS DE CONTAMINACIÓN</b>	<b>50</b>
6.1 Métodos	50
6.2 Resultados y discusión	50
6.2.1 La Fauna en ríos sin contaminación antropogénica	50
6.2.2 Fauna acuática en ríos afectados por la minería y el procesamiento de minerales	51
<b>7. LAGO URU URU</b>	<b>57</b>
7.1 Información Hidrológica	57

## CONTENIDO

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	7
2 CONSIDERACIONES GENERALES	8
2.1 Perfil de las fuentes de contaminación	8
2.2 División fisiográfica del área del PPO	8
2.2.1 Generalidades	8
2.2.2 Sub-cuenca del río Antequera	9
2.2.3 Sub-cuenca del río Santa Fe	13
2.2.4 Sub-cuenca del río Huanuni	13
2.2.5 Sub-cuenca del río Poopó	14
2.3 Sitios de muestreo y programas de monitoreo	14
3. CONCENTRACIONES DE METALES Y CARGAS EN RIOS NO AFECTADOS POR LA MINERÍA NI EL PROCESAMIENTO DE MINERALES	20
3.1 Generalidades	20
3.2 Resultados y discusión	20
4 FUENTES PUNTUALES DE DESCARGAS LIQUIDAS DE LAS MINAS Y PLANTAS DE PROCESAMIENTO DE MINERALES	24
4.1 Centro minero Huanuni	24
4.1.1 Agua de mina	24
4.1.2 Colas y agua de proceso descargadas en el río Huanuni desde el ingenio Santa Elena	27
4.1.3 Efluentes de las pequeñas minas inactivas	28
4.2 Agua de mina descargada de la mina San José	29
4.3 Centro minero Bolívar	32
4.4 Distrito Japo	33
4.5 Distrito Poopó	33
4.6 Fundiciones de Vinto	33
5 CONCENTRACIONES Y CARGA DE METALES EN LOS RIOS QUE DRENAN LOS DISTRITOS MINEROS	37
5.1 Flujo, pH y concentración de contaminantes en los ríos	37
5.1.1 Ritmo del flujo hidrico	37
5.1.2 Comportamiento del pH en los ríos	37
5.1.3 Concentración de contaminantes	40
5.2 Flujo de DAR	47
6 INDICADORES BIOLÓGICOS DE CONTAMINACIÓN	50
6.1 Métodos	50
6.2 Resultados y discusión	50
6.2.1 La Fauna en ríos sin contaminación antropogénica	50
6.2.2 Fauna acuática en ríos afectados por la minería y el procesamiento de minerales	51
7. LAGO URU URU	57

7.2 Concentraciones de metales y su transporte hacia y desde el lago	58
7.3 Metales en los sedimentos lacustres	61
7.4 Componentes biológicos	69
7.4.1 <i>La comunidad macrofita</i>	69
7.4.2 <i>Contenido de metales en los tejidos macrofitos</i>	69
7.4.3 <i>Fauna béntica</i>	85
<b>8. LAGO POOPÓ</b>	<b>89</b>
8.1 Información Hidrológica	89
8.1.1 <i>Descripción general</i>	89
8.1.2 <i>Registros históricos del nivel del lago Titicaca y su consecuencia para el lago Poopó</i>	89
8.1.3 <i>Evolución reciente del lago Poopó</i>	90
8.1.4 <i>Cambios Geográficos de los afluentes y de la morfología del lago Poopó</i>	92
8.2 Transporte de metales al lago Poopó	95
8.3 Metales en los sedimentos del lago Poopó	99
8.3.1 <i>Generalidades</i>	99
8.3.2 <i>Métodos</i>	99
8.3.3 <i>Resultados de los análisis de metales</i>	100
8.3.4 <i>Interpretación cronológica de la variación de contenidos metálicos en los sedimentos</i>	101
8.4 Aspectos biológicos y recursos pesqueros	105
8.4.1 <i>Comunidades macrofitas</i>	105
8.4.2 <i>La comunidad del fitoplancton</i>	106
8.4.3 <i>Fauna béntica</i>	106
8.4.4 <i>Fauna piscícola y pesquería</i>	107
8.4.5 <i>Avifauna</i>	107
<b>9. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES FINALES.</b>	<b>109</b>

## RESUMEN

Operaciones históricas y actuales en el área del PPO son responsables de la formación de efluentes ácidos cargados de metales provenientes de residuos minerales y de minas inactivas. Este proceso, generalmente conocido como drenaje ácido de roca (DAR), contamina enteramente cursos de agua, lagos y aguas subterráneas, eliminando la flora y la fauna en largos tramos fluviales, y degradando la calidad del agua hasta niveles no seguros. Pese a que existen otras fuentes para la contaminación del agua, el DAR es la fuente dominante en el área del proyecto. Los principales tipos de DAR se listan a continuación:

- Socavones con drenaje de interior mina con rocas de respaldo sulfurosas en oxidación
- Pilas de residuos sulfurosos
- Pilas o diques con colas sulfurosas
- Residuos de desechos mineros sulfurosos retratados
- Colas sulfurosas depositadas en lechos de ríos y en lagos.

Además existen numerosas fuentes menores de DAR como:

- Pilas de menas o sus residuos
- Afloramiento de rocas sulfurosas
- Rellenos de agregados rocosos (caminos, edificios) que contienen materiales sulfurosos

Se han estudiado cuidadosamente las propiedades de oxidación y lixiviación de todos los residuos sulfurosos y los resultados se presentan en el informe PPO-9611. Ellos pueden ser usados como base para priorizar las fuentes que estarán sujetas a futuras medidas de protección. No obstante, la priorización final deberá incorporar conocimientos sobre el estado de los ecosistemas en subcuencas íntegras que contienen residuos minerales. Estos estudios y sus resultados son el objeto de este informe.

La cuenca del lago Poopó está definida como el área de drenaje, aguas abajo de Chuquiña en el río Desaguadero, que une las dos estructuras hidrológicas principales del Altiplano, el lago Titicaca y el lago Poopó. El área de captación de la cuenca del lago Poopó abarca aproximadamente 22 000 km<sup>2</sup>. El informe PPO-9607 trata la porción superior de la cuenca, mientras que éste se concentra en las subcuencas que descargan en los dos lagos de la cuenca: el Uru Uru y el Poopó.

después de llegar a la cuenca del lago Poopó, el río Desaguadero se divide en dos brazos en Chuquiña (La Joya), uno que fluye hacia el lago Uru Uru y el otro directamente hacia el lago Poopó. Del brazo oriental sale un canal que lleva agua hacia el área de Itos. Aparte de ser alimentado por el río Desaguadero, el lago Uru Uru también recibe agua de mina de San José y agua residual de la ciudad de Oruro. Las aguas del lago Uru Uru desembocan en el extremo sur en el lago Poopó. La Cordillera Oriental drena en el lago Poopó por medio de tributarios intermitentes como el Río San Juan Sora Sora (que a su vez es alimentado por los Ríos Huanuni y Santa Fe) desde el norte, y por los Ríos Poopó, Antequera, Juchusuma y Cortadera desde el este. Desde el sur, el Río Sevaruyo y el mayor tributario, el Río Marquez, alimentan También al lago. Los pequeños ríos que drenan desde las montañas al norte de Oruro, descargan en las aguas subterráneas de la sub-cuenca Caracollo-Oruro que es una parte hidrológicamente aislada del Altiplano.

El área del PPO ha sido subdividida en unidades fisiográficas más pequeñas, a las que se refiere como sub-cuencas. Una sub-cuenca está relacionada con los principales ríos del área y encierra uno o varios distritos mineros. Se distinguieron las siguientes sub-cuencas: la del río Antequera, del río Santa Fe, las sub-cuencas del río Poopó y Huanuni. Además está el distrito de San José (Oruro) que, debido a su morfología - un grupo de cerros aislados en la planicie - no puede ser definido como una sub-cuenca.

## Muestreo

En total se establecieron 9 estaciones en los ríos no afectados por la minería y 29 estaciones de monitoreo en las sub-cuencas "mineras" para el programa de monitoreo de DAR. El monitoreo comenzó en marzo de 1994 y finalizó en marzo de 1996. La frecuencia del muestreo y medición fue ajusto a las variaciones del caudal. Durante el periodo de sequía se realizó poco muestreo/medición, pero durante el periodo de lluvias se realizaron muchas visitas al campo, a veces más de una por mes. El programa de monitoreo comprende el muestreo de agua, las mediciones de flujo y la determinación in situ de parámetros como pH, conductividad eléctrica y temperatura. Las muestras de agua fueron tomadas justo debajo de la superficie del agua, donde la corriente era más fuerte; por inmersión de botellas de polietileno enjuagadas en ácido (acid-rinsed). En el laboratorio, las muestras de agua fueron filtradas (0.45 µm) y luego acidificadas (1 ml de ácido nítrico suprapuro por 100 ml de muestra) antes del análisis. Las muestras de agua fueron analizadas en el laboratorio por uno o más de los siguientes parámetros químicos: Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ag, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, Sb, Zn, As, Ni, Ca.

S, Hg, Sn, PST, PSD, PSS.

#### Concentraciones de metales en ríos no mineros

En comparación con los niveles de fondo tentativos de elementos trazas en agua dulce, sólo tres de los ríos muestreados -Cayhuasi, Jacha Uma y Cortadera- muestran concentraciones medias de elementos iguales o menores, excepto para antimonio y arsénico, que son mayores. En los ríos restantes, las concentraciones medias de la mayor parte de elementos son marcadamente mayores. Estos valores de fondo elevados fueron causados por fuentes geoquímicas ("litogénicas"), sin ninguna perturbación antropogénica evidente. Consecuentemente, los niveles de fondo "mundiales" no son aplicables para esta área. Esto es particularmente cierto para antimonio y arsénico. En todos los ríos fueron encontradas concentraciones de antimonio más elevadas que el valor de fondo dado, y alcanzaron hasta 300 veces el "valor de fondo mundial" en los ríos Jacha Uma y Cortadera. En los ríos del sur del lago Poopó los niveles de arsénico encontrados fueron 50 veces mayores que el "valor de fondo mundial".

Aunque el origen litogénico del arsénico y del antimonio es evidente, su proveniencia es diferente y compleja. Las elevadas concentraciones de arsénico (30-150 µg/l) en los ríos Sevaruyo y Marquez son causadas por el proceso natural de intemperismo de las rocas volcánicas de la Meseta de Los Frailes. En contraste con el arsénico, el antimonio de las aguas de los ríos Cayhuasi, Jacha Uma, Huaylluma, Juchusuma y Cortadera tiene su evidente origen en complejos metasedimentarios del Paleozoico que albergan numerosas mineralizaciones y depósitos de antimonio tipo veta y diseminados. Las mineralizaciones están acompañadas por extensas zonas de alteración y se reúnen en un cinturón NNO-SSE, cubriendo parcialmente la orilla oriental del lago Poopó.

La mayor parte de las concentraciones de elementos mostrada en la Tabla 3.1 son menores que el nivel máximo aceptable de las clases A-D de acuerdo al sistema de clasificación de Bolivia. Sin embargo, los niveles medios de antimonio exceden estos niveles en los ríos Jacha Uma y Cortadera. Adicionalmente, los niveles en los ríos Cayhuasi y Huaylluma están a punto de exceder el límite. Los niveles medios de arsénico en los ríos Sevaruyo, Marquez y Laca Jahuira también exceden el nivel máximo aceptable de las clases A-D. La directriz de la Organización Mundial contra el Hambre (WHO) para el arsénico en agua potable es 10 µg/l, y este valor es superado en todos los ríos excepto el Cayhuasi y el Jacha Uma. Otro elemento que excede el valor directriz de la WHO en la mayor parte de los ríos, al menos ocasionalmente, es el antimonio. Mientras que los niveles medios de plomo están por debajo del valor directriz de la WHO, las concentraciones máximas de plomo exceden el valor límite al menos en cuatro ríos. Por tanto, no hay ningún río en el área que pueda ser considerado como fuente segura de agua potable, si se usan estrictamente las recomendaciones de la WHO.

DAR, concentraciones de metales, ríos afectados por actividad minera

Los ríos Huanuni, Santa Fe y Antequera están expuestos a substanciales descargas de DAR. El valor de pH de los tributarios no afectados está normalmente sobre 8, mostrando así que las aguas han disuelto agentes alcalinos de la tierra. Pese al potencial de neutralización de las aguas alcalinas, el pH alcanza inmediatamente un nivel levemente superior a 3, que se mantiene aguas abajo hasta que la corriente alcanza la planicie. Sin embargo, antes de alcanzar el lago Poopó en Pazña, el río Antequera se vuelve menos ácido, llegando a un pH sobre 5. Esta disminución de la acidez se debe a la mezcla con agua rica en carbonatos descargada en los ríos de vertientes situadas en el lecho del río.

El sorprendente resultado del monitoreo del pH es que el pH es consistentemente bajo aguas abajo en los tres ríos principales. Podría esperarse generalmente que el drenaje ácido generado arriba se diluya sucesivamente por las importantes cantidades de agua fresca alcalina añadida al río aguas abajo. La falta del incremento esperado en el pH indica la generación constante de DAR a lo largo de los ríos. El incremento de DAR se facilita por las grandes cantidades de residuos minerales finos (arenas o colas finas) depositadas en todos los ríos. A pesar de la concentración de actividades recientes e históricas en el pueblo de Poopó, el río Poopó es bastante alcalino, con un pH de casi 9. Estas aguas están claramente afectadas por las vertientes termales localizadas justo aguas arriba del pueblo, con altas concentraciones de sal.

La carga anual total de sulfato transportada desde los distritos mineros supera las 50 000 toneladas. De esta cantidad se considera que el 40% representa el transporte natural. La carga correspondiente de los metales pesados estudiados es de casi 4 000 toneladas de las cuales la contribución antropogénica es del 99% (cadmio, zinc, cobre). El único suplemento natural de importancia es el arsénico (90 - 99%) y el antimonio. Considerando la potencial importancia para el medio ambiente, el zinc y el cadmio deben ser objeto de especial atención. No obstante, el cobre podría también jugar un rol importante en el valle Huanuni.

Las proporciones de las cantidades transportadas de sulfato, cadmio y plomo son casi las mismas en los ríos Santa Fe, Huanuni y Antequera. El río Santa Fe transporta relativamente más zinc que el Huanuni, pero con

una carga substancialmente menor que en el Antequera. El flujo sólo de la sub-cuenca Antequera asciende al 50% de la carga total de zinc y a más del 20% de la carga total de cadmio.

De los cuatro ríos, el Poopó descarga las menores cantidades de DAR. La carga de sulfato de los ríos es menor al 2% del total. La carga relativa de cobre y plomo es casi la misma que las demás, pero la carga de cadmio y especialmente la de zinc son relativamente pequeñas, menos de 0.1% del total. El río Poopó es el portador más significativo de cloruros (de origen natural). De hecho, la concentración de este elemento en el agua del río es generalmente 15 veces mayor que la de sulfato.

#### **Indicadores biológicos de contaminación, ríos no afectados por actividades mineras**

La macrofauna béntica de los ríos estudiados por el proyecto fue registrada semi-cuantitativamente durante las diferentes campañas de muestreo realizadas en el periodo 1994-1996. Con el fin de identificar la composición de fondo de la fauna béntica, se tomaron muestras en ríos de contaminación desconocida. En los ríos con contaminación antrópica, como ser el San Juan de Sora Sora, Poopó y Antequera, se tomaron muestras aguas arriba y aguas abajo de las fuentes de contaminación.

En cinco de los siete ríos no contaminados que fueron analizados (Jalsuri, Cortadera, Sevaruyo, Marquez y Palco Mayo), se identificaron 5 a 11 taxa consistentes básicamente en larvas de insectos. También se encontraron crustáceos y vertebrados, como peces y larvas de ranas/sapos (Anura). Moluscos como caracoles y mejillones fueron escasos. El insecto "remero" (Corixidae) es de distribución oportunista, bastante común y abundante. Los adultos pueden volar hacia aguas adecuadas, donde puedan tolerar la contaminación porque su respiración aérea. La larva de mosca (Ephemeroptera) y el camarón de agua dulce (Amphipoda) no pueden migrar por el aire y tienen respiración acuática, por lo que son más susceptibles a la contaminación hídrica. En dos de los ríos sin contaminación antropogénica conocida, el Jachacha Uma y Huaylluma, no se encontró fauna acuática. Las duras condiciones climáticas son causa probable para la pobreza de la fauna acuática.

#### **Indicadores biológicos de contaminación, ríos afectados por actividades mineras**

El río San Juan Sora Sora, que drena las sub-cuencas Huanuni y Santa Fe, tiene tres tributarios principales: los ríos Santa Fe, Huanuni y Ventaimedia. El río Santa Fe está contaminado por las actividades mineras pasadas y presentes de Japo, Morococala y Santa Fe. El río Huanuni está contaminado por la mina y el pueblo de Huanuni. Adicionalmente estos dos sistemas fluviales están afectados por actividades de las cooperativas. No obstante, la cuenca del río Ventaimedia no tiene fuentes contaminantes. La mayor diversidad de fauna, con 14 taxa diferentes, fue hallada en el río Huanuni, aguas arriba de la mina, donde no está afectado por contaminación minera, de ingenios u otras actividades humanas. Están representados todos los grupos sensibles. La calidad del agua en este punto es la mejor (con las más bajas concentraciones de metales y un mínimo de sólidos suspendidos) de toda el área. Aunque la fauna béntica en el río Ventaimedia es menos diversa que en el río Huanuni, las especies sensibles son abundantes y la comunidad está bien equilibrada. No se encontró fauna béntica aguas abajo de las minas en los ríos Santa Fe y Huanuni. Las descargas provenientes de la minería y otras actividades de procesamiento de mineral, exterminaron la fauna béntica en todas las secciones afectadas de los ríos, al parecer sin excepción. En la sub-cuenca del río Poopó, las actividades mineras están concentradas en los tramos bajos del río. Importantes cantidades de aguas termales ingresan al río algunos kilómetros aguas arriba de estas minas. Solamente en las secciones superiores del río Poopó se encontró una comunidad faunística relativamente normal. Aguas más abajo, antes y después de la entrada de las aguas termales, sólo se identificaron pocas especies y no existían grupos sensibles como moscas y anfibios. Debajo de las actuales labores mineras, la fauna estaba ausente. En el río Antequera, contaminado por las descargas provenientes de las minas Bolívar, Totoral y Avicaya, sólo se encontró una composición faunística relativamente normal antes de la mina Bolívar. También se observaron unas pocas especies en un pequeño afluente utilizado para irrigación. Aguas abajo de las actividades mineras y de procesamiento de minerales, la fauna béntica estuvo ausente. La carencia de fauna puede deberse parcialmente al agua termal que ingresa al río Antequera por el río Urmiri y por varias fuentes en el lecho del río.

#### **Lago Uru Uru**

El lago Uru Uru funciona como un eficiente sumidero de metales. El transporte por la salida del lago, de todos los elementos estudiados excepto azufre y antimonio, es sólo una pequeña fracción del ingreso. La fijación en el lago se explica por reacciones que secuestran metales y por la incorporación de metales por plantas acuáticas del ecosistema límnic del lago Uru Uru. El alto superávit en la descarga de azufre desde el

lago (32000-155000 ton/año) debe explicarse por causas múltiples. La más obvia es la repetida (**intermitente**) disolución de sulfatos depositados en el lago. Las fuentes adicionales son las deposiciones atmosféricas provenientes de Vinto y los sulfatos disueltos arrastrados desde el área de captación. Como la cantidad calculada continúa siendo muy elevada se deben considerar las contribuciones adicionales antropogénicas. Las emisiones de los hornos artesanales de ladrillos, las fábricas de ladrillos y fábricas de cemento, son las fuentes más probables. Con respecto al antimonio, parte de su exceso en el agua de salida se puede atribuir a la disolución de depósitos originados en la descarga de la mina de oro-antimonio Antofagasta (que estuvo inactiva durante el período de monitoreo). Sin embargo, gran parte del antimonio es disuelto probablemente de los desmontes que se utilizaron para la construcción del terraplén ferroviario que divide al lago. Además, las deposiciones atmosféricas provenientes de la fundición de antimonio de Vinto pueden ser responsable de una pequeña parte del exceso.

El perfil vertical de la concentración de metales en los sedimentos del lecho lacustre es una medida relativa de la carga de metales en el lago. Además, el análisis del contenido metálico en sedimentos más profundos y antiguos permite revelar concentraciones históricas.

En agosto/septiembre de 1995 se llevó a cabo un programa de muestreo de sedimentos del lago Uru Uru, cuando el muy bajo nivel de agua facilitó el trabajo. Las muestras fueron tomadas en las orillas, a intervalos de aproximadamente 2 km (*Figura 7.1*). En 26 sitios se recolectaron sedimentos de la capa superior, de tres a cinco centímetros. Adicionalmente se hizo un muestreo de una sección vertical con una profundidad de 70 cm en la parte noreste del lago. Los valores de fondo de los sedimentos del lago Uru Uru se pueden comparar con los del lago Poopó con excepción de arsénico y antimonio. El mayor nivel de fondo para arsénico en sedimentos del lago Poopó, de origen completamente natural. El mayor nivel de fondo para antimonio en sedimentos del lago Uru Uru se explica por las condiciones geológicas de la cuenca hidrológica del Uru Uru.

El sector noreste del lago, que es el principal receptor del agua descargada por la mina San José, muestra un grado sustancialmente más alto de contaminación. La contaminación más grave en ambas partes del lago es la ocasionada por antimonio. El antimonio es un constituyente típico del mineral de San José y del mineral de Au-Sb de Antofagasta y es transportado al lago con los efluentes de mina y en el lixiviado derivado de las colas Iroco. La gran acumulación de antimonio en las muestras recolectadas a lo largo del terraplén de la vía férrea deriva de los desechos mineros usados para su construcción. El posible aporte de la fundición de antimonio de Vinto no es notorio.

Los sedimentos a lo largo de la margen sudeste del lago han sido contaminados con arsénico, antimonio, cadmio, mercurio, plomo, estaño y zinc en una descarga "accidental" del río San Juan de Sora Sora en el lago.

### Lago Poopó

Investigaciones de secciones de sedimentos y registros históricos revelaron que el lago Poopó es intermitente y de existencia periódica. Además de las amplias variaciones en las cantidades de precipitación en el área, el tamaño del lago es dependiente del flujo en el río Desaguadero, que a su vez depende del nivel de agua en el lago Titicaca. El nivel de agua del lago Titicaca es regulado por la oscilación sud del fenómeno de "El Niño". Se puede apreciar que cuando el agua del lago Titicaca baja del nivel de 3800 m, la salida del Desaguadero se vuelve tan baja que el ingreso al lago Poopó no puede compensar las pérdidas por evaporación de la superficie del lago y por infiltración. El resultado es que el lago desaparece. Esto sucedió más recientemente en 1992-1995. Excepto por la desecación ocurrida el 1983, parece que el período entre 1975 y 1992 es el más largo, en los tiempos modernos, con una existencia continua del lago como verdadero ecosistema limnico.

Durante el trabajo de campo del PPO, había poca o ningún agua en el lago. Consecuentemente, no fue posible un muestreo significativo. Como una mejor aproximación a la calidad del lago, se pueden utilizar las concentraciones registradas en las estaciones de monitoreo de vario tributarios. El lago Poopó representa un virtual sumidero para todos los metales que le llegan.

Una gran parte (85%) del arsénico transportado en aguas superficiales hacia el lago Poopó tiene origen natural. El aporte de arsénico ocasionado por la minería y el procesamiento de minerales, cuyo origen principal se encuentra en el centro minero de San José, es poco significativo. El antimonio de origen natural no sigue el mismo patrón que el arsénico, ya que por lo visto deriva más bien del cinturón de rocas sedimentarias del Paleozoico que hospedan mineralización de oro-antimonio. La fracción del flujo natural de antimonio se estima en un 12%. Un tanto sorpresivamente, el plomo de origen natural supera con creces a la fracción antropogénica llega al 75 % del aporte total de plomo. Su fuente dominante son las vulcanitas y mineralizaciones asociadas de la caldera Soledad (ver PPO-9607). Estas observaciones son extremadamente importantes, pues indican que la posibilidad de mejorar la calidad del agua del lago Poopó es limitada. Las

fuentes geológicas de arsénico, antimonio y plomo no pueden ser eliminadas por ninguna acción humana imaginable. Por otra parte, las fuentes antropogénicas de cadmio (así como las de cobre y zinc) dominan absolutamente el ingreso de estos metales en el lago. La elevada contribución antropogénica del cobre puede rastrearse hasta los centros mineros de Huanuni y Santa Fe/Japo. Las proporciones del azufre antropogénico o natural fueron las más difíciles de estimar y deben ser tomadas con precaución. Parece ser que las evaporitas en la planicie del valle del río Desaguadero, en la subcuenca del río Marquez y las playas circundantes a los lagos Uru Uru y Poopó son las fuentes naturales de azufre más importantes. Pequeñas cantidades de azufre natural vienen de las áreas montañosas que rodean los centros mineros. Debe indicarse también que la contribución de azufre de deposición atmosférica originada en las emisiones de Vinto y de otras fundiciones, representa sólo una pequeña proporción del total.

#### Metales en los sedimentos del lago Poopó

El PPO excavó dos pozos, una en la parte norte del lago Poopó, 110 cm de profundidad, el otro en la parte sud, 100 cm de profundidad. Las muestras de las concentraciones de los elementos en estas secciones muestran tres diferentes patrones. Los niveles de arsénico y manganeso son más altos en las capas de sedimentos profundos que en la superficie. Los niveles de níquel son poco uniformes en todo el muestreo de sedimentos. Los elementos que quedan muestran incrementos hacia la superficie. La distribución vertical de los metales es independiente de las características litológicas.

En el caso del arsénico, manganeso y níquel, los datos de sedimentos dan una clara evidencia que las fuentes geoquímica naturales de estos elementos son de vital importancia. Desagregando el arsénico, la intensidad de la contaminación indica la siguiente proporción de incremento:

en el pozo norte Cu<Pb<Zn<Sb<Hg<Sn<Ag<Cd,  
en el pozo sud -Cu<Pb<Zn<Hg<Ag<Cd<Sn<Sb.

La contaminación más grande se observa generalmente en la parte norte del Lago Poopó, consistentemente con la vecindad a la salida de la subcuenca Huanuni/Santa Fe. La más alta contaminación es notada para el cadmio en el pozo de la parte norte. La contaminación más grande (excepto mercurio) ocurre en la parte de arriba 20 a 25 cm de los sedimentos, coincidiendo con el periodo minero moderno luego de 1910.

El antimonio es el único elemento que tiene concentraciones altas en la corteza salina de los sedimentos.

Este pico no se repite en para ningún otro elemento, luego su origen por precipitación del agua del lago es menos parecida. La explicación propuesta es que este pico es causado por la deposición atmosférica, teniendo su fuente en la pluma de la fundición Vinto. Esta es la más lejana deposición atmosférica causada por la fundición Vinto.

#### Aspectos biológicos, recursos pesqueros en el Lago Poopó

La gran variación en niveles de agua y extensión del lago Poopó, y la concomitante variación en la salinidad del agua del lago, tiene tremenda influencia en el desarrollo de la flora macrofita acuática.

De acuerdo a algunos reportes anteriores (de 1940, ver Iltis, 1993, para referencias), probablemente de los 1930, cuando el lago Poopó estaba evidentemente bien desarrollado, y antes de la desecación de mediados de los 1940, una importante flora acuática macrofítica se desarrolló en los sedimentos del fondo en el 68% del Lago. Sin embargo la parte central comprendió sedimentos grises compactos, carentes de vegetación. Collot (1982) reporta que donde existieron macrófitas, la flora estuvo dominada por especies del género Ruppia y Chara (un alga con raíces) y también contiene helecho acuático Azolla sp. Luego de la reaparición del lago en 1985, y la obtención de su máxima extensión y profundidad de los últimos tiempos, una importante flora acuática se desarrolló nuevamente en los lechos del lago. Había siempre una zona central alargada donde las macrófitas estaban ausentes, a pesar de la transparencia relativamente alta, y la salinidad uniforme de 8-11 g/l. Se encontró que las especies Chara dominaron grandemente, excepto en la parte norte, en la nueva entrada del Río Desaguadero, donde la Ruppia spp. cubrió grandes áreas. Parece ser que la Ruppia estaba en regresión en diferentes zonas en los bordes, comparando a la situación anterior a 1983. Así, la comunidad macrofita típica del Lago Titicaca no fue observada en el Lago Poopó, ni antes ni después de la desecación en 1983. En la situación presente, durante la ejecución del PPO, se caracterizó por un lago casi seco, y la zona con Ruppia que anteriormente bordeaba la mayor parte del lago, había casi desaparecido, excepto en las áreas húmedas cerca de la entrada del Río Desaguadero en el Norte. En esta misma región, se observaron algunos conjuntos de Totorá, pero estaban en malas condiciones debido a la desecación. A lo largo de la antigua orilla del lago, la

flora terrestre había invadido la zona. Adicionalmente, los agricultores locales han extendido recientemente la agricultura dentro del área antigua del lago.

La composición de la comunidad del fitoplancton así como de las plantas fue muy diferente antes y después de la desecación de 1983. El dominio anterior de diatomeas fue reemplazado por una masa de Peridiales. En resumen la parte central, la turbidez fue también muy cerca a la entrada del Río Desaguadero. En contraste a la situación del Lago Titicaca, donde se identificaron más de 17 especies diferentes de ostrácodos, la fauna de ostrácodos en el lago Poopó es extremadamente pobre. Durante varias campañas de muestreo en este Lago se encontraron cero, una o dos especies de ostrácodos. Con relación a la fauna béntica que resta, los pocos análisis realizados sugieren que esta fauna se adaptó muy lentamente a la nueva condición ambiental luego de 1985. La Fauna béntica, muy pobre, consistía principalmente de dos especies, el gastrópodo *Littoridina cf. poopóensis* en las áreas cubiertas por *Chara*, y el anfípodo (caracol) *Hyaella longipalma* en algún área profunda. En 1989, sin embargo, se inició la colonización de nuevas regiones acuáticas.

La fauna piscícola del Lago Poopó es extremadamente pobre en diversidad, consistiendo de solo una especie nativa, el Karachi (*Orestias agassii*), y una introducida: pejerrey (*Basilichthys bonariensis*). En 1980, el total de la población de pescadores en el Lago Poopó fue de 510 personas, y la pesca fue de un total de 1175 tons (cerca del 90% pejerrey). Incluso en 1983, cuando la mayor parte del lago estuvo seca, se informó de una pesca de 900 tons. Los siguientes años, la población de pescadores incrementó, como también la pesca, alcanzando un máximo de 799 pescadores y un máximo de pesca de 3380 tons, en 1990. Esta pesca representó cerca al 40% de la producción bruta total nacional de pesca en Bolivia. Después, la pesca decreció rápidamente. Por ejemplo, en 1992, los pescadores notaron deformidades y reducción en el tamaño del pescado, y el total de pesca se redujo a cerca de 550 tons. En 1993, la industria del pescado en el Lago Poopó colapsó completamente.

En los años cuando el lago Poopó existió como tal y tuvo una gran extensión, una rica avifauna dependía de la gran productividad del Lago. Esta consistía de algunas especies de flamencos y de una gran variedad de patos y gansos. Sin embargo, actualmente la mayoría de estas aves acuáticas se han trasladado a otros lugares. Los análisis del hígado de Flamenco muestran similares niveles de los metales esenciales cobre y zinc que los invertebrados que son su alimento. Los niveles de metales no esenciales cadmio y plomo fueron sin embargo, mucho más bajos en los flamencos que en los invertebrados, indicando que estos metales no fueron bioacumulados en los flamencos. El nivel de mercurio (no esencial) fue en algunos casos más alto en el hígado de flamenco que en los invertebrados. Esto podría implicar que el mercurio es bioacumulado, quizá porque la fracción significativa de mercurio podría estar en forma de metil mercurio que es fácilmente bioacumulado.

## Conclusiones

Las siguientes son las principales conclusiones del reporte:

Hay un alto influjo antropogénico de antimonio en el Lago Uru Uru y, consecuentemente, también en la parte norte del lago Poopó. Este alto influjo puede crear un considerable riesgo para la salud y el medioambiente, y la reducción de este influjo de antimonio debería tener por lo tanto una alta prioridad. El muy alto influjo de cadmio, cobre y zinc, con origen antropogénico en la parte norte y este del lago Poopó probablemente causará daños ambientales al ecosistema límnic (en periodos cuando el lago exista), lo cual incrementa la urgencia de medidas para reducir la descarga de estos metales de los lugares mineros en la subcuenca del Lago Poopó. Sin embargo tales medidas tienen más baja prioridad que las medidas necesarias para proteger el más permanente e importante ecosistema acuático del lago Uru Uru.

Como la mayor parte de el influjo de arsénico en el Lago Poopó es de origen natural, este influjo continuo dentro del lago no puede ser eliminado. Porque la región generalmente sufre de carencia de agua, la posibilidad de construir llanuras de inundación artificiales para dotar de sumidero significativo de arsénico (y otros metales) es extremadamente limitado.

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante varios siglos, la industria minera y de procesamiento de minerales ha sido la base de la economía boliviana, y aparentemente continuará siéndolo en el futuro previsible. Si bien los nuevos proyectos de minería y de beneficio de minerales se desarrollan con la debida consideración a los aspectos ambientales, las labores antiguas han causado, a lo largo de muchos años, un considerable daño al medio ambiente. Como se demostrará en el presente informe, una parte importante del daño puede atribuirse a los continuos procesos de formación de efluente ácido cargado de metales, generado en los desechos mineros abandonados y en las minas inactivas. Este proceso, por lo general conocido como drenaje ácido de roca (DAR), contamina los cursos de agua, los lagos y aguas subterráneas eliminando la flora y la fauna acuática en grandes tramos de los ríos, y degradando la calidad del agua por debajo de los niveles de seguridad.

El "Proyecto Piloto Oruro" (PPO) ha sido un proyecto único en el sentido de que estudió y evaluó la situación ambiental general en toda la región, que es una de las áreas mineras más importantes de Bolivia, y ha desarrollado los lineamientos estratégicos para un manejo ambiental consistente, de acuerdo a los principios de desarrollo sostenible. La estrategia ambiental propuesta se describe en el Plan Maestro Ambiental adjunto al informe final. El PPO también ha sido un proyecto piloto en el sentido de que ha demostrado la posibilidad de aplicar el método científico empleado en el PPO para otros distritos mineros de Bolivia y de la región andina en general.

Este informe es el segundo que trata de varios aspectos de los ecosistemas acuáticos en el área del proyecto. Como se define en el Programa detallado de trabajo (PPO-9401, enmendado en el PPO-9601) el informe incluye contribuciones a la Parte 2 - Determinación de datos de fondo, Parte 3 - Identificación de fuentes de contaminación, Parte 4 - caracterización de los modelos de dispersión y niveles de Inmisión, y Parte 5 - Impactos ecológicos de los contaminantes. El primer informe que trataba de los ecosistemas acuáticos, PPO 9607 fue dedicado a las zonas superiores del sistema hidrológico del Desaguadero.

La recolección de datos y los estudios de campo fueron realizados por los Grupos GEO y BIO del equipo del PPO. Se realizaron más de 1 200 monitoreos de campo, se tomaron más de 2000 muestras de agua y se realizaron aproximadamente 1 500 análisis de multielementos durante el curso del programa. Las investigaciones dieron como resultado más de 50 000 datos para la base de datos. también se incorporaron los datos de la auditoría Ambiental de las minas Huanuni y San José (GEOBOL & SGAB, 1995).

Este informe fue preparado por Pavel Adamek (SGAB), Zelmira Andia (PPO), José Córdova (PPO), Sven Hammarbäck (SGAB), Lars Landner (MFG), Tom Lundgren (SGAB), Rubén Plaza (PPO), Alberto Paniagua (PPO), Olof Sangfors (MFG) y Víctor Zabaleta (PPO).

## 2 CONSIDERACIONES GENERALES

### 2.1 Perfil de las fuentes de contaminación

En el área investigada hay muchas fuentes de contaminación que **afectan la calidad del agua de los corrientes y los lagos**. Las fuentes de contaminación **predominantes son las diversas formas de drenaje ácido de roca (DAR)**. A continuación se da un **listado de los principales tipos de DAR**:

- Socavones con drenaje de interior mina con rocas de caja sulfurosas **en oxidación**
- Pilas de residuos sulfurosos
- Pilas o diques con colas sulfurosas
- Residuos de desechos mineros sulfurosos retratados
- Colas sulfurosas depositadas en lechos de ríos y en lagos.

Además existen numerosas fuentes menores de DAR como:

- Pilas de menas o sus residuos
- Afloramiento de rocas sulfurosas
- Rellenos de agregados rocosos (camino, edificios) que contienen **materiales sulfurosos**

Se han estudiado cuidadosamente las propiedades de oxidación y **lixiviación de todos los residuos sulfurosos** y los resultados se encuentran en el *Informe PPO 9609*. **Ellos pueden ser usados como base para priorizar las fuentes que estarán sujetas a futuras medidas de protección**. No obstante, la priorización final deberá basarse en **estudios que reflejen la situación que se da por las descargas combinadas de todas las fuentes que afectan a los ecosistemas de la cuenca íntegra**. Estos estudios y sus resultados **son el objeto de este informe**.

### 2.2 División fisiográfica del área del PPO

#### 2.2.1 Generalidades

En los informes PPO 9603 y PPO9606 se incluye una descripción **detallada de la fisiografía del área del PPO**. El área del proyecto rodea la cuenca del lago Poopó, **que a su vez forma parte de la gran cuenca endorreica del Altiplano**. La cuenca del **lago Poopó está definida como el área de drenaje, aguas abajo de Chuquiña en el río Desaguadero, que une las dos estructuras hidrológicas principales del Altiplano, el lago Titicaca y el lago Poopó**. Durante los periodos de niveles de agua muy elevados, el río Laca Jahuirá **une el lago Poopó con el Salar de Coipasa**. El área de captación de la cuenca del lago Poopó **abarca aproximadamente 22 000 km<sup>2</sup> (Figura 2.1)**.

Después de llegar a la cuenca del lago Poopó, el río Desaguadero **se divide en dos brazos en Chuquiña (La Joya)**, uno que fluye hacia el lago Uru Uru y el otro **directamente hacia el lago Poopó**. Del brazo oriental sale un canal que lleva agua hacia **el área de Itos**. Aparte de ser alimentado por el río Desaguadero, el lago Uru Uru también **recibe agua de mina de San José y agua residual de la ciudad de Oruro**. Las aguas del lago Uru Uru **desembocan en el extremo sur en el lago Poopó**. La Cordillera Oriental drena en el lago Poopó por medio de

**tributarios intermitentes** como el río San Juan Sora Sora (que a su vez es **alimentado por los ríos Huanuni y Santa Fe**) desde el norte, y por los ríos Poopó, Antequera, **Juchusuma y Cortadera** desde el este. Desde el sur, el río Sevaruyo y el mayor tributario, el río **Marqucz**, **alimentan** También al lago.

Los pequeños ríos que drenan desde las montañas al norte de Oruro, los ríos **Cayhuasi y Paria** (el Paria se forma por la confluencia de los ríos Jachacha Uma y Huaylluma), **descargan** en las aguas subterráneas de la sub-cuenca Caracollo-Oruro que es una **parte** hidrológicamente aislada del Altiplano.

Durante los estudios y en este informe, el área del PPO ha sido subdividida en unidades fisiográficas mas pequeñas - áreas de captación - a las que se refiere como sub-cuencas. Una sub-cuenca está relacionada con los principales ríos del área y encierra uno o varios distritos mineros. Se distinguieron las siguientes sub-cuencas: la del río Antequera, del río Santa Fe, las sub-cuencas del río Poopó y Huanuni. Además está el distrito de San José (Oruro) que, debido a su morfología - un grupo de cerros aislados en la planicie - no puede ser definido como una sub-cuenca. La *Figura 2.2* es un mapa esquemático que muestra la extensión de las sub-cuencas y la ubicación de las estaciones de monitoreo.

### 2.2.2 *Sub-cuenca del río Antequera*

La sub-cuenca es drenada por el río Antequera con un gran tributario, el Urmiri, alimentado por una red de tributarios menores que están, no obstante, secos la mayor parte del año. Mientras que el río Antequera se encuentra muy contaminado por diversas actividades mineras, el río Urmiri en general no está afectado. El área total de captación es de 229 km<sup>2</sup>, de los cuales la cuenca del Urmiri abarca 84 km<sup>2</sup>.

El cauce del río Antequera tiene características jóvenes (es decir, morfología montañosa con laderas escarpadas formadas por la actividad erosiva del río) desde el tope oriental del pueblo Antequera (Punto de referencia antecedente DB-1) hasta el asentamiento de Avicaya, donde el valle se abre a una amplia planicie inundada (DA-5). Más al sur el río se divide en muchos canales antes de entrar en el lago Poopó en Pazña. El agua termal descarga en el sistema en Urmiri y más allá de la confluencia del Urmiri con el Antequera. La estación de monitoreo principal para esta sub-cuenca es la PZ-3 en Pazña.

El sustrato de la sub-cuenca está predominantemente formado por sedimentos Paleozoicos - pizarras, areniscas y cuarcitas intruidos por dos stocks menores de pórfido dacítico/riodacítico del Mioceno. Los lechos de los ríos en los valles están rellenos con depósitos aluviales - grava, arena y limo. Hay áreas mas pequeñas cubiertas por depósitos glaciales (morenas) y depósitos glacio-fluviales (arenas) en Totoral y Avicaya. Los depósitos glacio-fluviales También constituyen una parte sustancial de los depósitos de llanuras inundadas.

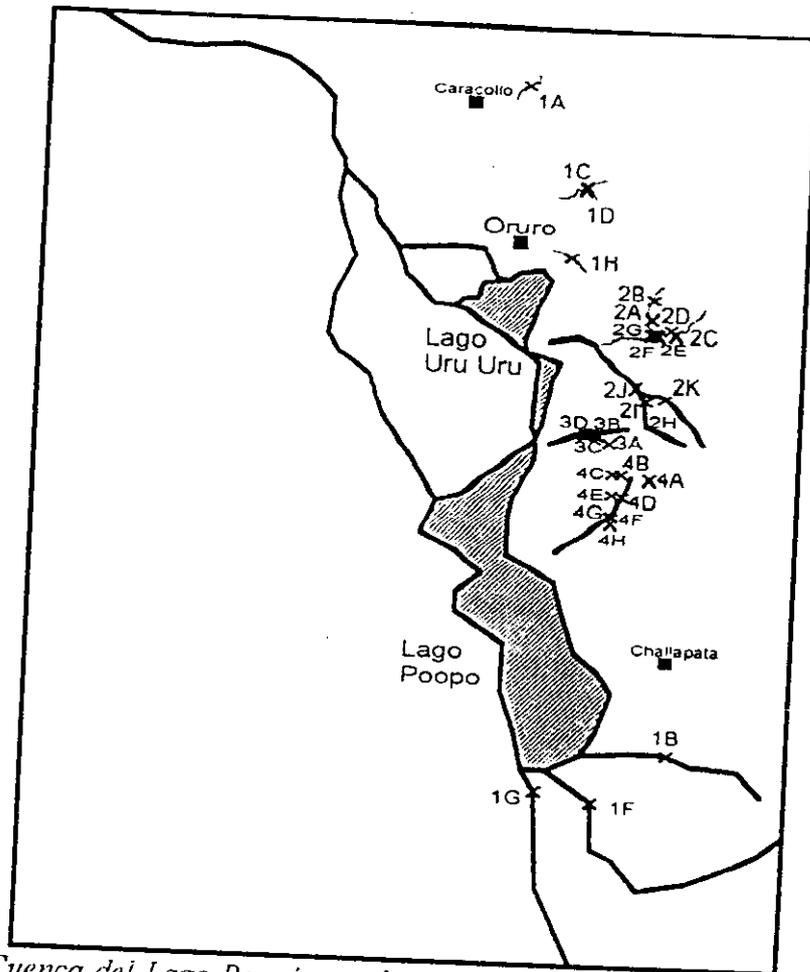


Figura 2.1 Cuenca del Lago Poopó con drenajes y principales estaciones de monitoreo (por nombres, ver tabla 2.1)



Fig. 2.2 Subcuencas y estaciones de muestreo (círculos rojos). Las estaciones con etiqueta se discuten en el texto

La sub-cuenca Antequera incluye el distrito Bolívar-Avicaya con depósitos **polimetálicos** (Sn, Ag, Zn y Pb) del "tipo boliviano". Los depósitos principales son Bolívar (**actualmente activo**), Martha, Centenario, Totoral y Avicaya. Al sur de Avicaya se explotaron los depósitos glacio-fluviales por estaño, mediante el dragado de la grava fluvial a gran **escala al sur de Avicaya (ESTALSA)**. Ver detalles en el informe PPO 9604, Troeng & Riera (1996) y Palza et al. (1996). Las actividades de extracción y procesamiento de mineral dieron origen a una gran cantidad de desmontes y colas. Los depósitos de residuos pueden encontrarse en pilas, en las laderas de los valles y en el lecho del río Antequera. Desde la mina Bolívar en el extremo norte, hasta la planicie costera del lago Poopó, el aluvión del río Antequera está mezclado con las colas sulfurosas. En Totoral hay gran cantidad de colas confinadas en el lecho del río.

### 2.2.3 *Sub cuenca del río Santa Fe*

El sistema del Río Santa Fe drena un área de captación de 143 km<sup>2</sup> aproximadamente. Los principales componentes del drenaje son el río Santa Fe, que comienza en Morococala y es el afluente más importante; el río Japo (También llamado Santa Teresa o Cana Mayu) originado en Japo (referencia de fondo en el punto AJ-1). El río usualmente fluye sólo en la estación de lluvias.

La sub-cuenca es en su mayoría montañosa. El río corre por una cañada profundamente erosionada, muy estrecha (a veces sólo unos metros de ancho) levemente sinuosa desde su nacimiento hasta la Estancia Aco Aco. En este sector el lecho del río tiene una mínima cantidad de sedimentos aluviales gruesos. En Aco Aco el río se precipita abruptamente en el amplio valle del río Huanuni. En este punto el río Santa Fe da origen a un gran abanico aluvial. A los 5000 m, el río Santa Fe se une al río Huanuni y forma el río San Juan de Sora Sora. La estación principal de monitoreo para la sub-cuenca es la ASF-6, justo sobre la confluencia con el Río Huanuni.

El substrato de la sub-cuenca contiene partes iguales de sedimentos del Paleozoico (pizarras, areniscas y cuarcitas) y del Mioceno (dacíticas a riolíticas volcánicas de la caldera del Morococala). Grandes áreas al sur del Japo están cubiertas de morenas glaciares.

La sub-cuenca Santa Fe incluye al distrito Japo-Morococala con los depósitos de Japo, Morococala y Santa Fe, **actualmente abandonados** (excepto algo de dragado a pequeña escala). Como en otros distritos, la minería pasada dejó grandes cantidades de residuos en depósitos y montones, pero También en grandes depósitos en el lecho del río mezclados con aluviones. Las colas del río son reprocesadas, en algunos lugares, por cooperativas mineras de pequeña escala.

Para obtener información detallada ver Palza et al. (1996) y Troeng Riera (1996).

### 2.2.4 *Sub-cuenca del río Huanuni*

La sub-cuenca del río Huanuni puede ser dividida en dos partes, una río arriba, por debajo de la confluencia con el río Ventaimedia, abarcando una superficie de 172 km<sup>2</sup>, y otra aguas abajo, hasta la confluencia con el río Santa Fe, que cubre 256 km<sup>2</sup>. El área total de captación es de 428 km<sup>2</sup>. La referencia de fondo para la sección superior está en el punto BH-1, en el río Huanuni, y para la inferior en el BH-5, en el río Ventaimedia. Desde la confluencia con el río Ventaimedia, el río Huanuni corre a través de un valle ancho, abierto, relleno por depósitos de

llanuras inundadas de grava, arena y limo. La estación principal de monitoreo para la sub-cuenca es la BH-4, justo encima de la confluencia con el río Santa Fe.

El sustrato de la sub-cuenca está formado casi enteramente formado por **sedimentos del Paleozoico**. Las rocas volcánicas del Mioceno aparecen solamente como **pequeños vestigios en la cumbre** de algunas montañas; no hay depósitos glaciares.

La sub-cuenca incluye el depósito del Huanuni, que es hoy el mayor productor de **estaño** en Bolivia (ver detalles en el informe PPO 9604, Palza et al. 1996, y Troëng & Riera 1996). Desafortunadamente, la minería actual se practica, desde el punto de vista ecológico, de una manera muy precaria. El agua de proceso, las colas arenas y las colas de flotación, ricas en sulfuros, son descargadas indiscriminadamente en el río. Además se descargan las lamas de la recuperación de agua. Frecuentemente hay desbordes y filtraciones accidentales (ver detalles en COMIBOL: Auditoría Ambiental de la mina Huanuni, 1995). Estas descargas se suman a una gran cantidad de colas y otros desechos minerales depositados en el lugar y reprocesados en el lecho del río por las cooperativas.

#### 2.2.5 Sub-cuenca del río Poopó

El río Poopó y su red de pequeños afluentes drena una cuenca de 109 km<sup>2</sup>. El punto de referencia de fondo es el P-1, aguas arriba de las fuentes termales situadas en el lecho del río.

El sustrato del área de captación está formado básicamente por sedimentos del Paleozoico. Hay stocks porfíricos del Mioceno Menor intruidos en los sedimentos.

La sub-cuenca abarca al distrito polimetálico Poopó-Candelaria. La mina Poopó, operada actualmente por cooperativas, es la operación más importante (ver detalles en Palza et al. 1996, y Troëng & Riera 1996). La planta de concentración está inactiva. Importantes cantidades de desmontes recientes y colas sulfurosas se depositaban en la planicie atravesada por una carretera intercontinental.

El punto de monitoreo principal para la sub-cuenca es el P-2.

### 2.3 Sitios de muestreo y programas de monitoreo

Se seleccionó una serie de estaciones de monitoreo en los principales cursos de agua que drenan el área de captación del lago Poopó (*Figura 2.1*), incrementada por estaciones adicionales dentro de las cuatro sub-cuencas "mineras" descritas anteriormente (*Figura 2.2*). La selección de las estaciones de monitoreo fue realizada en base a los siguientes criterios:

- Al menos una estación debe representar las condiciones de fondo en cada sub-cuenca
- Otras estaciones deben reflejar el aporte de cada fuente importante de DAR
- Debe ser posible calcular la carga contaminante total en los ríos principales
- Deben ser favorables las condiciones para tener situaciones estables (secciones de medición constantes) en las estaciones de monitoreo.
- Tanto el muestreo como las mediciones de caudal deben ser realizables en la misma sección.
- No deben haber cambios sensibles en la corriente aguas arriba (p. Ej. cooperativas).

Por muchas razones no fue posible satisfacer todos los criterios en todos los sitios escogidos, por razones prácticas y económicas. Por ejemplo, el tipo de construcción necesaria para abarcar todo el flujo del río es costosa, además esta estructura obstruiría las operaciones mineras de los "cooperativistas". Por esta razón estas construcciones no fueron realizadas. Se priorizaron las secciones naturales estrechas del río y se usaron placas portátiles de madera para colectar los flujos y facilitar la medición cuando fue necesario.

En total se establecieron 9 estaciones en los ríos no afectados por la minería y 29 estaciones de monitoreo en las sub-cuencas "mineras" para el programa de monitoreo de DAR. En el río Poopó, con pocas operaciones importantes, concentradas en la parte inferior, se consideraron necesarias sólo dos estaciones. En el río Huanuni, sin embargo, con muchos afluentes y un extenso procesamiento de las colas en casi toda su extensión, se consideró necesario establecer 18 estaciones.

El monitoreo comenzó en marzo de 1994 y finalizó en marzo de 1996. La frecuencia del muestreo y medición fue ajusto a las variaciones del caudal. Durante el período de sequía se realizó poco muestreo/medición, pero durante el período de lluvias se realizaron muchas visitas al campo, a veces más de una por mes. Para cubrir todas las estaciones de monitoreo, cada salida al campo toma dos o tres días.

El programa de monitoreo comprende el muestreo de agua, las mediciones de flujo y la determinación in situ de parámetros como pH, conductividad eléctrica y temperatura. Las muestras de agua fueron tomadas justo debajo de la superficie del agua, donde la corriente era más fuerte; por inmersión de botellas de polietileno enjuagadas en ácido (acid-rinsed). En la mayoría de las estaciones se tomaron muestras por duplicado. No se realizó ningún tratamiento o la conservación de muestras en el lugar. Por problemas logísticos, algunas muestras tuvieron que ser almacenadas durante meses en las oficinas del proyecto antes de ser enviadas al laboratorio para los análisis químicos. En el laboratorio, las muestras de agua fueron filtradas (0.45  $\mu\text{m}$ ) y luego acidificadas (1 ml de ácido nítrico suprapuro por 100 ml de muestra) antes del análisis. Las muestras de agua fueron analizadas en el laboratorio por los siguientes parámetros químicos:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , Ag, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, Sb, Zn, As, Ni, Ca, S, Hg, Sn, PST, PSD, PSS (sin embargo, no todos los parámetros fueron determinados en cada muestra).

Los análisis fueron mayormente realizados en Suecia por Svensk Grundamnesanalys AB, usando el ICM-MS (espectrometría de emisión de masas por plasma acoplado inductivamente) y/o ICP-AES (espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente) (métodos modificados de EPA 200.7 y 200.8). MeAna Konsult realizó algunos análisis de rutina y varias determinaciones de control. Estos análisis se realizaron en un Espectrómetro de Absorción Atómica con horno de grafito. En Bolivia los análisis se hicieron en el Instituto de Investigaciones Minero Metalúrgicas, usando Espectrometría de Absorción Atómica con horno de grafito.

En Palza et al. (1996) se puede encontrar una detallada descripción de los programas de monitoreo. Todos los parámetros de las muestras, resultados de análisis, y mediciones tomadas se encuentran en la Base de Datos del PPO en la oficina de SERGEOMIN en Oruro:

Tabla 2.1 Estaciones de monitoreo en los ríos no afectados por la minería y el procesamiento de minerales

No.	Coord.	Lugar	Clase	Río	Material percolante
CY-1	O 7066 S 80459	Cayhuasi	Superficial Agua de Río	Cayhuasi	Aluvial-Coluvial Bedrock sedimentario
PR-1	O 7128 S 80290	Paria	Superficial Agua de Río	Jachacha Uma	Aluvial-Coluvial Bedrock sedimentario
PR-2	O 7129 S 80287	Paria-Obrajes	Superficial Agua de Río con agua termal	Huaylluma	Aluvial-Coluvial Bedrock sedimentario
JU-1	O 7273 S 79315	Norte de Challapata	Superficial Agua de Río	Juchusuma	Aluvial-Coluvial Bedrock sedimentario
C-1	O 7349 S 78846	Huari	Superficial Agua de Río	Cortadera	Aluvial-Coluvial Bedrock sedimentario-volcánico
S-1	O 7246 S 78575	Sevaruyo	Superficial Agua de Río	Sevaruyo	Aluvial-Coluvial Red beds y Bedrock volcánico
SQ-1	O 7196 S 78722	Sevaruyo-Quillacas	Superficial Agua de Río	Sevaruyo	Aluvial-Coluvial Red beds y Bedrock volcánico
MR-1	O 7078 S 78747	Oeste de Quillacas	Superficial Agua de Río	Marquez	Aluvial-Coluvial Red beds y Bedrock volcánico
LJ-1	O 7047 S 78778	Pampa-Aullagas	Superficial Laguna estancada	Laca Jahuirá	Descarga de agua subterránea que percola por sedimentos del Lago Poopó

**Tabla 2.2. Puntos de monitoreo de la sub-cuenca del río Santa Fe.**

	Coord.	Sitio	Clase	Río	Materiales
<b>Jee-1</b>	E 728300 N 8001300	Socavón ppal.mina Japo	Drenaje de mina.	Al río Japo	Sustrato oxidado (mina)
<b>Npig-1</b>	E 727900 N 8001300	Ingenio Negro Pabellón	Descarga de la planta	Al río Japo	Transporta colas de ingenio
<b>AJ-1</b>	E 72700 N 8000200	700 m al sur del campo Japo	Superficial (río ppal.)	Japo	Material glacio-fluvial
<b>AC-2</b>	E 728000 N 7996200	Jaromita, encima la confluencia con. Santa Teresa	Efluente	Cana Mayu, aguas arriba del Río Santa Teresa	Lecho arenoso
<b>ASF-7</b>	E 728100 N 7995900	Jaromita, aguas abajo de la confluencia	Superficial (río ppal.)	Río Santa Teresa	Material coluvial y glacio-fluvial
<b>AM-3</b>	E 733200 N 7992300	Morococala, 1 km NO del campo	Efluente	Dique al río Santa FJ	Sedimentos coluviales y desmontes
<b>ASF-4</b>	E 729700 N 7992400	La Escalera 3.5 km al NE de Pairumani	Efluente	Río Santa FJ aguas arriba de la confluencia	Sustrato de lava, colas piriticas
<b>ASF-8</b>	E 729500 N 7992300	La Escalera 2.9 km NE Pairumani	Efluente	Río Santa FJ aguas abajo de la confluencia	Sustrato de lava, colas piriticas
<b>ESC-1</b>	E 729500 N 7992100	La Escalera 2.8 km NE de Pairumani	Efluente	Tributario pequeño, limpio agua de irrigación	Llega al río principal solo en las inundaciones
<b>ELV-1</b>	E 728300 N 7991800	La Escalera 1.8 km NE de Pairumani	Efluente	En río Elva aguas arriba del río Santa FJ	minería temporal en depósitos glacio-fluviales
<b>AP-5</b>	E 727800 N 7991500	1.2 km NE de Pairumani,	Superficial (río ppal.)	En el río Santa FJ , aguas abajo del río Elva	Sedimentos col-/aluviales, sustrato Paleozoico
<b>ASF-6</b>	E 717400 N 7988800	1.8 km SE Sora Sora (agua sobre la ruta)	Superficial (río ppal.)	En el río Santa FJ aguas arriba de la confluencia	Sedimentos aluviales contaminados con colas

**Tabla 2.3.** Puntos de monitoreo de la sub-cuenca del río Huanuni

	Coord.	Sitio	Clase	Río	Material percolado
<b>BH-1</b>	E 731600 N 7976500	Pata Huanuni, 3.0 km E del pueblo Huanuni	Superficial, antecedente	Río Huanuni, aguas arriba del río TocoToconi	Sedimentos aluviales en bedrock Paleozoico
<b>Hfsc1</b>	E 730800 N 7976600	Socavón ppal. mina Pepitos, 2 km E Huan.	Efluentes de mina	Descarga en el río Huanuni	Sustrato oxidado (la mina)
<b>HING1</b>	E 729800 N 7977200	Molino Sta Elena descarga en Huanuni	Efluente de molino	Descarga directamente en el río Huanuni	Goteras de las colas
<b>HSC-1</b>	E 729700 N 7977500	Socavón ppal. de la mina Patiño (Huanuni)	Efluente de mina	Al río Huanuni y molino Sta. Elena	Sustrato oxidado (la mina)
<b>BH-3</b>	E 728400 N 7977100	Colgante, puente publico en pueblo Huanuni	Superficial en río ppal.	En río Huanuni	Sedimentos aluv., residuos públicos, alcantar., colas
<b>BH-8</b>	E 725300 N 7978800	Playa Verde, 4.0 km NO de pueblo Huanuni	Superficial en río ppal.	En río Huanuni, aguas arriba del río Ventaimedia	Sedimentos aluviales y colas reprocesadas
<b>BH-5</b>	E 727300 N 7975600	Dique de bombeo, 0.8 km N de Ventaimedia	Efluente	En río Ventaimedia	Sedimentos aluviales, pocos depósitos de colas
<b>BH-6</b>	E 723800 N 7980800	Khala Saya, 6.5 km NO de pueblo Huanuni	Superficial en río ppal.	En río Huanuni, aguas abajo del río Ventaimedia	Sedimentos aluviales y colas reprocesadas
<b>VV-1</b>	E 723000 N 7982500	Viluyo manantial, 1 km NO pueblo Viluyo	Efluente	Irrigación, eventualmente drena al río Huanuni	Origen desconocido, probable de galería, etc.
<b>BH-4</b>	E 718100 N 7986300	Paco Pampa, 14.4 km NO de pueblo Paco Pampa	Superficial en río ppal.	Huanuni, aguas abajo de Aguas Calientes	Sedimentos aluviales y depósitos de colas
<b>AB-7</b>	E 716500 N 7989600	Sora Sora, 1.0 km SE de pueblo Sora Sora	Superficial en río ppal.	En río San Juan de Sora Sora	Sedimentos aluviales, flujo contiene mucha arcilla
<b>M-1</b>	E 712800 N 7990900	Puente /camino ppal. sobre el río, 2.5 km Sora Sora	Superficial en río ppal.	En río San Juan de Sora Sora	Sedimentos aluviales arenosos, contaminados por colas
<b>M-2</b>	E 707200 N 7989700	Ruta a Caravi, 1.7 km al SO de Machacamarca	Superficial en río ppal.	En San Juan de Sora Sora (elevada prop. de infiltración)	Lecho arenoso muy suave contaminado por colas

2.4 Puntos de monitoreo de la sub-cuenca del río Poopó.

No.	Coord.	Sitio	Clase	Río	Material percolado
LI-1	E 720700 N 7963800	Vialaque (ruta), 6.5 km SE pueblo Poopo	Superficial en río ppal.	En río Poopó, aguas abajo de vertientes termales	Lecho pluvial muy arenoso, con residuos minerales
LI-2	E 718500 N 7966500	Pozo Candelaria, 1.2 km SE Poopó	Superficial en río ppal.	En río Poopó. Aguas arriba: vertientes termales	Sedimentos aluviales y receptor de efluentes de mina
PSC-1	E 715600 N 7966700	Socavón Machamarquita, 0.5 km SE pueblo Poopó	Efluente de mina (cont finas)	El agua de mina descarga en río Poopó	Sustrato oxidizado (la mina)
P-2	E 713700 N 7966300	Puente /camino ppal. 1.0 km S de pueblo Poopó	Superficial en río ppal.	En el río Poopó que tiene flujos subterráneos	Playa arenosa, pocas pilas de colas y efluentes de mina
VQ-1	E 712300 N 7963600	Meseta Qeso Quesoni	Superficial en río ppal.	Actualmente, curso canalizado del río Poopó	Sedimentos arcillosos y aluviales (irrigación)

Tabla 2.5 Puntos de monitoreo regulares en la sub-cuenca Antequera

No.	Coord.	Lugar	Clase	Río	Material percolado
DB-1	E 728200 N 7955100	Dique para agua municipal, Chapaña	Superficial en río ppal., de fondo	En el río Chapaña	Bedrock y aluvión
BSC-1	E 728200 N 7956000	Mina Bolivar, bocamina principal.	Drenaje de mina DAR	Al río Chapaña	Sustrato oxidado (la mina)
DB-2	E 728200 N 7956200	Cementerio, población Antequera	Superficial (río ppal),	En el río Chapaña, (Antequera)	Desmontes y colas de ingenio
BIG-1	E 726000 N 7957000	Dique colas de ingenio (Pampitas)	Descarga del ingenio	Al río Antequera via Palomani	Acarrea colas de ingenio
DM-3	E 725200 N 7955200	Mina Martha	Superficial (río ppal.)	En el río Antequera	Sedimentos aluviales y esquistos
To-1	E 724200 N 7953400	Ingenio de planta Totoral, población Totoral	Descarga de ingenio	Al río Antequera	Acarrea colas de ingenio
DT-4	E 742100 N 7952000	En el río a la salida del dique Totoral	Superficial (río ppal.)	En el río Antequera	Lecho pedregoso y morrenas Avicaya
DA-5	E 723500 N 7959500	Avicaya, camino a Estalsa	Superficial (río ppal.)	En el río Antequera	Lecho pedregoso, sedimentos aluviales, colas, afloramientos de pizarras y esquistos
PZ-1	E 721100 N 7945600	Ford - Pazña San José Pampa	Superficial (río ppal.)	En río Antequera	Lecho arenoso aluvial
PZ-3	E 720700 N 7942200	Pazña puente ppal Jachacha Jaraña	Superficial (río ppal.)	En río Pazña	Lecho uniforme de sedimentos aluviales
PZ-2	E 722100 N 7943900	Siqui Chullpa (camino a Pazña)	Efluente	En río Urmiri	Grava aluvial, arena

Tabla 2.6. Estaciones de monitoreo adicionales en la sub-cuenca Antequera.

Nombre	Coord.	Lugar	Clase	Río	Material percolado
SUR-1	E 726900 N 7956200	Surumi, Antequera	Efluente	En Chlar Khara	Lecho aluvial de arena y grava
MST-1	E 724800 N 7958300	Pampitas	Efluente superficial	Palormani	Lecho aluvial de grava y arena + colas aguas arriba

### 3. CONCENTRACIONES DE METALES Y CARGAS EN RIOS NO AFECTADOS POR LA MINERÍA NI EL PROCESAMIENTO DE MINERALES

#### 3.1 Generalidades

Muy pocos ríos en el área del proyecto no están afectados por ninguna fuente importante de contaminación antropogénica. En ocho de estos ríos, se tomaron muestras de agua para análisis por metales. Durante el periodo de monitoreo, de agosto de 1994 a diciembre de 1995 fueron tomadas de una a cinco muestras por mes. El número total de muestras varió de 6 a 20 en cada río, porque algunos estuvieron secos durante el periodo. Entre los ríos monitoreados, hay tres ríos importantes situados al S-SE del lago Poopó (Cortadera, Sevaruyo y Marquez) y un río pequeño (Juchusuma) al E del lago (*Figura 2.1*). El río Laca Jahuirá se sitúa al SO del lago Poopó y sirve de salida al salar de Coipasa cuando el nivel de agua en el lago es suficientemente alto. Durante el tiempo de monitoreo, sin embargo, sólo el agua remanente del Laca Jahuirá formó un estanque casi estancado, aparentemente alimentado por aguas subterráneas. La dirección de su flujo, en caso de existir, era hacia el lago.

De los tres ríos muestreados en la parte EN del área del proyecto, los más significativos son los ríos Jacha Uma y Huaylluma, puesto que evidentemente alimentan el acuífero explotados como principal fuente de agua potable para Oruro (ver reporte PPO9616). Estos dos ríos se unen al río Paria que luego de una corta distancia se disipa en el aluvión. Esto sucede aún en la estación húmeda.

#### 3.2 Resultados y discusión

En la Tabla 3.1 se presentan concentraciones de metales y otros elementos, así como los rangos observados en las concentraciones de elementos en los ríos no afectados por la minería y el procesamiento de minerales. Con fines de comparación se muestran también concentraciones de fondo mundiales tentativas (Förstner & Wittman 1983) así como recomendaciones para agua potable de la WHO (WHO 1993) y los máximos permisibles en la clasificación de aguas boliviana (Clases A-D).

En comparación con los niveles de fondo tentativos de elementos trazas en agua dulce, sólo tres de los ríos muestreados -Cayhuasi, Jacha Uma y Cortadera- muestran concentraciones medias de elementos iguales o menores, excepto para antimonio y arsénico, que son mayores. En los ríos restantes, las concentraciones medias de la mayor parte de elementos son marcadamente mayores. Estos valores de fondo elevados fueron causados por fuentes geoquímicas ("litogénicas"), sin ninguna perturbación antropogénica evidente. Consecuentemente, los niveles de fondo "mundiales" no son aplicables para esta área. Esto es particularmente cierto para antimonio y arsénico. En todos los ríos fueron encontradas concentraciones de antimonio más elevadas que el valor de fondo dado, y alcanzaron hasta 300 veces el "valor de fondo mundial" en los ríos Jacha Uma y Cortadera. En los ríos del sur del lago Poopó los niveles de arsénico encontrados fueron 50 veces mayores que el "valor de fondo mundial".

Aunque el origen litogénico del arsénico y del antimonio es evidente, su proveniencia es diferente y compleja. Las elevadas concentraciones de arsénico (30-150 µg/l) en los ríos Sevaruyo y Marquez son causadas por el proceso natural de intemperismo de las rocas volcánicas de la Meseta de Los Frailes. Las rocas volcánicas dacíticas del Mioceno-Plioceno tardío y especialmente las riolíticas tienen generalmente elevados contenidos de arsénico, las dacitas 11-69 ppm As y las riolitas 7-810 ppm As (la concentración de fondo de arsénico en rocas igneas silíceas

es de aproximadamente 1 ppm, Wedephol 1991) Las zonas brechadas y alteradas en las volcánitas contienen hasta 1 405 ppm As (BGR/GEOBOL 1994). En contraste con el arsénico, el antimonio el antimonio de las aguas de los ríos Cayhuasi, Jacha Uma, Huaylluma, Juchusuma y Cortadera tiene su evidente origen en complejos metasedimentarios del Paleozoico que albergan numerosas mineralizaciones y depósitos de antimonio±oro tipo veta y diseminados (el mayor es Antofagasta y el aún no desarrollado. Pederson, ver PPO 9604). Las mineralizaciones están acompañadas por extensas zonas de alteración y se reúnen en un cinturón NNO-SSE, cubriendo parcialmente la orilla oriental del lago Poopó. También se registraron elevadas concentraciones de antimonio en suelos (>0.1 ppm Sb) en una zona casi continua, de Paria a Challapata, coincidiendo con el cinturón metalogenético antes mencionado (ver informe PPO 9608).

La mayor parte de las concentraciones de elementos mostrada en la Tabla 3.1 son menores que el nivel máximo aceptable de las clases A-D de acuerdo al sistema de clasificación de Bolivia. Sin embargo, los niveles medios de antimonio exceden estos niveles en los ríos Jacha Uma y Cortadera. Adicionalmente, los niveles en los ríos Cayhuasi y Haylluma están a punto de exceder el límite. Los niveles medios de arsénico en los ríos Sevaruyo, Marquez y Laca Jahuira también exceden el nivel máximo aceptable de las clases A-D. La directriz de la Organización Mundial para la Salud (WHO), para el arsénico en agua potable es 10 µg/l, y este valor es superado en todos los ríos excepto el Cayhuasi y el Jacha Uma. Otro elemento que excede el valor directriz de la WHO en la mayor parte de los ríos, al menos ocasionalmente, es el antimonio. Mientras que los niveles medios de plomo están por debajo del valor directriz de la WHO, las concentraciones máximas de plomo exceden el valor límite al menos en cuatro ríos. Por tanto, no hay ningún río en el área que pueda ser considerado como fuente segura de agua potable, si se usan estrictamente las recomendaciones de la WHO.

En la Tabla 3.1 se muestra el flujo estimado de metales. La metodología para la estimación del flujo varió para los diferentes ríos, dependiendo del número y la calidad de los datos de medición de flujo. Para los ríos Cayhuasi, Jacha Uma y Haylluma la carga de elementos se calculó como concentración × flujo × periodo, normalizada a 365 días. Finalmente, para el río Juchusuma, el flujo promedio anual fue estimado del modelo de caja descrito en el informe PPO 9606 (p. 26). El flujo promedio anual fue combinado con la concentración media de elementos para el flujo estimado.

El transporte de la mayoría de los elementos fue mayor en el río Marquez, debido al elevado flujo y a las altas concentraciones de elementos, excepto para antimonio, que fue mayor en el río Cortadera. En general, la fiabilidad de las estimaciones de flujo es baja, puesto que se basan en una pequeña cantidad de análisis y mediciones de flujo (7 a 20 por estación de monitoreo).

**Tabla 3.1** Concentraciones promedio, rangos de concentraciones y flujo anual de metales y azufre en cursos de agua en monitoreadas durante 1994/1995. "N" = número de muestras. Análisis hecho por Svensk Grundämnesanalys AB, Sweden.

Punto de Muestreo	Periodo d Monitoreo	N		pH	mS/cm	Fe mg/l	S mg/l	As µg/l	Cd µg/l	Cu µg/l	Mn µg/l	Ni µg/l	Pb µg/l	Sb µg/l	Zn µg/l
CY	27.1-95 - 25.9-95	15	Concentración media	8.2	0.68	0.005	40	2	0.03	0.4	0.7	3	0.1	10	0.4
			Rango de concentración			0.005-6	28-50	1.6-5.6	0.02-0.12	0.2-1.5	0.2-1.96	0.3-8.1	0.05-6.4	7-17	0.3-29
Río Cayhuasi			Flujo kg/año			120	120.0	10	0.2	1.5	10	6	0.7	53	9
			Rango de concentración			0.005-6	28-50	1.6-5.6	0.02-0.12	0.2-1.5	0.2-1.96	0.3-8.1	0.05-6.4	7-17	0.3-29
PR-1	26.9-94 - 25.9-95	7	Concentración media	8.1	0.53	0.1	30	3	0.03	2	5	6	0.3	30	0.6
			Rango de concentración			0.005-1.6	27-35	2.7-15	0.02-0.8	0.6-8	0.9-7.3	0.9-11	0.2-3.1	25-35	0.3-1.4
Río Jaehacha Uña			Flujo kg/año			620	16.0	3	0.1	1.3	29	3	1	17	5
			Rango de concentración			0.07-3.3	23-34	6-27	0.04-1.3	4-9.4	1.9-11.9	1.0-7.4	0.7-1.7	3-18	0.3-2.0
PR-2	26.9-94 - 25.9-95	10	Concentración media	8.3	1.17	0.6	30	20	0.1	10	30	4	3	10	7
			Rango de concentración			0.07-3.3	23-34	6-27	0.04-1.3	4-9.4	1.9-11.9	1.0-7.4	0.7-1.7	3-18	0.3-2.0
Río Huaylluma			Flujo kg/año			9.000	110.0	47	1	57	330	24	24	30	52
			Rango de concentración			0.07-3.3	23-34	6-27	0.04-1.3	4-9.4	1.9-11.9	1.0-7.4	0.7-1.7	3-18	0.3-2.0
JU	13.7-94 - 30.3-95	9	Concentración media	8.0	0.68	2	30	10	0.1	5	300	4	5	3	10
			Rango de concentración			0.01-3.3	8-61	6-98	0.04-1.1	0.7-5.1	0.3-2.25	1.6-2.9	0.07-8.3	0.6-6	1.8-1.58
Río Juchusunta			Flujo kg/año			24.600	128.0	120	1	60	1.67	30	70	10	120
			Rango de concentración			0.01-3.3	8-61	6-98	0.04-1.1	0.7-5.1	0.3-2.25	1.6-2.9	0.07-8.3	0.6-6	1.8-1.58
C	24.11-94 - 26.9-95	20	Concentración media	8.9	1.99	0.005	10	10	0.06	1	1	1	0.06	30	9.
			Rango de concentración			0.005-6	12-24	0.6-3.4	0.02-0.2	0.2-12	0.2-2.38	0.6-8.4	0.05-1.2	0.5-1.8	0.3-3.1
Río Coranderri			Flujo kg/año			16.000	97.0	140	<1	40	720	29	65	290	100
			Rango de concentración			0.005-16	12-24	0.6-3.4	0.02-0.2	0.2-12	0.2-2.38	0.6-8.4	0.05-1.2	0.5-1.8	0.3-3.1

Muestra	Periodo de Muestreo	N	pH	mS/cm	Fe mg/l	S mg/l	As µg/l	Cd µg/l	Cu µg/l	Mn µg/l	Ni µg/l	Pb µg/l	Sb µg/l	Zn µg/l											
SO	18.1-95 - 1.8-95	12	8.4	0.3	0.2	7	90	0.6	1	4	1	0.7		8											
Rio Secaruyo, Quillacas		Rango de concentración			0.02-1.3	6-8	30-130	0.02-0.9	0.6-2.0	0.7-53	0.6-2	0.05-3.5		2-26											
					Flujo kg/año	34 000	370 0	4 200	40	70	1 30	75	110	80	720										
MR	19.12-94 - 31.8-95	16	8.7	0.93	0.3	20	100	0.2	2	10	2	0.8	4	9											
Rio Marquez		Concentración media																							
															Rango de concentración	0.005-9.4	10-24	68-150	0.03-4.5	1.3-24	0.2-877	1.8-12	0.05-43	2.3-5.2	1-290
															Flujo kg/año	220 000	1 100 000	6 500	90	590	17 00	340	840	250	6 100
LJ	14.9-94 - 12.4-95	6	8.2	7.75	0.2	100	90	0.3	7	100	20	0.6	2	6											
Rio Laca Jaluita		Rango de concentración			0.09-1.2	59-116	64-173	0.2-0.4	2.6-19	23-238	9.5-26	0.3-3.7	2.0-6.4	1.6-23											
					Concentración media																				
Valores de referencia					como SO <sub>4</sub>																				
Forsner & Whitman 1983					<0.3		2	0.07	2	<5	0.3	0.2	0.1	0.5											
Background Mundial de agua fresca																									
WHO					0.3		10	3	2 000	100	20	10	5	3 000											
Agua potable MAC																									
Clasificación Boliviana para agua dulce					0.3	100	50	5	50	500	50	50	10	200											
Máximo permisible					0.3	133	50	5	1 000	1 00	500	50	10	5 000											
Concentraciones (MAC)					1.0	133	100	5	1 000	1 00	500	100	10	5 000											

## 4 FUENTES PUNTUALES DE DESCARGAS LIQUIDAS DE LAS MINAS Y PLANTAS DE PROCESAMIENTO DE MINERALES

### 4.1 Centro minero Huanuni

Actualmente existen dos tipos principales de descargas con metales en el centro minero de Huanuni, (a) agua de mina, colas y (b) agua de proceso del ingenio Santa Elena. Adicionalmente existen cantidades menores de DAR descargadas desde varias pequeñas minas inactivas (c).

#### 4.1.1 Agua de mina

La mina Huanuni (Figura 4.1) se desagua por bombeo en etapas desde las partes más profundas. El agua es evacuada desde el nivel principal ("Cero" - Patiño). De la entrada a la mina, el agua fluye una corta distancia por una canaleta abierta hasta el tanque de recolección de donde continúa hacia el ingenio y es utilizada como agua de proceso. El agua de mina no utilizada como agua de proceso desborda del tanque y "desaparece" entre los residuos que se encuentran debajo y alrededor del tanque. El bombeo del agua de mina se realiza periódicamente; en general se alternan tres a cuatro horas de bombeo con dos a tres horas de reposo. El flujo promedio durante el bombeo es 30 l/s (estimado de los registros de bombeo de la mina) y durante los períodos de pausa el flujo es de 3 a 6 l/s. El valor mínimo de 3 l/s, claramente independiente del bombeo, puede ser considerado como el flujo proveniente de las partes de la mina localizadas sobre el nivel Patiño. El flujo normalizado para 24 horas asciende a aproximadamente 19 l/s.

El agua de mina es fuertemente ácida (pH 1.9-4.5) y contiene altas concentraciones de metales. En la Tabla 4.1 se muestra la tasa de transporte de metales seleccionados disueltos (kg/día) que salen de la mina para un flujo promedio estimado de 19 l/s.

Tabla 4.1 Concentraciones de algunos elementos (mg/l) y su flujo estimado (ton/año) en el agua de mina de Huanuni (HSC-1). Todos los análisis se hicieron en el IIMM.

Elementos	N	Valor	
Flujo (l/s)	13	3 - 50	
pH	6	1.9 - 4.47	
Cond. el. (mS/m)	3	1.04 - 3.55	
		(mg/l)	Tasa de transporte en ton/año (19 l/s flujo promedio)
SO <sub>4</sub> (mg/l)	6	2 138 - 2 817	1 400
Zinc (mg/l)	6	13.8 - 132	55
Cadmio (mg/l)	6	2.36 - 5.9	2.4
Cobre (mg/l)	6	4 - 23.6	6.2
Plomo (mg/l)	6	0.02 - 0.2	0.1



Figura 4 | Fuentes puntuales de DAR de minas y descargas líquidas de fundiciones

**Por lo general** hay escasez de agua en el área Huanuni y como se necesitan **grandes cantidades para el procesamiento** de minerales (el consumo total de agua en el ingenio es de  $1180 \text{ m}^3/\text{hora}$  a capacidad plena), se usan todas las fuentes disponibles. Siendo insuficiente el suministro de agua dulce, se provee una parte importante del agua de proceso con agua de mina fuertemente ácida. Debido a su elevada corrosividad y a otras características desfavorables, se evita el uso de la misma cuando es posible. De todas formas, su empleo es inevitable durante las estaciones secas y el agua de mina representa el 5% del total necesario (aprox.  $60\text{-}72 \text{ m}^3/\text{hr}$ , aunque no hay datos exactos de su uso en los registros del ingenio). En el ingenio, el agua de mina se mezcla con el agua proveniente de otras fuentes, es reciclada en parte (la proporción real es del 60%) y finalmente es descargada con las colas en el río.

Una comparación con el flujo total de metales disueltos descargado al río desde el ingenio, indica que el agua de mina contribuye sustancialmente a la contaminación total del agua del río Huanuni. Por ejemplo, el cadmio descargado con el agua de mina, representa aproximadamente el 40% y el cobre aproximadamente el 10% de la carga total de metales disueltos en el agua del río.

#### *4.1.2 Colas y agua de proceso descargadas en el río Huanuni desde el ingenio Santa Elena*

Durante el período del proyecto, el agua de proceso no reciclada y todas las colas producidas en el ingenio Santa Elena (*Figura 4.1*) fueron descargadas indiscriminadamente en el río Huanuni. Ha habido dos flujos constantes de colas: (a) colas de pirita de los circuitos de flotación y, (b) colas arenas de los clasificadores de rastrillo. Según el diseño de la planta, se supone que las colas arenosas son transportadas al depósito Porvenir por medio de un andarivel, mientras que los demás productos son descargados directamente en el río. Durante el período del proyecto y debido a desperfectos mecánicos en el andarivel (y evidentemente por razones administrativas fuera de nuestro conocimiento) todas las colas arenas fueron descargadas en el río. Aparte del continuo flujo de colas, ocurren descargas intermitentes desde varios puntos del proceso. Sus fuentes se hallan en el circuito de recuperación de agua. Normalmente, los espesadores se vacían abriendo la válvula del fondo, descargando los sedimentos en el río. Las descargas irregulares de varios productos de la planta también van a parar invariablemente al río.

Las colas son continuamente retiradas y reprocesadas por las cooperativas, aliviando a la empresa de los problemas causados por bloqueo de las salidas y por congestión del río.

Se estima que en 1994 el flujo de residuos del ingenio Santa Elena fue de 84 000 toneladas de colas arenosas, c. 11 000 toneladas de colas de pirita del circuito de flotación, 23 000 toneladas de colas finas y lamas del circuito de recuperación de agua (118 000 toneladas de colas en total), y un promedio de  $13\,500 \text{ m}^3/\text{dRa}$  de agua fuertemente ácida (pH 4) contaminada con metales tóxicos. En la *Tabla 4.2* se muestra el promedio estimado del flujo de residuos en 1994, aguas abajo del ingenio (tanto de metales disueltos en agua como de metales en sólidos). Debido a las frecuentes interrupciones de la producción en el ingenio, el flujo total de residuos fue algo menor en 1995 y 1996.

#### 4.1.3 Efluentes de las pequeñas minas inactivas

Se encontró DAR en algunos socavones del campo minero de Huanuni. Los drenajes individuales, en algunos casos, se colectan en cañerías o zanjas y se descargan en las salidas de la mina (Tabla 4.3). En otros casos el flujo es bastante difuso e incontrolado ocurriendo en el suelo poroso de la entrada.

Tabla 4.2 Promedio de flujo de metales de contaminación estimado aguas abajo del ingenio Santa Elena, kg por día (1994).

	Metales disueltos <sup>1)</sup>	Sólidos en suspensión <sup>2)</sup>	Colas arenas <sup>3)</sup>	Colas finas (lamas) <sup>3)</sup>	Colas flotación <sup>3)</sup>
peso bruto			230 000	63 000	30 000
Fe	4 420	9 500	6 900	10 500	16 800
Cu	140	180	90	230	170
Zn	790	140	50	270	120
As	20	80	90	70	170
Cd	19	2	1	4	2
Sn <sup>4)</sup>	0.4	1 990	1 150	1 370	290
Pb	10	45	14	33	36

Notas:

- 1) Punto de observación 12 en el río Huanuni (auditoría Huanuni de COMIBOL). Las estimaciones resultan del monitoreo sistemático del 29 de marzo al 25 de julio, 1994, mayormente en la estación seca.
- 2) Punto de Observación 12. El contenido de metales en los sólidos suspendidos se basa en las muestras recolectadas del 23 al 29 de mayo y del 26 al 28 de julio, 1994. Todos los análisis se hicieron en el IIMM. Los sólidos suspendidos derivan principalmente de lamas y colas de flotación descargadas en el río desde el ingenio. Si se calcula la carga total (la suma de todas las medias), las cantidades en los sólidos suspendidos deben restarse de las lamas y colas de flotación.
- 3) Las estimaciones se basan en los registros anuales del ingenio de la EMH combinados con los resultados de los análisis realizados por MeAna Konsult de las muestras tomadas por el equipo del proyecto.
- 4) El flujo estimado de Sn puede ser muy alto ya que la diferencia entre el contenido de Sn en la alimentación al ingenio y en el concentrado final calculada por la EMH fue sólo 764 toneladas en 1994.

El agua del socavón Paco no representa un riesgo ambiental ya que de hecho es potable. No obstante, después de pasar por el montón de desechos debajo del socavón, su pH baja a 5.5 y su conductividad aumenta a 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

**Tabla 4.3** Flujo, pH, conductividad y concentraciones de  $SO_4$  y algunos metales (mg/l) en efluentes de pequeñas minas inactivas en el distrito Huanuni. Análisis hechos en el IIMM.

Socavón	Flujo l/s	pH	Cond. mS/m	$SO_4$	Zn	Cd	Cu	As	Pb
Pepitos (HPSC-1)		3.80	0.42 - 2.13	1 300	430	4.3	0.4	3.3	1.5
Paco	0.5	6.7	245						
s/n (sin nombre)	0.5	3.1	1 500						
Esperanza	2.7	4.0	900						
Rho	0.5	5.1	1 000						
Rho - 2	0.2	3.4	4 000						

#### 4.2 Agua de mina descargada de la mina San José

Aunque la mina San José está actualmente fuera de operación, el agua de mina es continuamente evacuada (Figura 4.1.). Durante el período del proyecto, la descarga del agua de mina de San José ha sido una de las fuentes puntuales de contaminación más importantes.

El sistema de desgaste de la mina es bastante complicado. El agua de los niveles por debajo del A0" (socavón principal también llamado Santa Rita, 3800 m s.n.m.), tanto de la sección San José como de Itos, es recolectada en el nivel -460. Desde allí es bombeada a través del cuadro Central hacia un tanque en el nivel -340. Desde ese tanque el agua fluye por gravedad hacia un sumidero en el cuadro Santa Rita desde donde es bombeada al nivel A0". De allí el agua es evacuada fuera de la mina.

Según varios registros, el flujo promedio de la mina, cuando estaba operando era de aproximadamente 18 l/s durante 17 horas por día, esto es 1100 m<sup>3</sup>/dRa. Esto correspondería a la entrada de agua subterránea en la mina a un ritmo de 13 l/s. Durante 1995, y según el operador de la mina, el flujo promedio ascendía a 28.2 l/s en un promedio de 37 minutos por hora de bombeo diario, o sea aproximadamente 770 m<sup>3</sup> por día. De acuerdo a las mediciones del equipo del PPO, el flujo varía sustancialmente durante los períodos de bombeo con un máximo de 34 l/s. Sin embargo, el promedio medido es casi el mismo: 28.5 l/s; no hay flujo cuando no se bombea. Las cifras presentes corresponden a la entrada de agua subterránea en la mina a un ritmo promedio de 9 l/s, lo que ha sido confirmado por las mediciones de flujo dentro de la misma. La diferencia entre los dos valores del ritmo de entrada de agua subterránea (el actual y aquel durante el funcionamiento a plena capacidad) es demasiado grande como para ser explicada por la adición de agua de perforación. No obstante, el equipo del PPO no dispone de ninguna explicación.

Desde el socavón Santa Rita, el agua evacuada fluye una corta distancia por un canal abierto hasta alcanzar la cima del desmonte San José. De allí fluye, de manera totalmente incontrolada por la pendiente del desmonte, a un canal abierto, al pie del mismo. Durante su paso por el desmonte, aproximadamente el 30% del agua se pierde por infiltración. Cuando atraviesa la ciudad, el canal de descarga está revestido de concreto y cubierto, aunque no completamente cerrado y muy deteriorado, por lo que el agua de mina se pierde en parte y se mezcla con el agua de alcantarillado y el agua de escurrimiento. Al este del estadio de Oruro, cuando el canal emerge de la parte cubierta, transporta aproximadamente de 20 - 39 l/s durante el periodo de bombeo y entre 3 y 22 l/s durante las pausas. Se puede deducir que un 25% adicional del agua de mina se pierde en el agua subterránea durante su paso por la sección cubierta del canal. En total, casi la

agua de mina evacuada de San José se pierde por percolación en el agua subterránea dentro de los límites de la ciudad.

Fuera de los límites de la ciudad el agua de mina se mezcla con agua de drenaje hacia el sudeste y finalmente fluye en un río fuertemente regulado, el Tagarete, que drena hacia la parte este del lago Uru Uru, 17 km aguas abajo. En la sección Tagarete, ocurren grandes pérdidas adicionales que van a las aguas subterráneas, pero estas son imposibles de cuantificar debido a varios aportes, no controlados, de aguas servidas mezcladas con agua de escurrimiento. En agosto de 1996 el agua de mina transportada por el canal Tagarete se mezclaba con el agua subterránea derivada de un acuífero libre en el parque industrial, al sur del aeropuerto de Oruro. En ese tramo, se estima que el flujo del canal es de 15 m<sup>3</sup>/min

El agua de mina descargada es fuertemente ácida 1.2 - 2.5 de pH. Cuando la mina estaba activa, el operador intentó sin éxito aumentar el pH del agua agregando periódicamente cal en el pozo colector, en la estación de bombeo de la mina. El principal resultado de este tratamiento fue la gran precipitación de yeso en las paredes del canal pero sólo un incremento leve y temporal del pH. Actualmente el agua se descarga sin ningún tratamiento. El pH del agua que fluye desde el final del canal cubierto (cerca del estadio) es de 2.0 - 2.8. 17 km aguas abajo, justo antes de la entrada al lago Uru Uru, el pH es todavía tan bajo como 3.4 - 4.4 a pesar de la mezcla con varios efluentes y a la disolución.

En la *Tabla 4.4*. se dan las concentraciones de los elementos seleccionados en el agua de mina de San José.

En la *Tabla 4.4* se ven análisis más antiguos del agua descargada (1991 y 1992 del tiempo en que la mina operaba) en comparación con dos análisis recientes (marzo y octubre 1994) y tres análisis de agua muestreada dentro de la mina (julio 1994). Todos los análisis fueron hechos en el IIMM. Es evidente que el sistema de agua subterráneas activado por el bombeo es bastante errático. Algunas de las diferencias entre las series de análisis puede explicarse por la influencia del caleado anterior, sin embargo, una explicación a detalle requerirá de un estudio especial.

Se ha calculado el transporte de metales disueltos en el agua evacuada de la mina para un flujo de 800 m<sup>3</sup> de agua por día (*Tabla 4.5*). La comparación con la cantidad de metales transportados desde las minas Huanuni (*Tabla 4.1*) y Bolívar (*Tabla 4.6*) indican la relativa severidad de las descargas de San José en lo que se refiere a Fe, Cu, Pb y Sb.

Tabla 4.4 pH y concentraciones de algunos elementos (mg/l) en el agua de mina de San José. Todos los análisis hechos en el IIMM.

Especies	Agua de mina en el punto de descarga			Agua de mina dentro de la mina	
	Media <sup>1</sup> (N=4)	Media <sup>2</sup> (N=2)	Rango	Media <sup>1</sup> (N=3)	Rango
pH			1.2 - 2.5		1.3 - 2.7
Sol. Dis.	78 000		71 000 - 86 000	87 000	76 000 - 98 000
SO <sub>4</sub>	14 000	10 000	5 400 - 28 000	7 100	1 500 - 15 000
Ca	160	160	60 - 260	1 200	620 - 1 600
Mg	380		220 - 540	630	350 - 1 100
Ag	1.3		0.8 - 2.0	0.7	0.4 - 1.0
As	(38)		(12 - 62)		
Cd	4.9	3.1	1.8 - 8.0	2.5	1.7 - 3.9
Cr	3.8		0.7 - 6.9		
Cu	44	21	9 - 63	18	3 - 36
Fe	5 000	2 800	1 500 - 7 000	2 200	470 - 3 900
Mn	21		12 - 31	14	11 - 16
Ni	2.6	1.3	0.9 - 4.0	1.2	0.7 - 2.0
Pb	30	27	15 - 53	31	11 - 46
Sb	12	4.2	3.0 - 15	5.2	2.7 - 6.5
Zn	120	150	31 - 240	100	54 - 190

Explicaciones: (1) muestras tomadas en 1991 y 1992;  
 (2) muestras tomadas en marzo y octubre, 1994;  
 (3) muestras tomadas en el nivel 420 - Itos, y niveles 360 y 460 - San José, en Julio, 1994.  
 Los valores entre paréntesis son inciertos.

Tabla 4.5 Carga de algunos metales (kg/día) disueltos en el agua de mina de San José (basado en 800 m<sup>3</sup> por día ; análisis hechos por el IIMM).

Ag	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni	Pb	Sb	Zn
1	(30)	3	3	29	3 400	1.8	23	8	110

### 4.3 Centro minero Bolívar

La mina Bolívar actual ha estado en funcionamiento desde 1995. Existe un flujo regular de bombeo de agua de mina de aproximadamente 40 l/s. El agua de mina es usada intermitentemente en el proceso de beneficio en el lugar. El uso del agua de mina en el ingenio varía de 0 a 100% dependiendo de la proporción de reciclado y de las variaciones en la calidad del agua de proceso (en particular del pH). Si bien la mina Bolívar y su ingenio están diseñados como una operación sin descargas, el agua de mina no utilizada en el ingenio es descargada sin tratamiento en el lecho del río (aguas arriba de esta descarga el río está seco la mayor parte del año). Se ha estimado que la descarga promedio asciende a aproximadamente 10 l/s (en base a 24 horas/día) y junto con el agua de alcantarillado del campamento minero de Bolívar, (también descargada en el río sin ningún tratamiento) es suficiente para mantener un flujo permanente. En la *Tabla 4.6* se observa como esto afecta la calidad del agua en la sub-cuenca Bolívar.

El efluente de la operación Bolívar se caracteriza especialmente por las elevadas cargas de zinc y cadmio que alcanzan 500 y 4.5 toneladas por año respectivamente. La mayor parte de estos metales disueltos van al dique de colas. Sin embargo, la comparación con el transporte de metales en el punto de monitoreo DM3 (Martha), unos 5 km aguas abajo, en el río Antequera, indica que el agua de mina Bolívar contribuye con un 10% de los metales y con un 30% de SO<sub>4</sub> a la carga total.

*Tabla 4.6 Cargas de metales en el agua evacuada de la mina Bolívar. Estación de monitoreo BSC-1. Análisis por Svensk Grundämnesanalys AB, Suecia. N= cantidad de muestras*

	N	Concentración (mg/l)	Flujo total de la mina (kg/día)	Descarga en el río (kg/día)
pH	3	3.2 - 3.9		
Cond. (mS/cm)	3	2.14 - 2.71		
SO <sub>4</sub>	3	820 - 1 300	4 100	1 000
Zn	7	5.3 - 1 300	1 400	360
Cd	7	1.6 - 6.6	12	3
Cu	7	0.1 - 0.9	1	0.2
As	7	2 - 17	28	7
Pb	7	0.2 - 0.4	0.9	0.2

#### 4.4 Distrito Japo

La mina Japo fue cerrada en 1989 pero "cooperativas" emprenden trabajos a pequeña escala. La mina se bombea intermitentemente. La descarga ha sido monitoreada en pocas ocasiones durante el período del proyecto. La acidez del agua de mina resultó ser muy elevada con un pH inferior a 3 y una conductividad eléctrica de 2.18 mS/m. La mina Japo está ubicada arriba en el área de captación, cerca a la divisoria de aguas. Por ello el flujo de agua es comparativamente escaso y de corta duración.

#### 4.5 Distrito Poopó

La descarga del drenaje de mina de la mina "San Francisco" en Poopó es a veces ácida, a veces alcalina demostrando que la oxidación ocurre sólo en forma temporal (Tabla 4.7). Obviamente existe un potencial de neutralización en la roca, pero no suficiente para cubrir las necesidades cuando la roca está totalmente oxidada, lo que sucede de vez en cuando. La variación resultante del pH entre 3 y 8 coincide con las características materiales mostradas en las pruebas cinéticas (celdas húmedas. Ver informe PPO 9609). No obstante los cambios de oxidación en el tiempo, de los depósitos de colas recientes, probablemente no ocurrirán en la mina. La tasa de recambio del agua de mina es bastante pequeña y la mina ha existido por tanto tiempo que por ahora prevalecerán condiciones de oxidación de estado estacionario.

Comparado con el drenaje de las minas Huanuni y Bolívar, este DAR contiene muchas menos sales y metales en disolución. Como el flujo promedio también es bastante bajo, el ritmo de transporte anual de metales es moderado.

Tabla 4.7 Descargas de agua contaminada desde las bocaminas de Poopó, estación PSC-1 (San Francisco). Análisis hechos en el IIMM.

	No. muestras	Concentración (mg/l)	Ritmo de transporte (ton/año)
Flujo	11		
pH	11	3.10 - 8.10	
Cond. (mS/m)	11	2.46 - 14.0	
SO <sub>4</sub> (mg/l)	3	456 - 610	171
Zinc (mg/l)	7	1.4 - 11.4	1.4
Cadmio (mg/l)	7	0,01 - 0.24	0.07
Cobre (mg/l)	7	0,01 - 0.21	0.04
Arsénico (mg/l)	0		
Plomo (mg/l)	7	0.01 - 77	6.7

#### 4.6 Fundiciones de Vinto

El complejo metalúrgico de Vinto (Empresa Metalúrgica Vinto) consiste de fundiciones de estaño y antimonio que tratan anualmente unas 44 000 t de concentrado y producen unas 20 000 toneladas de estaño y 6 000 de trióxido de antimonio. El proceso de fundición en la planta es

complejo incluyendo unas 40 etapas diferentes, con muchas transferencias de materiales entre etapas. Respecto a las descargas líquidas, se pueden distinguir cinco divisiones principales del complejo: (1) la fundición de antimonio, (2) la fundición de estaño "Alta Ley", (3) la fundición de estaño - "Baja Ley", (4) el tratamiento de agua, y (4) las instalaciones administrativas y sanitarias.

El agua utilizada en el complejo proviene de dos pozos, del río Sepulturas y del sistema de distribución pública de agua de Oruro. Aerocomp (1996) estima que el consumo promedio de agua de proceso (industrial), asciende a unos 40 m<sup>3</sup>/h (11 l/s). Tal como indica el monitoreo del PPO (ver *Tabla 4.8*), la cantidad de agua consumida es mucho mayor.

Toda el agua descargada, sea industrial, sanitaria y de escurrimiento termina en el sistema de alcantarillado. Este sistema está muy deteriorado lo que resulta en grandes pérdidas por percolación en el agua subterránea. El agua de proceso de la fundición de antimonio es descargada en un dique de oxidación separado, desde donde se evapora o percola en el agua subterránea. Otras descargas líquidas se colectan en cuatro estanques de sedimentación ubicados en la periferie NO del área industrial. El efluente de "Alta Ley" junto con algunos residuos del tratamiento de aguas es canalizado hacia el primer y segundo estanque. Las descargas líquidas de la planta "Baja Ley" que también incluye una línea de producción de sulfato de cobre, son canalizadas hacia el tercer estanque donde se mezclan con el desborde del primero. Fue imposible monitorear o muestrear este último flujo ya que se encontraba entubado y su salida sumergida en el estanque. Debajo del cuarto estanque, el desborde del efluente se mezcla con el agua sanitaria.

El efluente mezclado sale de la instalación por una zanja descubierta hacia las lagunas de Succamani situadas a 1.2 km al oeste de la planta. allí nuevamente ocurren las pérdidas "en ruta" el agua subterránea, pero también por uso humano para lavado de ropa, irrigación, bebida para ovinos y bovinos y otros usos. también hay, sin embargo, adiciones de agua de escurrimiento y sanitaria. El desborde de la última laguna Succamani sale por un canal abierto hacia la parte sur de la planicie y después de pasar por debajo de la ruta y las vías del tren se infiltra en el agua subterránea y desaparece de la superficie.

El PPO realizó un monitoreo de 24 horas en seis estaciones, con 5 lecturas cada 4 horas de intervalo. Sin embargo, como se deduce de la descripción anterior, no se pudo establecer un balance aceptable de agua. En cada lectura se tomó una muestra de agua. Las muestras individuales se combinaron dando muestras compuestas representativas para las 24 horas. Los resultados del monitoreo y de los análisis químicos se muestran en la *Tabla 4.8*

Como se puede observar en los registros de pH y de conductividad eléctrica, la calidad del agua de descarga varió mucho durante las 24 horas de monitoreo y no hay un claro patrón sistemático en las observaciones o resultados de los análisis. Obviamente existen muchos puntos de descarga (y fuentes) desconocidos que no han sido hallados ni muestreados. Evidentemente, los estanques de sedimentación retienen en forma efectiva el sulfato, plomo y estaño. No obstante, como indica la diferencia en las concentraciones de Fe, Pb, Sn y Zn entre la salida de los estanques y la entrada a la laguna Succamani, debe haber un ingreso adicional de efluente en el canal entre ambos puntos (no se lo pudo encontrar). Comparando la calidad del agua en la entrada (EV 4) y a la salida (EV 5) de las lagunas Succamani, está claro que en el tiempo de residencia, el pH disminuye levemente y las concentraciones de agua aumentan fuertemente a la salida. Según los datos de Aerocomp (1996), la cantidad de materia orgánica se reduce mucho en la laguna (como indica la disminución de la demanda bioquímica de oxígeno de 50 mg/ a 9 mg/l) que junto

salida. Según los datos de Aerocomp (1996), la cantidad de materia orgánica **se reduce mucho en la laguna** (como indica la disminución de la demanda bioquímica de oxígeno de **50 mg/ a 9 mg/l**) que junto con las reacciones en el depósito dentro del estanque, puede causar la **disminución del pH** y aumentar la disolución de metales. De todas formas, es muy confuso el **marcado incremento del estaño y antimonio en disolución** hallado en el canal aguas abajo de la salida (EV 6) . Es importante notar la elevada concentración de arsénico y antimonio en el agua sanitaria. Como el PPO no realizó ninguna investigación dentro la planta de Vinto, no se han establecido las rutas de migración del As y Sb en el efluente sanitario.

Las descargas líquidas de Vinto, en comparación con otras fuentes puntuales de contaminación, son bastante modestas. No obstante, hay suficiente material como para contaminar el acuífero subyacente (ver informe PPO 9616). Aún peor, los habitantes del pueblo de Vinto usan el agua descargada de las instalaciones de la fundición para irrigar plantas, lavar ropa, dar de beber a los animales domésticos, etc., exponiéndose ellos mismos claramente a un considerable riesgo de salud.

Tabla 4.8 Monitoreo de 24-horas de las descargas líquidas de la fundición Vinto (13 de Diciembre, 1995): concentraciones de sulfato y metales en el efluente y estimaciones del transporte de metales. Análisis en Svensk Grundamnesanalys AB.

Locación	Estación	Monitoreo 24-horas				Muestras compuestas									
		Flujo l/s	pH	El. Cond mS/cm	SO <sub>4</sub> mg/l	Fe mg/l	As µg/l	Cd µg/l	Cu µg/l	Pb µg/l	Sb µg/l	Si µg/l	Zn µg/l		
Descarga superior de Vinto (entrada al estanque 1)	EV 1	6.6-15.6	2.4-6.6	0.5-9.7	1 400	17	270	1.4	11 000	2 000	13	310	840		
Salida principal de los estanques	EV3	15.1-21.5	3.8-5.4	1.1-1.4	290	<0.01	21	56	14 000	29	110	2	400		
Descarga de agua sanitaria	EV 2	4.2-12.2	9.4-11.2	0.3-1.2	87	0.03	1 500	0.6	29	1.4	490	12	7		
Entrada a la laguna Succamari	EV 4	3.3-12.8	3.4-4.6	1.1-1.4	240	6.3	32	49	12 000	153	130	380	700		
Salida de la laguna Succamari	EV 5	4.4-10.5	3.7-4.3	1.1-1.4	310	16.7	420	29	17 000	620	230	2 100	1 600		
Canal 200 m aguas abajo de la laguna Succamari	EV 6	3.0-4.6	3.7-4.6	1.2-1.5	320	18.6	440	45	17 000	700	740	5 000	1 700		
Mejor estimación posible de transporte de metales disueltos en las descargas de Vinto					kg/día 1 200	14	1.0	0.03	7.5	1.7	0.3	0.2	0.4		

## 5 CONCENTRACIONES Y CARGA DE METALES EN LOS RIOS QUE DRENAN LOS DISTRITOS MINEROS

### 5.1 Flujo, pH y concentración de contaminantes en los ríos

El clima de la parte sur del Altiplano está definido como árido a semiárido, donde predominan los regímenes de estaciones seca y húmeda (ver informe PPO 9606). La estación seca, de junio a agosto, tiene un bajo porcentaje de la precipitación anual. La estación de lluvias dura de diciembre a abril y la precipitación cae como lluvia torrencial. Las condiciones de la estación seca, con sólo algunos episodios de lluvias, por lo general favorecen la oxidación de los sulfuros presentes en los desmontes. La primera lluvia fuerte lixivia grandes cantidades de productos de intemperismo movilizados almacenados sobre la superficie del suelo. Luego de cierto periodo de tiempo, la mayoría de los contaminantes fácilmente móviles han sido ya lixiviados y los efectos de la dilución son obvios. Es evidente que estas circunstancias requieren de un estudio detallado con trabajo de campo frecuente, que incluya muestreo simultáneo y mediciones de flujo. Un muestreo poco frecuente puede llevar a subestimar el transporte de contaminantes. En este proyecto, con largos trayectos a las estaciones, por rutas muy precarias, no fue posible la toma de muestras en cada evento pluvial importante. Además, las dificultades logísticas y las restricciones presupuestarias redujeron el programa de campo a un muestreo/medición mensual o aún menos.

#### 5.1.1 Ritmo del flujo hídrico

El programa de monitoreo incluye mediciones del ritmo de flujo. Debido a serios problemas para mantener las secciones de muestreo en las corrientes bien y correctamente definidas, no fue posible hacer registros continuos. Obviamente, existen variaciones de flujo que ocurren en forma subterránea o en cursos de agua poco profundos y muy anchos, difíciles de coleccionar para las mediciones. Por ello, los errores de medida son significativos, lo que se verifica al comparar los datos medidos con los calculados. De los cálculos de escurrimiento reportados en el informe PPO-9606, el escurrimiento calculado es generalmente 50 a 100% mayor que el caudal medido en la estación correspondiente.

Debido a la falta de datos sobre el ritmo real del flujo durante el período del proyecto, se decidió usar el caudal normal calculado para estimar la carga de contaminantes. Esto se justifica ya que las variaciones de las concentraciones resultan relativamente pequeñas en comparación con la variación del caudal. Probablemente estas estimaciones de carga representan las condiciones normales mejor que si se usaran solamente los datos de las mediciones.

#### 5.1.2 Comportamiento del pH en los ríos

El drenaje ácido de roca se detecta fácilmente por su pH que es también el factor más importante para la disolución química de los contaminantes en el agua. Las Figuras 5.1 - 5.2 muestran, para cada uno de los tres ríos principales, el pH medio de las estaciones en todo el período del proyecto.

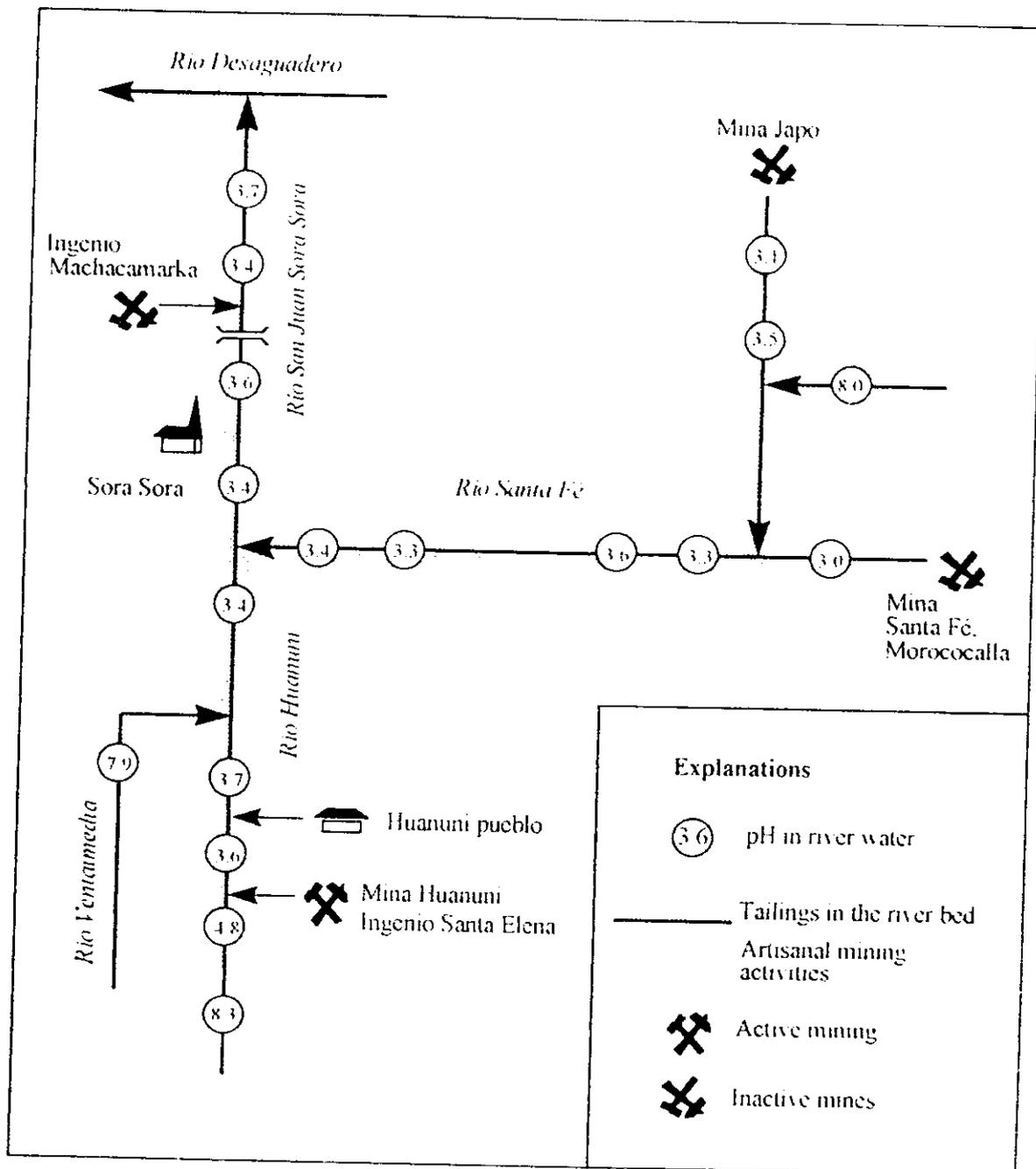


Figura 5.1 Evolución del pH (promedios anuales) a lo largo de los ríos Huanuni, Santa Fe y San Juan de Sora Sora

Las Figuras 5.1-5.2 muestran claramente que los ríos Huanuni, Santa Fe y Antequera están expuestos a importantes descargas de drenaje ácido de roca, que ya empieza en Japo, Morococala, Huanuni y Bolívar. El valor de pH en los tributarios no afectados está generalmente sobre 8, mostrando que las aguas disolvieron agentes alcalinos del suelo. A pesar del potencial de neutralización del agua alcalina, el pH alcanza rápidamente un nivel ligeramente superior a 3, que se mantiene estacionario hasta que la corriente alcanza la planicie. Antes de llegar al lago Poopó en Pazña (PZ3), el río Antequera se vuelve menos ácido, con un pH por encima de 5. Esta disminución de la acidez se debe a la mezcla con agua rica en carbonato, descargada al río por los manantiales situados en su lecho, aguas arriba del punto de monitoreo PZ3.

El sorprendente resultado del monitoreo de pH es que éste es marcadamente bajo en los tres ríos principales, aún lejos aguas abajo. Generalmente es de esperar que el drenaje ácido generado aguas arriba se diluya sucesivamente por las cantidades importantes de agua limpia alcalina que se van incorporando al río aguas abajo. La falta del esperado incremento en el valor del pH aguas abajo, indica la constante incorporación de DAR a lo largo del río. Este incremento de DAR es facilitado por las grandes cantidades de desmontes finos (colas arenas o finas) depositadas en todos los ríos.

A pesar de las actividades de concentración en Poopó, tanto recientes como antiguas, el río Poopó es bastante alcalino con un pH de casi 9. Estas aguas están claramente afectadas por las fuentes termales con elevadas concentraciones de sales situadas justo aguas arriba de Poopó.

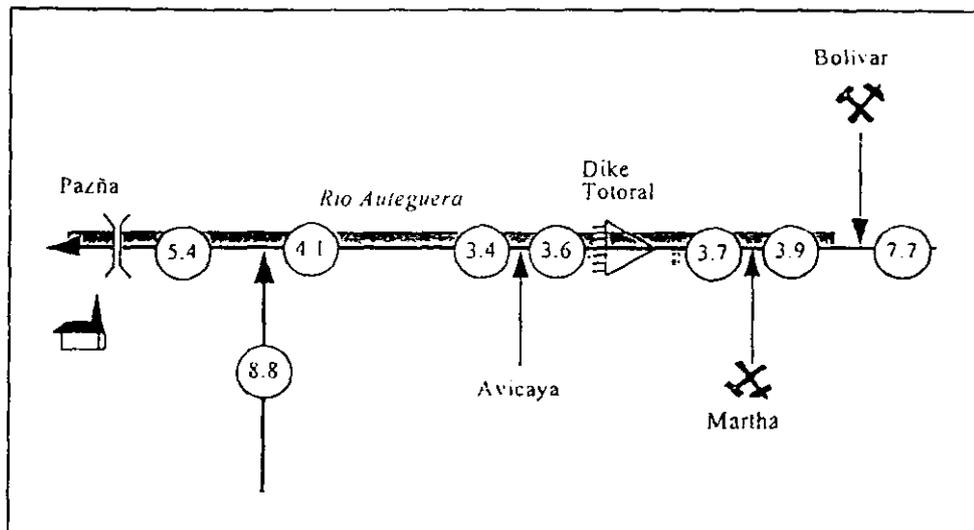


Figura 5.2 Comportamiento del pH a lo largo del río Antequera. (explicaciones de la Figura 5.1).

Aún siendo espacialmente constante, el pH muestra una significativa dependencia respecto del tiempo, relacionada claramente con el ritmo del flujo (ver Figura 5.3).

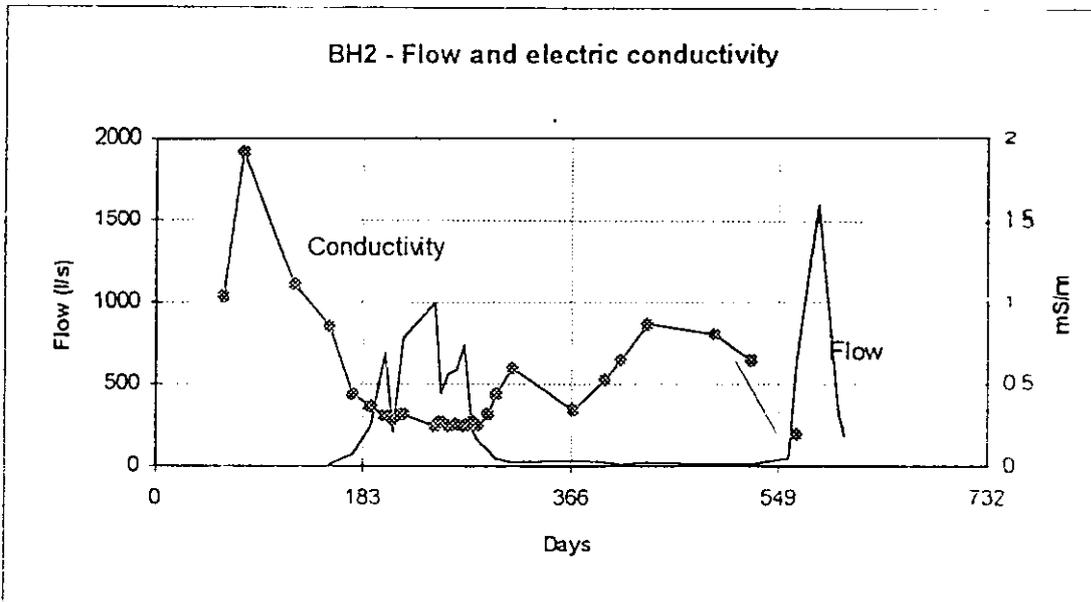
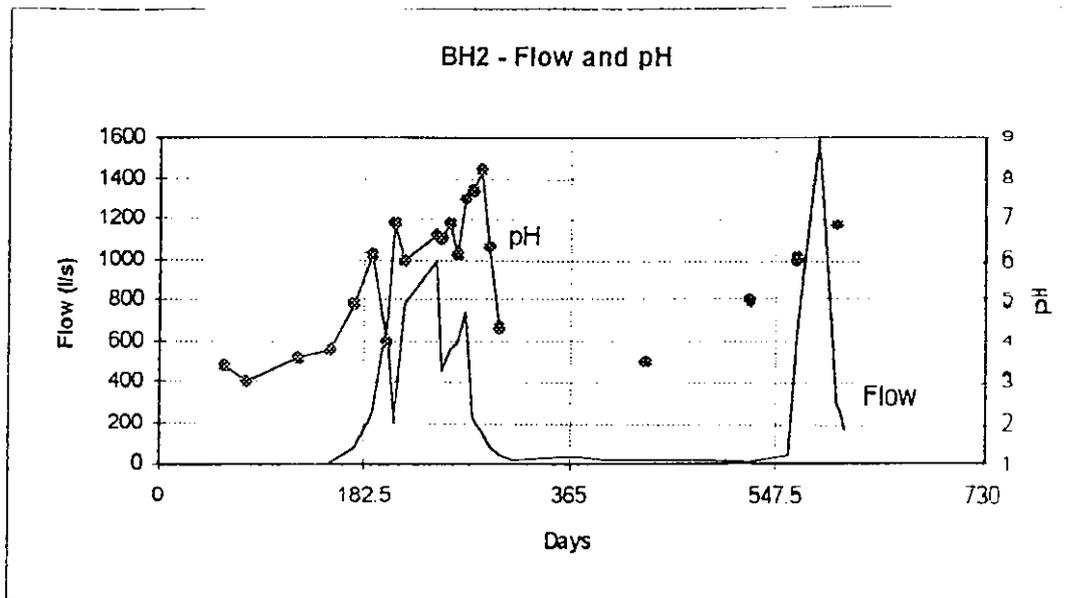


Figura 5.3 Registros de flujo, pH y conductividad eléctrica de la estación de monitoreo BH2.

La Figura 5.3 muestra que el pH aumenta cuando comienza la estación de lluvias, con el incremento del caudal, y disminuye cuando se reduce el mismo al comenzar la estación seca. Los parámetros son sincrónicos durante las estaciones 1994/95. La menor sincronización durante las estaciones 1995/96 indica sucesos de flujo no registrados. El diagrama de conductividad de la Figura 5.3 muestra que los periodos de bajo caudal se relacionan con concentraciones de sal relativamente elevadas, seguidos por periodos de dilución con flujos más altos.

### 5.1.3 Concentración de contaminantes

En la Tabla 5.2 se muestra un panorama de las concentraciones promedio y los rangos de concentraciones registrados en las estaciones de monitoreo

La concentración de sulfato es un buen parámetro de la descarga de DAR en los ríos. La *Figura 5.4* muestra el comportamiento de las concentraciones medias de sulfato en los ríos contaminados. En la parte superior de las áreas de captación, como en la pequeña cuenca de la mina Japo, la concentración de sulfatos no parece variar mucho durante el año. El flujo de fondo, disponible para diluir el DAR, es pequeño en comparación con las vastas áreas de residuos en oxidación que originan constantemente elevadas concentraciones de sulfato, de alrededor de 3 000 mg/l con un pH entre 2.5 y 4.0, por lo general alrededor de 3.0.

La situación difiere entre los ríos Santa Fe y Huanuni. En el sistema Santa Fe, las descargas de DAR de las fuentes primarias son elevadas en relación al flujo, dando altas concentraciones de sulfato que disminuyen aguas abajo pese a que otras fuentes incrementan la carga. En el sistema Huanuni, la descarga de las fuentes de DAR de la parte superior, se diluye inmediatamente por el abundante caudal aquí, a pesar de la creciente dilución, las concentraciones se incrementan aguas abajo. La razón es la descarga continua de DAR de fuentes secundarias como colas en oxidación que sedimentaron en el lecho del río.

Las concentraciones de sulfato en el río Poopó son de un orden de magnitud menor que en los otros tres ríos estudiados. Además, la concentración parece estar regida más por los afluentes naturales de las aguas termales que por el DAR.

La situación del río Antequera es una combinación de los ríos Santa Fe y Huanuni. Se descarga sulfato de las operaciones mineras de Bolívar, con dilución relativamente baja por aguas de más arriba. No obstante, debido a sucesivas adiciones de DAR en Totoral y Avicaya, las concentraciones se mantienen a niveles altos en todo el trayecto hasta Pazña, donde ocurre eventualmente una ligera disminución de la concentración, causada principalmente por dilución.

Debido a las características de transporte diferentes e individuales, el comportamiento de las concentraciones de metales no es necesariamente proporcional al del sulfato, que es una sustancia relativamente estable. Los metales tienden a ser adsorbidos sobre superficies libres o a precipitar como sales, lo que disminuye el transporte. En la *Figura 5.5*, se muestran, en diagramas radiales, las concentraciones medias de los metales más interesantes durante el período del proyecto.

Las variaciones en las concentraciones de metales son tan grandes que hacen necesario el uso de escalas logarítmicas para comparar, en diagramas, varios metales y estaciones de monitoreo. Por ejemplo, las concentraciones de fondo son del orden de 1 a 100 µg/l, mientras que las concentraciones de las descargas más o menos primarias de DAR, de 1 a 1 000 mg/l.

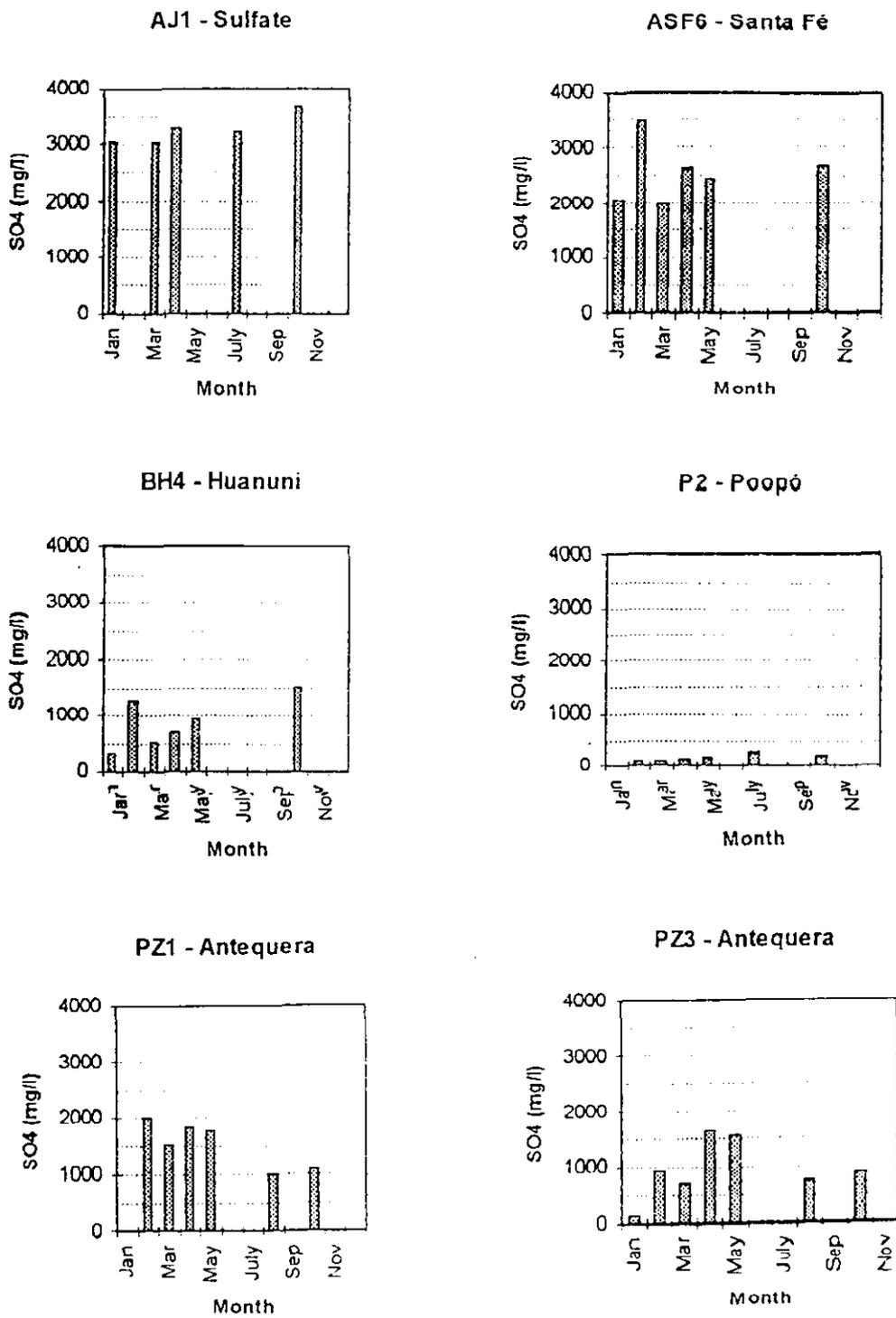


Figura 5.4 Comportamiento de las concentraciones de sulfato (promedios mensuales) en los ríos Japo, Santa Fé, Huanuni, Poopó y Antequera durante un año.

De los diagramas del sistema del río Santa Fe, es evidente que las concentraciones de cobre, plomo y hierro en las descargas de Japo y Morococala son casi iguales. La concentración de zinc es algo mayor en Morococala que en Japo, pero por otro lado, la concentración de cadmio es algo menor. Aguas abajo de la confluencia, las concentraciones son bastante constantes excepto para el plomo que disminuye un poco más que los otros metales.

En el río Huanuni, las concentraciones de fondo de metales son levemente superiores que en el río Santa Fe. No obstante, aguas abajo de las descargas primarias de las actividades mineras, las concentraciones son menores que las halladas aguas abajo de las labores correspondientes en Japo, Morococala y Santa Fe. Esto se debe a la mayor dilución en el río Huanuni. Como se muestra en los diagramas de la *Figura 5.5*, si se compara el sistema Huanuni con el sistema Santa Fe, zinc y plomo están presentes en mayores proporciones que cadmio y cobre, pero hierro en menor proporción.

En el río Huanuni la distribución de las concentraciones de metales se mantiene constante hasta la confluencia con el río Santa Fe. Aguas abajo de este punto, se reduce la concentración de hierro en más de un orden de magnitud, mientras las concentraciones de otros metales importantes se mantienen en un nivel constante.

Considerando los cinco metales seleccionados, en la estación P1 prevalecen los valores de concentraciones de fondo, *Figura 5.5*. En la estación P2, las concentraciones son de 3 a 10 veces mayores, excepto para el hierro, que se mantiene constante. Comparadas con los otros sistemas fluviales de las áreas mineras, las concentraciones de metales a la salida del río Poopó son de 1 a 3 órdenes de magnitud menores, con cadmio como el metal proporcionalmente dominante.

Las concentraciones de metales aguas abajo de las descargas primarias de la mina Bolívar difieren de las de Japo y Morococala por tener concentraciones mayores de plomo y zinc pero menores de cobre e hierro, *Figura 5.5*. Aguas abajo de la mina Bolívar, las concentraciones de metales cambian, pero aguas arriba de la estación PZ1 en Pazña, sólo marginalmente. En Pazña, donde el pH aumenta significativamente, se reducen las concentraciones de metales, especialmente la de hierro. Por ejemplo, la concentración de hierro es mucho menor en la salida del río Antequera que en la salida del río Sora Sora.. También las concentraciones de cobre y plomo son menores, mientras que las de cadmio y zinc son casi las mismas o ligeramente superiores.

Las fluctuaciones estacionales de las concentraciones de metales son sorpresivamente pequeñas, indicando que la acumulación de sales y metales móviles en los periodos secos no es relativamente de importancia. Sólo pequeños picos de concentración aparecieron en algunas estaciones situadas en la parte superior del área de escurrimiento, al comienzo de la época de lluvias.

Aguas abajo en el sistema fluvial, las variaciones estacionales de las concentraciones son más evidentes; no obstante no hay patrones establecidos. En algunos casos los picos de concentraciones se encuentran durante los periodos secos, y en otros, antes o después de los periodos de caudal abundante. Esto último parece ser lo más común. Aquí, los patrones de concentración parecen estar regidos más por la oxidación/lixivación de sedimentos contaminados, mas que por la lixivación de las fuentes primarias de DAR.

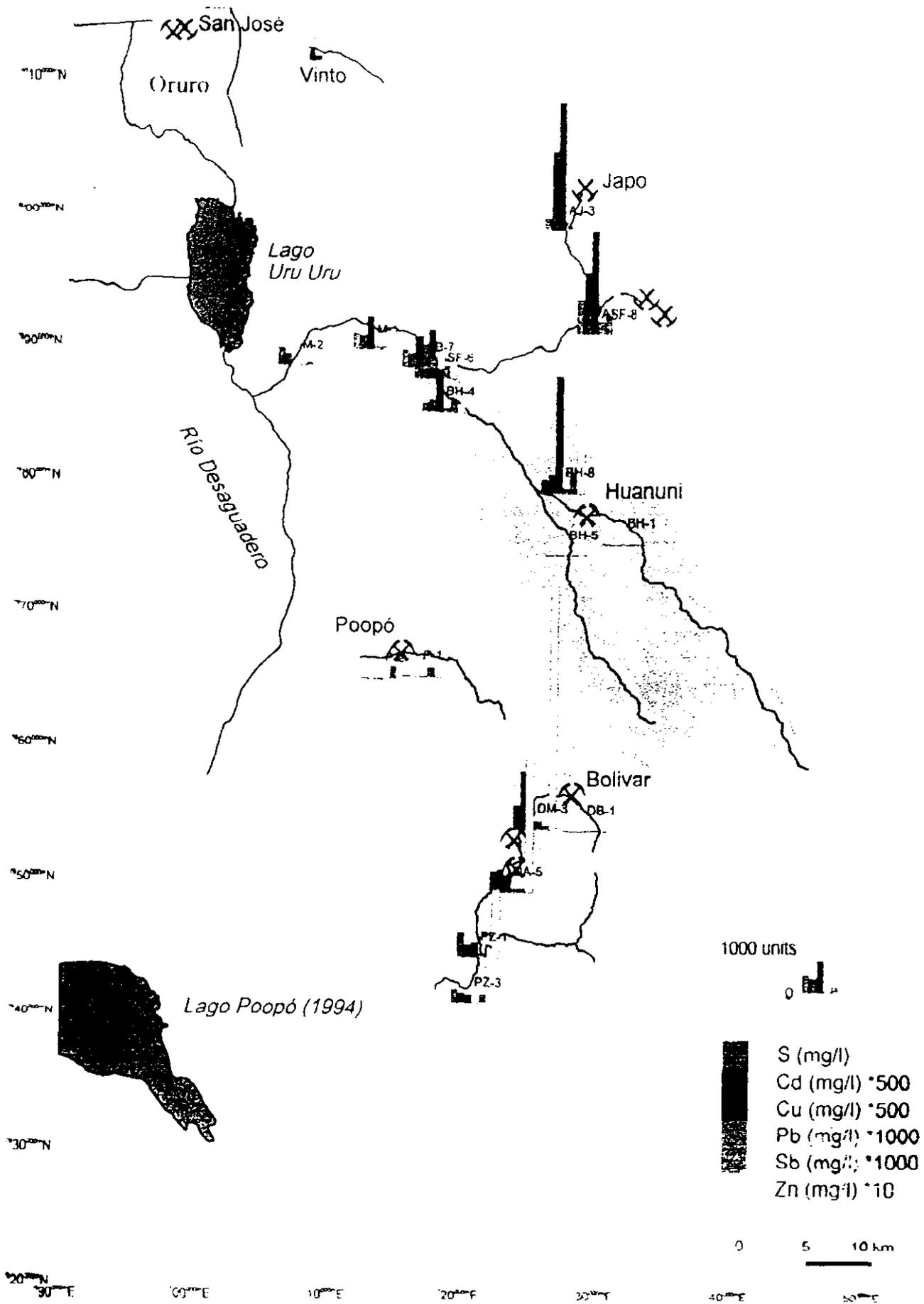


Figura 5.5 Concentraciones promedio de azufre y metales en agua de los ríos que drenan distritos mineros

## 5.2 Flujo de DAR

El ritmo del transporte másico de contaminantes en cursos de agua está regido por el caudal y por las concentraciones de contaminantes. Por ello es esencial medir simultáneamente ambos parámetros. Debido simplemente a la dilución, las concentraciones cambian con el caudal. No obstante, cada cuenca de drenaje tiene un patrón de escurrimiento/concentración propio, dependiendo del tamaño, relieve y posición/carácter del residuo minero.

Debido a la falta de información sobre la representatividad de las muestras de agua y las mediciones de flujo, se ha decidido llevar a cabo cálculos hidrológicos del flujo normal. Estos cálculos se basaron en las estadísticas de las precipitaciones en el área. Los caudales medidos fueron usados como base para estos cálculos mensuales. Los caudales calculados fueron combinados con los valores de las concentraciones de contaminantes promediados para cada mes y cada estación. Los resultados de las cargas calculadas de contaminantes en cada uno de los cuatro ríos seleccionados están compilados en las *Tablas 5.1 y 5.2*, y los detalles se incluyen en el Apéndice.

Como se muestra en las tablas, la carga anual total de sulfato, transportada desde los distritos mineros, supera las 50 000 t. De esta cantidad se considera que un 40% representa el transporte natural de fondo. La carga correspondiente a los metales pesados estudiados es de casi 4 000 t, de las cuales la contribución antropogénica puede llegar al 99% (cadmio, zinc, cobre). El único suplemento natural de importancia a la carga total está dado por arsénico y antimonio. Considerando la importancia potencial para el medio ambiente, el zinc y el cadmio deben ser objeto de especial atención. No obstante, el cobre podría también jugar un rol importante en el valle Huanuni.

*Tabla 5.1 Flujo anual de contaminantes de las áreas mineras en los cuatro ríos principales, t/año. El cloruro no es un contaminante de las actividades mineras pero refleja los aportes generales de las aguas termales.*

	Santa Fe	Huanuni	Poopó	Antequera
Sulfato	20 000	20 000	900	10 000
Cloruro	590	1 000	12 000	2 000
Zinc	1 300	530	2	2 000
Cadmio	12	12	0.15	7
Cobre	13	44	1.8	6
Plomo	0.3	2	0.06	0.6
Arsénico	0.8	0.2	0.1	0.01
Antimonio	2	5	0.01	0.04

Las proporciones de las cantidades transportadas de sulfato, cadmio y plomo son casi las mismas en los ríos Santa Fe, Huanuni y Antequera. El río Santa Fe transporta relativamente más zinc que el Huanuni, pero la carga es substancialmente menor que en el Antequera. El flujo, sólo de la sub-cuenca Antequera, asciende al 50% de la carga total de zinc y a más del 20% de la carga total de cadmio.

De los cuatro ríos, el Poopó descarga la menor cantidad de DAR. La carga de sulfato de este río es menor al 2% del total. La carga relativa de cobre y plomo es casi la misma que las demás, pero la carga de cadmio y especialmente la de zinc son relativamente pequeñas, menos de 0.1% del total. El río Poopó es el portador más significativo de cloruros (de origen natural). De hecho, la concentración de este elemento en el agua del río es generalmente más de 15 veces mayor que la de sulfato.

**Tabla 5.2** Concentración de cloruros, sulfatos y metales seleccionados en aguas de ríos que drenan los distritos mineros. Análisis realizado por IMA, excepto para BH 1 y BH 5 hechos por Svensk Grundämnesanalys AB.

Punto de monitoreo (Número de muestras)	Periodo	pH	Conduct $\mu\text{S}/\text{cm}$	Cl- mg/l	SO <sub>4</sub> - mg/l	Ag mg/l	Cd mg/l	Cu mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	Pb mg/l	Sb mg/l	Zn mg/l	As mg/l
ASF 8 (23)	8/3 95	3.3	3780	81	2500	0.06	2.9	4.9	460	16	0.3	0.5	100	0.1
Río	27/3 96			68	2600	0.02	3.0	4.8	440	15	0.1	0.3	94	0.1
Santa Fé				189	3600	0.25	4.8	7.6	910	34	3.2	1.4	190	0.2
				49	1200	0.01	0.9	1.7	73	3.4	0.0001	0.001	40	0.1
ASF 6 (25)	25/8 94	3.4	3450	84	2500	0.02	1.6	2.3	180	14	0.1	0.3	160	100
Río	27/3 96			84	2500	0.02	1.5	2.1	190	10	0.02	0.2	180	110
Santa Fé				161	2200	0.04	3.0	6.5	320	40	0.7	0.8	250	150
				18	2.9	0.01	0.6	0.7	6	5.9	0.0001	0.001	64	3.3
BH 1 (16)	16/9 94	8.3	180	22	43	0.0001	0.001	0.002	0.22	0.009	0.0008	0.0009	0.084	0.002
Río	25/3 96			20	40	0.0001	0.00004	0.0002	0.005	0.0005	0.00005	0.0008	0.005	0.001
Huamuni				46	95	0.0001	0.012	0.029	1.84	0.086	0.010	0.0014	0.954	0.009
				12	26	0.0001	0.00002	0.0002	0.005	0.0002	0.00005	0.0006	0.0003	0.0007
BH 5 (2)	.6 94	7.9	390		0.1		0.00002	0.0004	0.002		0.0001		0.008	0.019
	.8 94						0.00004	0.0009	0.075		0.0002		0.006	0.002
BH 8 (8)	7/9 94	3.4	2750	94	1100	0.02	0.9	5.4	380	19	0.1	0.5	100	
Río	25/3 96			100	870	0.02	1.0	3.0	300	15	0.1	0.3	43	
Huamuni				110	2600	0.03	1.0	18	1100	39	0.2	1.4	540	
				64	110	0.01	0.2	1.1	6	2.6	0.001	0.01	7.9	
BH 4 (28)	29/8 94	3.4	2340	43	800	0.01	0.6	2.0	60	20	0.1	0.3	22	0.003
Río	25/3 96			35	700	0.01	0.5	1.3	9	18	0.1	0.2	19	0.001
Huamuni				100	1800	0.02	1.5	7.8	240	39	0.4	1.1	57	0.02
				26	330	0.01	0.2	0.6	1	7.6	0.008	0.02	0.02	0.0002
AB 7 (16)	28/4 95	3.4	2420	100	1300	0.06	0.7	1.5	22	17	0.04	0.2	44	
R. San Juan de Sora S.	25/8 96			90	1300	0.01	0.7	1.3	17	18	0.01	0.1	40	
				180	2000	0.19	1.1	2.5	65	34	0.1	0.5	95	
				28	490	0.01	0.3	0.7	6	0.01	0.0001	0.0001	14	
M 1 (27)	13/7 94	3.4	2420	67	1200	0.03	0.7	1.6	32	19	0.1	0.1	43	
R. San Juan de Sora S.	25/3 96			37	1200	0.01	0.6	1.3	10	16	0.1	0.04	42	
				220	2100	0.22	1.3	3.1	360	33	0.8	0.8	91	
				25	480	0.004	0.3	1.0	0.7	5.6	0.01	0.004	12	
M 2 (23)	1/1 95	3.7	1510	97	1330	0.06	0.6	1.6	27	20	0.04	0.1	42	
				65	1280	0.06	0.6	1.3	7.8	20	0.03	0.05	38	
R. San Juan de Sora S.	25/3 96			235	2600	1.5	1.5	2.50	2.50	4.9	0.2	1.1	103	
				35	530	0.3	0.3	3.5	3.5	5.9	0.0001	0.0001	14	

Periodo de muestreo (Número de muestras)	Periodo de muestreo	PH	Conductividad $\mu S/cm$	Ca $mg/l$	SO <sub>4</sub> $mg/l$	Ag $mg/l$	Cl $mg/l$	Cd $mg/l$	Cu $mg/l$	Pb $mg/l$	Mn $mg/l$	Pt $mg/l$	SD $mg/l$	Zn $mg/l$	As $mg/l$	
P1 (23) Rio Poopo	13/7 94	8.7	6820	1600	81	0.004	9.8	0.02	0.1	0.03	0.03	0.01	0.2	0.1	0.03	
		Mediana		1700	81	0.004	2.2	0.01	0.1	0.03	0.03	0.002	0.009	0.02	0.02	
		Max.		2700	130	0.02	48.3	0.2	0.3	0.08	0.08	0.04	1.6	0.5	0.11	
		Min.		610	0.2	0.0001	0.01	0.002	0.05	0.0004	0.0004	0.0001	0.0001	0.0001	0.001	
P2 (16) Rio Poopo	13/7 94	8.3	8920	1900	150	0.02	0.04	0.04	0.2	0.1	0.1	0.02	0.3	0.4	0.01	
		Mediana		1600	140	0.02	0.04	0.03	0.1	0.1	0.1	0.002	0.006	0.2	0.01	
		Max.		4400	240	0.05	0.1	0.1	0.9	0.3	0.3	0.1	1.5	2.3	0.05	
		Min.		660	80	0.01	0.003	0.001	0.03	0.01	0.01	0.001	0.0003	0.03	0.001	
DB1 (31) Rio (Thurgau)	29/8 94	7.7	220	41	41	0.003	0.01	0.01	0.6	0.2	0.2	0.01	0.02	0.03	0.03	
		Mediana		21	43	0.0001	0.003	0.005	0.04	0.004	0.004	0.001	0.002	0.02	0.03	
		Max.		220	62	0.03	0.3	0.04	9.7	3.1	3.1	0.1	0.3	0.2	0.06	
		Min.		12	0.1	0.0001	0.0002	0.0003	0.004	0.0002	0.0002	0.0004	0.0001	0.0001	0.0001	
DM3 (26) Rio Antiguera	29/8 94	3.7	3160	57	2200	0.04	2.7	0.4	11	16	16	0.2	0.1	5.70	0.003	
		Mediana		27	1700	0.02	2.3	0.4	4.6	14	14	0.1	0.02	4.10	0.001	
		Max.		160	3500	0.13	4.9	0.8	98	31	31	0.4	0.6	1300	0.01	
		Min.		21	960	0.01	1.3	0.3	0.2	4.5	4.5	0.0001	0.0004	2.20	0.0003	
DA5 (15) Rio Antiguera	29/8 94	3.4	3320	160	1500	0.02	1.1	0.8	55	15	15	0.1	0.1	310	0.1	
		Mediana		110	1500	0.02	1.1	0.8	3.7	13	13	0.1	0.003	310	0.1	
		Max.		420	2100	0.02	1.4	1.6	190	25	25	0.3	0.8	440	0.2	
		Min.		71	1100	0.01	0.8	0.4	2.5	8.5	8.5	0.0001	0.0002	190	0.02	
PZ1 (17) Rio Antiguera	13/7 94	4.1	2090	78	1600	0.01	0.6	0.7	1.4	14	14	0.1	0.3	160	0.05	
		Mediana		78	1800	0.01	0.6	0.6	1.0	14	14	0.004	0.1	170	0.05	
		Max.		110	2100	0.02	0.9	1.6	3.8	20	20	0.2	1	200		
		Min.		57	200	0.01	0.002	0.01	0.01	12	12	0.0005	0.002	0.1		
PZ3 (18) Rio Antiguera	13/7 94	5.4	2090	140	1100	0.01	0.5	0.4	0.6	11	11	0.03	0.2	130	0.01	
		Mediana		120	1000	0.01	0.5	0.5	0.2	10	10	0.01	0.04	140	0.001	
		Max.		310	1900	0.02	1.1	0.8	2.1	14	14	0.2	0.7	210	0.05	
		Min.		95	110	0.01	0.3	0.02	0.001	6.2	6.2	0.0005	0.001	68	0.0001	
Clasificación boliviana para Agua Fresca Concentración Máxima Admisible		Clase														
Clase "A"		250	300	0.05	0.05	0.05	0.005	0.05	0.05	0.03	0.5	0.05	0.05	0.01	0.2	
Clase "B"		300	400	0.05	0.05	0.05	0.005	0.005	1.0	0.3	1.0	0.05	0.05	0.01	0.2	
Clase "B"		400	400	0.05	0.05	0.05	0.005	0.005	1.0	1.0	1.0	1.0	0.05	0.01	5.0	
Clase "D"		500	400	0.1	0.05	0.05	0.005	0.005	1.0	1.0	1.0	1.0	0.1	0.01	5.0	

## 6 INDICADORES BIOLÓGICOS DE CONTAMINACIÓN

### 6.1 Métodos

La macrofauna béntica de los ríos estudiados por el proyecto fue registrada semi-cuantitativamente en varias campañas de muestreo realizadas en el periodo 1994-1996. Con el fin de identificar la composición de fondo de la fauna béntica, se tomaron muestras en ríos sin contaminación conocida. En los ríos con contaminación antrópica, como el San Juan de Sora, Sora, Poopó y Antequera, se tomaron muestras aguas arriba y aguas abajo de las fuentes de contaminación. La ubicación de los puntos de muestreo se detalla en la *Figura 6.1*. Un arroyo no contaminado, muestreado en el punto AL, 12 km SO de Colquiri, fue utilizado como referencia en éste y en estudios previos (ver Auditorias Ambientales de la minas de COMIBOL). La fauna acuática del lugar es bastante diversa con varias especies de larvas de invertebrados y gusanos. La flora acuática es también relativamente rica, con varias especies de plantas y musgos acuáticos.

La fauna fue muestreada con red (dip-net) y por recolección de las rocas de los ríos. La abundancia de los diferentes grupos taxonómicos fue registrada en una escala de tres grados: escasa, común y abundante (ver *Tabla 6.1*).

### 6.2 Resultados y discusión

Los resultados del estudio de la fauna béntica están resumidos en la *Tabla 6.1*. La fauna béntica macroscópica del Altiplano es bastante trivial. El clima hostil, con sequías y bajas temperaturas, crean condiciones hostiles para este tipo de animales. Además, muchos ríos tienen lechos arenosos, que son un sustrato deficiente para los animales.

#### 6.2.1 La Fauna en ríos sin contaminación antropogénica

En cinco de los siete ríos no contaminados que fueron analizados (Jalsuri, Cortadera, Sevaruyo, Marquez y Palco Mayo), se identificaron 5 a 11 taxa consistentes básicamente en larvas de insectos. También se encontraron crustáceos y vertebrados, como peces y larvas de ranas/sapos (Anura). Moluscos como caracoles y mejillones fueron escasos. El insecto "remero" (Corixidae) es de distribución oportunista, bastante común y abundante. Los adultos pueden volar hacia aguas adecuadas, donde puedan tolerar la contaminación porque su respiración aérea. La larva de mosca (Ephemeroptera) y el camarón de agua dulce (Amphipoda) no pueden migrar por el aire y tienen respiración acuática, por lo que son más susceptibles a la contaminación hídrica.

La comunidad béntica de los ríos Jalsuri Grande y Cortadera se caracteriza por una diversa y abundante población de las especies sensibles moscas y anuros. Camarones, ostrácodos y peces también están presentes en estos ríos. La calidad del agua del río Cortadera es evidentemente suficientemente buena como para albergar una comunidad béntica equilibrada. Las concentraciones de metales fueron generalmente bajas, excepto para antimonio y ocasionales picos de cobre, plomo y mercurio (ver sección 3)

En los ríos Sevaruyo y Marquez, se encontraron comunidades menos abundantes y equilibradas; aunque en ambos ríos había peces, así como camarones (Marquez) y moscas (Sevaruyo). Se podría especular que una razón para la escasez de fauna en estos ríos es la alta concentración de arsénico en el agua (más de 150 µg/l). En el río Desaguadero en Toledo (ver informe PPO 9607) se observó un empobrecimiento similar de la fauna acuática, relacionado posiblemente con los elevados contenidos de arsénico en el agua.

informe PPO 9607) se observó un empobrecimiento similar de la fauna acuática, relacionado posiblemente con los elevados contenidos de arsénico en el agua.

En dos de los ríos sin contaminación antropogénica conocida, el Jachacha Uma y Huaylluma, no se encontró fauna acuática. Además de los altos niveles de antimonio (25-35  $\mu\text{g/l}$  en el Jachacha Uma, 3-18  $\mu\text{g/l}$  en el Huaylluma), las concentraciones de metales en estos ríos son muy bajas. Es difícil juzgar si la ausencia de fauna se debe a las duras condiciones físicas (por ejemplo, el flujo de agua en estos ríos era muy bajo durante el período de muestreo), o se debe al elevado contenido natural de antimonio. No existen muchos datos acerca de la toxicidad del antimonio para la fauna acuática. De todas maneras, en el lago Uru Uru, donde las concentraciones de antimonio son diez o más veces mayores, existe una fauna béntica abundante. Se podría concluir que las severas condiciones físicas son la razón probable para la pobreza de la fauna acuática.

### 6.2.2 Fauna acuática en ríos afectados por la minería y el procesamiento de minerales

El río San Juan Sora Sora, que drena las sub-cuencas Huanuni y Santa Fe, tiene tres tributarios principales: los ríos Santa Fe, Huanuni y Ventaimedia. El río Santa Fe está contaminado por las actividades mineras pasadas y presentes de Japo, Morococala y Santa Fe. El río Huanuni está contaminado por la mina y el pueblo de Huanuni. Adicionalmente estos dos sistemas fluviales están afectados por actividades de las cooperativas. No obstante, la cuenca del río Ventaimedia no tiene fuentes contaminantes.

**La mayor diversidad de fauna, con 14 taxas diferentes, fue hallada en el río Huanuni, aguas arriba de la mina, donde no está afectado por contaminación minera, de ingenios u otras actividades humanas (Tabla 6.1 - 12).** Están representados todos los grupos sensibles. También se observaron ranas, peces y sus huevos. El número de taxa es el mismo que en el punto de referencia AL. Esto no resulta sorprendente ya que la calidad del agua en este punto es la mejor (con las más bajas concentraciones de metales y un mínimo de sólidos suspendidos) de toda el área. Aunque la fauna béntica en el río Ventaimedia es menos diversa que en el río Huanuni, las especies sensibles son abundantes y la comunidad está bien equilibrada.

**No se encontró fauna béntica aguas abajo de las minas en los ríos Santa Fe y Huanuni. Las descargas provenientes de la minería y otras actividades de procesamiento de mineral, exterminaron la fauna béntica en todas las secciones afectadas de los ríos, al parecer sin excepción.**

En la sub-cuenca del río Poopó, las actividades mineras están concentradas en los tramos bajos del río. Importantes cantidades de aguas termales ingresan al río algunos kilómetros aguas arriba de estas minas. Solamente en las secciones superiores del río Poopó se encontró una comunidad faunística relativamente normal (Tabla 6.1 - 14). Aguas más abajo, antes y después de la entrada de las aguas termales, sólo se identificaron pocas especies y no existían grupos sensibles como moscas y anfibios. Debajo de las actuales labores mineras, la fauna estaba ausente.

En el río Antequera, contaminado por las descargas provenientes de las minas Bolívar, Totoral y Avicaya, sólo se encontró una composición faunística relativamente normal antes de la mina Bolívar. También se observaron unas pocas especies en un pequeño afluente utilizado para irrigación. Aguas abajo de las actividades mineras y de procesamiento de minerales, la fauna béntica estuvo ausente. La carencia de fauna puede deberse parcialmente al agua termal que ingresa al río Antequera por el río Urmiri y por varias fuentes en el lecho del río.

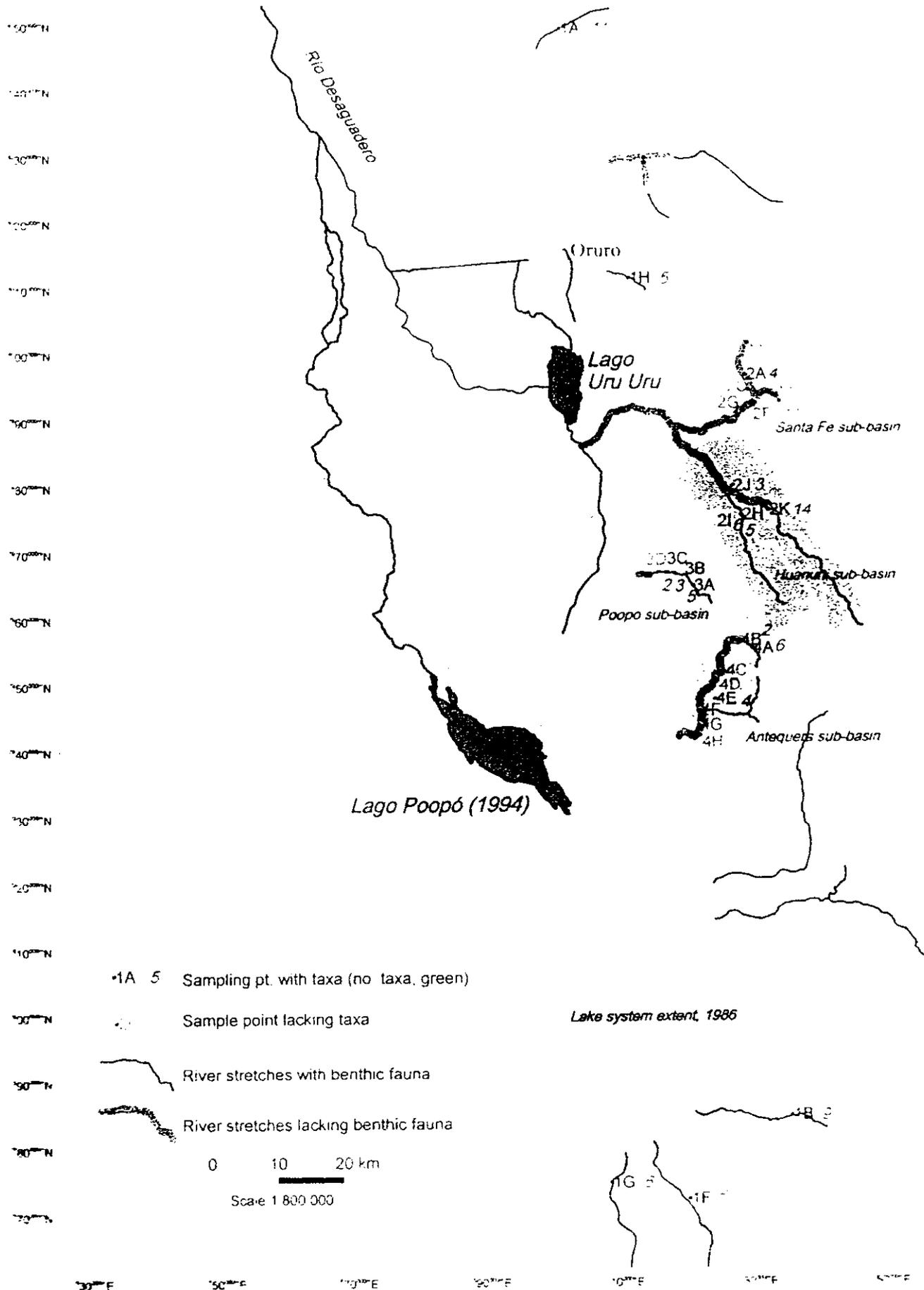


Figura 6.1 Localidades de muestreo de fauna benthica en rios

Table 6.1 Abundancia de grupos taxonómicos de fauna béntica en cursos de agua del área del PPO area. Abundancia: + raro, ++ común, +++ abundante.

	AL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
TURBELLARIA	++																							
OLIGOCHAETA	++	+					+																	
HIRUDINEA																								
AMPHIPODA		+	+			++		+		+++	++	+	++										+	
OSTRACODA		+	+				++				+		+											
EUPHYLLOPODA																								
HEMIPTERA																								
<i>Corixidae</i>																								
<i>Notonectidae</i>																								
COLEOPTERA																								
<i>Elmidae</i>	++	+	++								+		++		+		++++					+		+
ZYGOPTERA																								
ODONATA	++	+	+										+										++	
EPEMEROPTERA	++	+++	+++			++				+++	+		+++		+++								+	
TRICHOPTERA	++											++	++											
PLECOPTERA		+				+					+		+											
DIPTERA	++											++	+++											
<i>Chironomidae</i>	++	++	+++			+		+				+	+++		++	++						+		++
<i>Simuliidae</i>													+++											
GASTROPODA		+											+		+++									
ANURA		++	+++			+				++			++											
TELEOSTOMI																								
<i>Thricomys spp.</i>		+	+			++				++			+											
<i>Orestias spp.</i>						++																		
TOTAL TAXA	8	11	9	0	6	6	5	4	0	5	6	3	14	0	5	3	2	0	6	2	0	4	0	

*Notas de la Tabla 6.1*

Punto de muestreo	Código en la Tabla	Número de taxa	UTM Este	UTM Norte	Descripción
6.1					
1A	1	11	700500	7955100	Rio Jalauri Grande, noroeste de Caracollo
1B	2	9	735000	7884600	Rio Cortadera, Huari
1C	3	0	713200	8029400	Rio Jauchacha Uma, Paria
1D	3	0	713100	8028700	Rio Huaylluma, Paria
1E	4	6	719600	7872200	Rio Sevanyo
1G	5	6	707800	7874700	Rio Marquez
1H	6	5	710700	8011200	Rio Palca Mayo, Sepulturas
2A	7	4	728100	7996400	Rio Santa Fe, Jarumita below Cana Mayu River
2B	8	0	728400	8001300	Rio Santa Fe abajo de la Mina Japo mine
2C	8	0	728100	7992100	Rio Santa Fe Jarumita Santa Tereza
2D	8	0	733200	7992300	Rio Santa Fe River abajo de Mina Morococala
2E	8	0	732200	7993400	Rio Santa Fe River abajo de Mina Santa Fe
2F	8	0	729500	7992100	Rio Santa Fe Rio Escalera
2G	8	0	729100	7992400	Rio Santa Fe Rio, desde Pay runani, and all the way downstream to the monitoring station ASF-6, at the confluence with the Huamani River, through the San Juan Sora Sora River (monitoring stations AB-7, M-1) to the confluence with the Desaguadero River (M-2)
2H	9	5	727500	7975300	Ventamedia River above dam
2I	10	6	727400	7975300	Ventamedia River at village
2J	11	3	725200	7978700	Playa Verde, small tributary to the Huamani River
2K	12	14	731500	7976000	Huamani River above Huamani mine, ditto background reference BH-1
	13	0	721500	7976000	Huamani River from the beginning of cooperative reprocessing in the river (Huamani audit obs point 8), along the Santa Elena mill, to the confluence with Santa Fe River (incl. monitoring station BH-4)
3A	14	5	720200	7964600	Poopó River, upper reaches
3B	15	3	717500	7966500	Poopó River above thermal water
3C	16	2	716300	7966700	Poopó River below thermal water
1D	17	0	715900	7966700	Poopó River below mine to mouth
4A	18	6	729000	7955100	Antequera River above Bolívar mine, same as background reference DD-1
4H	19	2	721200	7956300	Antequera River below Bolívar mine
4C	20	0	723000	7956300	Antequera River above Toloral mine, same as DM-3
4D	20	0	723400	7950500	Antequera River at Avicaya, same as D/A-5
4E	21	4	721200	7994500	Aporte tributary irrigation channel
4F	22	0	721100	7945700	Antequera River road ford, same as PZ-1
4G	22	0	721200	7943500	Antequera River below Urmiri River
4H	22	0	721200	7951100	Antequera River, from PZ-3 at Puzña to mouth

## 7. LAGO URU URU

### 7.1 Información Hidrológica

El lago Uru Uru ( a 3 693 m sobre el nivel del mar) es una parte central del sistema de drenaje Titicaca-Poopó . El lago, que según algunas fuentes existe sólo desde principios de siglo, está dividido en dos partes por el terraplén de una línea férrea y una carretera (*Figura 7.1*), que permite sólo un mínimo intercambio de agua entre las dos partes separadas. La única comunicación es por algunos canales. La parte SO del lago es alimentada por el brazo oriental del río Desaguadero que ingresa al Uru Uru en Challacollo (punto de observación CH), y por el río Tajarita que recibe la mayor parte, si no todas, sus aguas del Desaguadero a través del canal Burguillos-Itos. El río Tajarita descarga en el lago Uru Uru en el Puente Español. El sector NE es alimentado por un río muy regulado (canalizado): el Tagarete, que lleva al lago aguas fuertemente contaminadas de la mina San José.

El lago Uru Uru (parte SO) drena en su límite austral por el río Desaguadero, que fluye hacia el sur por 30 km antes de ingresar al lago Poopó. A pocos kilómetros al sur de la desembocadura, en Caravi (punto de observación CA), el río San Juan de Sora Sora ingresa al canal principal desde el oeste, drenando las cuencas de los ríos Huanuni y Santa Fe.

Como el lago es muy poco profundo, su extensión varía considerablemente entre la estación seca y la de lluvias, así como entre año y año. Sin embargo, y en contraste con el lago Poopó, el lago Uru Uru no se seca completamente. Durante el tiempo de estudio, el sector noreste del lago estaba casi seco y sólo el sector sudoeste contenía agua permanente. A lo largo del periodo de observación del proyecto (1994–1996), la superficie del lago Uru Uru varió entre 48 y 70 km<sup>2</sup> en la estación seca y la húmeda respectivamente. La parte central del lago se caracteriza por tener un área plana, con una profundidad uniforme de 1.30 m durante la estación húmeda. En la estación seca, la profundidad máxima es de 0.80 a 1.00 m. La imagen satelital del 8 de agosto de 1986, muestra una superficie lacustre continua de aproximadamente 150 km<sup>2</sup>, que cubre ambas partes del lago y un área amplia de llanuras de inundación a su alrededor. Aparentemente es la máxima extensión reciente.

El ingreso de agua fue monitoreado sistemáticamente en el Puente Español y en Challacollo (ver el informe PPO-9606), pero por muchas razones, el monitoreo sistemático de la salida del lago fue imposible. Por ello se estimó el balance del agua con la ayuda de datos hidrológicos provenientes del informe PPO-9606. Los niveles de agua (rangos máximo y mínimo) fueron calculados mediante la ecuación :

$$P_{\text{areal}} + Q_{\text{in}} = E_{\text{lr}} + E_{\text{lago}} + L_{\text{CA}}$$

$P_{\text{areal}}$  es la precipitación areal promedio de la zona de captación, estimada del mapa anual de isohietas<sup>1</sup>.  $Q_{\text{in}}$ , para la estimación más baja, es el aporte combinado al sector sudeste del lago, monitoreado en las estaciones PE y CH durante 1994 y 1995. Como todo el periodo fue relativamente seco, y la parte NO estuvo mayormente sin agua, se considera este valor, sin peligro, como el mínimo. Para la estimación más alta de  $Q_{\text{in}}$ , se asumió que los valores de PE+CH representan sólo el 25 % del total (ver PPO-9606). Por esta razón se incrementó en un

---

<sup>1</sup> El mapa de isohietas es un mapa de contornos de los valores medio anuales de lluvias (1975-1995) mostrados en milímetros.

**75% y se combinó con las descargas de la mina San José y de la ciudad de Oruro a la parte NE del lago.  $E_T$**  (evapotranspiración de las áreas de tierra) se obtuvo con un coeficiente de escurrimiento de 12.2%, indicado en PPO-9606, aplicado a la precipitación areal media.  $E_{lago}$  es la evaporación de las áreas inundadas, el valor usado es idéntico al determinado para el lago Poopó. La máxima extensión del lago fue la de agosto de 1986, y la mínima de octubre de 1994.  $L_{CA}$  es la descarga estimada del lago Uru Uru en el punto de observación CA (Caravi). Ver detalles sobre la discusión de valores en el informe PPO-9606. Los volúmenes mínimos y máximos calculados se muestran en la *Tabla 7.1*.

*Tabla 7.1 Volúmenes anuales promedio estimados para el lago Uru Uru*

		Estimación areal anual (mm)	Área aproximada (km <sup>2</sup> )		Volumen promedio anual (millones de m <sup>3</sup> )	
			Mínima	Máxima	Mínimo	Máximo
Precipitación		400	500	500	200	200
Ingreso	PE + CH	-	-	-	211	844
	Mina San José	-	-	-	-	0.3
	Ciudad de Oruro	-	-	-	-	33
Evapotranspiración		351	450	350	158	123
Evaporación del lago		1875	50	150	93.8	281
Salida en Caravi		-	-	-	159.2	673.3

## 7.2 Concentraciones de metales y su transporte hacia y desde el lago

Para evaluar el transporte de metales desde el lago Uru Uru y su fijación en él, se utilizaron el balance hídrico y los volúmenes promedio estimados del ingreso y de las descargas.

Con el fin de preparar la estimación mínima de metal transportado, se asumió que la parte noreste del lago estaba completamente seca. En tal escenario, el contenido metálico transportado en el agua de mina de San José era descargado directamente en las aguas subterráneas de las planicies al norte del lago Uru Uru. Esta situación se observó durante la mayor parte de 1994 y 1995. Para los ingresos por los puntos PE y CH, el transporte mínimo de metal se tomó del informe PPO-9607. Para el transporte máximo, los valores se incrementaron en un 75%, ya que los estudios hidrológicos del área (PPO-9606) indican que los flujos medidos pueden representar sólo 25 a 60% del promedio anual. Con este propósito se asumió una relación lineal entre el flujo y el transporte de metales. Se asumió también, para la descarga de agua de la mina San José, incluida en la estimación máxima, un 50% de deposición de metales (en sedimentos e infiltraciones en agua subterránea), en su ruta hacia el lago. En ninguna estimación se consideró el aporte ni de la mina Antofagasta ni del polvo de Vinto. Los resultados de los cálculos se muestran en la *Tabla 7.2*. Debido a la serie de asunciones arriba mencionadas, los resultados deben considerarse con precaución.

Como se observa en la *Tabla 7.2*, el lago Uru Uru funciona como un eficiente sumidero de metales. El transporte por la salida del lago, de todos los elementos estudiados excepto azufre y antimonio, es sólo una pequeña fracción del ingreso. La fijación en el lago se explica por reacciones que secuestran metales y por la incorporación de metales por plantas acuáticas del ecosistema limnico del lago Uru Uru. El alto superávit en la descarga de azufre desde el lago (32000-155000 ton/año) debe explicarse por causas múltiples. La más obvia es la repetida (intermitente) disolución de sulfatos depositados en el lago. Las fuentes adicionales pueden rastrearse hasta las deposiciones atmosféricas provenientes de Vinto y los sulfatos disueltos arrastrados desde el área de captación. De todas maneras, la cantidad calculada continúa siendo muy elevada, aún en comparación con otras zonas de captación en el sistema del Desaguadero. Por esta razón se deben considerar las contribuciones adicionales antropogénicas. Las emisiones de los hornos artesanales de ladrillos, las fábricas de ladrillos y fábricas de cemento, son las fuentes mas probables.

Con respecto al antimonio, parte de su exceso en el agua de salida se puede atribuir a la disolución de depósitos originados en la descarga de la mina de oro-antimonio Antofagasta (que estuvo inactiva durante el período de monitoreo). Sin embargo, gran parte del antimonio es disuelto probablemente de los desmontes que se utilizaron para la construcción del terraplén ferroviario que divide al lago. Además, las deposiciones atmosféricas provenientes de la fundición de antimonio de Vinto pueden ser responsable de una pequeña parte del exceso.

Tabla 7.2 Concentraciones promedio y transporte anual de metales, arsénico y azufre hacia y desde el lago Uru Uru. El transporte de elementos se estimó sobre la base del balance hídrico presentado en la tabla 7.1. Las concentraciones de elementos fueron registradas durante el programa de monitoreo 1994/1995. "N"=número de muestras. Las desviaciones estándar se muestran entre paréntesis

CONCENTRACIONES	PH	Cond. mS/c	mg/l		µg/l							
			Fe	S	As	Cd	Cu	Mn	Ni	Pb	Sb	Zn
Entrada Puente Espazol (PE), peso promedio N=16	8.5	2.7	3.2	70	150	0.4	20	170	9	8	3.9	30
Entrada Challacollo (CH), peso promedio, N=22	8.4	1.97	1.0	64	250	0.2	18	190	5	8	2.7	11
Salida Caravi (CA), media (Desv. Standard ), N=11	8.9	8.14	0.1 (0.08)	336 (73)	65 (19)	0.4 (0.1)	7 (5)	19 (29)	11 (4)	8 (8)	20 (9)	6 (5)
<b>TRANSP. DE ELEMENTOS, MINIMO</b>												
Entrada = PE+CH			780 000	18 600 000	45 000	90	5 200	12 000	2 300	2 200	1 000	7 200
Salida = Caravi (min)			16 000	53 500 000	10 000	70	1 100	3 000	1 800	1 300	3 200	960
Transporte a la salida como % de entrada			2	288	22	71	21	25	78	59	320	13
<b>TRANSP. DE ELEMENTOS, MAXIMO</b>												
Entrada = (PE+CH)H4 + San JoséH.O.5			3 740 000	75 000 000	185 000	910	26 100	51 000	9 500	13 000	5 400	48 000
Ingreso = Caravi (max)			70 000	230 000 000	44 000	270	4 700	12 800	7 400	5 400	13 500	4 000
Trans. Salida como % de entrada			2	307	24	30	18	25	78	42	248	8

Nota: en todos los cálculos los ensayos que resultaron por debajo de los límites de detección se incluyeron con los valores de los límites de detección. Todos los datos en las estaciones PE y CH corresponden al informe PPO-9607. El transporte de metales de San José fue tomado de la tabla 4.5

### 7.3 Metales en los sedimentos lacustres

El perfil vertical de la concentración de metales en los sedimentos del lecho lacustre es una medida relativa de la carga de metales en el lago. Además, el análisis del contenido metálico en sedimentos más profundos y antiguos permite revelar concentraciones históricas. En agosto/septiembre de 1995 se llevó a cabo un programa de muestreo de sedimentos del lago Uru Uru, cuando el muy bajo nivel de agua facilitó el trabajo. Las muestras fueron tomadas en las orillas, a intervalos de aproximadamente 2 km (*Figura 7.1*). En 26 sitios se recolectaron sedimentos de la capa superior, de tres a cinco centímetros. Adicionalmente se hizo un muestreo de una sección vertical con una profundidad de 70 cm en la parte noreste del lago. Todas las muestras de sedimentos consisten en limo y limo fino. Para todos los datos analíticos del estudio ver el informe preliminar PPO-9505.

La *Tabla 7.3* muestra las concentraciones promedio, en diversas partes del lago, de elementos seleccionados, en comparación con niveles de fondo calculados de sedimentos más profundos -"anteriores a la minería"- . Los valores de fondo de los sedimentos del lago Uru Uru se pueden comparar con los del lago Poopó (cf. *Tabla 8.2*) con excepción de arsénico y antimonio. El mayor nivel de fondo para arsénico en sedimentos del lago Poopó, de origen completamente natural, es tratado de manera especial en el capítulo 8 de este informe. El mayor nivel de fondo para antimonio en sedimentos del lago Uru Uru se explica por las condiciones geológicas de la cuenca hidrológica del Uru Uru. El lago es adyacente a una zona metalogenética caracterizada por ocurrencia de mineralizaciones de antimonio y oro hospedadas en sedimentos.

Como indica la *Tabla 7.5*, no existe correlación entre las concentraciones de metales (excepto Mn) y metaloides con el carbón total o la pérdida por ignición (PPI). Por ello no se amerita una evaluación del grado de contaminación con un método como el de gradiente de Cato (1990). La falta de correlación es de alguna manera sorprendente, ya que la PPI mide y los contenidos totales de carbón están dentro del rango normal de sedimentos lacustres y por lo general los materiales orgánicos tienen mayor capacidad para ligar metales. Se propone como medida tentativa de la contaminación, la relación: concentración promedio de un elemento/concentración de fondo (*Tabla 7.3*).

El sector noreste del lago, que es el principal receptor del agua descargada por la mina San José, muestra un grado sustancialmente más alto de contaminación. La contaminación más grave en ambas partes del lago es la ocasionada por antimonio. El antimonio es un constituyente típico del mineral de San José y del mineral de Au Sb de Antofagasta y es transportado al lago con los efluentes de mina y en el lixiviado derivado de las colas Iroco (vía río Thajarita, ver informe PPO-9607). La gran acumulación de antimonio en las muestras recolectadas a lo largo del terraplén de la vía férrea (*Figura 7.2*) deriva de los desechos mineros usados para su construcción. El posible aporte de la fundición de antimonio de Vinto no es notorio (ver 7.4.2).

Recalamos que los sedimentos a lo largo de la margen sudeste del lago han sido contaminados con arsénico, antimonio, cadmio, mercurio, plomo, estaño y zinc en una descarga "accidental" del río San Juan de Sora Sora en el lago (ver *Figuras 7.3-7.8*)

Tabla 7.3 Sedimentos lacustres (0-5 cm de profundidad) del Uru Uru. Concentraciones promedio de elementos seleccionados (peso seco). Las desviaciones estándar están entre paréntesis. El factor tentativo de contaminación es el cociente = media de un elemento/valor de fondo. Análisis por Svensk Grundämnesanalys AB, Sweden.

	Fondo	Parte sudoeste		Parte Noreste		Salida (Caravi,CA)		Factor Contaminación		
		Media( N=17)	Rango	Media( N=7)	Rango	Media( N=2)	Rango	SW	NE	CA
Ag mg/kg	<0.04	0.3 (0.3)	0.08- 0.75	0.7 (0.1)	0.54- 0.8	0.3	0.2- 0.4	8	17	8
As mg/kg	41*16	55 (32)	25- 160	67 (49)	20- 130	41	15- 66	1	2	1
C %		2.1 (1.4)	0.7- 5.5	2.1 (0.9)	1.3- 3.5	0.7	0.2- 1.2			
Cd mg/kg	0.2*0.2	0.7 (0.7)	0.16- 3.0	7.4 (12.0)	0.19- 30.0	0.4	0.28- 0.6	4	37	2
Cu mg/kg	14*4	69 (36)	13- 120	67 (63)	22- 160	50	44- 55	5	5	4
Fe %	2.2*0.6	3.2 (1.0)	1.3- 4.4	3.1 (1.4)	1.5- 5.5	2.4	1.7- 3.0	1	1	1
Hg µg/kg	<40	120 (120)	39- 420	340 (170)	140- 560	110	40- 180	3	9	3
Mn mg/kg	270*140	660 (230)	170- 1 200	500 (230)	330- 850	360	350- 380	2	2	1
N %		0.13 (0.12)	0.04- 0.5	0.16 (0.08)	0.09- 0.3	0.12	0.06- 0.2			
Ni mg/kg	15*2.8	20 (6)	7- 27	16 (6)	12- 26	14	11- 18	1	1	NA
P mg/kg		820 (170)	400- 1 250	920 (270)	650- 1 400	640	520- 760			
Pb mg/kg	13*4.5	55 (30)	26- 120	103 (35)	68- 170	52	41- 63	4	8	4
Sb mg/kg	0.2*0.5	3.7 (9.6)	0.04- 34	12 (19)	0.4- 48	0.2	0.2- 0.3	19	60	1
Sn mg/kg	0.7*0.2	3.7 (3.5)	0.5- 11	7.5 (1.8)	5.1- 11	0.9	0.5- 1.4	5	11	1
Zn mg/kg	56*16	130 (38)	72- 240	430 (570)	83- 1 600	110	58- 160	2	8	2
LOI %		9 (7.2)	3.2- 35	11 (5.9)	6.4- 21	3.1	1.8- 4.4			

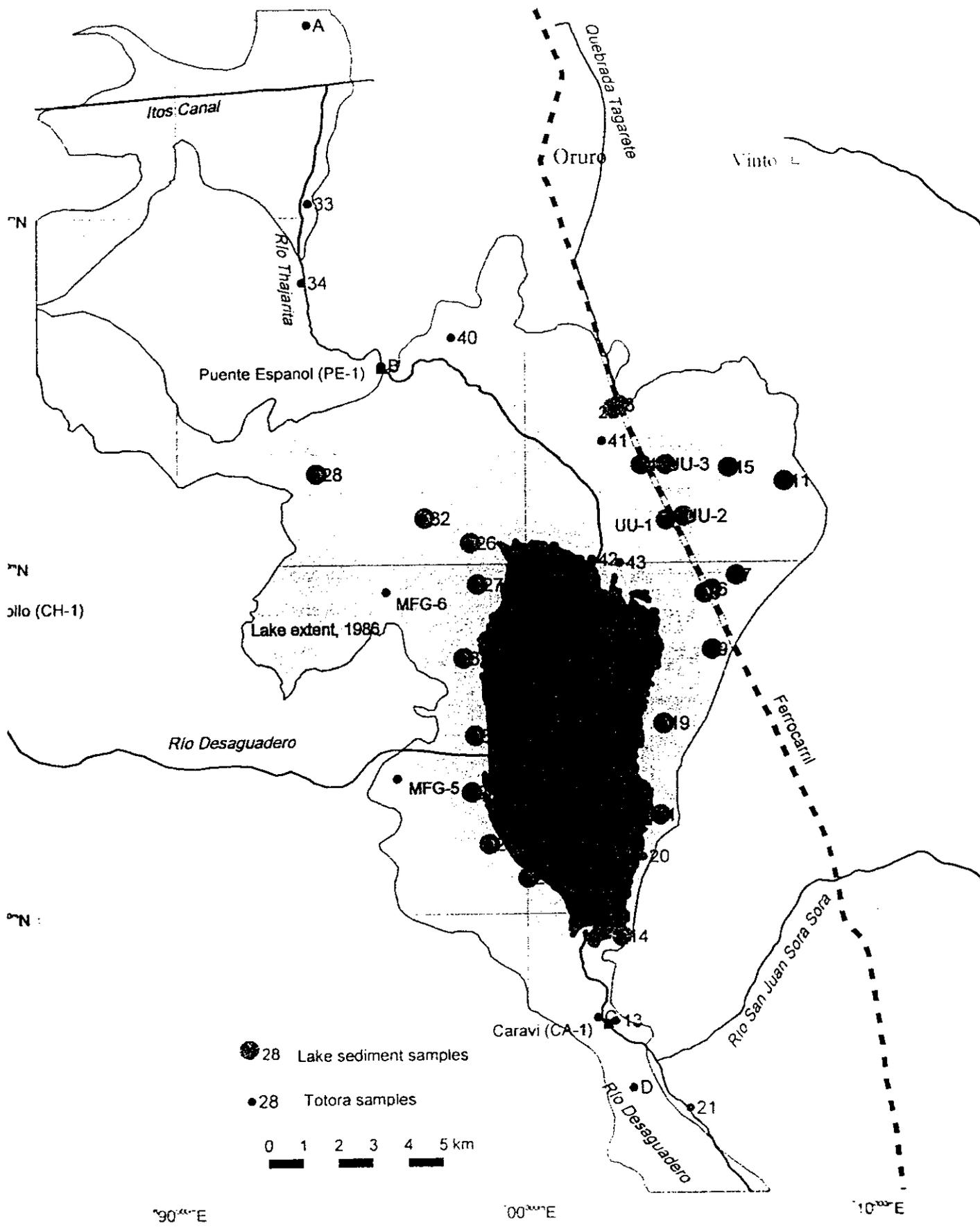


Figura 7.1 Puntos de muestreo de sedimentos lacustres y Totora. Máxima extensión del lago el 1986, extensión de 1994 y tributarios en azul.



**Figura 2** Concentraciones de arsénico, plomo y antimonio en sedimentos del lago Uru Uru (mg/kg ps) (As, Pb, Sb). La altura del rectángulo negro indica (As, Pb) 5, (Sb) 5 mg/kg. Línea punteada, máxima extensión del lago; contorno azul

La comparación de los coeficientes de correlación entre las concentraciones de elementos de las dos partes del lago presenta diferencias interesantes (ver *Tabla 7.5*). Mientras que los metales en la parte SO muestran las más triviales correlaciones (como Zn-Cd, Cu-Ni, Cu-Fe y As-Sb), en el sector NE del lago, parte de los elementos están fuertemente correlacionados. Además existe una marcada correlación positiva entre hierro y As, Cd, Cu, Ni y Zn, esto indica que los coloides de hierro cumplen un rol importante como medio de adsorción. Las relaciones del antimonio y del estaño con otros elementos de los sedimentos del NE, difieren visiblemente del patrón general de correlación, en particular por sus generalmente leves coeficientes negativos, así como por la falta de una fuerte correlación positiva con el hierro

La acumulación, generalmente baja, de hierro en los sedimentos del lago (como indica la relación) presenta un problema de interpretación. La *Tabla 7.2* indica que la mayor parte del hierro transportado se descarga dentro del lago. Existe una cierta gradiente en la deposición del hierro con respecto a la afluencia al lago y se podría especular que gran parte del hierro se deposita en áreas relativamente pequeñas, adyacentes a la entrada y en el canal (rio Tagarete), que lleva agua de mina. Sin embargo, el muestreo realizado es insuficiente para llegar a una conclusión (un muestreo más detallado supera el alcance del PPO).

La sección vertical de los sedimentos lacustres (*Tabla 7.4*) excavada en el sector noreste del lago, indica que sólo la capa superior de los sedimentos está contaminada. Evidentemente, antes de la excavación del canal que drena el agua de la mina San José hacia el lago Uru Uru, la descarga de la mina no alcanzaba el área NE del lago. Por ello, se puede utilizar la concentración de metales en los sedimentos más profundos del lago Uru Uru (0.15 -0.70 m de profundidad) para el cálculo de valores de fondo.

*Tabla 7.4 Distribución vertical de ciertos elementos en sedimentos lacustres del sector NE del lago Uru Uru. El estrato contaminado está remarcado. Análisis realizados por Svensk Grundämnesanalys AB.*

Profundidad de las muestras, cm	Ag mg/kg	As mg/kg	Cd mg/kg	Hg µg/kg	Pb mg/kg	Sb mg/kg	Sn mg/kg	Zn mg/kg
0 - 15	0.68	20	0.31	550	78	0.85	8.63	87
15 - 29	0.05	27	0.07	<40	18	0.14	0.84	68
29 - 41	<0.04	59	0.37	<40	13	0.20	0.89	61
41 - 70	<0.04	36	0.04	<40	9	0.24	0.52	38
Composición de fondo del lago Poopó	0.05	135-157	0.18-0.30	<40	9-13	<0.04	0.4-0.6	40-51

Tabla 7.5 Correlación entre concentraciones de elementos en sedimentos del Lago Uru Uru

Parte Noreste:

	Ag	As	Cd	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	Pb	Sb	Sn	Zn	LOI	C	P	N
Ag	1.00															
As	0.66	1.00														
Cd	0.63	0.72	1.00													
Cu	0.64	0.94	0.60	1.00												
Fe	0.44	0.93	0.51	0.94	1.00											
Hg	0.43	0.21	0.53	0.20	-0.02	1.00										
Mn	-0.08	0.34	0.35	0.32	0.50	-0.50	1.00									
Ni	0.55	0.97	0.98	0.97	0.98	-0.30	0.54	1.00								
Pb	0.87	0.85	0.33	0.84	0.78	0.16	0.06	0.83	1.00							
Sb	0.12	0.65	0.99	0.50	0.41	0.54	-0.35	-0.62	0.25	1.00						
Sn	-0.13	-0.34	-0.13	-0.35	-0.28	0.13	0.57	-0.18	-0.43	-0.10	1.00					
Zn	0.65	0.79	0.93	0.78	0.64	0.50	0.29	0.96	0.47	0.89	-0.19	1.00				
LOI	-0.45	0.57	0.84	0.32	0.39	0.26	0.92	0.23	0.15	0.87	0.07	0.63	1.00			
C	-0.72	-0.48	-0.45	-0.48	-0.24	-0.33	0.64	-0.26	-0.73	-0.07	0.73	-0.50	0.87	1.00		
P	0.35	0.75	0.84	0.53	0.60	0.33	0.79	0.86	0.40	0.83	0.01	0.68	0.95	0.17	1.00	
N	-0.45	-0.06	-0.04	-0.07	0.16	-0.50	0.91	0.17	-0.36	-0.24	0.69	-0.10	1.00	0.90	0.53	1.00

Parte Sudoeste:

	Ag	As	Cd	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	Pb	Sb	Sn	Zn	LOI	C	P	N
Ag	1.00															
As	0.38	1.00														
Cd	0.44	0.25	1.00													
Cu	-0.79	-0.13	0.01	1.00												
Fe	-0.60	0.07	0.12	0.90	1.00											
Hg	0.79	0.26	0.77	-0.35	-0.29	1.00										
Mn	-0.28	0.07	-0.01	0.40	0.47	-0.26	1.00									
Ni	-0.42	0.05	0.39	0.84	0.88	0.00	0.49	1.00								
Pb	0.78	0.40	0.62	-0.44	-0.37	0.90	-0.47	-0.13	1.00							
Sb	0.43	0.77	0.45	-0.29	-0.20	0.44	-0.30	-0.28	0.58	1.00						
Sn	0.78	0.44	0.83	-0.42	-0.20	0.73	-0.13	-0.21	0.70	0.53	1.00					
Zn	0.05	0.18	0.94	0.25	0.35	0.64	0.06	0.65	0.52	0.35	0.69	1.00				
LOI	0.15	0.19	0.85	0.05	0.08	0.59	0.72	0.23	0.38	0.47	0.66	0.80	1.00			
C	0.19	0.17	0.19	-0.07	-0.06	0.01	0.58	-0.03	-0.08	-0.03	0.28	-0.01	0.92	1.00		
P	0.47	0.17	0.24	-0.13	0.04	0.25	0.52	0.11	0.10	0.00	0.36	0.11	0.32	0.67	1.00	
N	0.44	0.19	0.36	-0.29	-0.20	0.22	0.55	-0.07	0.10	0.02	0.49	0.05	0.87	0.89	0.74	1.00

## 7.4 Componentes biológicos

### 7.4.1 La comunidad macrofita

Las observaciones sobre la cobertura y abundancia de macrofitas se realizaron en el periodo 1995–1996, siendo las más detalladas las de 1995, con visitas a 25 estaciones de muestreo tanto en la época húmeda como en la seca. Los resultados de estos estudios se muestran en la *Tabla 7.6*.

*Tabla 7.6* Areas de superficies ocupadas por diferentes especies macrofitas en el lago Uru Uru, durante las investigaciones llevadas a cabo en 1995 (de Zabaleta, 1996).

Taxa	Cantidades durante la...			
	estación húmeda		estación seca	
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	
<i>Ruppia spiralis</i>	21	30	9.6	20
<i>Schoenoplectus totora</i>	8.4	12	5.3	11
<i>Chara popooensis</i>	5.6	8	2.9	6
<i>Myriophyllum</i> Sp.	3.5	5	1.4	3
Algae	1.4	2	0.5	1
Area con vegetación	40	57	20	41
Area sin vegetación	30	43	28	59
Area total	70	100	48	100

El área sin vegetación fue aproximadamente de una extensión similar en la estación seca y en la húmeda, lo que significa que la regresión de la superficie del lago durante la estación seca implica la pérdida de aproximadamente la mitad del área de cobertura vegetal. Las especies que reducen notablemente su cobertura en la estación seca fueron *Myriophyllum*, *Ruppia* y *Chara*, mientras que la reducción del área cubierta por *Totora*, resultó menos evidente, aunque la *Totora* se caracterizó por una clara reducción en el número de hojas y biomasa. En 1996, durante la sequía constante, cuando el agua desapareció del sector noroeste del lago, decreció principalmente la distribución de *Ruppia* y *Chara*.

Se debe remarcar, que especialmente durante los periodos de desecación del lago, y durante la estación seca, la vegetación acuática es explotada para pastoreo de vacunos, lo que contribuye en gran parte, al menos en algunas áreas, a la regresión de la vegetación acuática. Las plantas preferidas por el ganado son *Totora* y *Ruppia*. Además del pastoreo directo en las llanuras de inundación del lago seco, tradicionalmente los agricultores locales cosechan en forma particular biomasa de *Totora* para alimentar ganado. El consumo diario de *Totora* como forraje en los alrededores del lago Uru Uru se estimó en 1 400 kg.

### 7.4.2 Contenido de metales en los tejidos macrofitos

Para evaluar el grado general de contaminación por metales en la biota del lago Uru Uru, así como la biodisponibilidad de los metales que se presentan en los sedimentos, se tomaron muestras de la macrofita acuática *Totora* (*Schoenoplectus totora*), y se analizaron sus tejidos

Se usaron las imágenes satelitales Landsat TM del 1 de octubre de 1994 para identificar áreas con denso crecimiento de Totorá, utilizando métodos standard de clasificación de imágenes. Por medio de la tecnología fue posible identificar áreas con Totorá a una distancia de las áreas ya observadas, por ejemplo en la planicie inundada, al oeste y sudoeste del lago Uru Uru. No obstante, el muestreo se concentró en el perímetro del lago Uru Uru y del río Tajarita, donde los brotes nuevos fueron accesibles durante el muestreo de 1995. Se obtuvo un material relativamente extenso, con 30 muestras recolectadas en el lago Uru Uru, y se hicieron análisis separados de los tejidos del tallo y de las raíces. El muestreo se realizó en agosto de 1995 y los análisis de los tallos representan por lo tanto un período completo de crecimiento anual. En la *Tabla 7.7*, y las *Figuras 7.3 - 7.8*, se presentan los resultados.

*Tabla 7.7 Niveles de metales en tallos y raíces de Totorá (Schoenoplectus totora) del lago Uru Uru. Análisis hechos por Svensk Grundämnesanalys AB para peso seco.*

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	Se	Sn	Ta	Zn
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	µg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
<b>Tallos de Totorá n=31</b>												
Max	47	12	9,1	46	72	42	61	4,7	286	30	20	650
percentil-90	14	1,8	3,6	24	49	3,2	12	2,4	100	2,6	12	200
percentil-75	7	0,2	2,4	9	27	1,4	5	1,6	84	1,3	10	37
percentil-50	3	0,06	1,8	5	16	0,7	2	1,0	61	0,4	6	22
percentil-25	1,8	0,04	1,2	4	6	0,4	1	0,7	46	0,1	2	13
percentil-10	1,0	<0,004	0,6	3	<30	<0,01	0,8	0,25	36	0,05	<0,008	10
Min	0,04	<0,004	0,1	1,8	<30	<0,01	0,5	0,05	32	0,04	<0,008	7,8
<b>Raíces de Totorá n=28</b>												
Max	45	5	4,2	58	129	16	18	1,8	235	0,7	15	275
percentil-90	17	0,6	2,0	36	35	1,5	6	1,0	40	0,2	6	226
percentil-75	10	0,2	1,4	28	32	1,1	3	0,3	28	0,07	4	121
percentil-50	7	0,05	1,1	20	18	0,8	1	0,2	22	0,04	3	65
percentil-25	4	0,01	0,5	13	9	0,4	0,6	0,1	16	0,02	2	33
percentil-10	3	<0,004	0,4	8	6	0,08	0,2	0,05	14	0,007	<0,008	23
Min	0,8	<0,004	0,3	5,5	4	<0,01	0,1	0,04	12	0,004	<0,008	17
<b>Niveles comunes en plantas</b>	0,5 - 1,5	<0,9	0,1 - 0,5	5 - 30	<300	0,2 - 5	0,07 - 5,4	-	-	-	-	20 - 150

Si se toma el cociente de los valores del percentil-90 y el percentil-10 como un indicador de la variación entre las áreas de mucha y poca exposición a los metales, y en consecuencia del potencial relativo de bioconcentración, se puede observar que el valor máximo se obtiene para el cadmio seguido por el de estaño. Los cocientes de los otros elementos son de 20 o menos. Una conclusión probable puede ser que el cadmio es el metal con el mayor grado de biodisponibilidad en el lago Uru Uru, seguido del estaño y el zinc. La observación de que el cadmio y el zinc tienen una fuerte tendencia a ser bioconcentrados en el tejido de las plantas, es coherente con los conocimientos generales sobre el comportamiento de estos metales en el medio ambiente. No obstante, la indicación de que también el estaño tiende a una eficiente bioconcentración es una observación novedosa y requiere estudios posteriores.

**Tabla 7.8** Coeficientes de correlación entre niveles de metales en sedimentos con niveles en raíces y tallos de Totora y entre niveles en tallos versus los de raíces. Muestras del lago Uru Uru. NS = no significativo en el nivel  $p < 0,001$ , "-" = faltan datos.

	As	Cd	Cr	Hg	Se	Ta	Sb	Sn	Pb	Cu	Zn	Ni
<b>Sedimentos vs tallos</b> n = 31	NS	NS	-	NS	-	-	NS	NS	NS	NS	NS	NS
<b>Sedimentos vs raíces</b> n = 28	0,78	0,60	-	NS	-	-	0,60	NS	0,93	NS	NS	0,79
<b>Tallos vs raíces</b> n = 27	NS	NS	NS	0,61	0,86	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Se ha realizado un estudio de correlación entre el contenido de metales en sedimentos, raíces y tallos de Totoras para evaluar la ruta más plausible de incorporación de metales en el tejido de estas plantas, ver *Tabla 7.8*. Este cálculo muestra una correlación numérica muy significativa entre los niveles de antimonio, arsénico, cadmio, plomo y níquel en los sedimentos y en las raíces de totoras indicando que estos elementos son incorporados quizás preferentemente de los sedimentos. Sin embargo no se ha notado una correlación importante entre el contenido de elementos en los sedimentos y en los tallos de totoras, y exceptuando el Hg y el Se, tampoco se encontró correlación entre las concentraciones en tallos y en raíces. Además, el promedio de los niveles de concentración de cadmio, cromo, plomo, antimonio, selenio y estaño son sistemáticamente más elevados en raíces que en tallos. El estaño muestra la acumulación más alta en tallos, tanto con respecto a raíces (10 a 40 veces más) como a sedimentos. De hecho, la concentración de estaño en raíces es la menor de todos los metales estudiados. Notar que los tallos son de crecimiento anual y por tanto sólo pueden retirar los elementos de las raíces "periódicamente". Solo el arsénico, cobre, mercurio y zinc demuestran niveles de concentración mayores en las raíces que en los tallos.

De todo lo que se ha dicho se puede deducir que (a) la mayoría de los elementos no son transportados prontamente de las raíces a los tallos y (b) se debe procurar una explicación alternativa para la acumulación de cadmio, plomo, antimonio y estaño en los tallos.

Como el lago Uru Uru está ubicado en área de la pluma de emisión de Vinto, y los principales constituyentes de las emisiones son estaño, antimonio, cadmio y plomo (además de  $SO_2$ , arsénico y mercurio), (ver Aerocomp 1996 y PPO-9715), se puede especular que una gran parte de estos elementos ha sido incorporada por los tallos de totora directamente de las partículas aéreas, sin "reprocesamiento" a través de sedimentos y raíces. La hipótesis se corrobora también por la distribución espacial del crecimiento de totora con elevadas concentraciones de estaño y antimonio en los tallos (ver *Figura 7.3* y *7.5*; notar la diferente escala de las figuras), coincidiendo con el área de la pluma (ver PPO-9608, *Figura 3.4*). Para el cadmio y el arsénico (*Figura 7.4* y *7.6*), esta relación es evidente sólo en el eje de la pluma. La distribución espacial del mercurio en tallos (*Figura 7.8*) coincide con los resultados de los análisis estadísticos, indicando tanto la translocación desde las raíces a los tallos como la incorporación por deposición atmosférica.

El posible mecanismo de bioacumulación de sustancias provenientes directamente de la deposición atmosférica, en tallos de totora, es desconocido y la problemática requiere de estudios posteriores.

Los resultados de los estudios sobre el contenido de metales en tejidos de totora puede compararse con los estudios de quinua (ver informe PPO-9710). Los estudios experimentales de los factores que influyen los niveles de metales en quinua indican que el arsénico, mercurio y antimonio (pero no cadmio) provenientes del aire, tienen mayor impacto en las plantas que los del suelo, conclusión consistente con los datos de concentraciones de metales en tejidos de quinua.

**Figura 7.3**

*Concentraciones de estaño en tallos, raíces y sedimento substrato, en barras rojas, verdes y azules. El rectángulo negro indica 0.5 mg/kg ps para tallos y raíces, 2.5 mg/kg ps para sedimentos. Las áreas amarillas indican densos crecimientos de totora de acuerdo a la interpretación de imágenes satelitales. Ausencia de barra = sin análisis*



Figure 7.3

Tin concentrations in Totora stems, roots and the substratum sediment as red, green and blue bars. Black rectangle behind bars indicates 0.5 mg/kg DW for stems and roots, 2.5 mg/kg DW for sediment. Yellow areas are dense totora growth according to satellite image interpretation. No bar means no analysis made.

**Figura 7.4** *Concentraciones de cadmio en tallos, raíces y sedimento substrato, en barras rojas, verdes y azules. El rectángulo negro indica 0.1 mg/kg ps para tallos y raíces, 0.5 mg/kg ps para sedimentos. Las áreas amarillas indican densos crecimientos de totora de acuerdo a la interpretación de imágenes satelitales. Ausencia de barra sin análisis.*

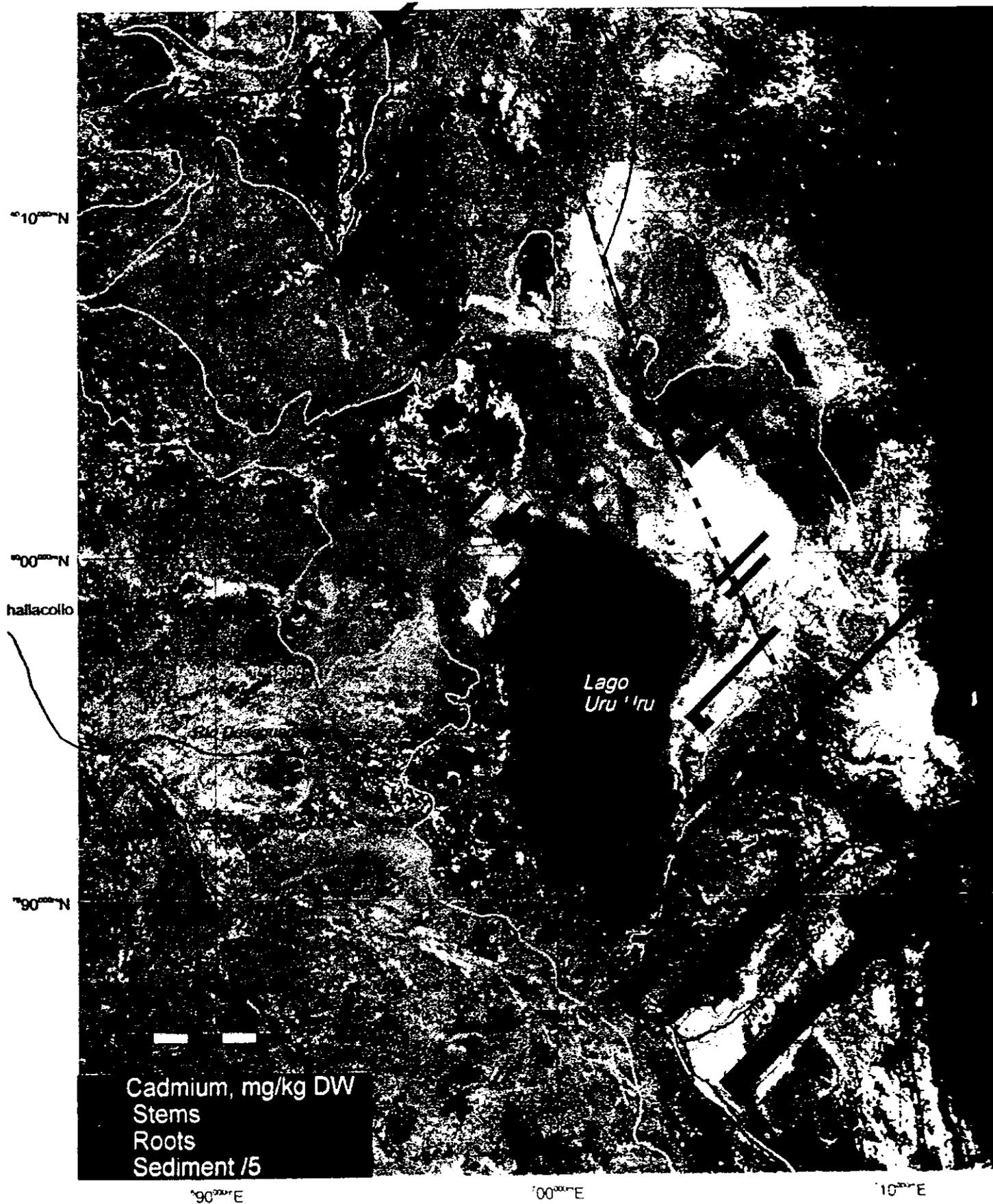


Figure 7.4

Cadmium concentrations in *Tofora* stems, roots and the substratum sediment as red, green and blue bars. Black rectangle behind bars indicates 0.1 mg/kg DW for stems and roots, 0.5 mg/kg DW for sediment. Yellow areas are dense *totora* growth according to satellite image interpretation. No bars means no analysis made.

*Figura 7.5 Concentraciones de antimonio en tallos, raíces y sedimento sustrato, en barras rojas, verdes y azules. El rectángulo negro indica 100  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  ps para tallos, raíces y sedimentos (todos en la misma escala). Las áreas amarillas indican densos crecimientos de tatora de acuerdo a la interpretación de imágenes satelitales. Ausencia de barra = sin análisis.*



**Figure 7.5**

*Antimony concentrations in Fotora stems, roots and the substratum sediment, as red, green and blue bars. Black rectangle behind bars indicates  $100 \mu\text{g}/\text{kg DW}$  for stems and roots and sediment (note same scale all three). Yellow areas are dense totora growth according to satellite image interpretation. No bar means no analysis made.*

**Figura 7 6**

*Concentraciones de arsénico en tallos, raíces y sedimento substrato, en barras rojas, verdes y azules. El rectángulo negro indica 5 mg/kg ps para tallos y raíces, 25 mg/kg ps para sedimentos. Las áreas amarillas indican densos crecimientos de totora de acuerdo a la interpretación de imágenes satelitales. Ausencia de barra = sin análisis.*

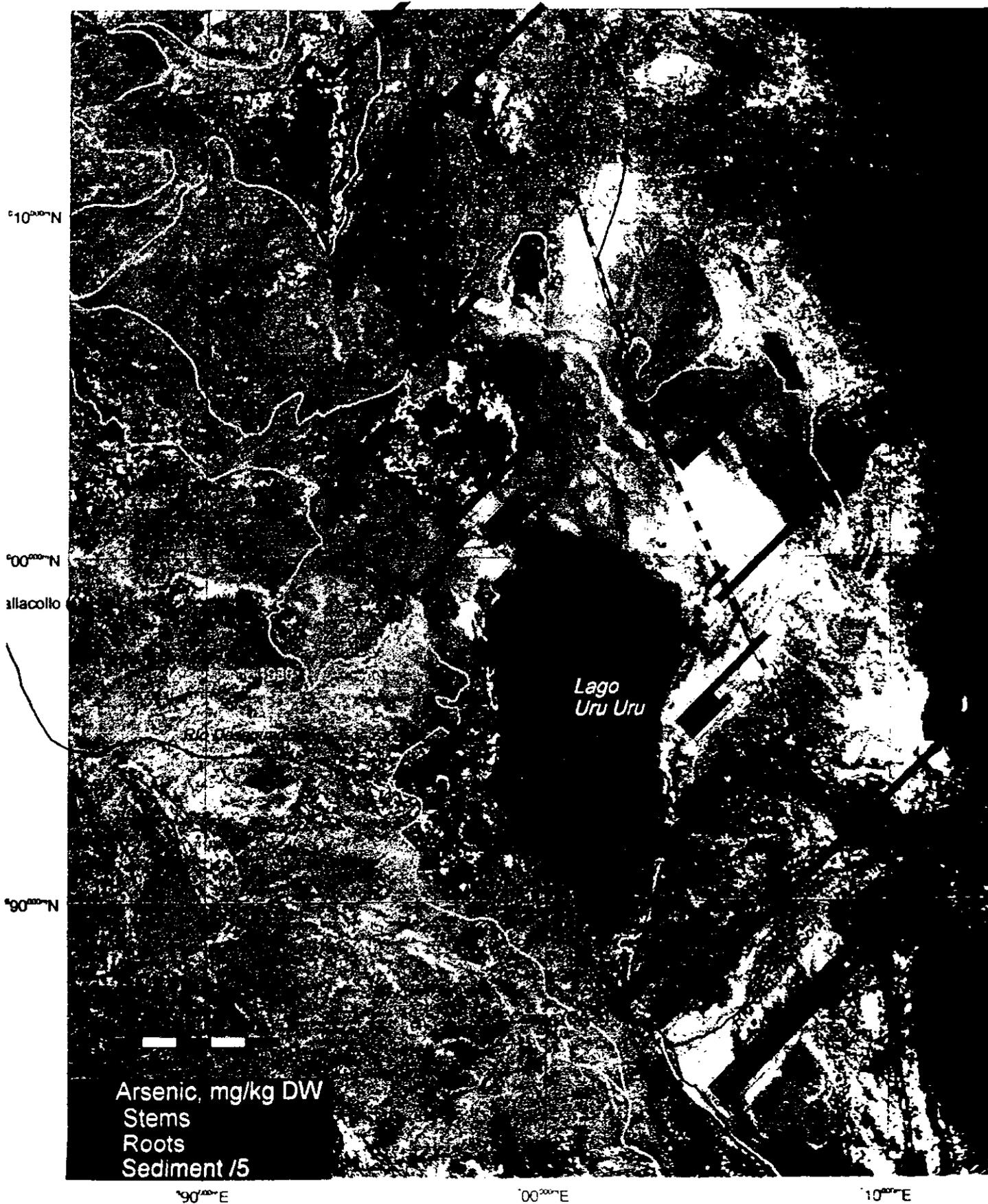


Figure 7.6

Arsenic concentrations in *Totora* stems, roots and the substratum sediment, as red, green and blue bars. Black rectangle behind bars indicates 5 mg/kg DW for stems and roots, 25 mg/kg DW for sediment. Yellow areas are dense totora concentrations according to satellite image interpretation. No bars indicates no analysis made

**Figura 7.7** *Concentraciones de plomo en tallos, raíces y sedimento substrato, en barras rojas, verdes y azules. El rectángulo negro indica 5 mg/kg ps para tallos y raíces, 25 mg/kg ps para sedimentos. Las áreas amarillas indican densos crecimientos de totora de acuerdo a la interpretación de imágenes sateliales. Ausencia de barra sin análisis.*



Figure 7.7

Lead concentrations in Totora stems, roots and the substratum sediment, as red, green and blue bars. Black rectangle behind bars indicates 5 mg kg DW for stems and roots, 25 mg kg DW for sediment. Yellow areas are dense totora growth according to satellite image interpretation. No bars indicates no analysis made.

**Figura 7.8**

*Concentraciones de mercurio en tallos, raíces y sedimento substrato, en barras rojas, verdes y azules. El rectángulo negro indica 5  $\mu\text{g}/\text{kg}$  ps para tallos y raíces, 25  $\mu\text{g}/\text{kg}$  ps para sedimentos. Las áreas amarillas indican densos crecimientos de totora de acuerdo a la interpretación de imágenes satelitales. Ausencia de barra = sin análisis.*

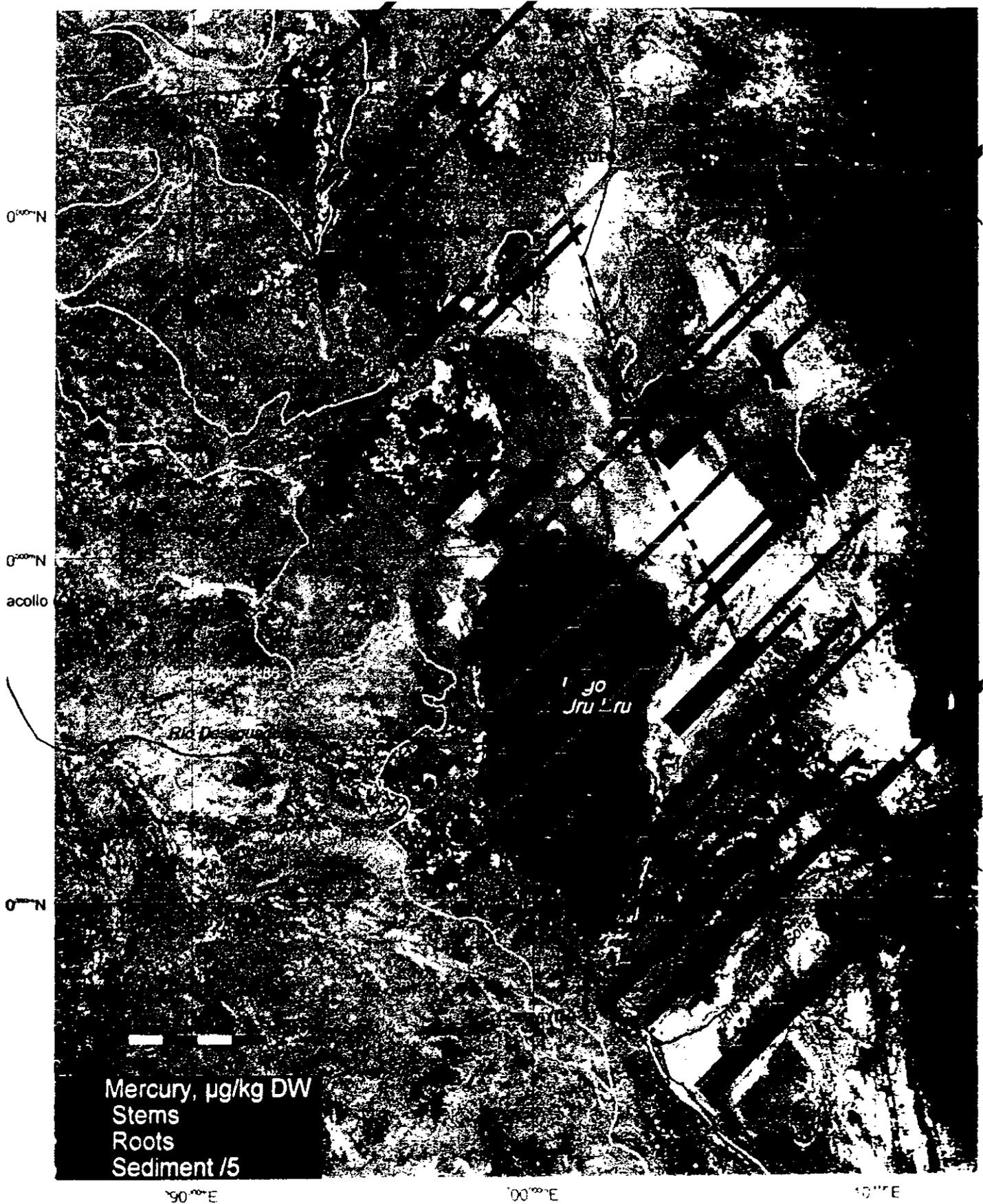


Figure 7.8

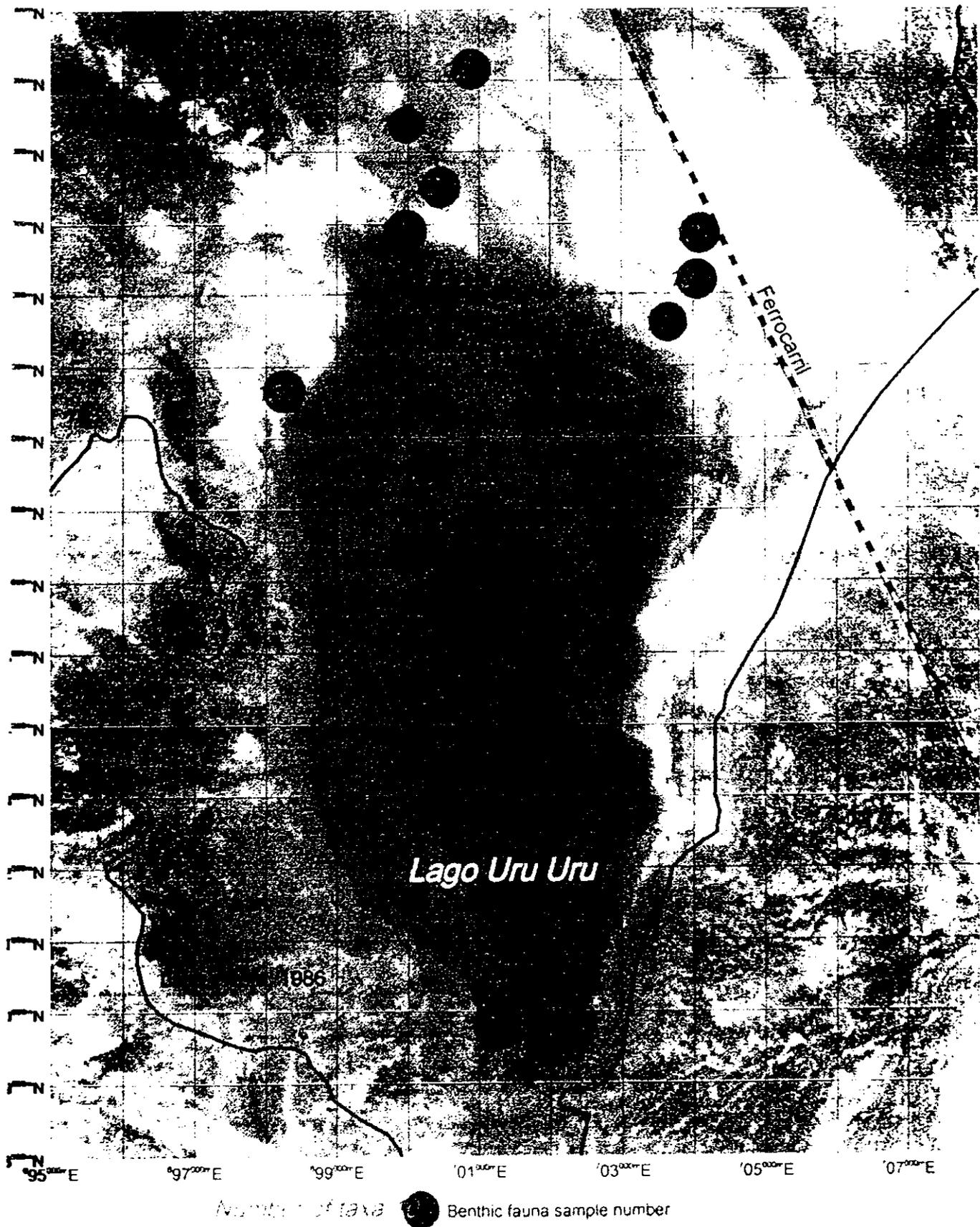
Mercury concentrations in *Totora* stems, roots and the substratum sediment, as red, green and blue bars. Black rectangle behind bars indicates  $5 \mu\text{g}/\text{kg DW}$  for stems and roots,  $25 \mu\text{g}/\text{kg DW}$  for sediment. Yellow areas are dense *totora* growth according to satellite image interpretation. No bars indicates no analysis made.

### **7.4.3 Fauna béntica**

**Las muestras de fauna béntica fueron tomadas en 25 lugares, distribuidos en el lago Uru Uru como se muestra en la Figura 7.9. Ninguno de los puntos de muestreo estuvieron situados al este de la ferrovía que cruza el lago.**

La fauna en la parte sudoeste del lago es aparentemente normal para el Altiplano, con 8 - 13 taxas identificadas en las diferentes estaciones de muestreo (Tabla 7.9). Grupos sensibles como anfipodas y/o efemerópteras estaban presentes en todas las estaciones de muestreo. La distribución faunística es también regular en todo el lago. No se encontró relación entre el número de taxa y los niveles de metales en los sedimentos. Aparte de los grupos animales mencionados en la Tabla 7.9, se observaron ocasionalmente camarones simples (Euphillopoda).

La parte altamente contaminada del lago, situada al noreste de las vías del ferrocarril, está generalmente seca. Se hicieron algunos muestreos esporádicos de la fauna béntica en esta parte cuando había agua pero no se la halló en ninguna de las muestras.



**Figure 7.9**

*Sampling locations (black text) and frequency of taxa (red text, scaled green circles) of benthic fauna in Lake Uru Uru. Background - Landsat TM satellite image Oct. 1, 1994, bands 3,2,1.*



## 8 LAGO POOPÓ

### 8.1 Información Hidrológica

#### 8.1.1 Descripción general

El lago Poopó está situado entre los 18°21' y los 19°10' de latitud sur y entre los 66°50' y los 67°24' de longitud oeste. La altura media de la superficie del lago es de 3 686 m. Los principales elementos del sistema hidrológico de la cuenca endorreica del Altiplano -Lago Titicaca, Río Desaguadero y Lago Poopó - han sido descritos en los informes PPO-9603 y PPO-9606. Como se muestra en ellos, la descarga del río Desaguadero tiene una alta correlación con el nivel de agua en el lago Titicaca, y siendo que el balance hídrico del lago Poopó es extremadamente sensible al flujo de ingreso del Desaguadero, el volumen y extensión de este lago varían con el nivel de agua en el Titicaca. El aporte anual promedio del río Desaguadero al lago Poopó, durante el periodo 1975 - 1995 representó cerca del 80 % del ingreso total, que se estima en 3 800 m<sup>3</sup>. El aporte anual promedio de este importante río corresponde a un 150 % del volumen promedio del lago, estimado en 2 000 millones de m<sup>3</sup>. La evaporación lacustre promedio (del área de ambos lagos, 2 100km<sup>2</sup>) se estima en 1 875 mm, correspondiendo a un volumen de aproximadamente 3 900 millones de m<sup>3</sup>. Por ello es evidente que durante un año de sequía, virtualmente sin flujo de ingreso, el Poopó se secará completamente después de un periodo de 6 a 12 meses

Estas consideraciones muestran claramente que no vale la pena analizar la hidrología del lago Poopó en base a datos promedio de un periodo de varios años, si no se toman en cuenta las variaciones de año en año en la precipitación y el aporte y particularmente las variaciones en el nivel de agua en el lago Titicaca. Gracias a un gran número de estudios sobre las fluctuaciones de nivel de agua en el lago Titicaca y el análisis de sus causas, se dispone de una base de datos relativamente completa, que cubre un largo periodo. Para tener una mejor comprensión de las grandes variaciones en los parámetros hidrológicos del lago Poopó, es pertinente presentar una breve descripción de las principales características de la situación en el lago Titicaca

#### 8.1.2 Registros históricos del nivel del lago Titicaca y su consecuencia para el lago Poopó

Durante el último periodo interglacial ( hace aproximadamente 13 000 a 27 000 años) la parte sur del Altiplano estaba cubierta por el enorme lago Minchin (60 000 km<sup>2</sup>) Después de la última glaciación, Choqueyapu II, el lago Tauca cubría un área de unos 43 000 km<sup>2</sup> en el Altiplano sur (PPO-9603). Su elevación descendió de aproximadamente 3 815 m a cerca de 3 750 m hace alrededor de 8 000 años. Entonces, el lago Tauca se secó hace unos 7 000 años (Martin et al., 1993)

Empleando una función de transferencia basada en los registros de la fauna de ostrácodos en los sedimentos, se reconstruyeron los últimos 7 000 años de fluctuaciones del nivel de agua en el lago (Mourguiart y Roux, 1990) Estos datos indican que la subcuenca sudeste del lago Titicaca alcanzó su nivel más bajo hace alrededor de 7 500. y que el nivel fluctuó en torno a una posición 18 m más baja que la actual, en el periodo hasta hace 3 900 años. Entre 3 900 y 3 000 años antes del presente (A.P.), el nivel del agua se elevó a -6 m, como consecuencia de un clima húmedo. Posteriormente, el nivel mostró fluctuaciones relativamente fuertes, aunque la tendencia general fue de ascenso al nivel presente de 3 809 m, que parece haber sido alcanzado por primera vez (en la era moderna) hace unos 1 300 años. Es altamente improbable que durante el periodo 7500 - 1300 A.P., haya habido alguna

descarga del lago Titicaca y transporte de aguas hacia el sur, hacia la localización presente del lago Poopó.

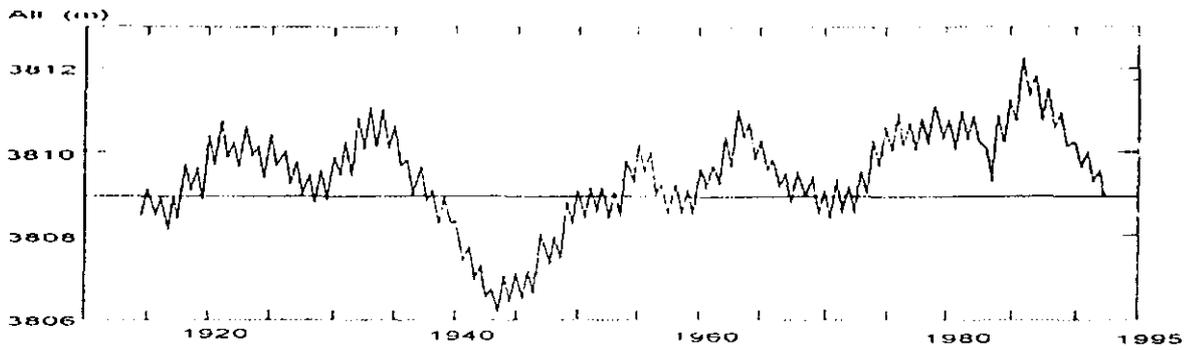
Se sugirió (Martin et al., 1993) que las fluctuaciones en el nivel de agua en el lago Titicaca estuvieron (y están) fuertemente regidas por la Oscilación Austral, llamada eventos de "El Niño". Fuertes eventos de El Niño generan grandes anomalías pluviales y cambios en los patrones de vientos en Sud América, caracterizados por una declinación de la zona de convección, normalmente centrada en el Amazonas, hacia el oeste. Esta declinación promueve precipitaciones anómalamente fuertes en el norte del Perú y falta de lluvias en el Altiplano Boliviano. Inversamente, en periodos sin fuertes eventos El Niño, la lluvia en el Altiplano aumenta y esto puede ocasionar el aumento del nivel de agua en el lago Titicaca. La frecuencia del evento de El Niño se mostró muy irregularmente distribuida durante el periodo analizado. Por ejemplo: observaciones de otras partes del continente indican que entre 3 900 y aproximadamente 2 700 años A.P., no hubieron condiciones importantes semejantes a El Niño en el Altiplano Boliviano, y consecuentemente el clima debió ser en promedio más húmedo que antes (cuando tales condiciones eran frecuentes). Este fue también el periodo en el que aumentó el nivel de agua en el lago Titicaca (Martin et al., 1993). Durante las últimas centurias, la frecuencia del evento de El Niño tendió a aumentar, y el nivel del lago fue, en promedio, mayor que en siglos anteriores. Lo que tuvo, obviamente, una influencia decisiva en la salida de agua por el río Desaguadero, y por lo tanto, en la formación y ocasional existencia del lago Poopó durante los últimos siglos.

En particular, durante la llamada "Pequeña Era Glacial", en los siglos XVII y XVIII, hay indicaciones de que el nivel del lago Titicaca era de 3 813 m (Mourguiart, comentario personal) y que durante este periodo es altamente probable que el Desaguadero haya sido activado y que existiera el lago Poopó. Debe también tomarse en cuenta, que en un mapa de Bolivia de 1855, se muestra un lago Poopó con una extensión tan grande como la de 1986. Por otra parte, mapas más antiguos, de los 1840s, muestran un lago más pequeño e incluso ninguno. Sin embargo, al inicio del siglo XX, observaciones directas del nivel del lago Titicaca mostraron que se encontraba por debajo de los 3 809 m entre 1915 y 1920 (Pourchet et al., 1994), lo que probablemente significa que el lago Poopó no existía en ese periodo.

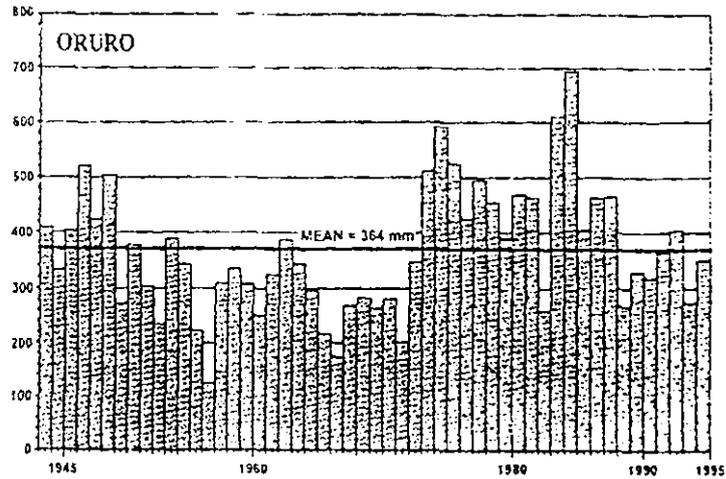
En un año normal, el nivel del lago Titicaca desciende unos 75 cm durante la estación seca entre mayo y octubre, y sube una cantidad similar en la estación húmeda de noviembre a marzo (Carmouze and Aquize Jaen, 1981). Las observaciones realizadas durante el siglo XX muestran claramente que durante los eventos de El Niño, el ascenso del nivel de agua en la estación húmeda es marcadamente menor o puede no ocurrir (Francou and Pizarro, 1985). Por otro lado, durante los años Anti-El Niño, el incremento de lluvias hace que el nivel del lago se eleve constantemente. Por ejemplo, durante el periodo 1936 - 1943, caracterizado por repetidas ocurrencias de los eventos El Niño, la reducción del nivel alcanza a un descenso neto de 3 m (ver *Figura 8.1*). Durante los años normales 1944 a 1946, el nivel del lago se mantuvo en esa posición. Posteriormente, entre 1947 y 1963, un periodo marcado por cuatro ocurrencias de los eventos Anti-El Niño, el incremento de la precipitación provocó un incremento neto de 3 m en el nivel del lago.

### 8.1.3 Evolución reciente del lago Poopó

En años recientes, el nivel de agua del lago Titicaca se incrementó intermitentemente de menos de 3 807 m, en 1944, a un máximo de 3 812 m, en 1986/87. Sin embargo, durante los 1980s se



a)



b)



c)

Estado del Lago Poopo

??	?	XXX	??	XX	X	XX
XX = Periodo de desecación reportado				?? = Posible periodo de desecación		
1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980
						1990

Figure 8.1. a) Variaciones observadas en el nivel de agua del lago Titicaca (Paorchet et al. 1994), b) datos de precipitación registrados en Oruro (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, SENAMHI) y c) flujos medidos en el río Desaguadero a la altura de Ulluma (SENAMHI), chronologically aligned cronologicamente alineados. Al pie se muestran los efectos reportados o posibles sobre el Lago Poopo

observaron fuertes fluctuaciones. Por ejemplo, en 1983, cuando ocurrió un fuerte evento de El Niño, el nivel de agua bajó más de 1 m, y el flujo medio anual medido en el Desaguadero (en Chuquiña) fue de 28.7 m<sup>3</sup>/s (PPO-9606). Ese año el lago Poopó estuvo casi completamente seco (Mourguiart and Roux, 1990). El periodo siguiente, 1984 - 1987, se caracterizó por dos fuertes Anti-El Niño, y el nivel en el lago Titicaca alcanzó su posición máxima, mientras que el flujo medio anual estimado en el río Desaguadero (en PPO-9606) varió entre 130 y 280 m<sup>3</sup>/s (con picos mensuales de cerca a 500 m<sup>3</sup>/s). La consecuencia fue una tremenda expansión del lago Poopó, que alcanzó una superficie de aproximadamente 3 500 km<sup>2</sup> en 1986, y una profundidad máxima de cerca a 9 m (Mourguiart and Roux, 1990). Los años siguientes, el nivel del Titicaca descendió nuevamente a aproximadamente a 3 809 m, en 1993/94, y el flujo medio anual estimado fluctuó entre 15.5 y 22.9 m<sup>3</sup>/s de 1992 a 1995 (PPO-9606). Sin que deba sorprender, durante los últimos años el lago Poopó cesó de existir como lago con superficie de agua visible. Consecuentemente, parece ser que cuando el nivel de agua del Titicaca desciende a menos de 3 810 m, la salida por el Desaguadero llega a ser tan baja que el aporte al lago Poopó no puede compensar las pérdidas por evaporación y la infiltración. El resultado es la desaparición del lago.

Es importante mantener en mente estas fuertes fluctuaciones hidrológicas y los cambios rápidos y frecuentes entre la existencia del lago y su desecación cuando se discutan los aspectos ecológicos del lago Poopó. Excepto para la desecación ocurrida en 1983, parece que el periodo entre 1975 y 1992 fue el más largo, en tiempos modernos, con una existencia continua del lago como verdadero ecosistema límnicó.

#### *8.1.4 Cambios Geográficos de los afluentes y de la morfología del lago Poopó*

Antes de 1985, todo el flujo del Desaguadero al lago Poopó pasaba por el área del actual lago Uru Uru, y de este lago, las aguas fluían hacia el sur por un canal estrecho hasta el límite norte del lago Poopó. Con esta configuración de ingreso, se investigó el lago Poopó a fines de los 70s (Iltis, 1977, Boulangé et al, 1978). Durante aquel periodo de tiempo, la máxima profundidad del lago fluctuó entre 2.20 m, en la estación húmeda, y 1.60 m, en la estación seca. Se podían distinguir dos diferentes zonas: una región central de aproximadamente 1 500 km<sup>2</sup>, donde la profundidad variaba, en la estación húmeda, entre 0.50 y 2.20 m, y una región periférica, que podía alcanzar los 1 000 km<sup>2</sup> de extensión, con una profundidad menor a 0.50 m. Observaciones posteriores, en 1979, dieron una profundidad máxima de 2.90 m y una superficie total de aproximadamente 2 700 km<sup>2</sup>. En este periodo no había salida del lago Poopó. En este lago de poca profundidad de antes de 1985, se notaba una fuerte gradiente de norte a sur en la salinidad del agua.

Durante el periodo de flujo excepcionalmente alto, que se inició en enero de 1984 y continuó por aproximadamente 3.5 años, el Desaguadero cambió su curso en las partes bajas y se descargó no sólo pasando por el lago Uru Uru, sino también directamente en la parte noroeste del lago Poopó mismo. Como se mencionó anteriormente, este agudo incremento en el ingreso dio lugar a la expansión de la superficie del lago hasta cerca de 3 500 km<sup>2</sup> y un aumento de la profundidad máxima hasta 9 m (según Mourguiart y Roux, 1990) o 6 m (de acuerdo a Iltis, 1993). La gradiente de salinidad del agua del lago desapareció y ésta se volvió uniforme en todo el lago. Sin embargo, mostró variaciones temporales muy fuertes para un mismo punto: la salinidad descendió de cerca a 80 g/l, en 1983, a 8 g/l en 1987 (Mourguiart y Ropux, 1990), como resultado de la dilución ocasionada por la cantidad de agua de ingreso.

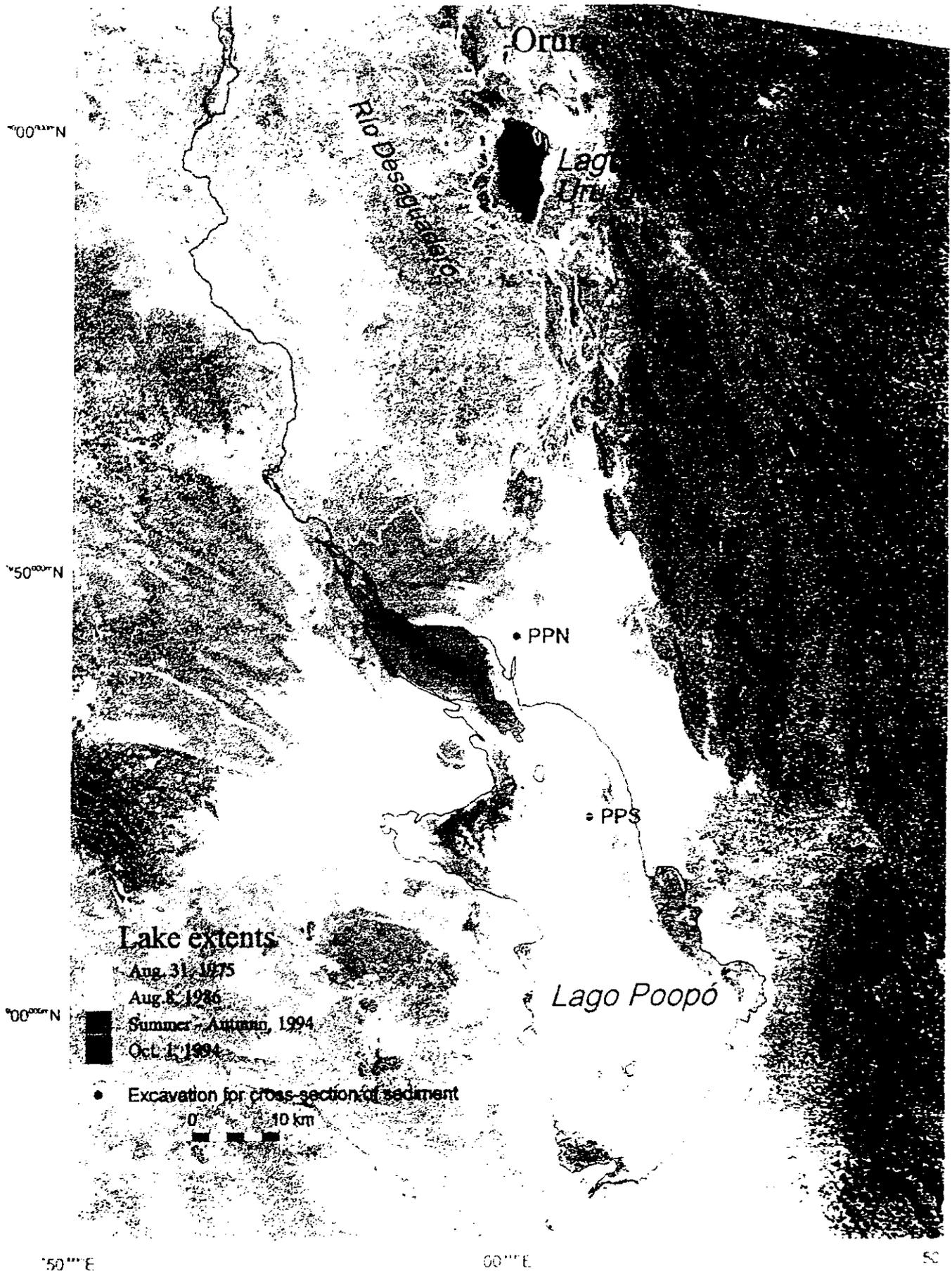


Figure 3.8

Extents of Desaguadero River Lake Poopó system, from Landsat TM satellite images. Image shown, Oct. 1, 1994, bands 3,2,1 as R,G,B.

En los años de máxima extensión del lago se reactivó la salida temporal austral por el río Laca Jahuirá, que fluía hacia el oeste, al salar de Coipasa. El tiempo de vida de esta descarga fue, sin embargo, relativamente breve, puesto que cuando el aporte anual medio del Desaguadero desciende por debajo de 160 m<sup>3</sup>/s, no puede equiparar por mucho tiempo la pérdida por evaporación (en la máxima extensión del lago), y esto sucedió ya durante el año hidrológico 1987/88.

Desde 1988, la superficie del lago fue decreciendo sucesivamente, lo que significa que durante la existencia del PPO casi no se observó agua en el lago, y del río Laca Jahuirá sólo quedaba un charco estancado, evidentemente alimentado por descargas de agua subterránea. Las extensiones de los lagos Poopó y Uru Uru en las ocasiones cuyas imágenes satelitales están disponibles, se muestran en la *Figura 8.2*, superpuestas a una imagen Landsat TM de octubre de 1994. Las tres imágenes dan la extensión del lago en agosto de 1975, agosto de 1986 y octubre de 1994 (del informe PPO-9603). La línea anaranjada (1975) muestra una extensión del lago Poopó relativamente grande, cerca de 2 200 km<sup>2</sup>, y la del lago Uru Uru. El único ingreso al lago Poopó, a través del Uru Uru, se aprecia claramente. La línea amarilla (1986) indica la máxima extensión de lago en tiempos recientes y muestra en forma clara los dos ingresos al lago. La conclusión de que esta imagen muestra la máxima extensión de lago Poopó se apoya además en el hecho de que la orilla noroeste coincide con el límite de antiguas dunas intercaladas con una costra de sal, que está bien delimitada en el terreno. Se asume que la línea magenta muestra la extensión de áreas húmedas en el lago, en octubre de 1994, como indica la Banda infrarroja 7 de Landsat. Probablemente estas áreas húmedas estuvieron cubiertas por algo de agua en un momento anterior de la estación. Las áreas que realmente permanecían con agua al tiempo de la imagen (Oct. 1, 1994) son sólo aquellas sombreadas con un gris muy oscuro, indicadas por una línea verde, al norte y a lo largo del flanco oeste del lago Poopó y en el lago Uru Uru.

## 8.2 Transporte de metales al lago Poopó

Existe una cantidad de datos antiguos sobre concentraciones de elementos en el agua del lago Poopó, en particular aquellos presentados por Beveridge (1983) y Quintanilla y Lorini (1993). Sin embargo, las dos series de datos muestran grandes diferencias, siendo las más destacadas las generalmente bajas concentraciones registradas en el último muestreo. Por ejemplo, los valores de Beveridge para antimonio varían entre 0.5 y 2.9 mg/l, y los de Quintanilla de 0.04 a 1.8 mg/l. Similares diferencias se presentan también en otros elementos. Sin embargo existen algunas cifras confusas en la última serie de datos. Así, según Quintanilla y Lorini, las concentraciones promedio de metales y metaloides en las aguas son diferenciadamente mayores que las concentraciones promedio en los principales afluentes del lago analizados por el PPO. La explicación probable es que en los anteriores estudios del lago se tuvieron grandes dificultades analíticas.

Durante el trabajo de campo del PPO, había poca o ningún agua en el lago. Consecuentemente, no fue posible un muestreo significativo. Como una mejor aproximación a la calidad del lago, se pueden utilizar las concentraciones registradas en las estaciones de monitoreo de vario tributarios. (ver *Tabla 5.1*)

El lago Poopó es efímero, y la mayor parte del tiempo endorreico, con una salida que existe por cortos periodos, solamente cuando los niveles de agua están altos. Como se explica en el informe PPO-9606, las pérdidas de agua lacustre por infiltración en aguas subterráneas o por actividades humanas tienen un efecto muy pequeño. Consecuentemente, el lago Poopó representa un virtual sumidero para todos los metales que le llegan. La *Tabla 8.1* y el diagrama (*Figura 8.3*) dilucidan el transporte anual de azufre y de metales originados en dos fuentes principales la natural y la

antropogénica, hasta el lago. El transporte de elementos seleccionados mostrado en la *Tabla 8.1* debe ser tomado como una estimación muy aproximada, puesto que no toma en consideración las pérdidas por infiltración al agua subterránea, ni el efluvo de aguas subterráneas hacia las aguas superficiales entre las estaciones de muestreo y el ingreso real al lago. Por otro lado, las observaciones fueron realizadas en años en que el flujo de los ríos era generalmente bajo (bajo transporte de metal), y deben ser tomados como los ingresos mínimos al lago. Durante los periodos de crecida, la mayor parte del contenido metálico ingresa al lago, y como resultado de la evaporación, se precipita en los sedimentos del fondo. En periodos secos, como en casi todo 1994 y 1995, el agua del río desaparece en los sedimentos del lecho fluvial, antes de ingresar realmente al lago. Los metales disueltos son absorbidos por los sedimentos aluviales o transportados al agua subterránea. Las proporciones de transporte en las estaciones de observación con origen mixto, se basan en la relación de las concentraciones de fondo a las concentraciones de origen mixto observadas. Más adelante se muestran una matriz usada para los cálculos y comentarios específicos<sup>2</sup>. Las fuentes principales de flujo natural de metales son los ríos Desaguadero, Cortadera, Sevaruyo y Marquez. Las fuentes antropogénicas se originan de actividades mineras y de procesamiento de minerales en los centros mineros de San José/Itos, Antofagasta, Huanuni, Santa Fe, Japo, Morococala, Bolivar, Avicaya, Totoral y Poopó.

2 Matriz para calcular proporciones de transporte de metales de origen natural (N) y antropogénico (A) (en porcentaje) de varias estaciones monitoreadas

Estación		S	As	Cd	Cu	Fe	Pb	Sb	Zn
J	N, %	100	100	100	100	100	100	100	100
	A, %	0	0	0	0	0	0	0	0
CA	N, %	19	10	50	100	100	50	13	100
	A, %	81	90	50	0	0	50	87	0
M2	N, %	0	0	0	0	0.2	0	0	0
	A, %	100	100	100	100	99.8	100	100	100
P2	N, %	68	8	3	4	100	50 ?	100	6
	A, %	32	92	97	96	0	50 ?	0	94
PZ3	N, %	4	0.3	0	0	35	0.4	65	0.3
	A, %	96	99.7	100	100	65	99.6	35	99.7
JU	N, %	100	100	100	100	100	100	100	100
	A, %	0	0	0	0	0	0	0	0
CI	N, %	100	100	100	100	100	100	100	100
	A, %	0	0	0	0	0	0	0	0
SQ1	N, %	100	100	100	100	100	100	100	100
	A, %	0	0	0	0	0	0	0	0
MRI	N, %	100	100	100	100	100	100	100	100
	A, %	0	0	0	0	0	0	0	0

Comentarios al pie de página 1:

**Re. CA:** Concentraciones de la estación de Challacollo (CH) fueron usadas con valores de fondo para evaluar las proporciones "N2 y 2A" excepto para As y Pb, que se ajustaron con montos derivados de San José/Itos.

**Re. M2:** Valores de fondo de Huanuni usados para estimar "N" y "A"

**Re. PZ3:** Las concentraciones de DBI sirvieron de fondo para S, As, Sb y Zn, para los demás elementos, los valores de fondo de Huanuni.

**Re. JU:** Es la estimación menos fiable, basada en el flujo promedio asumido de 250 l/s durante 180 días por año y en las concentraciones medias de elementos

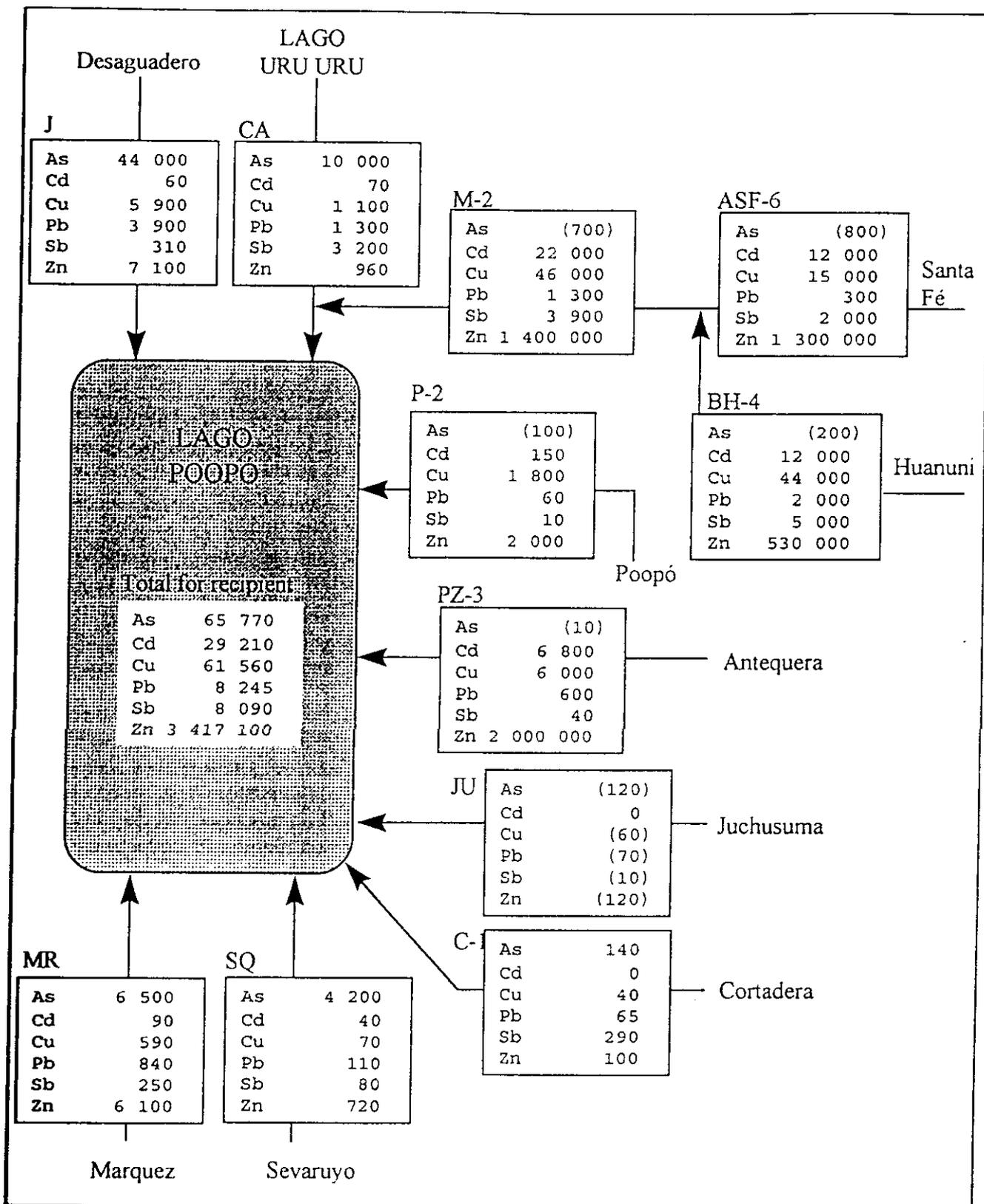


Figure 8.3 Annual surface water transport of metals into Lake Poopó, kg/year. The figures in brackets are uncertain.

**Tabla 8.1** Transporte estimado anual de azufre y metales seleccionados de origen natural (N) y antropogénico (A) al lago Poopó (en t/año) en aguas superficiales.

	S	As	Cd	Cu	Fe	Pb	Sb	Zn
<b>Origen Natural, t/año</b>	39 000	56	0.2	7	300	6	1	20
<b>Origen Antropogénico, t/año</b>	63 000	10	29	55	800	2	7	3 400
<b>Total, t/año</b>	102 000	66	29.2	62	1 300	8	8	3 420

Como se indica en la *Tabla 8.1*, una gran parte (85%) del arsénico transportado en aguas superficiales hacia el lago Poopó tiene origen natural: el intemperismo de vulcanitas del Mioceno en el área de captación del río Mauri (discutido en el informe PPO-9607) y vulcanitas del Mioceno tardío/Plioceno de la meseta de Los Frailes en las áreas de captación de los ríos Marquez y Sevaruyo (ver Capítulo 3 del presente informe). El aporte de arsénico ocasionado por la minería y el procesamiento de minerales, cuyo origen principal se encuentra en el centro minero de San José, es poco significativo. El antimonio de origen natural no sigue el mismo patrón que el arsénico, ya que por lo visto deriva más bien del cinturón de rocas sedimentarias del Paleozoico que hospedan mineralización de oro-antimonio. La fracción del flujo natural de antimonio se estima en un 12%. Un tanto sorpresivamente, el plomo de origen natural supera con creces a la fracción antropogénica llega al 75 % del aporte total de plomo. Su fuente dominante son las vulcanitas y mineralizaciones asociadas de la caldera Soledad (ver PPO-9607). Estas observaciones son extremadamente importantes, pues indican que la posibilidad de mejorar la calidad del agua del lago Poopó es limitada. Las fuentes geológicas de arsénico, antimonio y plomo no pueden ser eliminadas por ninguna acción humana imaginable.

Por otra parte, las fuentes antropogénicas de cadmio (así como las de cobre y zinc) dominan absolutamente el ingreso de estos metales en el lago. Es interesante notar que la razón de las cargas disueltas Zn/Cd difiere en las aguas provenientes de distintas subcuencas, 108 en las aguas de Santa Fe/Morococala, 44 en Huanuni, 13 en Poopó, y casi 300 en el agua de la subcuenca Antequera. La elevada contribución antropogénica del cobre puede rastrearse hasta los centros mineros de Huanuni y Santa Fe Japo.

Las proporciones del azufre antropogénico o natural fueron las más difíciles de estimar y deben ser tomadas con precaución. Parece ser que las evaporitas en la planicie del valle del río Desaguadero, en la subcuenca del río Marquez y las playas circundantes a los lagos Uru Uru y Poopó son las fuentes naturales de azufre más importantes. Pequeñas cantidades de azufre natural vienen de las áreas montañosas que rodean los centros mineros. Debe indicarse también que la contribución de azufre de deposición atmosférica originada en las emisiones de Vinto y de otras fundiciones, representa sólo una pequeña proporción del total. Aún si la cantidad total de azufre emitida por Vinto (cerca de 10 000 t anuales) terminara en el lago Poopó (lo que es muy poco probable) representaría solamente un 10 % del total de ingresos al lago.

## 8.3 Metales en los sedimentos del lago Poopó

### 8.3.1 Generalidades

Los sedimentos del lago están constituidos por capas consecutivas depositadas año tras año. Algunas sustancias, como metales muestran un débil transporte vertical en los sedimentos. Esto hace posible seguir la historia de la contaminación por análisis de las diferentes capas que forman el perfil vertical de los sedimentos.

La composición litológica de los sedimentos del fondo del lago Poopó fue estudiada por Bolulangé et al. (1978), que distingue cuatro fases -detritica, detritica-calcárea, organo-detritica y organo-calcárea. Estas fases son relevantes sólo para la capa superior de los sedimentos (0 - 10 cm). Los metales en los sedimentos del lago fueron analizados por Beveridge (1983). Así como los análisis de aguas, los resultados presentados por Beveridge (l.c.) son sistemáticamente más elevados que los registrados por el PPO, una diferencia que se explica por el desarrollo de las técnicas analíticas. De acuerdo a Bolulangé et al. (1978), la fase detritica consiste de arenas y arcillas que contienen más del 80% de residuos insolubles, menos de 10 % de material orgánico y de 0 a 20 % de carbonatos. La mayor parte de las arenas son eólicas. La fase detritico-calcárea contiene 40 a 80 % de residuos insolubles, menos de 10 % de material orgánico y 10 a 60 % de carbonatos. Las litologías prevaletes son arcillas y fangos calcáreos y arenosos, de color beige a gris verdoso, con grandes cantidades de shell-debris (gastropodos) que indican la baja profundidad del agua en el lago. Los sedimentos de la fase Organo-detritica contienen 60 a 80 % de residuos insolubles, 10 a 25 % de material orgánico y 0 a 30 % de carbonatos. Hay fangos arcillosos y arenosos de color beige, gris o verdusco, con manchas negras, ricas en material orgánico. Estos sedimentos contienen poca cantidad de shell-debris. En la fase organocalcárea, el sedimento contiene 40 a 60 % de residuo insoluble, 10 a 25 % de material orgánico y 15 a 50 % de carbonatos. El fango de esta fase es gris oscuro a negro, con pequeños gastropodos. Las fases organo-detritica y organo-calcárea indican aguas permanentes en esta zona limitada del lago, en el periodo anterior al muestreo (los años 70).

### 8.3.2 Métodos

El PPO excavó dos pozos, uno en la parte norte del lago, de 100 cm de profundidad, y otro en la parte sur, de 100 cm de profundidad (ver la Figura 8.4). El pozo norte (PPN) penetró un fango negro rico en material orgánico entre la superficie y los 30 cm de profundidad, y terminó en una arcilla gris verdusca. En la superficie y en la profundidad de 10 a 12 cm ocurren evaporitas salinas (que indican desecación). En el pozo sur (PPS), el fango orgánico negro ocurre entre la superficie y los 70 cm de profundidad y también yace sobre una arcilla gris verdusca. La evaporita salina ocurre en la superficie (desecación presente) y entre 20 - 22 cm y 50 -52 cm de profundidad. Evidentemente, las evaporitas fósiles se preservan sólo dentro de la fase rica en orgánico y está ausente de la fase detritica. Los pozos fueron muestreados en capas regulares de 5 cm. Adicionalmente se muestreó la costra de sal en la superficie. Las muestras de sedimentos fueron analizadas por Svensk Grundämnesanalys AB, Suecia. Las muestras fueron secadas a 60 °C, digeridas en autoclave con ácido nítrico en un horno de microondas. Una submuestra fue secada a 105 °C a fin de determinar el peso seco. El análisis subsecuente por Ag, Cd, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Sn y Zn fue realizado con ICP-MS y/o ICP-AES

### 8.3.3 Resultados de los análisis de metales

Los resultados de los análisis de elementos se muestran en la figuras 8.4, 8.5 y en la Tabla 8.2. Los sedimentos contaminados del lago fueron encontrados entre 0 y 85 cm de profundidad y el pozo norte y entre 0 y 60 cm en el pozo sur. Las concentraciones de metales en las capas inferiores, debajo de estos niveles pueden considerarse como "fondo local". La capa superficial de sedimento (0 - 5 cm) puede usarse para evaluar la contaminación contemporánea. A fin de ilustrar el grado de contaminación, también se muestra en la tabla 8.2 el "fondo global" para grauvacas (Wedepohl, 1991).

Los perfiles de las concentraciones de elementos muestran tres patrones diferentes. Los niveles de arsénico y manganeso son más altos en las capas sedimentarias inferiores que en la superficie. Los niveles de níquel son bastante uniformes en todo el perfil de sedimentos. Los elementos restantes muestran un incremento hacia la superficie del sedimento. La distribución vertical de los metales es independiente de las fases litológicas.

**Tabla 8.2** Lago Poopó, concentraciones promedio de sedimentos no contaminados y rangos de concentraciones en los sedimentos contaminados. Los datos se refieren a los dos pozos excavados por el PPO. Todos los valores están dados en mg/kg. Análisis por Svensk Grundämnesanalys. Con fines de comparación se incluye el "Fondo Global" en grauvacas (Wedepohl, 1991).

	Lago Poopó - Norte			Lago Poopó - Sur			Grauvaca Fondo
	media contaminada	85 - 5 cm de profundidad	5 - 0 cm prof.	media contaminada	60 - 5 cm de profundidad	5 - 0 cm prof.	
<b>Ag</b>	0.05	0.06 - 0.41	0.4	0.05	0.06 - 0.29	0.07	0.1
<b>As</b>	157	65- 214	88	135	64- 146	79	8
<b>Cd</b>	0.18	0.15 - 4.5	4.5	0.30	0.32 - 1.67	1.6	0.09
<b>Cu</b>	17	10- 67	51	11	8- 32	25	45
<b>Hg</b>	< 0.04	0.06 - 0.27	0.1	< 0.04	0.06 - 0.17	0.15	0.11
<b>Mn</b>	707	394- 1 150	410	430	205- 510	320	750
<b>Ni</b>	10	13- 20	13	9	7- 13	8	40
<b>Pb</b>	13	15- 65	46	9	10- 29	18	14
<b>Sb</b>	< 0.04	< 0.04 - 0.25	0.25	< 0.04	0.06 - 0.31	0.26	
<b>Sn</b>	0.4	0.5 - 3.1	2.8	0.6	0.7 - 3.6	3.2	3
<b>Zn</b>	40	37- 246	250	51	30- 200	190	105

En el caso del arsénico, manganeso y níquel, los datos de sedimentos muestran una clara evidencia de que las fuentes naturales, geoquímicas de esos metales son de vital importancia. El ingreso de estos

mentos al área era el mismo o mayor hace mucho tiempo, y no puede detectarse ningún impacto de contaminación antropogénica. Mientras los niveles de manganeso y níquel son menores que el valor de fondo mundial, las concentraciones de arsénico son significativamente mayores, reflejando así la anomalía geoquímica referida al arsénico en el área de captación del lago. Como se discutió anteriormente, los contribuyentes absolutamente dominantes de arsénico son los ríos Desaguadero, Marquez y Sevaruyo, y sus fuentes de arsénico no son antropogénicas. Las elevadas concentraciones de arsénico en sedimentos del lago más antiguos (antes de la minería) corroboran esta conclusión. Una complicada figura, para la que no tenemos explicación, es el decrecimiento gradual general en las cantidades de arsénico en dirección ascendente. Los cocientes de las concentraciones en los sedimentos contaminados entre los valores de fondo "locales" tentativos, pueden usarse para una valuación general del grado de contaminación. Sin tomar en cuenta al arsénico, la intensidad de la contaminación indicada por el cociente asciende de la siguiente manera:

en el pozo del norte - Cu < Pb < Zn < Sb < Hg < Sn < Ag < Cd,  
 en el pozo del sur - Cu < Pb < Zn < Hg < Ag < Cd < Sn < Sb

La contaminación más fuerte se observa generalmente en el norte del lago Poopó, en forma concordante con su vecindad a la desembocadura de la subcuenca Huanuni/Santa Fe. La mayor contaminación corresponde al cadmio en la excavación del norte. La contaminación más intensa (exceptuando al Hg) ocurre en los sedimentos superiores a 20 - 25 cm, coincidiendo con el periodo moderno de minería después de 1910. Antimonio es el único elemento que ocurre en concentraciones altas en la costra de sal que cubre los sedimentos. El pico no se replica para ninguno de los otros elementos, por ello, es menos probable que se origine de la precipitación del agua del lago. La explicación propuesta es que el pico es causado por deposición atmosférica, con su origen en la pluma de la fundición de antimonio de Vinto. Es la indicación más distante de deposición atmosférica causada por las fundiciones de Vinto.

La severidad de la contaminación también puede indicarse por comparación con los criterios suecos de calidad para sedimentos lacustres (Tabla 8.3, - no existe criterio para Sb ni Sn).

Tabla 8.3 Concentraciones máximas de metales en los sedimentos contaminados del lago Poopó, comparados con los criterios suecos para sedimentos lacustres. Nótese que el criterio sueco ha sido designado para la capa superior del fondo lacustre (0 - 1 cm de profundidad)

	Lago Poopó - Norte Max. en sedimentos contaminados (mg /kg)	comparación con criterio sueco	Lago Poopó - Sud Max. en sedimentos contaminados mg/kg	... comparación con criterio sueco
Cu	214	Alto	146	Alto
Pb	4.5	Alto	1.67	Moderadamente alto
Zn	67	Moderadamente alto	32	Moderadamente alto
Hg	0.27	Moderadamente alto	0.17	Moderadamente alto
Sb	65	Moderadamente alto	29	Moderadamente alto
Ag	246	Moderadamente alto	200	Moderadamente alto
Cd	20	Bajo	13	Bajo

### 3.4 Interpretación cronológica de la variación de contenidos metálicos en los sedimentos

La interpretación cronológica mostrada en las Figuras 8.4 y 8.5 se basan en la historia de la minería en la subcuenca del lago Poopó. Se distinguieron cuatro marcadores estratigráficos

- (a) El inicio de la minería en el área está marcado por la introducción del mercurio en el receptor. El mercurio ocurre naturalmente en el sistema en muy bajas concentraciones. En mayores cantidades fue inicialmente introducido al comenzar la minería colonial de metales preciosos, cuando fue ampliamente usado para la recuperación del oro y de la plata con ayuda de amalgamas. La minería de la plata en San José arrancó a fines del siglo XVI y puede asumirse que en toda el área se llevó a cabo una prospección a gran escala. Restos de la minería colonial pueden verse en muchos prospectos de Au-Sb a lo largo de la orilla oriental del lago Poopó. Por ello se puede deducir con seguridad que el primer marcados tiene una data de aproximadamente 1600.
- (b) El segundo indicador, que marca la década del 1880, es la introducción del estaño al sistema, al iniciarse la minería del estaño. Puesto que las menas de estaño son en su mayoría mineralógicamente complejas, el incremento del estaño está combinado con pequeñas cantidades de Sb, Pb, Zn y Cd.
- (c) La intensificación y la modernización de la minería del estaño y el procesamiento de minerales, en particular en Huanuni y Bolívar, entre 1905 - 1910 nos dan el tercer marcador.
- (d) Finalmente, la introducción de modernas tecnologías de procesamiento de menas (en Bolívar y Machacamarca) en las décadas de los 1920-30s, indicada por la amplia liberación de zinc y cadmio dan el último marcador. La cronología tentativa permite también la data de eventos de desecamiento marcados por evaporitas fósiles. Las dos capas superiores de evaporitas caen en los años 40 y antes de 1920, periodos que también se reconocen en base a la fluctuación de niveles de agua en el lago Titicaca (ver PPO-9603). El periodo anterior marcado por evaporitas está en algún punto entre 1600y 1880. Wirrman y Mourguiart (1955) hallaron una capa de yeso de 35 cm de espesor a 1.6 m debajo de la interfase agua-sedimento (por debajo de la profundidad máxima de las excavaciones del PPO) y la atribuyeron a una importante regresión lacustre luego de la desaparición del antiguo lago Tauca (unos 7 000 años antes del presente, ver Martín et al., 1993).

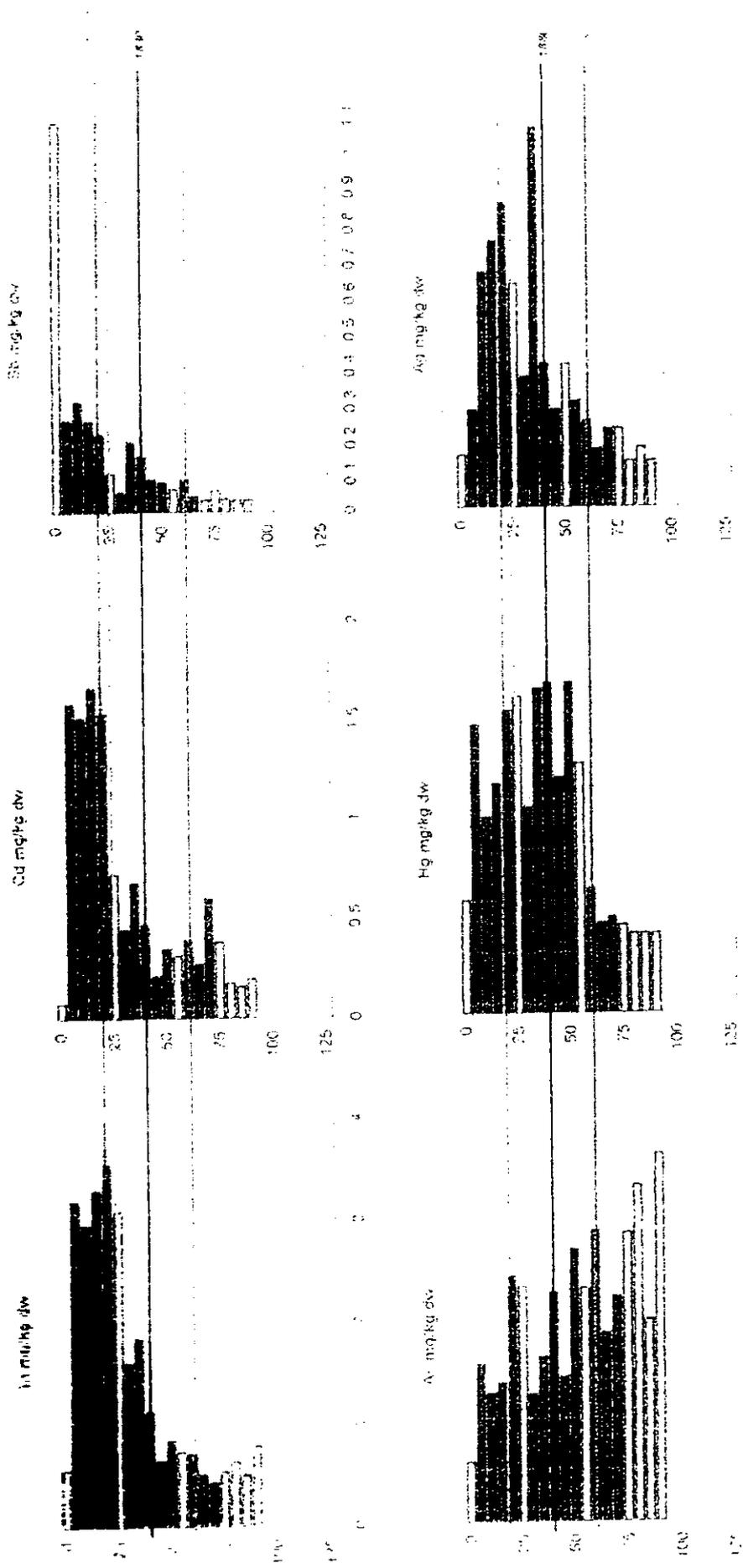


Figure 8.4 Concentrations of selected metals in vertical section of sediments point 11S in southern Lake Poopó for location of point see Figure 8.2. Color lines show interpretation of chronology

1977

1978

1979



TABLE 1. Concentrations of selected metals in water samples from Northern Lake Superior, 1977-1979. Values are in micrograms per liter (µg/L).

Year	Location	Aluminum	Cadmium	Copper	Lead	Manganese	Nickel	Silver	Zinc
1977	1	150	0.05	1.0	0.1	100	0.01	0.05	50
	2	180	0.06	1.2	0.12	120	0.012	0.06	60
	3	160	0.04	0.8	0.08	80	0.008	0.04	40
	4	140	0.03	0.6	0.06	60	0.006	0.03	30
1978	1	170	0.05	1.1	0.11	110	0.011	0.05	55
	2	190	0.06	1.3	0.13	130	0.013	0.06	66
	3	160	0.04	0.9	0.09	90	0.009	0.04	44
	4	150	0.03	0.7	0.07	70	0.007	0.03	33
1979	1	160	0.04	1.0	0.10	100	0.010	0.04	40
	2	180	0.05	1.2	0.12	120	0.012	0.05	50
	3	170	0.04	1.1	0.11	110	0.011	0.04	44
	4	150	0.03	0.8	0.08	80	0.008	0.03	30

1977

1978

1979

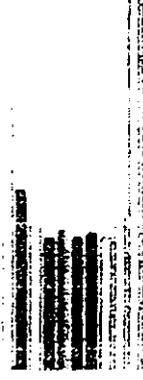


TABLE 2. Concentrations of selected metals in water samples from Northern Lake Superior, 1977-1979. Values are in micrograms per liter (µg/L).

Year	Location	Aluminum	Cadmium	Copper	Lead	Manganese	Nickel	Silver	Zinc
1977	1	160	0.04	1.1	0.11	110	0.011	0.04	44
	2	180	0.05	1.3	0.13	130	0.013	0.05	55
	3	170	0.04	1.0	0.10	100	0.010	0.04	40
	4	150	0.03	0.8	0.08	80	0.008	0.03	30
1978	1	170	0.04	1.2	0.12	120	0.012	0.04	44
	2	190	0.05	1.4	0.14	140	0.014	0.05	55
	3	160	0.04	1.0	0.10	100	0.010	0.04	40
	4	150	0.03	0.9	0.09	90	0.009	0.03	33
1979	1	160	0.04	1.1	0.11	110	0.011	0.04	44
	2	180	0.05	1.3	0.13	130	0.013	0.05	55
	3	170	0.04	1.2	0.12	120	0.012	0.04	44
	4	150	0.03	0.9	0.09	90	0.009	0.03	30

FIGURE 1. Concentrations of selected metals in water samples from Northern Lake Superior, 1977-1979. Values are in micrograms per liter (µg/L).

**Figura 8.4** *Concentraciones de metales seleccionados en una sección vertical de sedimento, punto PPS al sur del lago Poopó. Para la localización del punto ver la Figura 8.2 Las líneas en color muestran la interpretación de la cronología.*

**Figura 8.5** *Concentraciones de metales seleccionados en una sección vertical de sedimento, punto PPN al norte del lago Poopó. Para la localización del punto ver la Figura 8.2 Las líneas en color muestran la interpretación de la cronología.*

## 8.4 Aspectos biológicos y recursos pesqueros

### 8.4.1 Comunidades macrófitas

Las grandes variaciones en el nivel y extensión del lago Poopó, y la variación concomitante en la salinidad del agua lacustre, tienen una tremenda influencia sobre el desarrollo de la flora macrófita acuática. La composición típica de la flora litoral en los lagos del Altiplano puede inferirse de las observaciones realizadas por Collot (1980) en el lago Titicaca. En este lago, los márgenes de la orilla y las regiones poco profundas (0 - 1 m de profundidad) están dominadas por las plantas flotantes *Lemna gibba* e *Hydrocotyle ranunculoides*. En la zona de dos metros de profundidad, dominan las especies sumergidas *Myriophyllum elatnoides*, *Elodea potamogeton* and *Potamogeton strictus*. A los tres metros, las especies dominantes son la macrófita emergente *Schoenoplectus tatora* (Tatora), la macrófita submergente *Potamogeton strictus* y el alga fija *Cladophora spp.* El desarrollo medio de las macrófitas en intervalo de 0 a 3 m (todas las especies del lago) está en el rango 2.5 - 3.0 kg/m<sup>2</sup> (Rivera et al., 1991). ¿En qué medida fueron observadas comunidades macrófitas similares en el lago Poopó? De acuerdo a reportes anteriores (de 1940, ver Iltis, 1993, por referencias), probablemente de los años 30, cuando el lago estaba evidentemente bien desarrollado, y antes de la desecación de mediados de los 40, existía una importante flora macrófita acuática en los sedimentos del 68 % del fondo del lago. Sin embargo, la parte central comprendía sedimentos grises compactos, con carencia de vegetación. Collot (1982) reportó que donde existieron las macrófitas, la flora estaba dominada por especies del género *Ruppia* y *Chara* (un alga con raíces) y contenía también el helecho acuático *Azolla sp.* Esta situación todavía estaba vigente a fines de 1982, cuando la salinidad era 7.5 g/l al nivel de Pazña y 75 g/l cerca a Huari en el sud (Iltis, 1993). Puede asumirse que esta flora desapareció como resultado de la desecación del lago ocurrida en 1983. Después de reaparición del lago en 1985, y el alcance de su máxima extensión y profundidad en tiempos recientes, se desarrolló nuevamente una importante flora en el lecho del lago, principalmente en todas las zonas de inundación reciente. No obstante, hubo siempre una zona central alargada donde las macrófitas estuvieron ausentes, a pesar de la relativamente alta transparencia del agua (Secchi disc: 0.50 -3.50 m en la parte oeste), y la salinidad uniforme de 8 - 11 g/l, el periodo 1978 - 1989 (Iltis, 1993). Si bien no se realizaron estimaciones precisas del área ocupada por diferentes géneros, se encontró que la especie *Chara* dominó ampliamente, excepto en el noroeste, a la entrada nueva del río Desaguadero, donde la *Ruppia sp* cubría grandes áreas. Parecía también que la *Ruppia* estaba en regresión en diferentes zonas de la orilla, en comparación con la situación anterior a 1983. Es así que la comunidad macrófita típica del lago Titicaca no fue observada en el lago Poopó, ni antes ni después de la desecación de 1983.

La situación presente, durante la realización del PPO, se caracterizó por un lago casi seco, y porque la zona de *Ruppia*, que anteriormente bordeaba la mayor parte del lago, había desaparecido en su mayor parte, excepto en las áreas húmedas cerca al ingreso norte del río Desaguadero (Zabaleta, 1996). En la misma región, también se observaron algunos puntos de *Tatora*, que estaban en muy malas condiciones debido a la desecación. A lo largo de la mayor parte de la antigua orilla del lago, la zona fue invadida por flora terrestre, dando así cierta humedad. Esta comunidad de transformación se caracteriza por la existencia de varias familias de plantas terrestres, tales como *Chenopodiaceae*, *Graminae* y *Berberidaceae*, así como las especies *Suaeda fructicosa*. Adicionalmente, los agricultores locales extendieron últimamente sus cultivos, especialmente quinua, a áreas del antiguo lago (Zabaleta, 1996)

#### 8.4.2 La comunidad del fitoplancton

La composición de la comunidad de fitoplancton, así como las plantas erguidas fue muy diferente antes y después del evento de desecación de 1983. Por ejemplo, en 1982, la biomasa algal en la parte sur del lago (altamente salina) era pequeña ( $24 \text{ mg/m}^3$ ) y consistía en 96% de diatomeas y 4 % de clorofíceas flageladas unicelulares (Iltis, 1993). en la parte norte, la menos salina del lago, la biomasa algal fue 1 000 veces más alta ( $21.5 \text{ g/m}^3$ ) y estaba compuesta por 65 % de diatomeas, 34 % de pirrófitas y 2 % de cianobacterias. Las especies dominantes en la biomasa eran las diatomeas: *Cocconeis placentula* var. *euglypta*, *Chaetoceros* sp., *Gyrosigma spencerii*, *Nitzschia punctata* y *N. angustata*.

Después de la inundación del periodo 1987 - 1989, la biomasa promedio varió (en cinco ocasiones de muestreo) entre  $1.4$  y  $6.3 \text{ g/m}^3$ , con un valor máximo de  $90 \text{ g/m}^3$  en la orilla este, cerca de Huari, en Diciembre de 1988, y un mínimo de  $0.3 \text{ g/m}^3$  en el borde de la zona de carófitas (Iltis, 1993). Al borde del lago, dominaban abundantemente las dinofíceas, con la especie *Peridiniopsis cristatum* var. *boliviensis* como la dominante típica. En la zona central del lago, dominaban las clorofíceas, con la mayor abundancia de *Dictyosphaerium pulchellum*. El siguiente grupo en abundancia eran las diatomeas, con *Cyclotella* como género dominante, y las cianobacterias con *Nodularia harveyana* var. *sphaerocarpa*. Así, la original predominancia de las diatomeas fue reemplazada por la ocurrencia masiva de Peridinales. Este grupo fue predominante en las estaciones de muestreo con mayor biomasa. En el periodo 1987 - 1989, las diatomeas nunca fueron un grupo predominante en ninguna de las muestras analizadas. En cuatro muestras de 41, las cianobacterias excedieron el 40 % de la biomasa total. Durante estas campañas de muestreo, la zona central del lago Poopó tuvo una baja transparencia de aguas, que obviamente causaban los fuertes vientos que resuspendían los sedimentos en áreas carentes de macrófitas. Adicionándose a la parte central, la turbidez también afectó sensiblemente a la zona cercana al ingreso del río Desaguadero.

#### 8.4.3 Fauna béntica

Se llevaron a cabo sólo pocos estudios de la fauna del lecho del lago Poopó. Entre los estudios más detallados están los de la fauna de ostrácodos, que fueron realizados en el lago Titicaca, el lago Poopó y algunos otros pequeños del Altiplano (Mourgiart & Roux, 1990).

En contraste con la situación del lago Titicaca, donde fueron identificadas más de 17 especies de ostrácodos, la fauna de ostrácodos en el lago Poopó es extremadamente pobre. Durante varias campañas de muestreo en este lago se hallaron cero, una o dos especies. En la mayor parte de las ocasiones se detectó sólo la especie *Lymnocythere bradbury*, pero en el periodo 1986 - 1989, esta especie se presentó junto con *Cypridosis* sp. Estas dos especies tienen compartimientos ecológicos bastante distintos en el lago: la primera es una especie realmente béntica que muestra elevada abundancia en la superficie desnuda del sedimento, mientras que la segunda está relacionada con los campos de *Chara*, donde vive sobre las plantas. Estas especies tienen también una tolerancia a la salinidad bastante diferente: el límite letal para la *Cypridosis* es de unos  $15 \text{ mg/l}$ , mientras que *L. bradbury* puede sobrevivir en salinidades mayores a  $60 \text{ g/l}$  (Mourgiart & Roux, 1990).

En relación a la fauna béntica que resta, los pocos análisis realizados sugieren que esta fauna se adapta muy lentamente a las nuevas condiciones ambientales posteriores a 1985 (Iltis et al., 1990). La fauna béntica, muy pobre, consistía fundamentalmente de dos especies, el gastrópodo *Littoridiana* cf. *popoensis* en las áreas cubiertas de Chara, y el anfípodo (camarón) *Hialella longipalma* en algunas áreas algo más profundas. el 1989, sin embargo, se inició la colonización de nuevas regiones acuáticas. Esto se muestra por el claro incremento en la abundancia de varias especies el 1989, en comparación con la situación durante los años anteriores. El último año, la mayor abundancia de taxa estuvo en los círonomideos (insectos larváceos), los camarones (*Hyaella* sp.) y los oligocaietos (gusanos).

#### 8.4.4 Fauna piscícola y pesquería

Existen 43 especies descritas en los andes centrales (Parenti, 1984). Más de la mitad de éstos son endémicos en la cuenca endorreica del Altiplano. Se asume que muchas más especies quedan por describir, porque la diversidad de peces se considera inusualmente baja para el tamaño del lago Carney, 1993).

Desde esta perspectiva, la fauna piscícola del lago Poopó debe considerarse extremadamente pobre en diversidad. De acuerdo a los datos disponibles, está compuesta sólo de una especie nativa (*Orestias agassi*). Otra especie, el pejerrey (*Basilichthis bonaerensis*), fue introducida el 1956 de la Argentina (7000 especímenes), y desde entonces se convirtió en la especie más exitosa en el lago. esta especie tardía se adaptó muy bien al ecosistema del lago, y llegó a ser la especie preferida por la pesquería comercial.

El 1980, la población total de pescadores que dependían de las pesquerías del lago llegaba a 510 personas (300 pescadores comerciales y 210 de subsistencia), y la pesca total en ese año fue de 1 175 toneladas (cerca de 90 % de pejerrey). Aún el 1983, cuando el lago estuvo prácticamente seco, se reportó que la población de pescadores logró una pesca de 900 toneladas. Los años siguientes, la población de pescadores creció, así como el volumen de pesca, alcanzando un máximo de 799 pescadores y una pesca máxima de 3 380 tons, en 1990 (Zabaleta, 1994). Estas pescas representaron cerca del 40 % de la producción bruta de la pesca nacional de Bolivia. Después, los volúmenes de pesca declinaron rápidamente. Por ejemplo el 1992, los pescadores notaron en los peces deformidades y tamaños reducidos y el volumen total de pesca se redujo a 550 tons (Zabaleta & Bremer, 1993). El 1993, la industria pesquera del lago Poopó colapsó completamente, y los 143 pescadores que quedaban para la época tuvieron que buscar otras actividades económicas.

Durante los años de pesca abundante, cerca de 75 % del producto fue transportado a los mercados de pescado de La Paz, donde el pejerrey del lago Poopó se constituyó en una importante fuente de alimento rico en proteínas. Un 18 % era enviado a Cochabamba y otras ciudades, mientras que el 8 % era vendido en Oruro y en la vecindad del lago (Zabaleta, 1996).

#### 8.4.5 Avifauna

Los años en los que el lago existía como tal y tenía una gran extensión, una avifauna rica dependía de la alta productividad lacustre. Consistía en varias especies de flamencos (*Phoenicoparrus andinus*, *P. jamesi* and *Phoenicopterus chilensis*), que se alimentaban

principalmente del fitoplancton de áreas poco profundas del lago o llanuras inundadas cercanas. Sin embargo, actualmente la mayor parte de estas aves acuáticas se mudaron a otros lugares.

El 1994 se encontraron cientos de restos de flamencos asesinados, cerca al lago Poopó, al lado oeste de Challapata. De los adultos sólo quedaban cabezas, alas y patas, mientras que los cuerpos íntegros de los polluelos del año se descomponían. Los cadáveres se utilizaron para tomar unas pocas muestras destinadas al análisis químico. De los adultos se tomaron lenguas por tratarse de un músculo muy importante, debido a la manera especial de su alimentación. De los pollos se tomaron muestras de hígado, puesto que se sabe que muchos metales se acumulan en el hígado.

Los resultados de los análisis por metales se presentan en la Tabla 8.4, junto con el rango de contenidos metálicos en tres muestras de invertebrados (Corixidae y Anphipoda) recolectadas en el lago Uru Uru el 1994. Se puede decir que los invertebrados representan la alimentación de los flamencos

Los niveles de metales fueron en general más altos en los hígados que en las lenguas, algo normal para este tipo de tejidos. En comparación con los invertebrados, los niveles de los metales esenciales cobre y zinc estuvieron al mismo nivel en el hígado. Se conoce también que los niveles de los metales esenciales están regulados fisiológicamente en la biota. Los niveles de los metales no esenciales cadmio y plomo eran, sin embargo, mucho más bajos en los flamencos que en los invertebrados. Esto indica que estos metales no se bioacumulan en los flamencos.

Tabla 8.4 Niveles de metales en hígados de flamencos (de los pollos del año) y en lenguas de estas aves (adultas). Con fines de comparación se presentan también los rangos de niveles en tres muestras de invertebrados (Corixidae y Anphipoda) del lago Uru Uru

	Hg mg/kg ps	Cd mg/kg ps	Pb mg/kg ps	Cu mg/kg ps	Zn mg/kg ps
<b>Hígados de Flamenco (30% ps)</b>					
1	0.6	0.009	0.3	45	130
2	0.1	0.006	0.9	62	140
3	0.07	0.003	0.2	6.2	93
4	0.1	0.003	0.1	14	240
5	0.07	0.004	0.2	17	170
<b>Lenguas de Flamenco (50% ps)</b>					
6	0.08	0.003	0.07	1.4	14
7	0.06	0.002	0.05	0.3	9
8	0.06	0.003	0.08	0.4	14
9	0.04	0.001	0.06	0.3	8
<b>Rango de Invertebrados (20% ps)</b>	0.05 - 0.1	2- 4	2- 8	329- 44	56- 180

El nivel de mercurio (no esencial) fue, en algunos casos, mayor en hígados que en los invertebrados. Esto podría implicar que el mercurio se bioacumula, quizás porque una fracción significativa del mercurio podría estar en la forma fácilmente bioacumulable de metilmercurio.

## 9. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES FINALES.

Para hacer una evaluación general del grado de contaminación de los cursos de agua en el área del Proyecto Piloto Oruro, y los riesgos medioambientales asociados con esta contaminación, trataremos de resumir los datos disponibles de concentraciones de metales en aguas superficiales y clasificarlas dentro de tres categorías:

- i) Cursos de aguas que representan las concentraciones de fondo naturales de metales más bajas
- ii) Cursos de aguas con concentraciones de fondo de metales naturalmente elevadas
- iii) Cursos de aguas contaminadas con metales originados en las actividades mineras.

La razón para usar que incluya dos categorías de corrientes con “concentraciones de fondo naturales” de metales es la alta variación de la composición geológica de los bedrocks y los suelos en el área del PPO, con mineralizaciones dispersas, algunas de las cuales son fácilmente lixiviables. En efecto, no es posible encontrar ni una sola corriente, ni siquiera un tramo, donde las concentraciones de fondo de todos los metales analizados correspondan a, o sean más bajas que las concentraciones de fondo mundiales. En cada corriente muestreada, al menos uno de los metales muestra concentraciones superiores a los niveles de fondo reportados mundialmente. Además, diferentes metales muestran concentraciones elevadas en diferentes corrientes, reflejando el tipo específico de mineralización en su área de captación.

Cuando se evalúa el grado de contaminación antropogénica de corrientes, ríos y lagos, y cuando se evalúan los riesgos ambientales y de salud asociados con la minería y el procesamiento de minerales, es necesario basar el análisis en un amplio conocimiento de las variaciones naturales en los niveles de fondo (no contaminados por actividad humana) de los elementos potencialmente peligrosos. Por lo tanto, seleccionamos primeramente un grupo de corrientes de agua que contienen las concentraciones más bajas de la mayoría de los metales analizados, para mostrar la situación en áreas prístinas si o con mineralizaciones muy restringidas en su área de captación.

En segundo lugar, seleccionamos otra categoría de corrientes que drenan áreas sin actividad humana conocida dentro de su captación que supuestamente pueda causar contaminación de las corrientes de agua con metales, pero en las cuales, a pesar de ello, las corrientes de agua tienen altas concentraciones de al menos uno o algunos metales. Esta categoría de corrientes despliegan concentraciones de fondo de metales naturalmente elevadas, y ésta es la categoría que debe usarse como base para la evaluación de la peligrosa contaminación humana de los cursos de agua directamente afectados por operaciones mineras (La tercera categoría). Las tres categorías de corrientes y ríos se describen adelante con todo detalle, y se presentan en la Tabla 9.1 junto con algunos datos de referencia, y concentraciones de metales para estas categorías.

- i) Cursos de agua que representan las concentraciones de fondo naturales más bajas de metales:

Las concentraciones de la mayoría de los metales analizados en estas corrientes son similares (o más bajas) que los niveles de fondo de agua fresca de todo el mundo. Sin embargo, en alguna de estas corrientes, principalmente antimonio y arsénico, pero también níquel y zinc, alcanzan niveles de concentración generalmente más altos que el fondo mundial. Ya que las corrientes analizadas, o tramos de corriente, fueron todas captaciones de drenaje (o una porción de captación) donde no existían minas o ingenios, sólo los procesos de intemperismo natural deben ser responsables de las elevadas concentraciones de metales. Sin embargo debe tomarse una

reserva para un posible ingreso de metales (al menos algunos ) a través de deposiciones atmosféricas con origen en las emisiones de fundiciones, fábricas de cemento y ladrilleras en el área de Vinto-Oruro.

**ii) Cursos de aguas con concentraciones de fondo naturalmente elevadas de metales:**

Esta categoría de corrientes (o ríos) también drenan captaciones no afectadas mensurablemente por alguna actividad minera o procesamiento de minerales conocido, ni por actividad industrial alguna. Estas captaciones pueden sin embargo recibir deposiciones atmosféricas de partículas aéreas portadoras de metales, originadas en instalaciones que emiten contaminantes al aire, y estas deposiciones pueden finalizar en forma de concentraciones elevadas de metales en las corriente/ríos. Así, las concentraciones de uno o algunos metales en el agua de estas corrientes y ríos son mucho más altas que los niveles de fondo del mundo, y generalmente más altos que los cursos de agua pertenecientes a la categoría (i)<sup>3</sup>. Entre los cursos de agua pertenecientes a esta categoría se pueden encontrar algunos de los principales tributarios del lago Poopó.

**iii) Cursos de agua contaminados con metales originadas de las actividades mineras:**

Todos estos cursos de agua, contaminados directamente por minas o ingenios, son afluentes del Lago Uru Uru y del Lago Poopó. Debido a este hecho la mayoría de los metales en estos ríos muestran concentraciones más altas que los niveles de concentración de fondo mundiales y las corrientes que pertenecen a la categoría (ii), existen ejemplos de concentraciones bajas de antimonio y arsénico en alguno de los ríos que en algunas corrientes que pertenecen a la categoría (ii)<sup>4</sup>.

**Datos de referencia: límites de concentración para el uso seguro de agua para el consumo humano y para la protección de la vida acuática:**

Se ha compilado una serie de datos para realizar comparaciones con concentraciones actuales de metales en los cursos de agua del área del Proyecto y para hacer una evaluación de riesgo. Los datos consisten de Concentraciones Máximas Permisibles (MAC) de metales en agua usada para el consumo humano, y MACs para cuerpos de agua donde la vida acuática debería poder sobrevivir en una comunidad equilibrada y sostenible. La última categoría de valores límite, denominados a menudo "Concentraciones Sin Efecto Predecible" (PNEC), se deriva de resultados de pruebas ecotoxicológicas a largo plazo con organismos acuáticos sensibles.

En el presente estudio no se determinó la dureza de las aguas en el área del Proyecto Piloto Oruro. Sin embargo, un dato anterior (PELT, 1993) indica claramente que la dureza del agua en la mayoría de los ríos y lagos en el área de estudio pasa de 100 mg/l CaCO<sub>3</sub>. Por ello, se seleccionaron

---

**3** Porque estas concentraciones en muchos de los casos los niveles de "Predicted No Effect Concentrations" (PNEC), i. e. concentraciones en las cuales la vida acuática podría estar habilitada para sobrevivir en una comunidad balanceada y sostenible, esta categoría puede ser identificada como una contaminación natural. El uso del término contaminación natural es refutado por muchos autores, y defendido por otros para fenómenos naturales como emanaciones volcánicas, primaverales termales, etc. (e.g. Freedman, 1995).

**4** En este contexto un comentario puede ser dado en el término de "concentraciones de línea base". Este término es principalmente usado en conexión para permitir o controlar funciones administrativas de autoridades gubernamentales. La "concentración de línea base" es el nivel existente de la calidad del agua en un área en una fecha dada (e.g. antes de la solicitud de permiso de ciertas actividades industriales). En contraste con el background, las concentraciones de línea base combina ambas condiciones naturales y perturbaciones antropogénicas.

los valores MAC dados para USA y Canadá para representar el tipo de dureza que se indica, para hacerlos relevantes para la evaluación (Tabla 9.1).

Tabla 9.1 Categorías de concentraciones de metales en cursos de agua, comparados con el background mundial y las concentraciones máximas permisibles y respectivamente, concentraciones sin efectos previstos. Todos los valores en µg/l.

Categoría/rio	As	Cd	Cu	Ni	Pb	Sb	Zn
<b>(i) Concentraciones de fondo más bajas</b>							
Río Cayhuasi	2	0.03	0.4	3	0.1	10	0.4
Río Huanuni (BH-1)	1.1	0.04	0.2	1.1	0.05	0.8	5
Río Ventaimedia	10	0.03	0.7	0.2	0.2	2	7
Río Juchusuma	10	0.1	5	4	5	3	10
<b>(ii) Contaminación natural elevada</b>							
Río Desaguadero, Toledo	410	0.7	30	51	13	2.3	30
Río Desaguadero, Challacollo	250	0.2	18	5	8	2.7	11
Río Jachacha Uma	3	0.03	2	6	0.3	30	0.6
Río Cortadera	10	0.06	1	1	0.1	30	0.6
Río Sevaruyo	90	0.6	1	1	0.7	2	8
Río Marquez	100	0.2	2	2	0.8	4	9
<b>(iii) Cursos contaminados</b>							
R. Desaguadero, Puente Español	150	0.4	20	9	8	3.9	30
Río San Juan de Sora Sora	-	570	-	470	28	50	38 000
Río Poopó	(4.5)	370	27	80	2	5.6	195
Río Antequera	(4.9)	480	460	300	9	35	140 000
<b>Fondo mundial de agua fresca</b>							
Concetr. sin efectos previstos (PNEC)							
US EPA, CCC <sup>1)</sup> , vida acuática	8.1	1.1	12	88	3.2	-	110
Canadá <sup>2)</sup> , vida acuática	50	0.8	2	65	2	-	30
Sweden <sup>3)</sup> , vida acuática	0.9	0.09	2.1	9	1.2	-	9
<b>Max. Conc. Perm. (MAC)</b>							
OMS, agua potable	10	3	2000	20	10	5	3000

<sup>1)</sup> criterio de concentración continuo, a una dureza de agua de 100 mg/l CaCO<sub>3</sub>; As como arseniato

<sup>2)</sup> a una dureza de 60-120 mg/ CaCO<sub>3</sub>

<sup>3)</sup> dureza de agua no especificada, generalmente válida para aguas blandas.

Nota: los valores entre corchetes son inciertos

Una comparación de los metales representativos en los principales cuerpos de agua en el área con las concentraciones de fondo permite controlar el grado relativo de contaminación en estas aguas. Una forma ilustrativa de hacer esta comparación es calcular los "factores de contaminación" formando una razón entre las concentraciones actuales y las de fondo.

Como se muestra en la Tabla 9.2, al menos algunas de las corrientes de la categoría (i) muestran concentraciones de metales similares a los datos mundiales, excepto para el antimonio, que incluso en esta categoría es sistemáticamente más alto. Las concentraciones de metales más bajas fueron registradas en las partes altas del río Huanuni (punto de referencia BH-1). Desafortunadamente, el mismo río ha sido completamente destruido aguas abajo, por descargas no controladas de la mina y el procesamiento de menas. También en el río Cayhuasi se obtuvieron valores de fondo muy bajos, con excepción del antimonio.

**Tabla 9.2** Cociente entre las concentraciones de fondo de la región y valores de fondo mundiales para agua fresca, y entre concentraciones en cursos de agua contaminados y concentraciones de fondo. Los cocientes se presentan como mínimo y como máximo.

Cocientes	As	Cd	Cu	Ni	Pb	Sb	Zn
Concentraciones de fondo/Fondo mundial	<1-5	<1-1.4	<1-2	<1-13	<1-25	8-30	<1-20
Contaminación natural elevada/Fondo mundial	1.5-205	<1-10	<1-15	3-170	<1-65	20-300	1.2-60
Cursos contaminados / Concentración de fondo <sup>1)</sup>	<1- 136	<1- 19 000	<1- 2 300	<1- 2 350	<1- 560	<1- 62	1- 350 000

1) El rango de valores de estos cocientes se calculó de la siguiente manera: max. línea base/min. fondo o min. cont. natural (el menor valor empleado), y min. línea base/max. fondo o max. contaminación natural (el mayor valor empleado)

Los cursos de agua de la categoría (ii) muestran sistemáticamente niveles elevados de antimonio y en algunos ríos de arsénico, níquel, plomo y zinc (ver *Tabla 9.2*). Las concentraciones más altas de algunos metales fueron registradas en el brazo oeste del río Desaguadero (Río Juchuy Jahuirá), en Toledo. En esta estación de monitoreo, las altas concentraciones de elementos tienen origen en productos de intemperismo de complejos volcánicos que ocurren en la cuenca del Desaguadero, y en el caso del arsénico, aparentemente aumentadas por descargas de aguas subterráneas en el río. No se descubrió aquí ninguna influencia antropogénica. El origen y comportamiento de los metales en el sistema del río Desaguadero se discuten detalladamente en el informe PPO-9607 (versión final), y en referencia a los tributarios australes del lago Poopó, en el Capítulo 3 del presente informe.

De todo lo hasta aquí presentado, es evidente que debido a la gran complejidad geológica, es imposible establecer una serie de datos representativos que describan el background natural de los cuerpos de agua en la región.

Los cocientes de las concentraciones de metales reales de los ríos antropogénicamente perturbados entre los niveles de fondo, muestran que en todos los casos, éstas pueden ser de hecho menores que los de cursos de agua no perturbados. Esto ocurre si se usan como valores de fondo los valores de los ríos con contenidos elevados de metales. De aquí, la magnitud del factor de contaminación no nos dice nada sobre el peligro ambiental asociado con la contaminación. Esto es por qué nosotros también necesitamos comparar las concentraciones reales con los valores PNEC y MAC, y discutir el impacto potencial en el ecosistema y en la salud humana.

Una comparación de las concentraciones de metales naturalmente elevadas con los valores PNEC muestra claramente que los niveles de cadmio, níquel y zinc no dan ninguna razón para preocuparse, si se consideran los riesgos de daño al ecosistema acuático. Por otra parte, los niveles de arsénico, cobre y plomo exceden los valores relevantes de PNEC para la protección de la vida acuática. Una evaluación preliminar de riesgos de salud, relativos al uso de agua de río como suministro de agua potable, indica que el arsénico puede ser el mayor problema en todas las corrientes. En algunos de los puntos de muestreo, la concentración promedio de antimonio, plomo y níquel también exceden las guías de la OMS para agua potable.

La *Figura 9.1* es una representación gráfica de los cocientes del promedio anual de las concentraciones de metales entre los valores PNEC de la EPA de USA en el drenaje de ríos de tres distritos mineros: Huanuni, Poopó y Bolívar. Tales diagramas facilitan la estimación de la severidad relativa de los riesgos para los ecosistemas acuáticos causados por contaminación por varios elementos. En el Apéndice se muestra una serie completa de diagramas para todas las estaciones de monitoreo

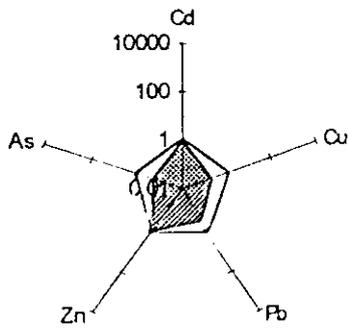
Se supone que las altas concentraciones naturales de arsénico en toda la región crean una gran presión de selección sobre los componentes vivos del ecosistema acuático, promoviendo así el establecimiento de comunidades tolerantes al arsénico. Ya que esta exposición a altos niveles de arsénico tiene una muy larga historia, los organismos existentes, comunidades y ecosistemas deben haber adquirido esta tolerancia, entonces no es posible hacer un control de riesgo basados en una simple comparación entre concentraciones observadas y los valores PNEC obtenidos en experimentos de laboratorio en otras partes del mundo. Los estudios de campo de fauna béntica, usada como indicador ecotoxicológico, fueron incluidos en esta consideración. Ni en el río Desaguadero, ni en los ríos Marquez y Sevaruyo, se hallaron especímenes de ostrácodos, astrópodos o anfibios y los anfípodos fueron muy raros. Pesa a que todas estas especies estuvieron representadas en los ríos “de fondo” y los ostrácodos, anfípodos y gastrópodos fueron incluso abundantes. La fauna béntica en las secciones de río con altas concentraciones de arsénico consistió mayormente en larvas de insectos cuyas etapas adultas pertenecen a la fauna terrestre, mientras que los animales verdaderamente acuáticos eran raros o estaban ausentes. Esto podría ser un fuerte indicador de que la descarga natural de arsénico al sistema fluvial crea un medioambiente adecuado para el desarrollo de la fauna béntica natural. Sin embargo, en dos de estos ríos sin contaminación antropogénica conocida, concretamente el Jacha Uma y el Huaylluma, no se encontró ninguna fauna acuática. Aparte de los altos contenidos de antimonio (max. 35 µg/l), las concentraciones de metales en estos ríos son muy bajas. Es difícil juzgar si la escasez de fauna se debe a las condiciones físicas severas, o al contenido natural elevado de antimonio. Sin embargo, en el lago Uru Uru, donde los niveles de concentración de antimonio son diez veces más altos, existe una abundante fauna béntica.

Se podría concluir que las duras condiciones físicas típicas de toda la región contribuyen fuertemente, si no son un factor dominante, a la pobreza de la fauna acuática en ciertas corrientes. Esto debe añadirse sin embargo que el río más limpio de todos, concretamente el río Huanuni en el punto de referencia BH-1, contiene el mayor número de fauna béntica, excepto para el Lago Uru Uru.

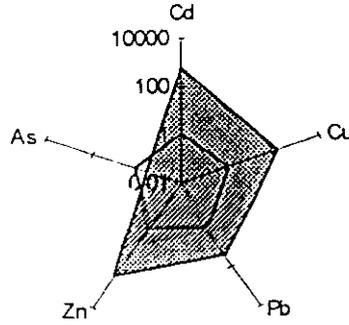
Para demostrar el inmenso significado de la fijación de metales en llanuras de inundación y ecosistemas límnicos, en la *Tabla 9.3* se comparan las concentraciones de elementos seleccionados en tres estaciones del sistema del Desaguadero. La estación La Joya (IR) es el punto de referencia en la parte superior del río (antes de ingresar en el área del PPO). La estación de Challacollo (CH) está en el brazo este del Desaguadero, antes de ingresar al lago Uru Uru. No se nota perturbación antropogénica en esta sección del río. La estación Caravi (CA) está a la salida del lago Uru Uru, en una extensa llanura de inundación. Entre las estaciones de Caravi y Challacollo, el agua natural está mezclada con agua contaminada proveniente de fuertes fuentes antropogénicas (Itos, San José, etc., ver *Tabla 7.2*).

Para ilustrar la capacidad relativa de la fijación de metales del ecosistema Uru Uru, se calcularon los cocientes de dividir los niveles obtenidos en las tres estaciones entre los niveles más bajos encontrados en la categoría de corrientes naturales de fondo.

Ratio: Mean concentration/PNEC-EPA  
Station BH-1

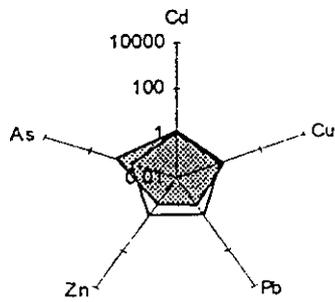


Ratio: Mean concentration/PNEC-EPA  
Station BH-4

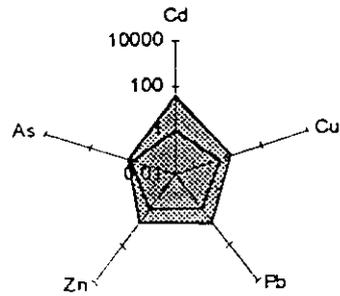


SUBCUENCA HUANUNI

Ratio: Mean concentration/PNEC-EPA  
Station P-1

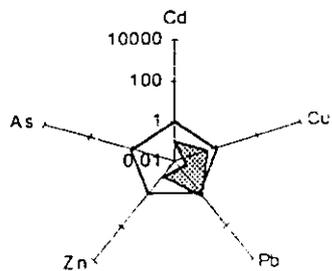


Ratio: Mean concentration/PNEC-EPA  
Station P-2

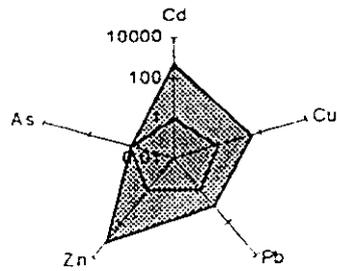


SUBCUENCA RIO POOPÓ

Ratio: Mean concentration/PNEC-EPA  
Station DB-1



Ratio: Mean concentration/PNEC-EPA  
Station PZ-3



SUBCUENCA ANTEQUERA

Figura 9.

Ejemplos de representación gráfica de los cocientes de las concentraciones medias anuales de metales en ríos entre los valores EPA de la USA. Un pentágono indica una razón 1:1

**9.3** *Concentraciones promedio de metales en agua en tres estaciones de monitoreo en el sistema del Río Desaguadero, y cocientes de las tres concentraciones promedio entre los niveles registrados de fondo más bajos*

	As	Cd	Cu	Ni	Pb	Sb	Zn
<b>Estación de monitoreo</b>	<b>Concentración Promedio (µg/l)</b>						
<b>La Joya (IR)</b>	270	1.0	79	36	37	1.7	92
<b>Challacollo (CH)</b>	250	0.2	18	5	8	2.7	11
<b>Caravi (CA)</b>	65	0.4	7	11	8	20	6
	<b>Cociente</b>						
<b>La Joya (IR)</b>	245	33	395	180	740	2	230
<b>Challacollo (CH)</b>	227	7	90	25	160	3	27
<b>Caravi (CA)</b>	59	13	35	55	160	400	15

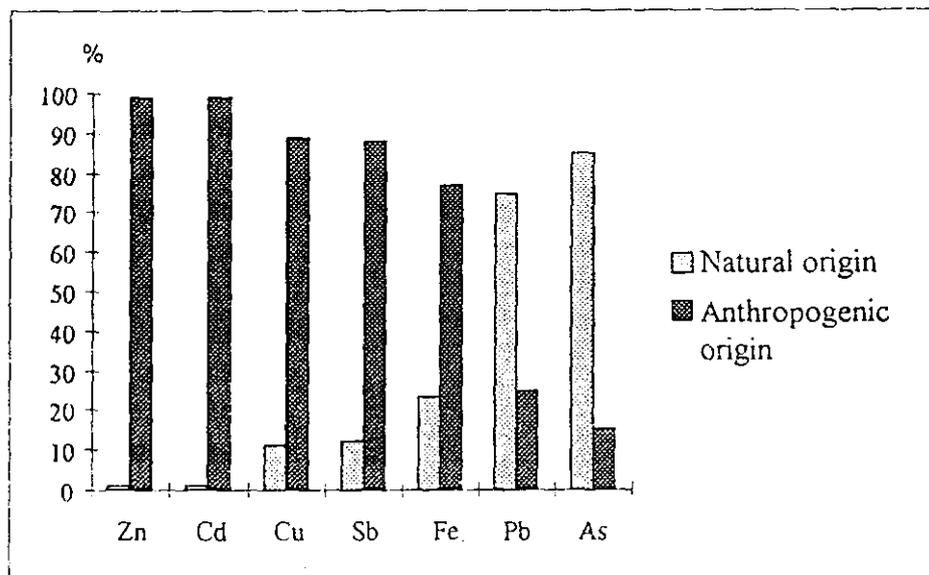
Aquí encontramos la interesante situación de que el incremento relativo de concentraciones de metales en La Joya, un punto de muestreo que por lo que se ve no está contaminado por descargas antropogénicas de metales, es mucho mayor (excepto para el antimonio) que los incrementos relativos en Caravi, donde la contaminación antropogénica es obvia. Este resultado aparentemente contradictorio puede explicarse por reacciones que secuestran metales y por incorporación en plantas acuáticas, primero en las llanuras de inundación situadas tanto aguas arriba como aguas abajo de Challacollo, y luego en el ecosistema limnico del lago Uru Uru. Evidentemente, las concentraciones de metales registradas a la salida del lago Uru Uru (Caravi), son el resultado no solo de la reducción de los niveles naturalmente elevados del río Desaguadero, sino también de muchas entradas antropogénicas de la ciudad de Oruro y actividades de minería y fundición locales. El proceso que conduce a la fijación de metales en el lago Uru Uru son obviamente más diversos que las descargas al lago que contienen metales (exceptuando el caso del antimonio).

En esta perspectiva, debe considerarse muy desafortunado que el ecosistema natural de llanuras de inundación aguas abajo de Challacollo esté siendo destruido por el dragado de canales directos para el agua del río, eliminando así las posibilidades de inundación intermitente a las llanuras inundables.

Si ampliamos la evaluación al posible impacto de los metales transportados al lago Poopó (en períodos de su existencia como ecosistema limnico) por los ríos altamente contaminados por actividades mineras, es importante, en principio, considerar la cantidad relativa de metales que tienen origen antropogénico. Como indica la Figura 9.2 (compilada de datos incluidos y discutidos en la sección 8.2), la fracción antropogénica de la cantidad total de flujo de entrada por estos ríos varía grandemente en el caso del zinc, cadmio, cobre y antimonio, mientras que llega a un cuarto del plomo y sólo un quince por ciento del ingreso total de arsénico.

La mayor fuente de los metales transportados al lago Poopó es la descarga de DAR cargado de metales de los distritos de Huanuni y Santa Fe-Japo, así como del ingenio inactivo de Machacamarca, localizados todos en el área de captación del río Sora Sora. Aún cuando las descargas indiscriminadas de aguas de proceso del ingenio Santa Elena (Huanuni) contribuyan con la mitad de la carga de metales del río Huanuni (ver Capítulo 3.1), y finalmente a la carga del río

San Juan de Sora Sora, el DAR deriva principalmente de numerosos depósitos de residuos mineros de antiguas actividades mineras y de concentración. Esto se puede demostrar fácilmente comparando las concentraciones (Tabla 5.1) y transporte de metales (Figura 8.3) del río Santa Fe (Estación ASF-6), que drena el distrito abandonado de Japo-Santa Fe, y del río Huanuni (Estación 3H4), que drena una subcuenca con una mina y un ingenio activos. Nótese la elevada contribución de metales disueltos al río Huanuni por el agua de proceso. El informe PPO-9611 muestra que la fuente de DAR más significativa son las colas depositadas en los lechos de ríos mezcladas con sedimentos aluviales. Estas colas están expuestas a la oxidación intermitentemente, los productos de intemperismo son arrastrados por el agua y las colas redepositadas y dispuestas para un nuevo ciclo de oxidación y lavado. El proceso es acelerado si las colas son sujetas a reprocesamiento por parte de las cooperativas.



**Figura 9.2** *Proporciones relativas de metales seleccionados de origen natural y antropogénico transportados al lago Poopó*

En segundo lugar por el ingreso de metales al lago Poopó es el transporte del distrito **Bolívar-Avicaya** dentro del área de captación del río Antequera. Aquí nuevamente los residuos **minerales** antiguos son la principal fuente de DAR. Es importante enfatizar que el efluente de la **actual** mina Bolívar es despreciable respecto al total de impactos sobre el lago Poopó. En **comparación** con los dos principales flujos de contaminación, el transporte de metales al distrito **Poopó** es relativamente menor.

El aporte más grande de metales al lago Poopó, excepto el zinc, proviene del norte a través **del brazo** oeste del río Desaguadero, que combina las cargas del río San Juan de Sora Sora con la **salida** del lago Uru Uru, contribuyendo, particularmente, con arsénico y antimonio. Sin embargo, la **mayor** cantidad de zinc es transportada por el río Antequera. Se ha visto en el Capítulo 6.2.2 que la **zona** acuática de los ríos, afectada por la minería y el procesamiento de minerales, ha sido

completamente eliminada. No puede excluirse que el aporte de metales al lago Poopó, durante los periodos de altos niveles de agua, creará potencialmente tan elevadas concentraciones de cadmio, cobre y plomo en las aguas del lago, que constituirán un considerable riesgo ambiental. La situación puede ser peor particularmente en el agua cercana a la orilla del lago, junto a las desembocaduras de los ríos contaminados. En vista de los posibles impactos de las concentraciones de arsénico en las aguas del lago Poopó, podemos referirnos a lo indicado anteriormente con respecto a los elevados valores de fondo.

Las conclusiones de la anterior evaluación son:

- Existe un elevado aporte antropogénico de antimonio al lago Uru Uru y consecuentemente, también a la parte norte del lago Poopó. Este elevado aporte puede crear un riesgo considerable para la salud y para el medio ambiente, por lo tanto, debe asignarse alta prioridad a la reducción de este ingreso de antimonio.
- Los elevados aportes de cadmio, cobre y zinc con origen antropogénico en la parte norte y este del lago Poopó probablemente causará daños ambientales al ecosistema límnic (en los periodos en los que el lago exista), lo que aumenta la urgencia de las medidas a tomarse para reducir las descargas de estos metales desde los lugares mineros hacia la cuenca del lago Poopó. Sin embargo, tales medidas tienen menor prioridad que las necesarias para proteger al más permanente e importante ecosistema acuático del lago Uru Uru.

Como gran parte del ingreso de arsénico al lago Poopó es de origen natural, su ingreso continuo al lago no puede ser eliminado. Debido a que la región generalmente padece de carencia de agua, la posibilidad de construir llanuras de inundación artificiales a fin de obtener un sumidero para arsénico (y otros metales) es extremadamente limitada.

## REFERENCIAS

- Beveridge, M.C.M., 1983, Un estudio de los niveles de metales pesados en el lago Poopó, Bolivia. Institute of Aquaculture, University of Stirling, Scotland: 40 pp.
- Beveridge, M.C.M., Stafford, E & Coutts, R., 1985, Metal concentration in the commercially exploited fishes of an endotheric saline lake in the tin-silver province of Bolivia. *Aquaculture and Fisheries Management* 1: 41-53
- Boulangé, B., Rodrigo, L.A. & Vargas, C., 1978, Morphologie, formation et aspects sédimentologiques du Lac Poopó (Bolivie). *Cahiers ORSTOM, Séries Géologie* 10: 69-78.
- Bowen, H.J.M. 1966. *Trace elements in biochemistry*. Academic Press, London: 241 pp.
- Carmouze, J.P., Arce, C. & Quintanilla, J., 1981, Régulation hydrique du Lac Titicaca et l'hydrologie de ses tributaires. *Rev. Hydrobiol. Trop.*, 14 (4): 329-348.
- Carney, H.J., 1993, Biodiversity, agriculture and water. Change in the unique tropical Lake Titicaca landscape, Peru/Bolivia. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 25: 918-922.
- Collot, D., 1980, Les macrophytes de quelques lacs Andins (Lac Titicaca, Lac Poopó, Lacs des vallées d'Hichu Kota et D'Ovesjuyo). *Travaux réalisés au cours du VSNA en Bolivie*. ORSTOM, Paris.
- Collot, D. 1982. *Vegetación acuática del Lago Poopo*. *Ecología en Bolivia*, 1: Revista del Instituto de Ecología, convenido UMSA-ORSTOM. La Paz, Bolivia. pp. 47-54.
- COMIBOL (Corporación Minera de Bolivia) & Swedish Geological AB, 1995, Environmental Audit of the Huanini mine, Part 1. 141 pp.
- COMIBOL (Corporación Minera de Bolivia) & Swedish Geological AB, 1995, Environmental Audit of the San José mine, 55 pp
- Francou, B. & Pizarro, L., 1985, El Niño y la sequía en los Altos Andes Centrales (Perú y Bolivia). *Bull. Inst. Français d'Etudes Andines*, 14: 1-18
- Förstner, U. & Wittman, G.T.W., 1983, *Metal Pollution in the Aquatic Environment* Springer-Verlag, Berlin. ISBN 3-540-12856-5. 486 pp.
- Garnica, A. 1995. Evaluación de la mancha de contaminación minera en el sector de Iroco y sus efectos en la cuenca baja del Río Desaguadero. Report from "Proyecto Regulación/Prevención Río Desaguadero".
- GEOBOL (Servicio Geológico de Bolivia) & BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 1994, Prospección y exploración de metales preciosos en el Departamento de Potosí, Bolivia. Informe Final (Tomo I-III), 510pp, and Boletín del Servicio Geológico de Bolivia No 5 (Especial), Año 1994: 204 pp.
- Itis, A. 1993, Recent limnological changes in a saline lake of the Bolivian Altiplano. Lake Poopó *Int. J. Salt Lake Res.* 2(1) 17-28

## *APENDICE 1*

*Concentraciones, descargas mensuales, transportes  
a lagos y ríos*

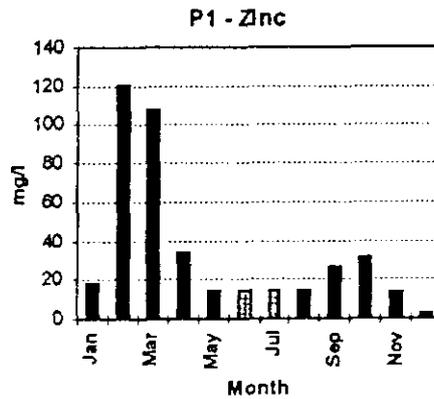
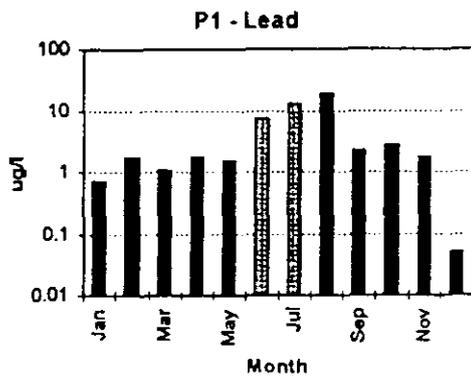
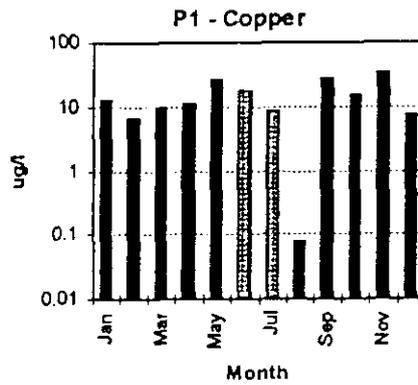
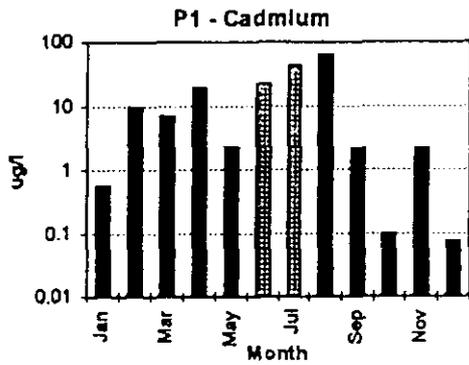
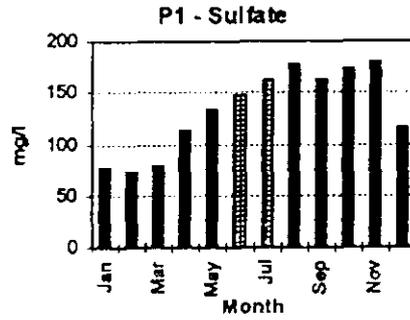
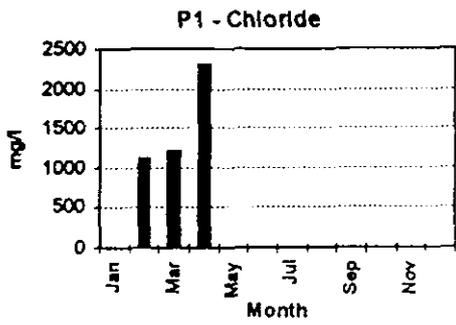
## *APPENDIX I*

*Concentrations, monthly discharge, transport in rivers and lakes*

## APPENDIX 1

**Monthly average modified concentrations P-1**

Month	Cl- mg/l	SO4- mg/l	Ag ug/l	Cd ug/l	Cu ug/l	Fe mg/l	Mn ug/l	Pb ug/l	Sb ug/l	Zn ug/l	As ug/l
Jan		76.5	0.10	0.56	12.7	0.57	34.8	0.7	3.2	18	32
Feb	1118.6	74.1	0.15	9.38	6.8	0.42	27.4	1.7	4.4	120.6	24.1
Mar	1226.4	77.8	0.16	7.04	10.1	0.13	13.5	1.1	8.0	107.5	33.2
Apr	2310.4	112.1	0.20	20.20	11.5	0.05	26.0	1.7	58.2	33.7	22.5
May		132.6	0.40	2.26	26.2	0.01	3.9	1.5	6.3	14.3	63.0
Jun		147.4	0.27	22.51	17.5	0.04	14.3	7.2	4.5	14.3	57.0
Jul		162.2	0.14	42.75	8.8	0.07	24.6	12.9	2.8	14.3	51.0
Aug		177.0	0.01	63.00	0.1	0.10	35.0	18.7	1.0	14.3	45.0
Sep		162.3	0.40	2.19	28.3	0.16	77.8	2.3	7.1	26.9	72.0
Oct		173.0	0.56	0.10	15.0	0.03	66.0	2.8	8.3	31.0	61.6
Nov		179.7	0.88	2.22	33.2	0.09	49.6	1.7	11.8	14.2	30.0
Dec		116.4	0.10	0.08	7.7	0.02	2.0	0.1	3.7	2.8	2.8
Year	1552	132.6	0.28	14.36	14.8	0.14	31.2	4.4	9.9	34.4	41.2



■ Analyzed concentration

▨ Extrapolated concentration

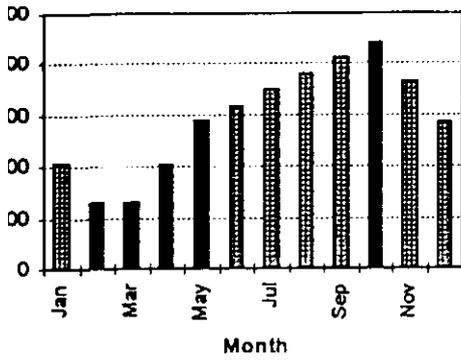
**MONTHLY AVERAGE INDIAN CONCENTRATIONS r-2**

**Revised January 1997**

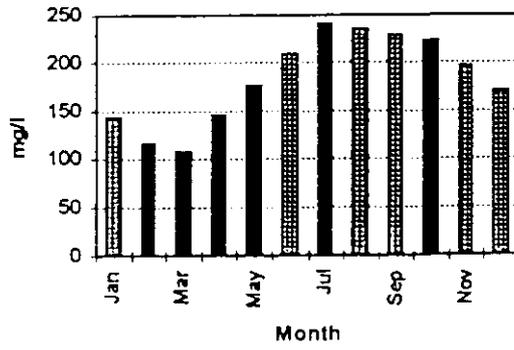
Month	Cl- mg/l	SO4- mg/l	Ag mg/l	Cd ug/l	Cu mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	Pb ug/l	Sb ug/l	Zn mg/l	As ug/l
Jan	2080	143		18.0	0.07	0.16	0.06	15.1	2051	0.23	2.5
Feb	1301	117		6.9	0.09	0.06	0.04	2.3	2	0.08	1.4
Mar	1313	109		23.3	0.03	0.09	0.05	1.5	2	0.37	9.1
Apr	2059	145		35.5	0.01	0.07	0.09	1.8	3	0.47	18.1
May	2871	177		50.0	0.01	0.09	0.10	1.4	8	0.59	27.1
Jun	3181	209		72.5	0.05	0.08	0.16	8.0	292	0.87	36.0
Jul	3490	241	0.01	95.0	0.10	0.06	0.21	14.5	575	1.14	45.0
Aug	3800	235	0.01	35.0	0.03	0.13	0.05	5.5	1000	0.13	31.9
Sep	4109	229	0.03	60.0	0.01	0.32	0.18	100.0	1400	0.21	18.9
Oct	4419	223	0.05	51.3	0.02	0.46	0.14	53.4	8200	0.67	5.8
Nov	3639	197		40.2	0.04	0.36	0.11	40.6	6150	0.53	4.7
Dec	2860	170		29.1	0.06	0.26	0.09	27.9	4101	0.38	3.6
Year	2949	183	0.03	47.7	0.04	0.15	0.11	20.9	1278	0.50	21.5

l/s	Pooppb s/month	m3 water	Cl-trpt tonnes	SO4-trpt tonnes	Ag-trpt kg	Cd-trpt kg	Cu-trpt kg	Fe-trpt kg	Mn-trpt kg	Pb-trpt kg	Sb-trpt kg	Zn-trpt kg	As-trpt kg
439	2678400	11758186	2446	169		21	88	192	74	18	5494	271	
622	2419200	1504742	1958	176		10	140	95	56	4	4	125	
423	2678400	1132963	1487	123		26	35	105	57	4	5	419	10
194	2592000	502848	1035	73		18	6	37	45	5	9	236	
96	2678400	257126	738	46		13	3	23	26	4	22	152	
34	2592000	88128	280	18		6	5	7	14	21	756	76	
27	2678400	72317	252	17		7	7	5	15	39	1540	82	3
27	2678400	72317	275	17		3	2	9	3	15	2678	9	
27	2592000	69984	288	16		4	1	22	13	259	3629	15	
96	2678400	257126	1136	57		13	5	119	36	143	21963	173	1
105	2592000	272160	990	54		11	10	99	31	105	15942	143	
194	2678400	519610	1486	88		15	29	137	46	75	10984	197	
2284	2828000	6002352	17701	1098		286	236	916	672	55	3353	3023	
	Summa	5925139	12372	854	16.4	148	331	849	415	55	3353	1900	127
190				SO4 854		Cd 148	Cu 1781	Fe 849	Mn 415	Pb 56	Sb 9	Zn 1900	

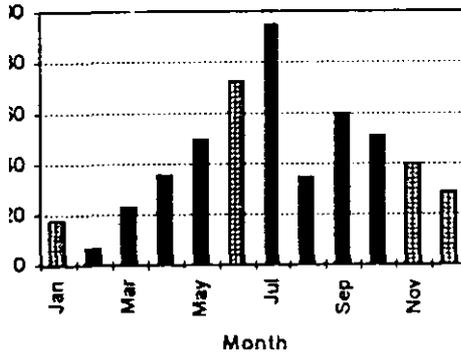
P2 - Chloride



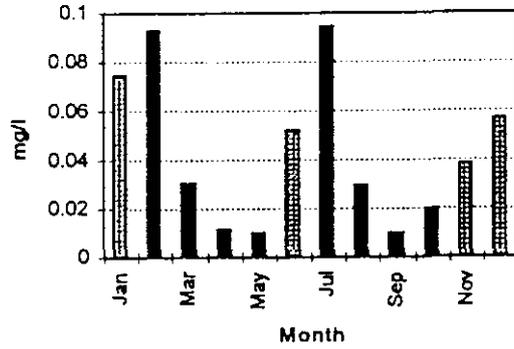
P2 - Sulfate



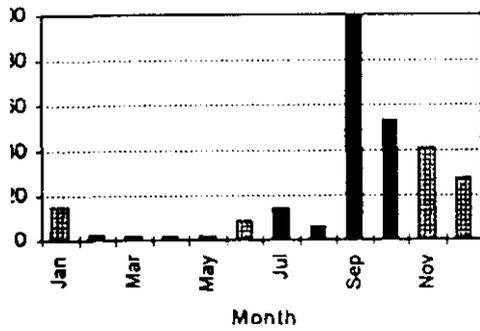
P2 - Cadmium



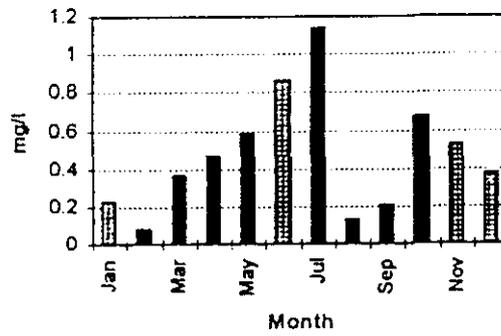
P2 - Copper



P2 - Lead



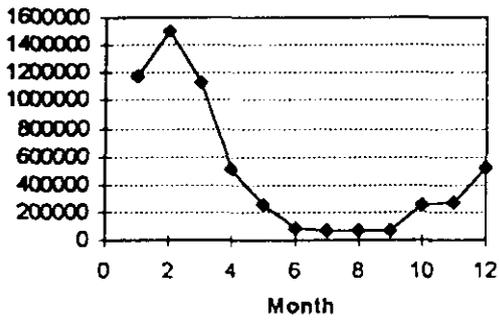
P2 - Zinc



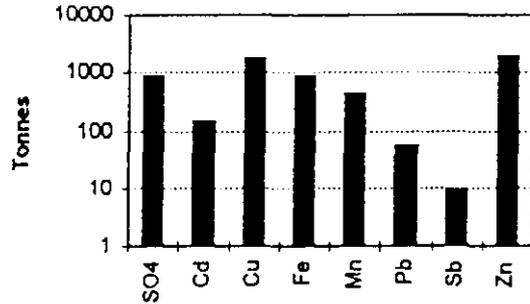
■ Analyzed concentration

▨ Extrapolated concentration

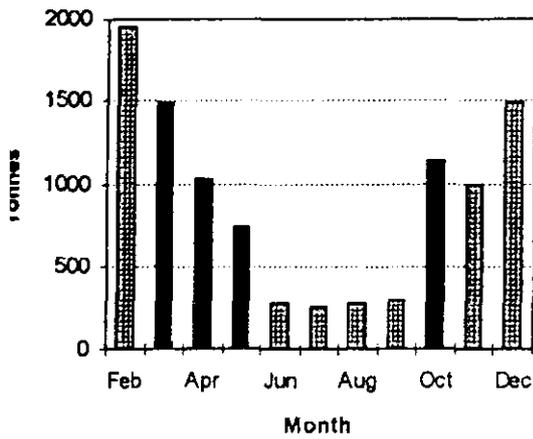
P2 - Monthly discharge



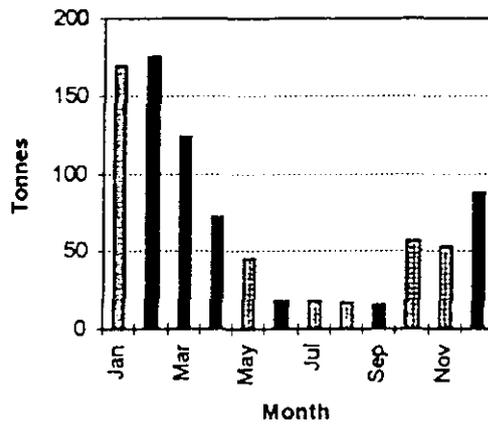
P2 - Annual transport



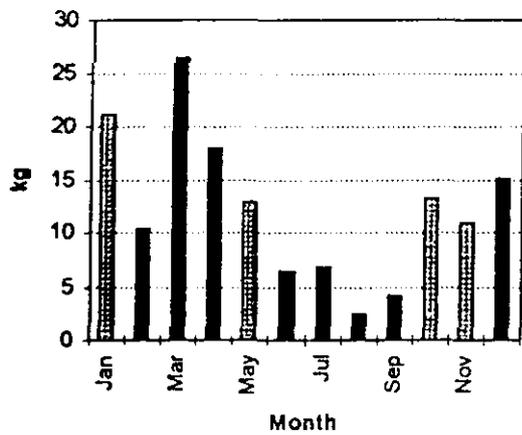
P2 - Chloride



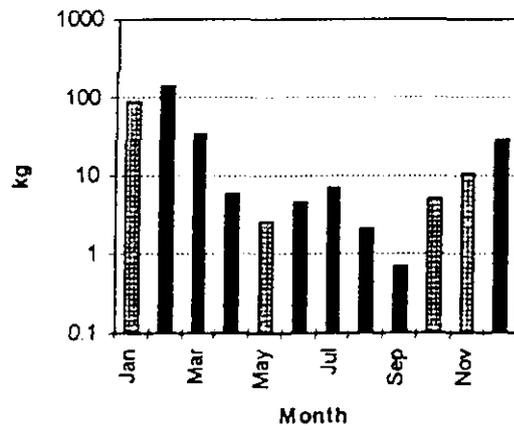
P2 - Sulfate



P2 - Cadmium



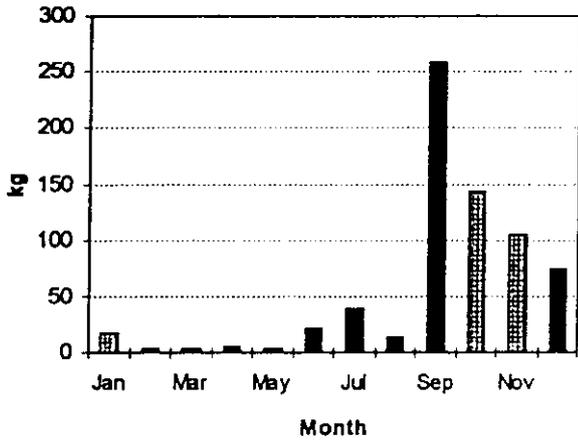
P2 - Copper



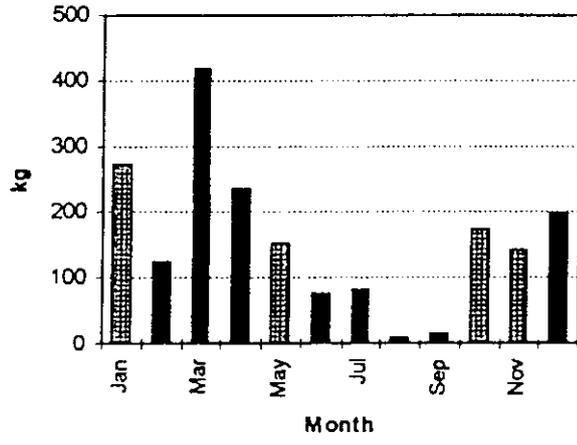
■ Transport based on analyzed concentration

▨ Transport based on estimated concentration

P2 - Lead



P2 - Zinc



■ Transport based on analyzed concentration

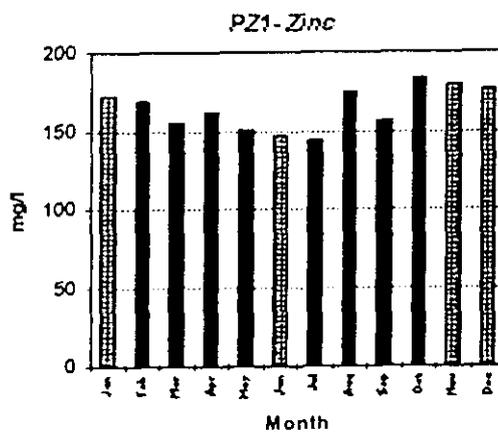
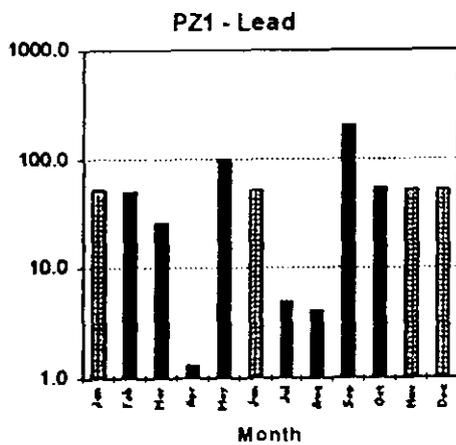
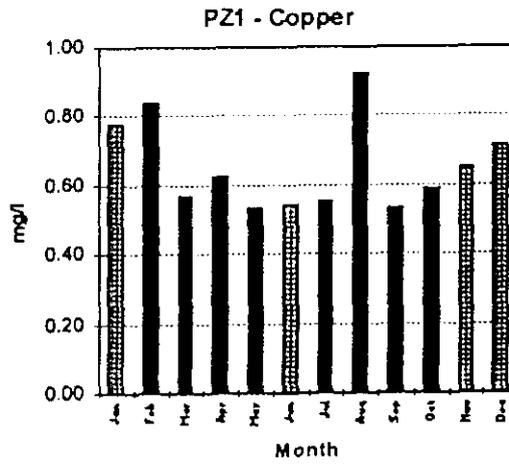
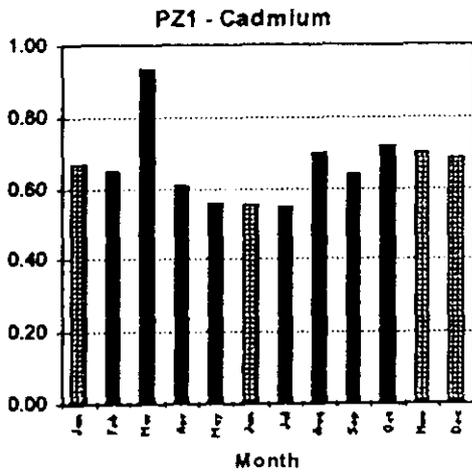
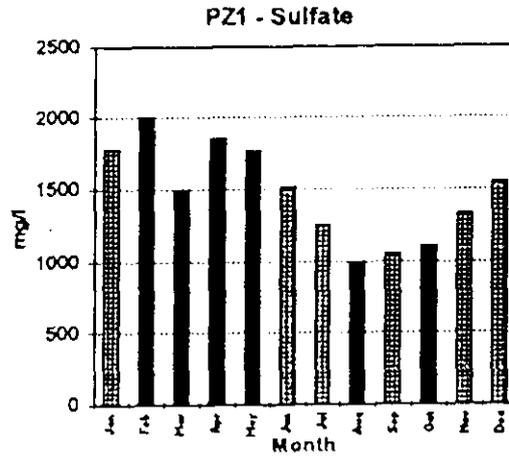
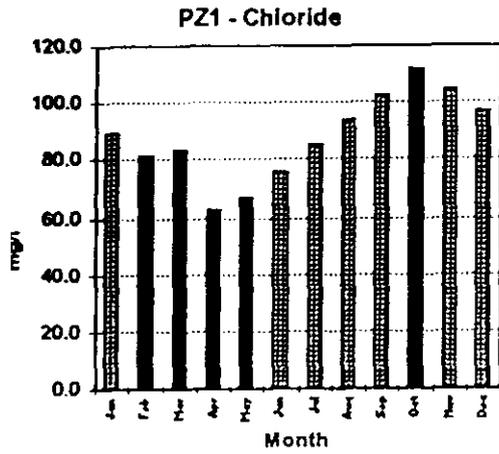
▨ Transport based on estimated concentration

**Monthly average modified concentrations PZ-1**

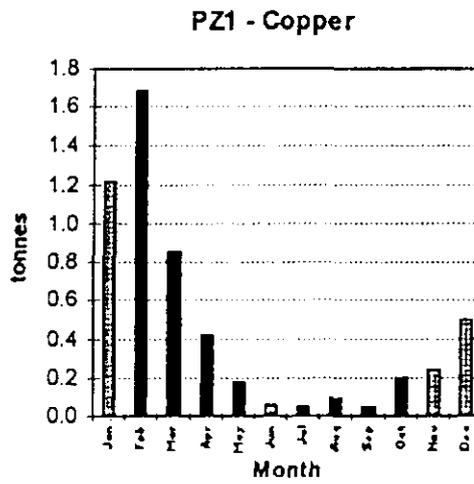
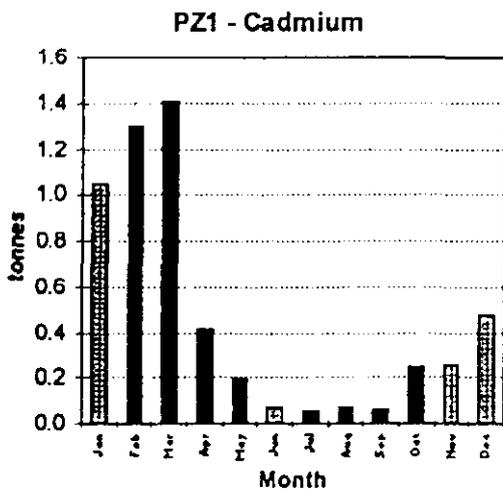
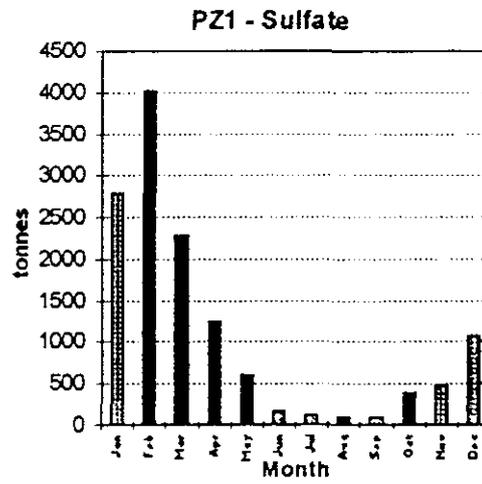
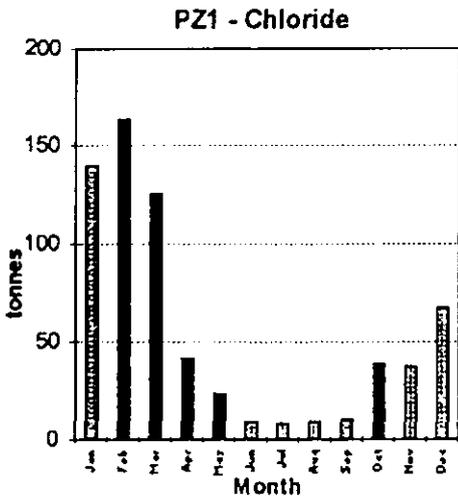
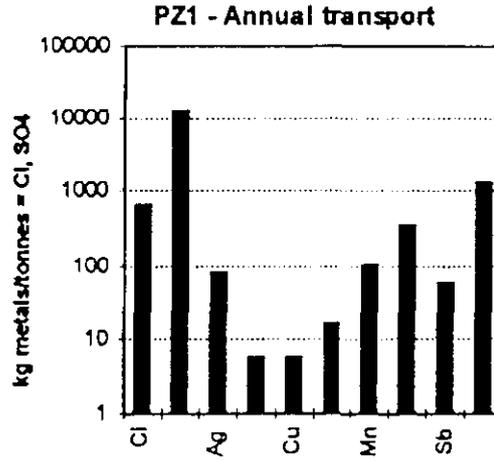
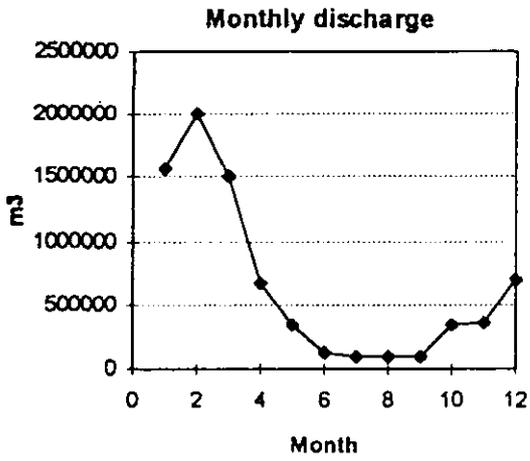
Month	Cl- mg/l	SO4- mg/l	Ag mg/l	Cd mg/l	Cu mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	Pb ug/l	Sb ug/l	Zn mg/l	As mg/l
Jan	89.2	1777	0.01	0.67	0.78	2.40	14.6	51.0	10.6	172	
Feb	81.8	2002	0.01	0.65	0.84	3.10	14.0	50.4	14.0	169	
Mar	83.0	1510	0.01	0.94	0.57	2.14	10.1	26.2	4.6	155	
Apr	62.7	1853	0.01	0.61	0.63	1.71	12.5	1.3	3.3	162	
May	67.0	1768	0.01	0.56	0.53	0.88	11.6	100.0	0.1	151	
Jun	76.0	1512	0.01	0.56	0.54	0.65	12.7	52.5	0.4	148	
Jul	84.9	1257	0.01	0.55	0.55	0.42	13.8	5.0	0.6	144	
Aug	93.8	1001	0.01	0.70	0.92	0.09	14.0	4.0	0.7	175	0.05
Sep	102.8	1051	0.01	0.64	0.53	0.03	14.4	200.0	0.7	157	
Oct	111.7	1102	0.01	0.72	0.59	0.29	16.5	53.1	0.7	183	0.01
Nov	104.2	1327	0.01	0.70	0.65	0.99	15.8	52.4	4.0	180	
Dec	96.7	1552	0.01	0.68	0.71	1.69	15.2	51.7	7.3	176	
Year	87.8	1478	0.01	0.66	0.65	1.20	13.8	54.0	3.9	184	0.03

Antequera		Cl-trtpt	SO4-trtpt	Ag-trtpt	Cd-trtpt	Cu-trtpt	Fe-trtpt	Mn-trtpt	Pb-trtpt	Sb-trtpt	Zn-trtpt	As-trtpt
/s	s/month	tonnes	tonnes	kg	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	kg	kg	tonnes	
584	2678400	1564186	2780	15.7	1.0	1.2	3.7	22.9	79.8	16.6	269	
828	2419200	2003098	4010	20.0	1.3	1.7	6.2	28.0	100.9	27.9	338	
563	2678400	1507939	2277	15.1	1.4	0.9	3.2	15.2	39.5	7.0	233	
259	2592000	671328	1244	6.7	0.4	0.4	1.1	8.4	0.9	2.2	109	
128	2678400	342835	606	3.4	0.2	0.2	0.3	4.0	34.3	0.0	52	
46	2592000	119232	180	1.2	0.1	0.1	0.1	1.5	6.3	0.0	18	
37	2678400	99101	125	1.0	0.1	0.1	0.0	1.4	0.5	0.1	14	
37	2678400	99101	99	1.0	0.1	0.1	0.0	1.4	0.4	0.1	17	0.004
37	2592000	95904	101	1.0	0.1	0.1	0.0	1.4	19.2	0.1	15	
128	2678400	342835	378	3.5	0.2	0.2	0.1	5.6	18.2	0.2	63	
140	2592000	362880	482	3.7	0.3	0.2	0.4	5.7	19.0	1.5	65	
259	2678400	693706	1077	7.0	0.5	0.5	1.2	10.6	35.9	5.1	122	
3046	2678400	8158406	12042	82.0	5.4	5.3	9.8	112.4	440.2	32.0	1340	
	Total:	7902144	13357	79.4	5.6	5.5	16.4	106.1	354.7	60.8	1315	212.934
			Cl	SO4	Ag	Cd	Cu	Fe	Pb	Sb	Zn	
			673	13357	79.4	5.6	5.5	16.4	354.7	60.8	1315	

APPI-7



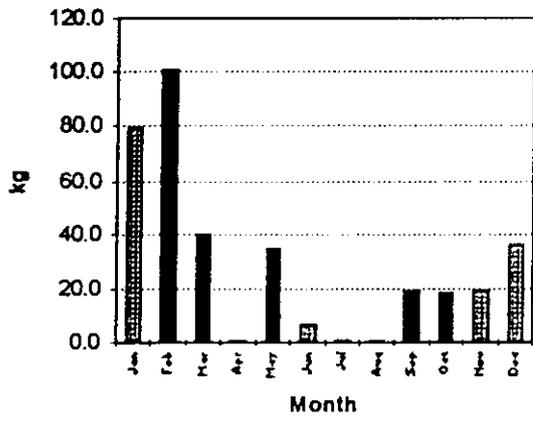
Analyzed concentration
  Extrapolated concentration



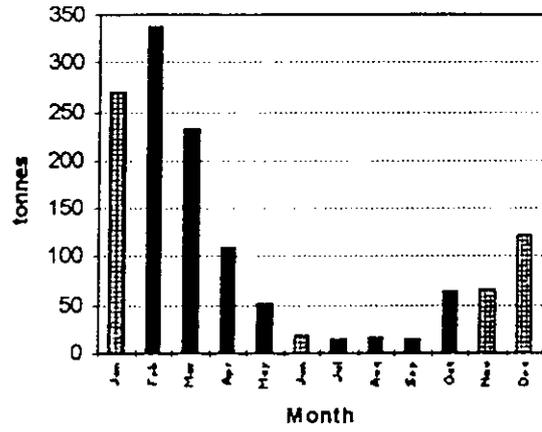
■ Transport based on analyzed concentration

▨ Transport based on estimated concentration

**PZ1 - Lead**



**PZ1- Zinc**



■ Transport based on analyzed concentration

▨ Transport based on estimated concentration

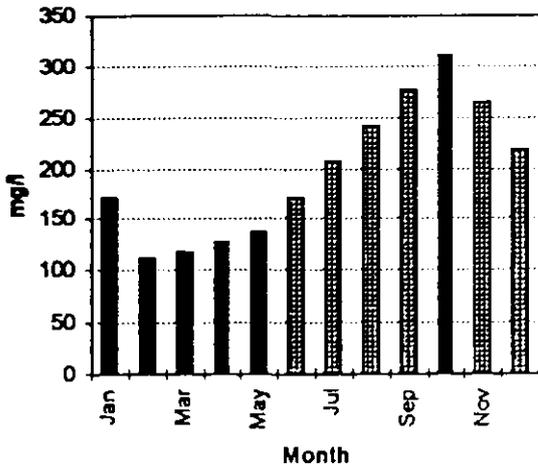
**Average Modified Concentrations P-2.3**

Revised data January 1997

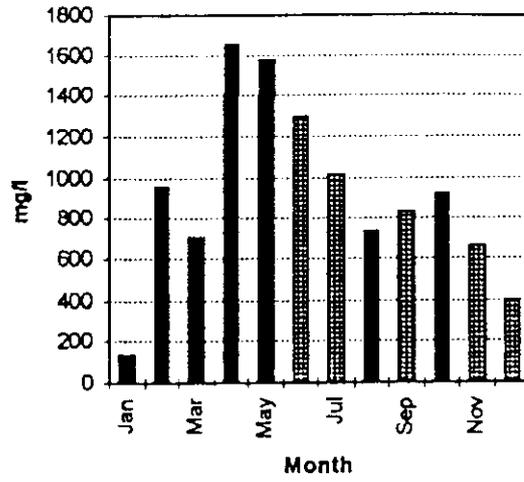
Month	Cl-	SO4-	Ag	Cd	Cu	Fe	Mn	Pb	Sb	Zn	As
	mg/l	ug/l	mg/l	mg/l	ug/l						
Jan	173	137	0.01	0.47	0.43	0.08	14.3	17.2	0.15	214.0	0.5
Feb	113	956	0.01	0.61	0.76	1.30	12.4	150.0	0.11	157.9	0.3
Mar	118	703	0.01	0.56	0.57	1.06	12.0	10.5	0.07	151.3	2.0
Apr	127	1653	0.01	0.53	0.53	0.60	10.1	1.0	0.00	140.0	1.6
May	137	1573	0.01	0.42	0.37	0.15	8.1	1.2	0.00	116.0	1.2
Jun	172	1294	0.01	0.39	0.26	0.08	8.2	1.6	0.20	94.0	0.8
Jul	207	1015	0.01	0.35	0.15	0.01	8.2	2.0	0.40	72.0	0.4
Aug	241	736	0.02	0.39	0.20	0.12	7.4	32.7	0.22	81.1	0.0
Sep	276	828	0.01	0.28	0.02	0.00	6.2	100.0	0.70	71.6	0.2
Oct	311	920	0.02	0.69	0.17	0.18	9.5	20.1	0.30	110.1	0.3
Nov	265	659	0.02	0.62	0.25	0.14	11.1	19.1	0.25	144.7	0.3
Dec	219	398	0.02	0.54	0.34	0.11	12.7	18.2	0.20	179.4	0.4
Year Mean	197	906	0.01	0.49	0.34	0.32	10.0	31.1	0.22	127.7	0.7
Year Median	190	874	0.01	0.50	0.30	0.13	9.8	17.7	0.20	128.0	0.4

Antequera		Cl-trtp	SO4-trtp	Ag-trtp	Cd-trtp	Cu-trtp	Fe-trtp	Mn-trtp	Pb-trtp	Sb-trtp	Zn-trtp	As-trtp
l/s	s/month	m3	tonnes	tonnes	kg	kg	kg	tonnes	kg	kg	tonnes	tonnes
923	2678400	2472163	428	339	30.9	1162	198	35.4	42.5	380.7	529	1.24
1308	2419200	3164314	358	3025	31.6	1914	4098	39.2	474.6	332.3	500	0.95
889	2678400	2381098	281	1674	29.8	1339	2518	28.5	24.9	161.9	360	4.64
409	2592000	1060128	134	1752	10.6	559	631	10.7	1.0	2.1	148	
202	2678400	541037	74	851	5.4	227	81	4.4	0.6	1.1	63	
72	2592000	186624	32	242	1.9	72	15	1.5	0.3	37.5	18	
58	2678400	155347	32	158	1.9	54	2	1.3	0.3	62.1	11	
58	2678400	155347	37	114	2.3	60	18	1.1	5.1	34.2	13	0.01
58	2592000	150336	42	124	1.5	42	0	0.9	15.0	105.2	11	
202	2678400	541037	168	498	10.8	372	95	5.2	10.9	162.9	60	
221	2592000	572832	152	377	10.0	352	82	6.4	11.0	144.4	83	
409	2678400	1095466	240	436	16.4	594	123	13.9	19.9	222.4	196	
4809	2678400	12880426	2532	11870	186.4	8261	4103	126.9	400.8	2798.3	1644	5.44
Total:		12475728	1978	9590	153.2	6750	7862	148.4	606.1	1646.7	1991	
		tonnes:	1978	9590	0.2	7	8	0.1	0.6	1.6	2	

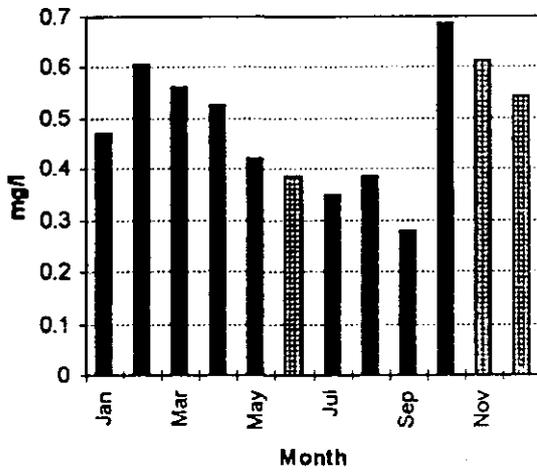
PZ3 - Chloride



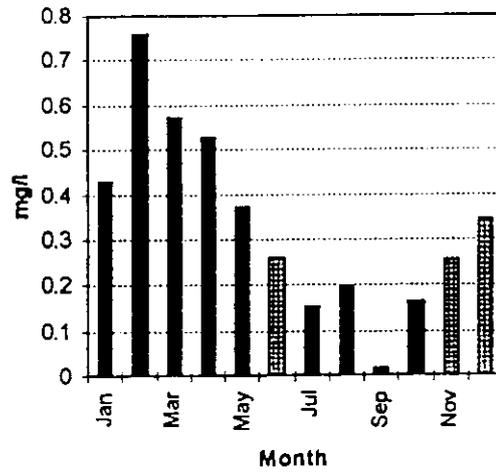
PZ3 - Sulfate



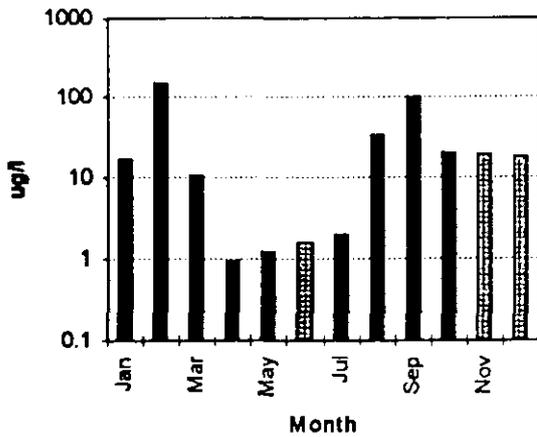
PZ3 - Cadmium



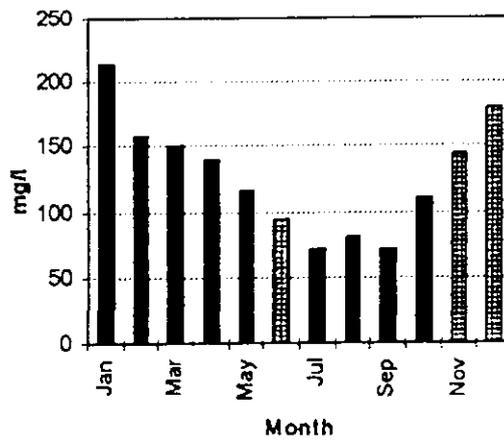
PZ3 - Copper



PZ3 - Lead



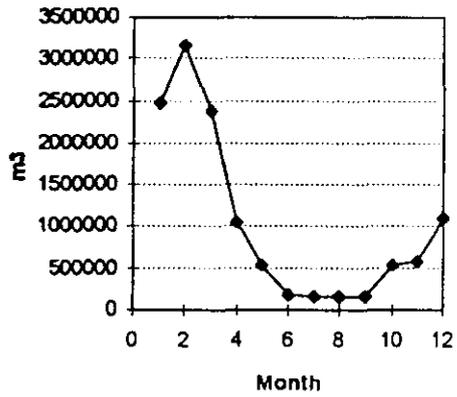
PZ3 - Zinc



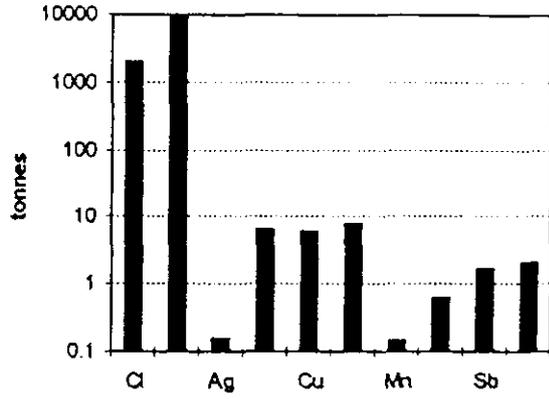
■ Analyzed concentration

▨ Extrapolated concentration

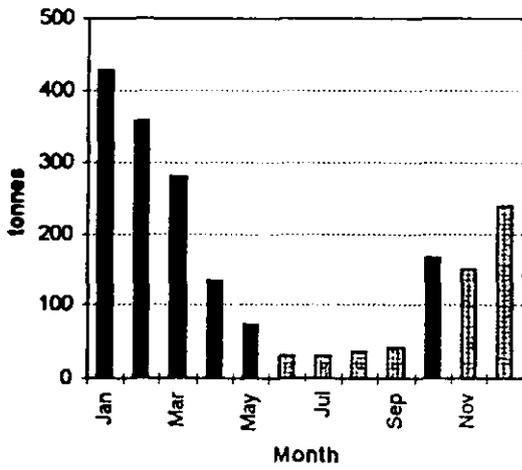
PZ3 - Monthly discharge



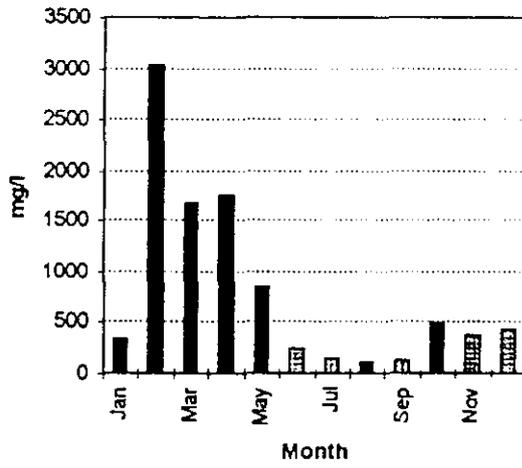
PZ3 - Annual transport



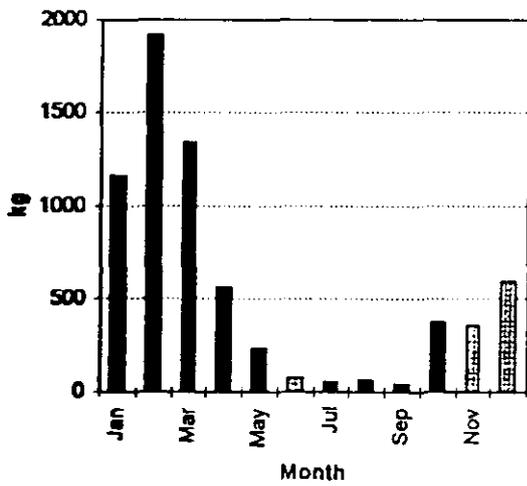
PZ3 - Chloride



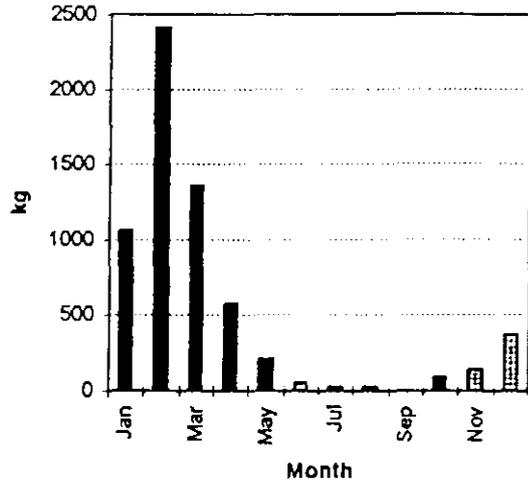
PZ3 - Sulfate

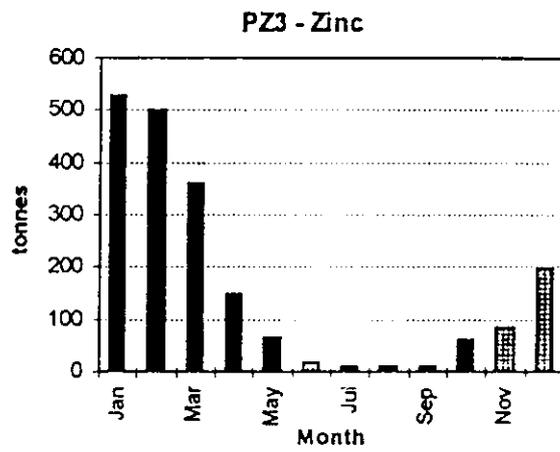
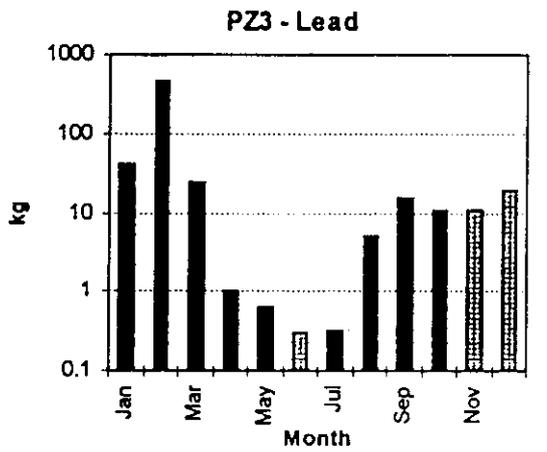


PZ3 - Cadmium



PZ3 - Copper





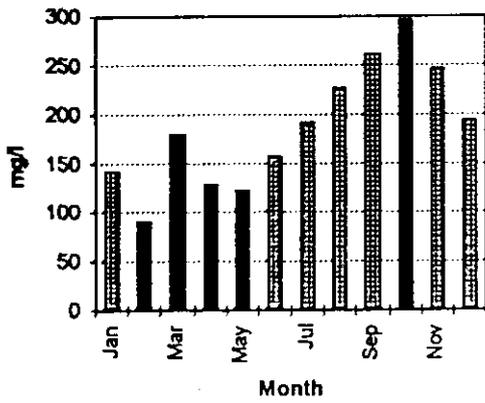
■ Transport based on analyzed concentration

▨ Transport based on estimated concentration

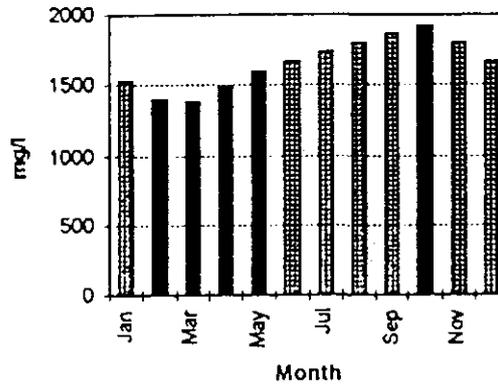
Month	Average concentrations																						
	Cl-	SO4-	Ag	Cd	Cu	Fe	Mn	Pb	Sb	Zn	As	Cl-trpt	SO4-trpt	Ag-trpt	Cd-trpt	Cu-trpt	Fe-trpt	Mn-trpt	Pb-trpt	Sb-trpt	Zn-trpt	As-trpt	
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	ug/l	ug/l	ug/l	tonnes	tonnes	kg	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	kg	tonnes	kg
Jan	142	1528		1.14	1.03	57.6	14.7	0.09	0.84	312							59.1	15.05	0.09	0.66	320.19		
Feb	90.5	1395		1.12	0.90	36.8	11.9	0.10	0.75	285							48.3	15.60	0.13	0.98	373.69		
Mar	180	1382		1.15	0.82	30.6	11.2	0.10	1.23	254	7.7						30.2	11.05	0.10	1.21	251.04	8	
Apr	129	1487		1.09	0.65	31.5	12.2	0.13	3.03	295							13.9	5.38	0.06	1.34	129.99		
May	123	1593		1.02	0.79	42.8	13.0	0.30	0.10	322							9.6	2.92	0.07	0.02	72.45		
Jun	158	1660		0.90	0.58	49.4	16.3	0.20	0.25	333							3.8	1.26	0.02	0.02	25.89		
Jul	193	1726		0.77	0.36	56.0	19.5	0.10	0.40	344							3.6	1.25	0.01	0.03	22.11		
Aug	227	1793		0.84	0.50	63.0	20.8	0.00	0.25	362							4.0	1.33	0.00	0.02	23.27		
Sep	262	1859	0.01	1.05	0.76	122.8	20.1	0.20	0.80	336							7.6	2.92	0.07	0.02	72.45		
Oct	297	1926	0.01	1.20	1.45	120.1	23.0	0.07	0.31	394	7.2						3.8	1.26	0.02	0.02	25.89		
Nov	245	1793		1.18	1.31	99.3	20.2	0.07	0.42	366							4.0	1.25	0.01	0.03	22.11		
Dec	194	1660		1.16	1.17	78.5	17.5	0.08	0.53	339							4.0	1.25	0.01	0.05	20.93		
Year	187	1650	0.01	1.05	0.86	65.7	16.7	0.12	0.73	329	7.5						266.6	73.05	0.55	4.73	1569.92		

l/s	Antequera													
	s/month	m3	tonnes	tonnes	kg	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	kg	tonnes	kg
383	2678400	1025827	145.7	1567		1.17	1.06	59.1	15.05	0.09	0.66	320.19		
542	2419200	1311206	118.6	1829		1.46	1.17	48.3	15.60	0.13	0.98	373.69		
369	2678400	988330	177.8	1366		1.13	0.81	30.2	11.05	0.10	1.21	251.04	8	
170	2592000	440640	56.8	655		0.48	0.29	13.9	5.38	0.06	1.34	129.99		
84	2678400	224986	27.7	358		0.23	0.18	9.6	2.92	0.07	0.02	72.45		
30	2592000	77760	12.3	129		0.07	0.04	3.8	1.26	0.02	0.02	25.89		
24	2678400	64282	12.4	111		0.05	0.02	3.6	1.25	0.01	0.03	22.11		
24	2678400	64282	14.6	115		0.05	0.03	4.0	1.33	0.00	0.02	23.27		
24	2592000	62208	16.3	116		0.07	0.05	7.6	1.25	0.01	0.05	20.93		
84	2678400	224986	66.8	433		0.27	0.33	27.0	5.17	0.01	0.07	88.53		
92	2592000	238464	58.5	428		0.28	0.31	23.7	4.82	0.02	0.10	87.37		
170	2678400	455328	88.2	756		0.53	0.53	35.7	7.95	0.04	0.24	154.47		
1996	2678400	5346086	997.8	8823		5.61	4.60	351.2	89.20	0.65	3.88	1756.48	40	
Total:		5178298	795.6	7864		5.79	4.83	266.6	73.05	0.55	4.73	1569.92		

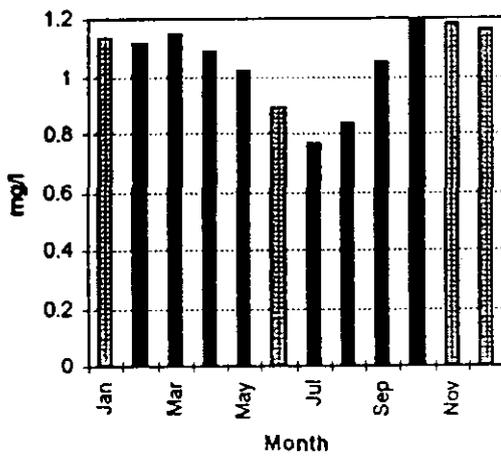
DA5 - Chloride



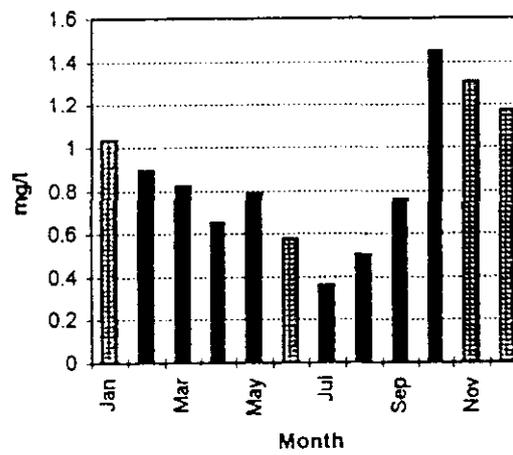
DA5 - Sulfate



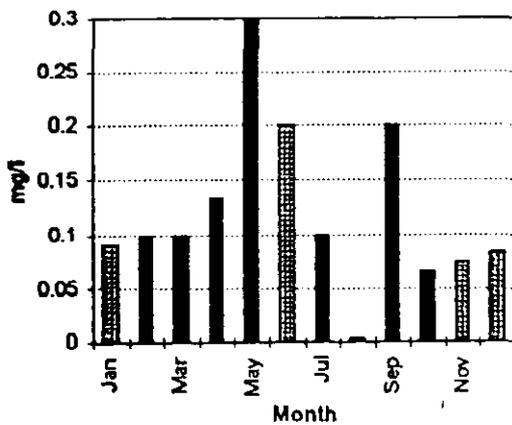
DA5 - Cadmium



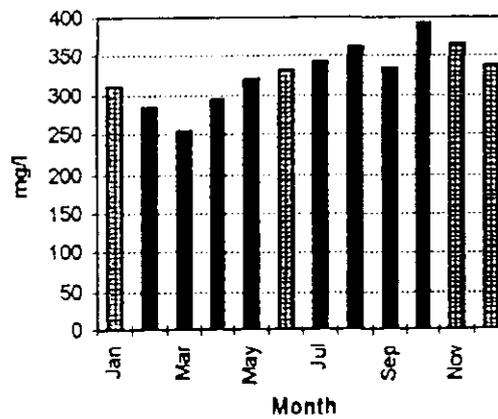
DA5 - Copper



DA5 - Lead

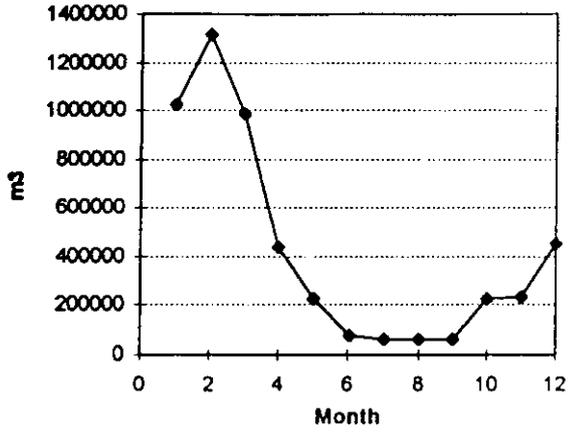


DA5 - Zinc

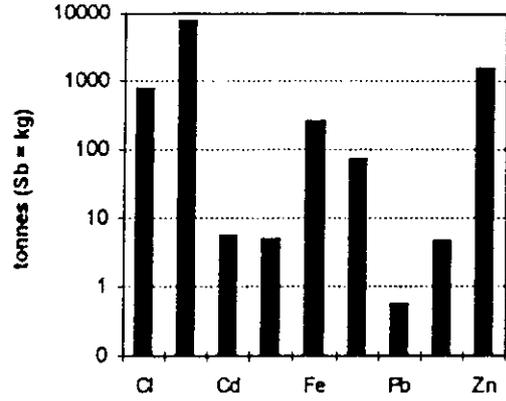


Analyzed concentration
  Extrapolated concentration

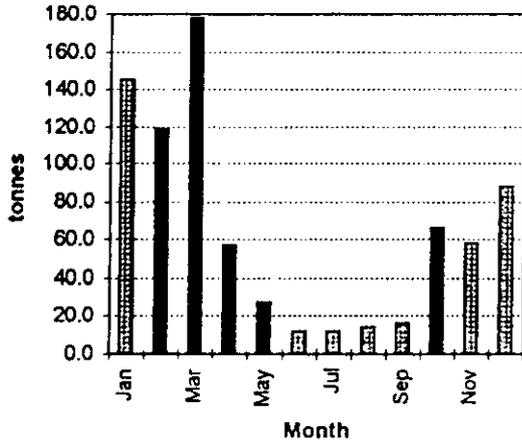
DA5 - Monthly discharge



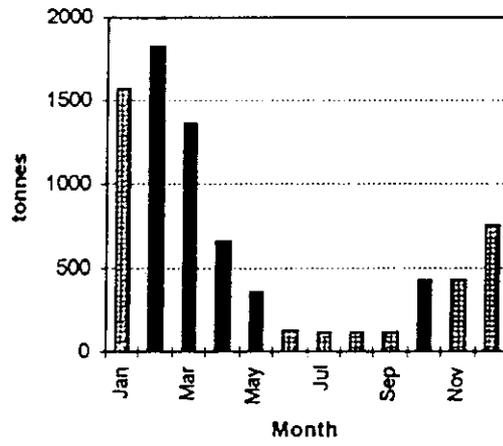
DA5 - Annual transport



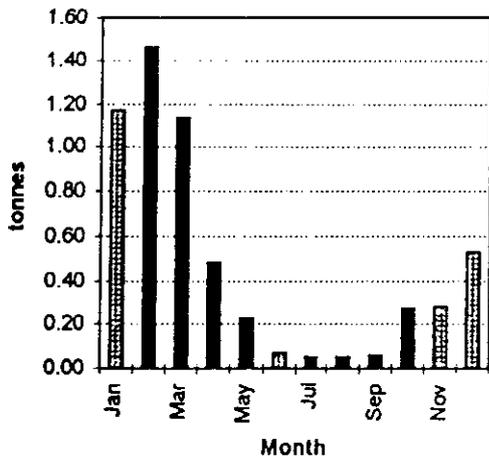
DA5 - Chloride



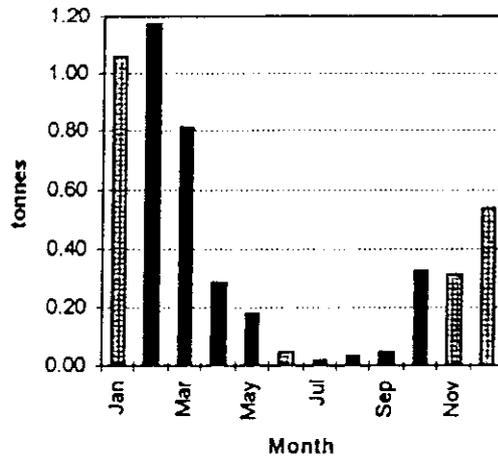
DA5 - Sulfate

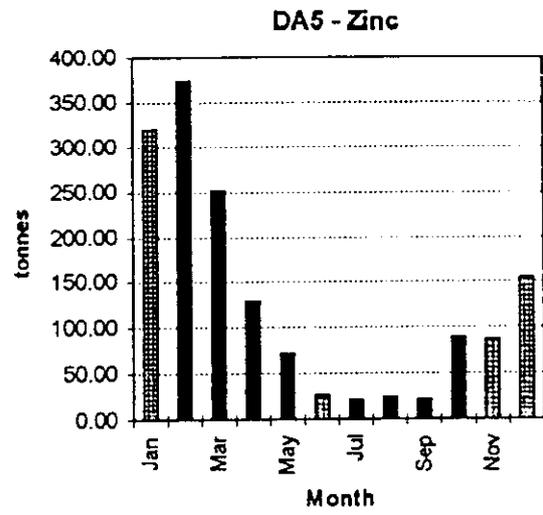
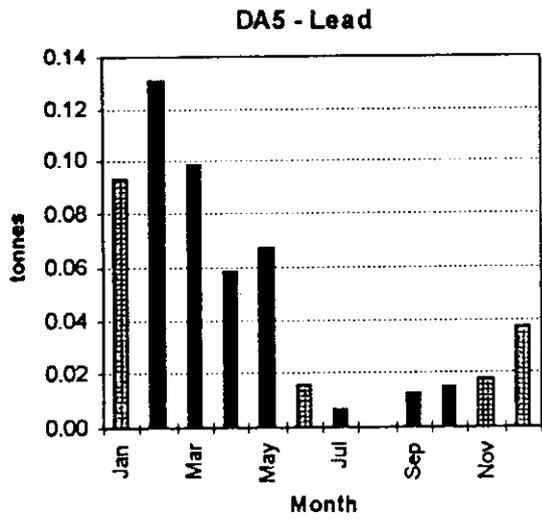


DA5 - Cadmium



DA5 - Copper





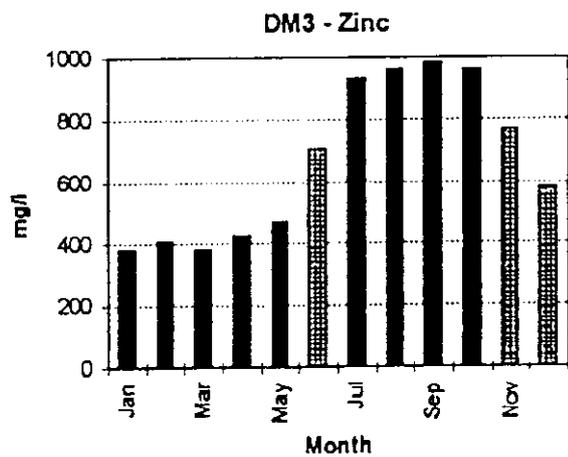
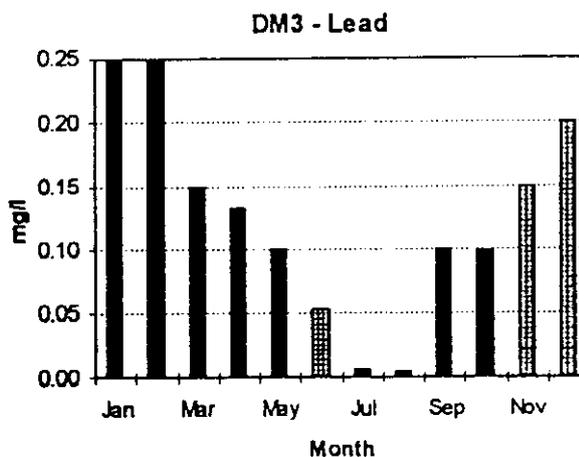
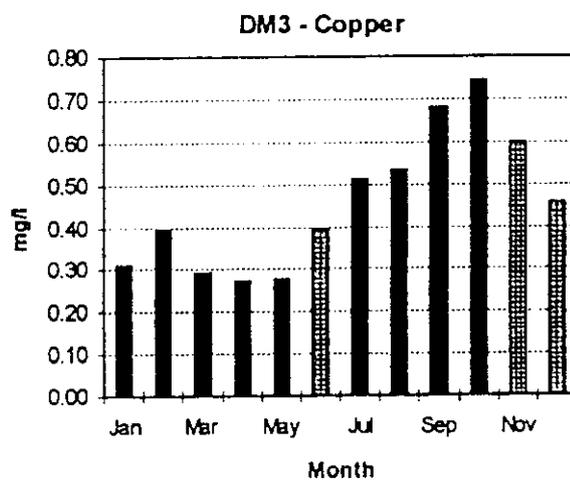
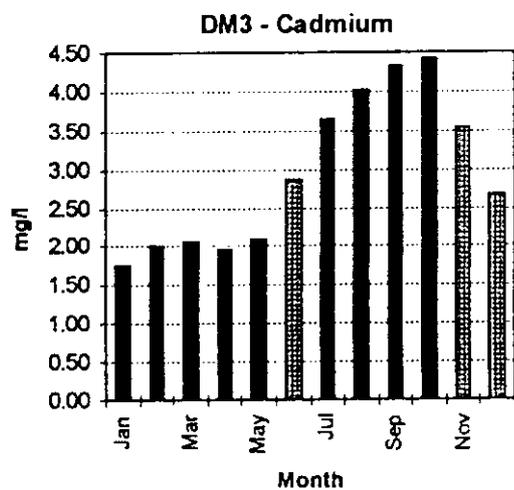
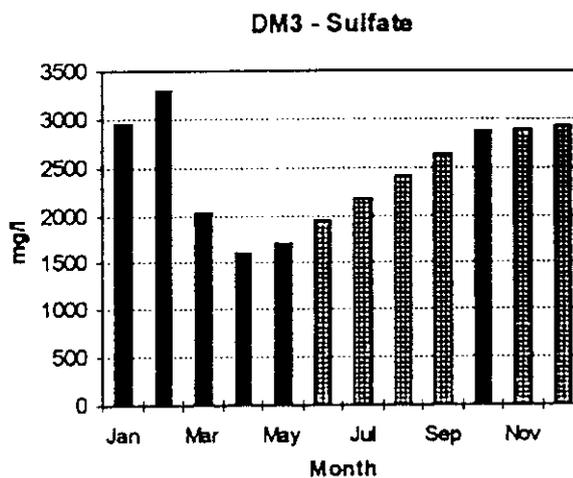
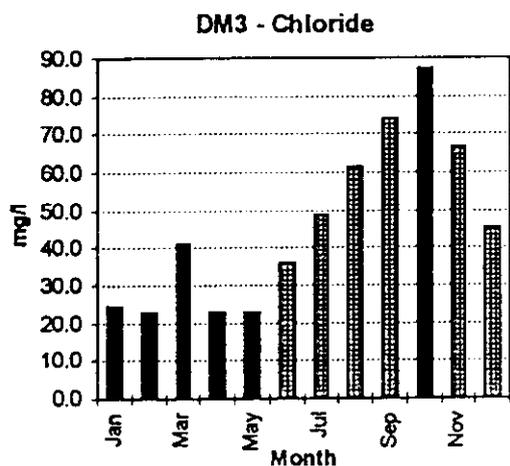
■ Transport based on analyzed concentration

▨ Transport based on estimated concentration

**Monthly average modified concentrations DM-3**

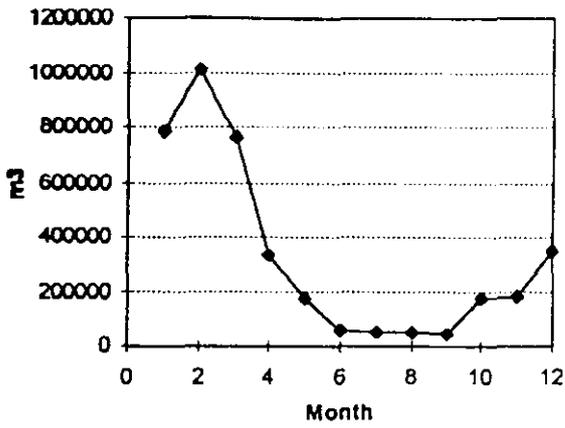
Month	Cl- mg/l	SO4- mg/l	Ag mg/l	Cd mg/l	Cu mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	Pb mg/l	Sb ug/l	Zn mg/l	As ug/l
Jan	24.6	2961	0.01	1.77	0.31	15.5	12.5	0.25	5.2	385	5.3
Feb	22.9	3303		2.01	0.40	13.0	12.5	0.25	14.8	407	1.4
Mar	41.2	2025		2.06	0.29	4.6	13.0	0.15	14.0	385	0.6
Apr	23.1	1607		1.96	0.27	2.6	14.0	0.13	9.8	431	
May	23.0	1719		2.08	0.28	1.7	16.0	0.10	12.1	474	
Jun	35.9	1950		2.87	0.40	1.0	18.5	0.05	6.3	702	
Jul	48.7	2180		3.65	0.51	0.2	21.0	0.01	0.4	930	
Aug	61.6	2411		4.03	0.54	1.2	22.5	0.01	0.5	965	
Sep	74.5	2641	0.01	4.33	0.68	4.6	29.0	0.10	0.6	980	
Oct	87.3	2872	0.02	4.43	0.75	2.8	31.9	0.10	0.7	962	113.0
Nov	66.4	2902		3.54	0.60	7.0	25.4	0.15	2.2	769	
Dec	45.5	2931		2.66	0.46	11.3	19.0	0.20	3.7	577	
Year	48.2	2458	0.01	2.95	0.46	5.4	19.8	0.12	5.8	664	30.1
Year	43.4	2526	0.01	2.76	0.43	3.7	18.7	0.12	4.4	640	3.4

Antequera			Cl-trpt	SO4-trpt	Ag-trpt	Cd-trpt	Cu-trpt	Fe-trpt	Mn-trpt	Pb-trpt	Sb-trpt	Zn-trpt	As-trpt
l/s	s/month	m3	tonnes	tonnes	kg	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	kg	tonnes	kg
294	2678400	787450	19.4	2331	0.01	1.4	0.24	12.2	9.84312	0.19686	4.09	303	4.17
417	2419200	1008806	23.1	3332		2.0	0.40	13.1	12.6101	0.2522	14.88	411	1.41
284	2678400	760666	31.3	1541		1.6	0.22	3.5	9.88865	0.1141	10.67	292	0.46
130	2592000	336960	7.8	541		0.7	0.09	0.9	4.71744	0.04482	3.30	145	
64	2678400	171418	3.9	295		0.4	0.05	0.3	2.74268	0.01714	2.07	81	
23	2592000	59616	2.1	116		0.2	0.02	0.1	1.1029	0.00316	0.37	42	
18	2678400	48211	2.3	105		0.2	0.02	0.0	1.01244	0.00029	0.02	45	
18	2678400	48211	3.0	116		0.2	0.03	0.1	1.08475	0.00024	0.02	47	
18	2592000	46656	3.5	123	0.00	0.2	0.03	0.2	1.35302	0.00467	0.03	46	
64	2678400	171418	15.0	492	0.00	0.8	0.13	0.5	5.45965	0.01711	0.11	165	19.37
70	2592000	181440	12.0	526		0.6	0.11	1.3	4.60858	0.02719	0.39	140	
130	2678400	348192	15.8	1021		0.9	0.16	3.9	6.59824	0.06962	1.28	201	
1530	2678400	4097952	189.4	10075	0.05	12.1	1.87	22.3	80.32	0.51108	23.95	2720	13.73
	Total:	3969043	139.3	10541		9.1	1.51	36.0	61.0215	0.74739	37.25	1917	
			Cl	SO4		Cd	Cu	Fe	Mn	Pb	Sb	Zn	
			139.3	10541		9.1	1.51	36.0	61.0215	0.74739	37.25	1917	

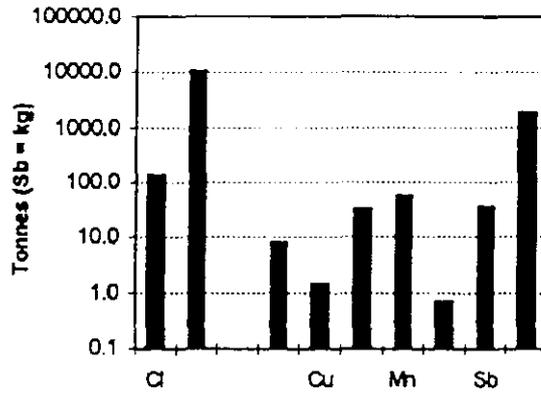


Analyzed concentration
  Extrapolated concentration

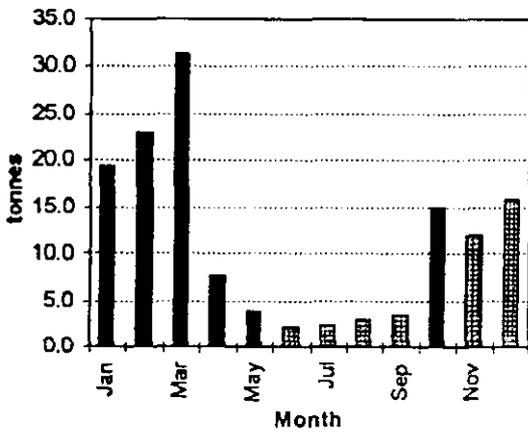
DM3 - Monthly discharge



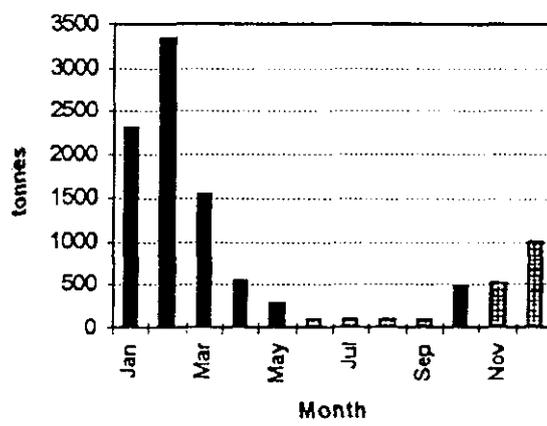
DM3 - Annual transport



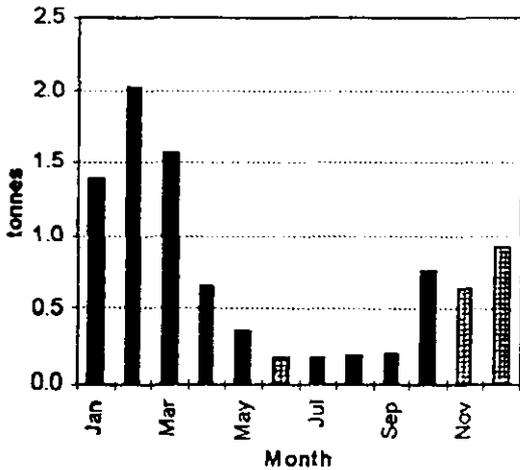
DM3 - Chloride



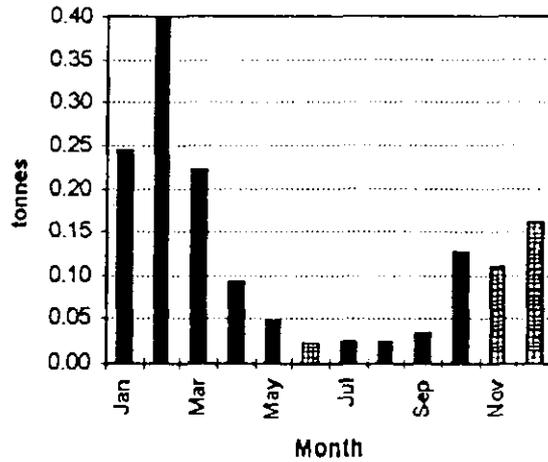
DM3 - Sulfate



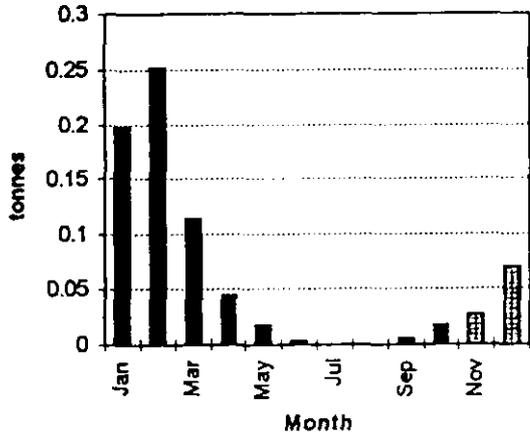
DM3 - Cadmium



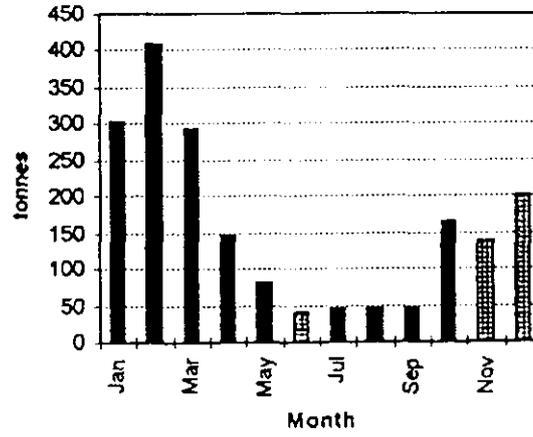
DM3 - Copper



DM3 - Lead



DM3 - Zinc



■ Transport based on analyzed concentration

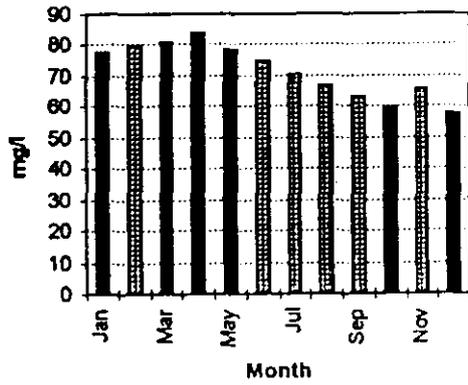
▨ Transport based on estimated concentration

### Monthly average modified concentrations ASF-6

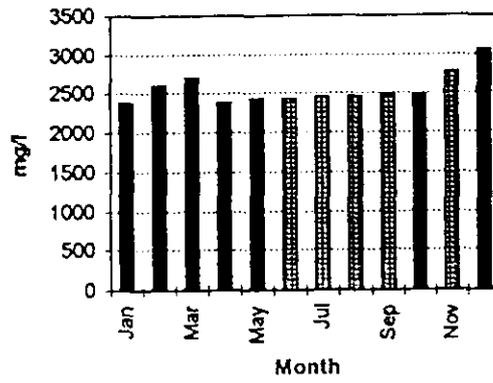
Revised data January 1997

Month	Cl- mg/l	SO4- mg/l	Ag mg/l	Cd mg/l	Cu mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	Pb mg/l	Sb mg/l	Zn mg/l	As ug/l	
Jan	78.03	2384.67	0.27	1.55	2.29	159.00	19.59	0.09	0.09	142.90	82.10	
Feb	79.38	2615.16	0.23	1.49	1.97	236.25	9.84	0.02	0.34	176.88	110.25	
Mar	80.72	2698.80	0.19	1.48	1.92	262.73	10.02	0.03	0.38	161.00	122.57	
Apr	83.73	2394.85	0.14	1.39	1.89	195.25	9.03	0.05	0.17	174.50	121.35	
May	78.29	2429.00	0.10	1.40	1.96	168.00	9.40	0.00	0.20	178.00	95.30	
Jun	74.51	2442.10	0.06	1.52	2.15	128.88	13.28	0.00	0.20	177.75	93.65	
Jul	70.72	2455.20	0.02	1.64	2.33	89.75	17.15	0.00	0.19	177.50	92.00	
Aug	66.94	2468.30	0.02	1.86	2.34	72.00	16.31	0.01	0.20	181.00	90.35	
Sep	63.15	2481.40	0.02	2.14	1.96	14.00	40.40	0.00	0.70	203.60	88.70	
Oct	59.37	2494.50	0.04	2.02	2.47	251.80	18.87	0.14	0.80	147.40	87.05	
Nov	65.59	2780.75	0.12	2.03	2.59	128.90	22.07	0.08	0.41	171.70	85.40	
Dec	58.00	3067.00	0.26	2.03	2.71	6.00	25.27	0.02	0.01	196.00	83.75	
Year	71.54	2559.31	0.12	1.71	2.21	142.71	17.77	0.04	0.31	174.02	86.04	
	<b>Santa - Fe</b>											
l/s	s/month	m3	Cl-trpt tonnes	SO4-trpt tonnes	Cd-trpt tonnes	Cu-trpt tonnes	Fe-trpt tonnes	Mn-trpt tonnes	Pb-trpt tonnes	Sb-trpt tonnes	Zn-trpt tonnes	As-trpt kg
576	2678400	1542758	120.4	3679.0	2.388	3.538	245.30	30.23	0.134	0.134	220.46	126.66
817	2419200	1976486	156.9	5168.8	2.949	3.890	466.94	19.44	0.039	0.663	349.60	217.91
555	2678400	1486512	120.0	4011.8	2.204	2.859	390.55	14.89	0.041	0.557	239.33	182.20
255	2592000	660960	55.3	1582.9	0.915	1.249	129.05	5.97	0.033	0.110	115.34	80.21
126	2678400	337478	26.4	819.7	0.472	0.661	56.70	3.17	0.000	0.067	60.07	32.16
45	2592000	116640	8.7	284.8	0.191	0.250	15.03	1.55	0.000	0.024	20.73	10.92
36	2678400	96422	6.8	236.7	0.179	0.225	8.65	1.65	0.000	0.019	17.11	8.87
36	2678400	96422	6.5	238.0	0.206	0.226	6.94	1.77	0.001	0.019	17.45	8.71
36	2592000	93312	5.9	231.5	0.188	0.183	1.31	3.77	0.000	0.065	19.00	8.28
126	2678400	337478	20.0	841.8	0.682	0.834	84.98	6.37	0.047	0.270	49.74	29.38
138	2592000	357696	23.5	994.7	0.724	0.926	46.11	7.89	0.029	0.145	61.42	30.55
255	2678400	682992	39.6	2094.7	1.386	1.851	4.10	17.26	0.014	0.007	133.87	57.20
3001	2628000	7886628	564.2	20184.3	13.501	17.468	1125.52	140.13	0.286	2.416	1372.42	757.43
	Tot. all	7785158	589.99	20184.6	12.487	16.691	1455.66	113.95	0.337	2.081	1304.12	793.05

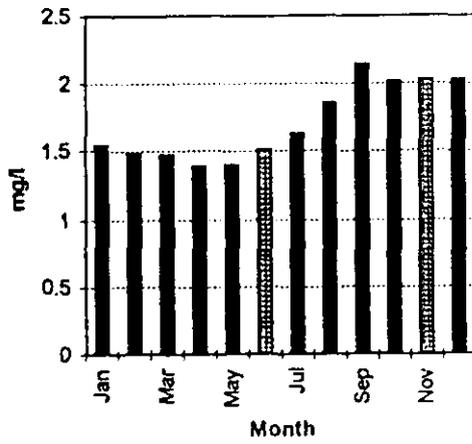
ASF6 - Chloride



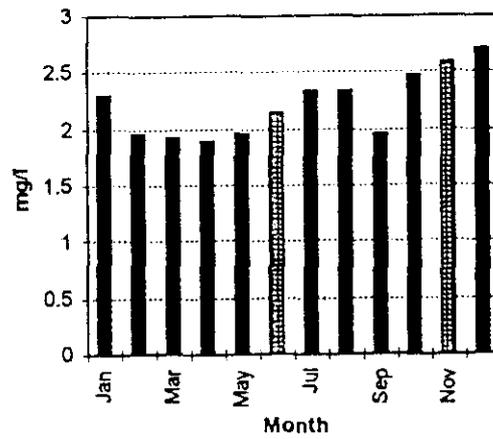
ASF6 - Sulfate



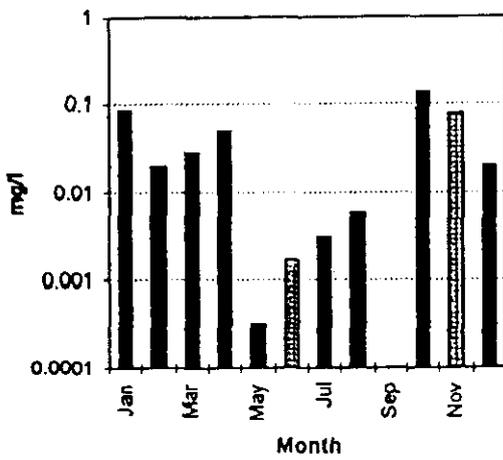
ASF6 - Cadmium



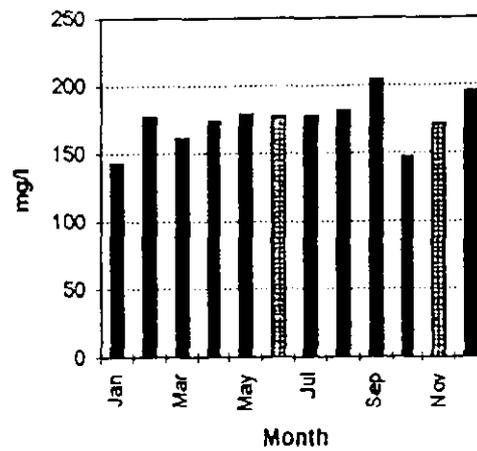
ASF6 - Copper



ASF6 - Lead

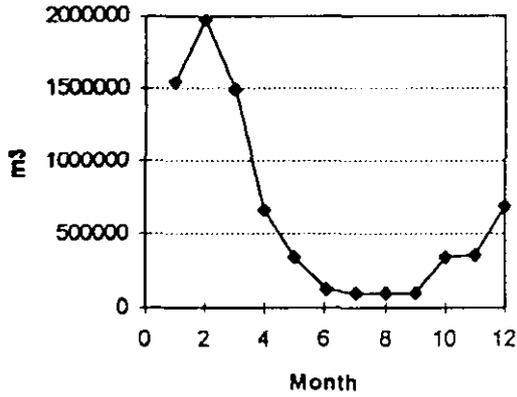


ASF6 - Zinc

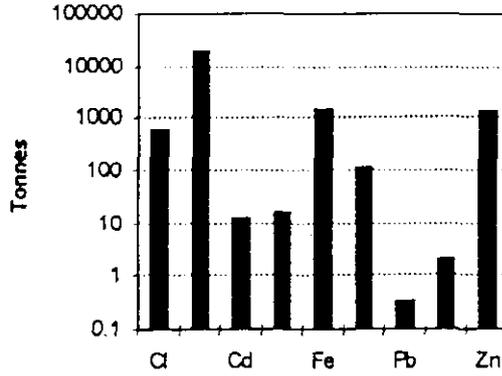


■ Analyzed concentration    ▨ Extrapolated concentration

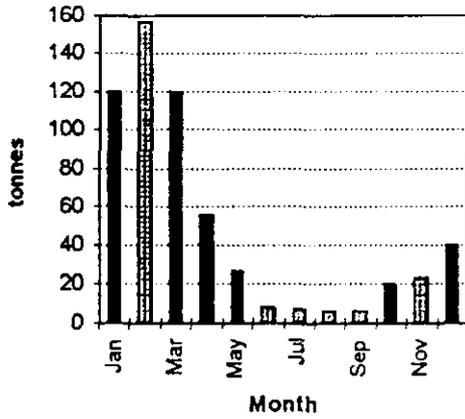
ASF6 - Monthly discharge flow rate



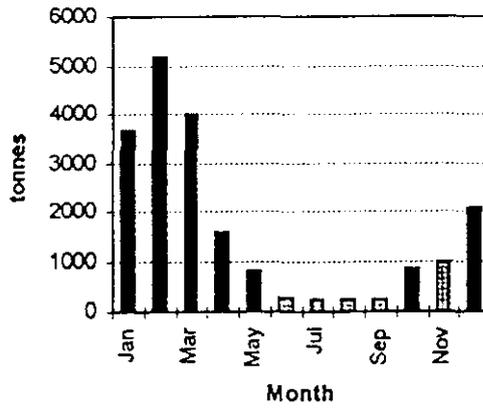
ASF6 - Annual transport rate



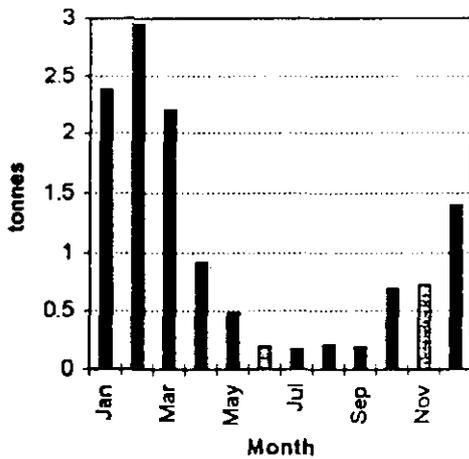
ASF6 - Chloride



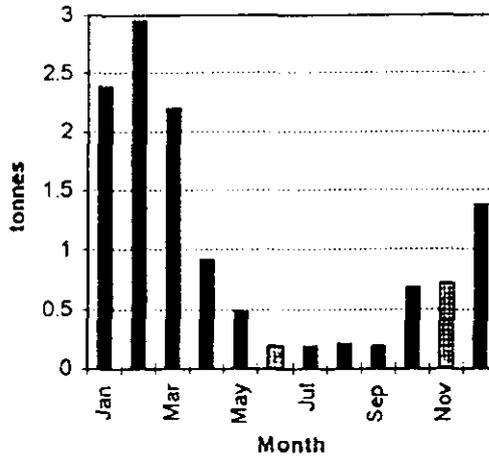
ASF6 - Sulfate



ASF6 - Cadmium

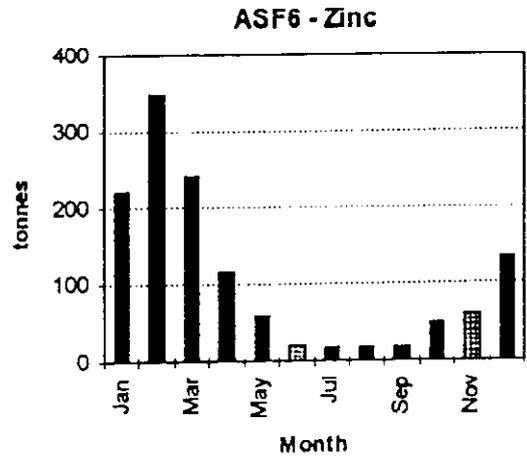
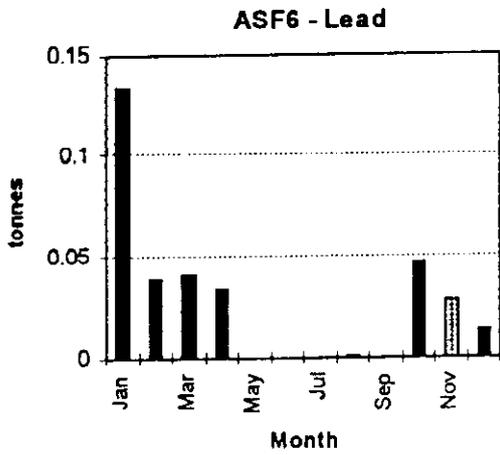


ASF6 - Copper



■ Transport based on analyzed concentration

▨ Transport based on estimated concentration



■ Transport based on analyzed concentration

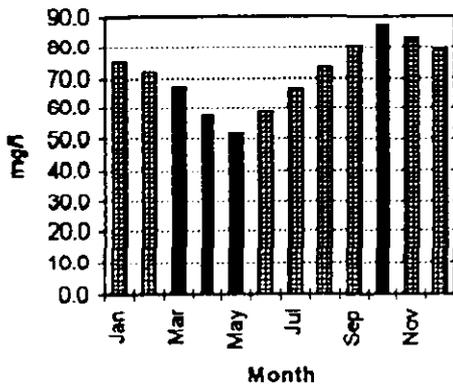
▨ Transport based on estimated concentration

**Monthly average modified concentrations ASF- 8**

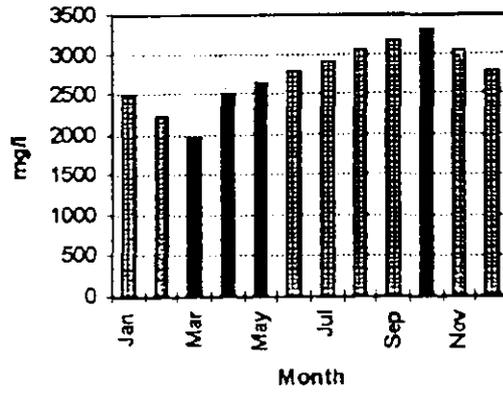
Month	Cl- mg/l	SO4- mg/l	Ag mg/l	Cd mg/l	Cu mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	Pb mg/l	Sb mg/l	Zn mg/l	As ug/l
Jan	75.4	2502	0.01	2.56	4.5	568	13.2	0.09	0.4	173	3795
Feb	71.4	2231	0.01	1.90	3.6	517	8.8	0.14	0.5	139	1970
Mar	67.4	1960	0.01	1.23	2.6	465	4.5	0.43	1.1	104	145
Apr	57.9	2500	0.01	2.68	4.0	444	9.0	0.18	0.3	103	121
May	52.2	2642	0.01	3.50	5.2	424	17.0	0.10	0.2	102	185
Jun	59.2	2777	0.02	4.00	6.1	427	24.8	0.05	0.8	102	2002
Jul	66.2	2911	0.02	4.50	7.1	430	32.5	0.00	1.4	101	3819
Aug	73.3	3046	0.01	4.00	6.5	437	30.0	0.10	1.3	134	5673
Sep	80.3	3180	0.03	4.60	6.9	570	34.0	0.20	1.1	110	7490
Oct	87.3	3315	0.02	4.55	7.4	723	26.2	0.22	0.7	277	9270
Nov	83.3	3044	0.02	3.88	6.4	671	21.9	0.18	0.6	242	7445
Dec	79.4	2773	0.02	3.22	5.5	620	17.5	0.14	0.5	208	5620
Year	71.1	2740	0.02	3.38	5.5	525	19.9	0.15	0.7	150	3961

Santa - Fe		Cl-trpt	SO4-trpt	Ag-trpt	Cd-trpt	Cu-trpt	Fe-trpt	Mn-trpt	Pb-trpt	Sb-trpt	Zn-trpt	As-trpt	
l/s	\$/month	m3	tonnes	kg	tonnes								
214	2678400	573178	43.2	1434	8.1	1.47	2.58	326	7.6	0.05	0.22	99	2.18
303	2419200	733018	52.3	1635	8.9	1.39	2.60	379	6.5	0.10	0.35	102	1.44
206	2678400	551750	37.2	1081	5.5	0.68	1.43	257	2.5	0.24	0.61	57	0.08
95	2592000	246240	14.3	616		0.66	0.99	109	2.2	0.04	0.08	25	0.03
47	2678400	125885	6.6	333	1.3	0.44	0.65	53	2.1	0.01	0.03	13	0.02
17	2592000	44064	2.6	122	0.7	0.18	0.27	19	1.1	0.00	0.04	4	0.09
13	2678400	34819	2.3	101	0.7	0.16	0.25	15	1.1	0.00	0.05	4	0.13
13	2678400	34819	2.6	106	0.3	0.14	0.23	15	1.0	0.00	0.05	5	0.20
13	2592000	33696	2.7	107	1.0	0.16	0.23	19	1.1	0.01	0.04	4	0.25
47	2678400	125885	11.0	417	2.6	0.57	0.93	91	3.3	0.03	0.08	35	1.17
51	2592000	132192	11.0	402	2.4	0.51	0.85	89	2.9	0.02	0.07	32	0.98
95	2678400	254448	20.2	705	4.1	0.82	1.39	158	4.5	0.03	0.12	53	1.43
1114	2628000	2927592	208.2	8021	45.5	9.91	16.02	1536	58.4	0.45	2.14	438	11.60
		Water	Cl	SO4	Ag	Cd	Cu	Fe	Mn	Pb	Sb	Zn	As
	Total	2688994	205.9	7060	35.7	7.17	12.40	1530	35.9	0.55	1.72	433	8.00

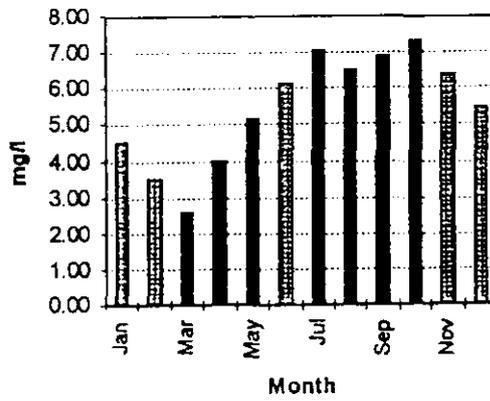
ASF8 - Chloride



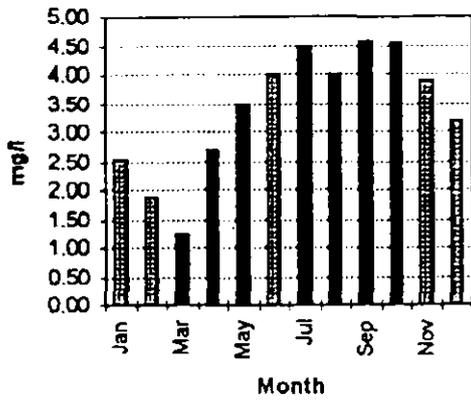
ASF8 - Sulfata



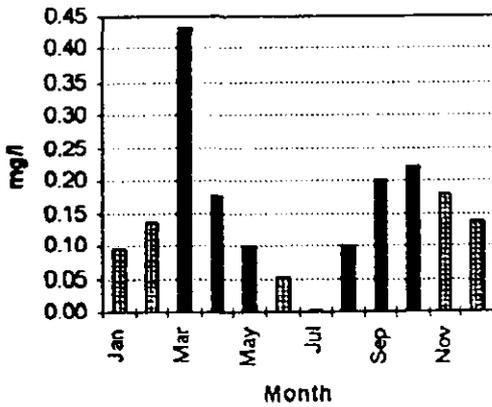
ASF8 - Copper



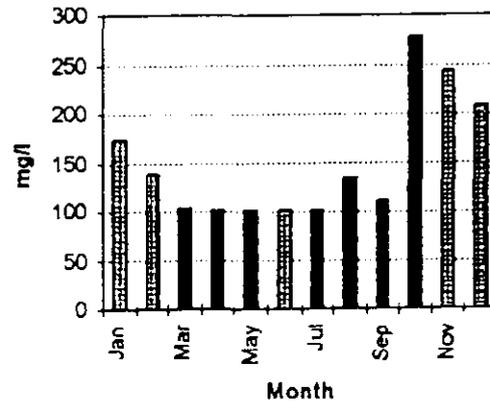
ASF8 - Cadmium



ASF8 - Lead

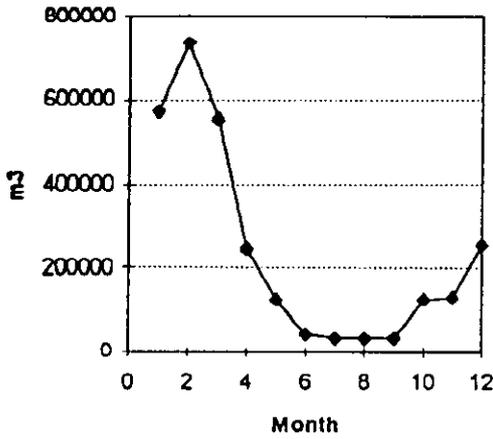


ASF8 - Zinc

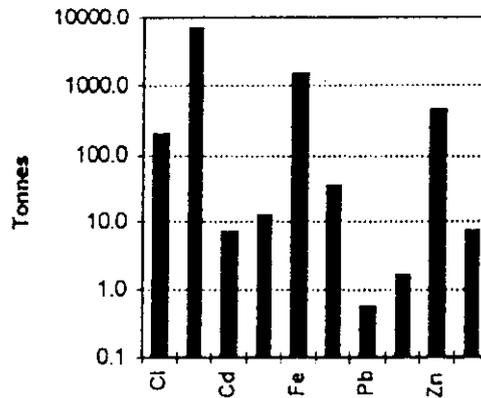


■ Analyzed concentration    ▨ Extrapolated concentration

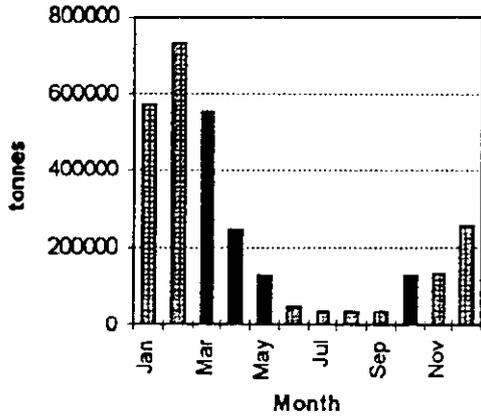
Monthly discharge flow rate



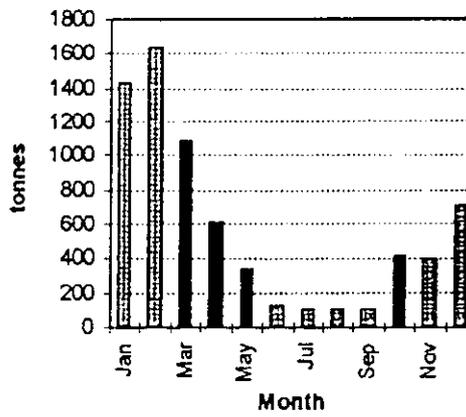
ASF8 - Annual transport



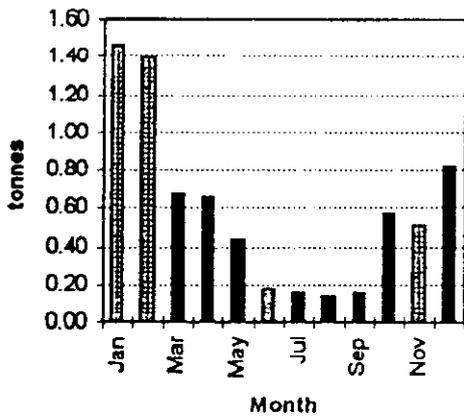
ASF8 - Chloride



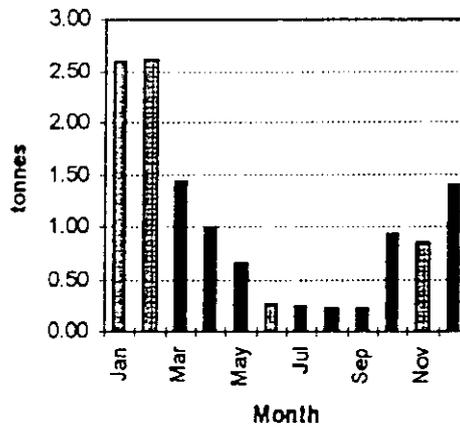
ASF8 - Sulfate



ASF8 - Cadmium



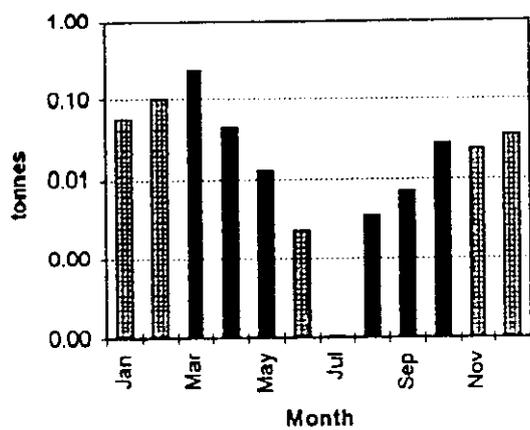
ASF8 - Copper



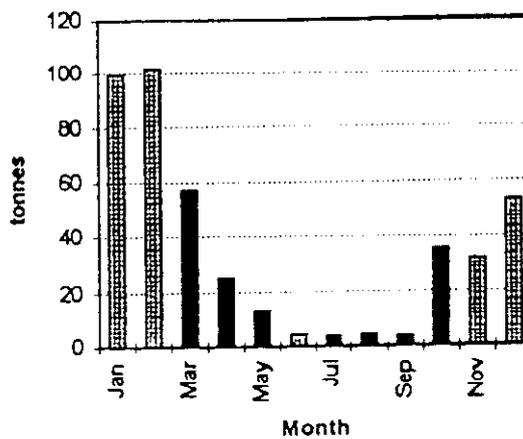
■ Transport based on analyzed concentration

▨ Transport based on estimated concentration

ASF8 - Lead



ASF8 - Zinc



■ Transport based on analyzed concentration

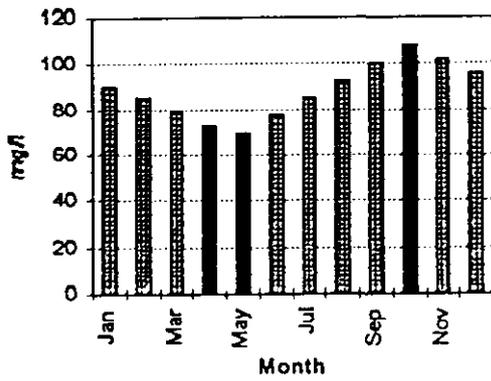
▨ Transport based on estimated concentration

**Monthly average modified concentrations AB-7**

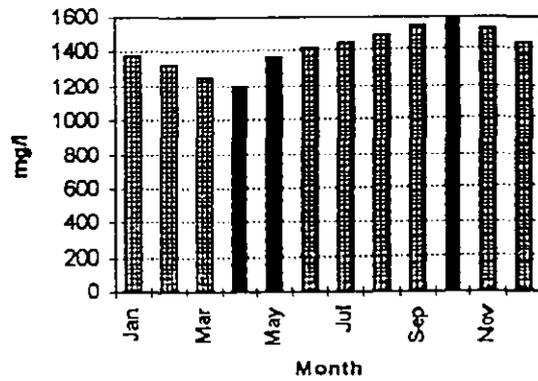
Month	Cl-	SO4-	Ag	Cd	Cu	Fe	Mn	Pb	Sb	Zn	As
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	ug/l
Jan	90.35	1396	0.02	0.75	1.53	21.4	16.5	0.06		58.5	
Feb	84.47	1322	0.01	0.70	1.33	16.1	14.2	0.04		52.3	
Mar	78.58	1257	0.01	0.65	1.13	10.9	11.9	0.02		46.2	
Apr	72.7	1192	0.01	0.60	0.93	5.7	9.6	0.00		40.0	0.3
May	69.4	1371	0.01	0.70	0.97	8.8	9.8	0.00	0.30	48.0	
Jun	77.12	1413	0.01	0.74	1.20	14.4	12.5	0.00	0.34	43.5	
Jul	84.84	1455	0.01	0.75	0.98	12.1	18.8	0.00	0.40	39.0	
Aug	92.56	1497	0.02	0.90	1.17	26.0	24.0	0.00	0.00	40.0	
Sep	100.3	1539	0.02	0.94	1.40	31.6	26.7	0.03	0.25	58.5	
Oct	108	1580	0.02	0.90	2.13	37.0	23.4	0.12	0.50	77.0	
Nov	102.1	1516	0.02	0.85	1.93	31.8	21.1	0.10		70.8	
Dec	96.23	1451	0.02	0.80	1.73	26.6	18.8	0.08		64.7	
Year	88.05	1415	0.01	0.77	1.37	20.2	17.3	0.04	0.30	53.2	0.3

Sora Sora		Cl-trpt	SO4-trpt	Ag-trpt	Cd-trpt	Cu-trpt	Fe-trpt	Mn-trpt	Pb-trpt	Sb-trpt	Zn-trpt	As-trpt
L/s	s/month	m3	tonnes	kg	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	kg	tonnes	kg
2382	2678400	6379949	576	8845	40.2	4.8	9.76	136	105	0.38	373	
3375	2419200	8164800	690	10792	32.3	5.7	10.86	132	116	0.33	427	
2295	2678400	6146928	483	7727	31.2	4.0	6.95	67	73	0.12	284	
1055	2592000	2734560	189	3261	25.9	1.6	2.54	16	26	0.00	109	0.82
521	2678400	1395446	97	1913	26.8	1.0	1.35	12	14	0.00	67	
186	2592000	482112	37	681	31.1	0.4	0.58	7	6	0.00	21	
149	2678400	399082	34	581	37.5	0.3	0.39	5	7	0.00	16	
149	2678400	399082	37	597	42.9	0.4	0.47	10	10	0.00	16	
149	2592000	386208	39	594	46.7	0.4	0.54	12	10	0.01	23	
521	2678400	1395446	151	2205	53.6	1.3	2.97	52	33	0.17	107	
571	2592000	1480032	151	2243	47.5	1.3	2.86	47	31	0.15	105	
1055	2678400	2825712	272	4100	44.6	2.3	4.89	75	53	0.23	183	
12408	2678000	32608224	2871	48136	38.3	25.2	44.66	659	563	1.24	9733	9.78
Total		32189357	2765	43540	460.22	23.3	44.16	571	485	1.39	1276	0.82

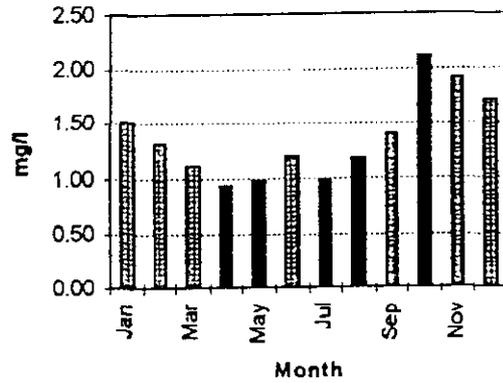
AB7 - Chloride



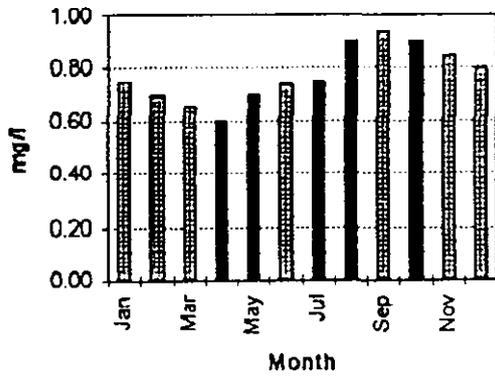
AB7 - Sulfate



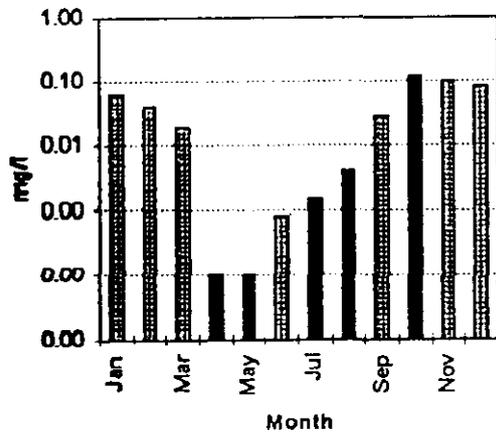
AB7 - Copper



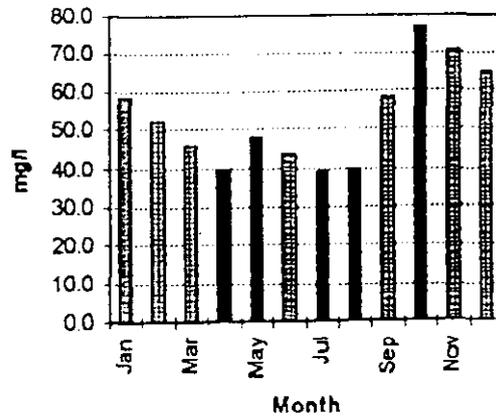
AB7 - Cadmium



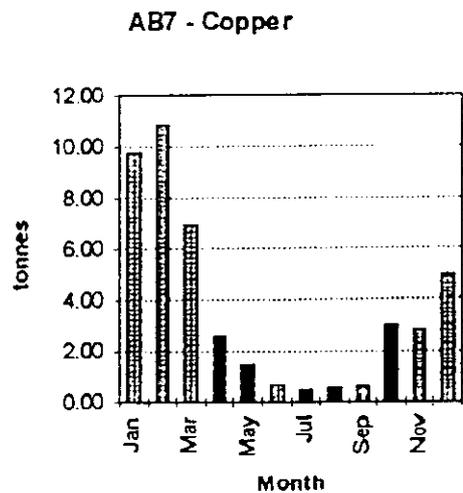
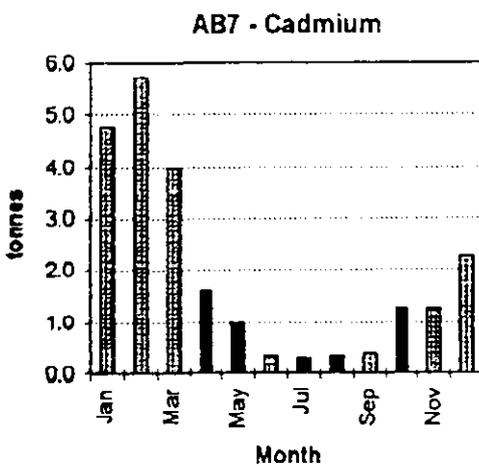
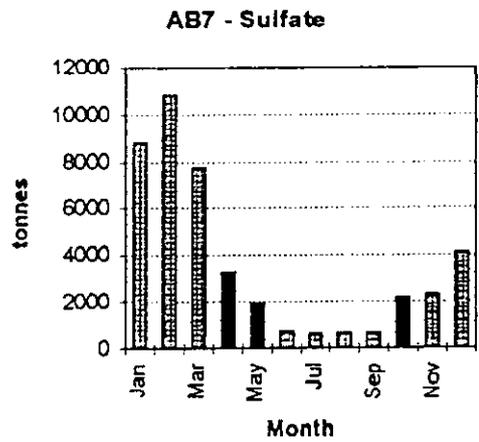
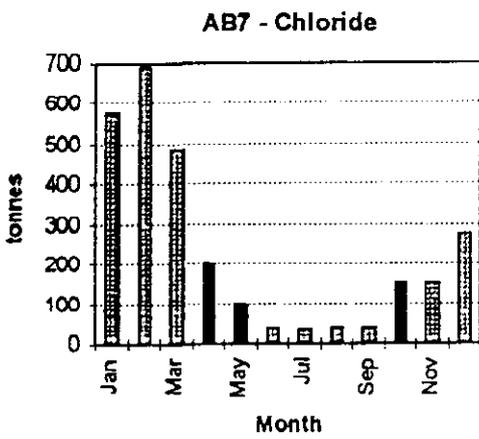
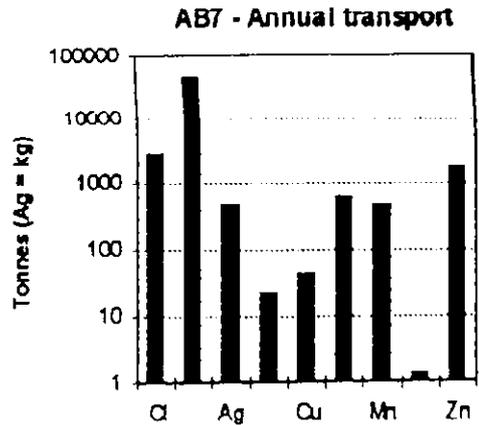
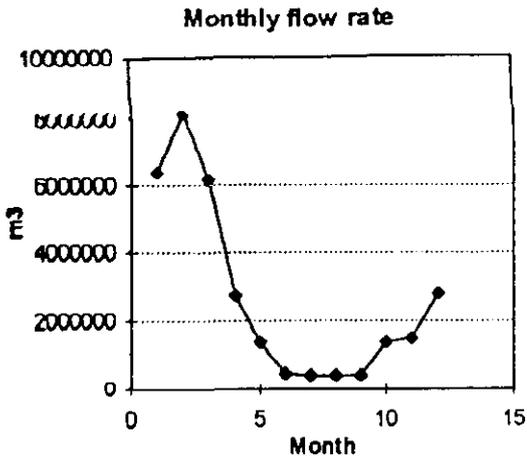
AB7 - Lead



AB7 - Zinc

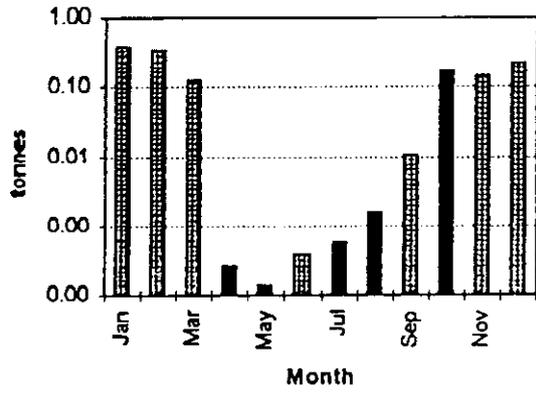


Analyzed concentration
  Extrapolated concentration

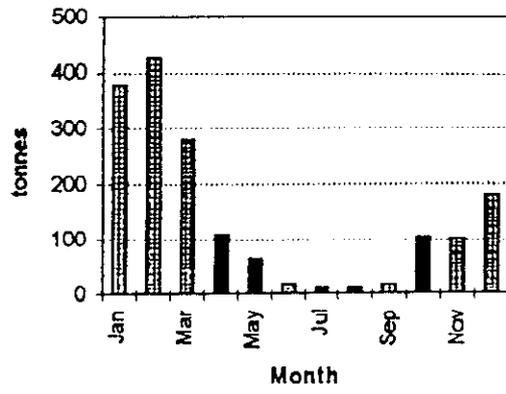


Transport based on analyzed concentration
  Transport based on estimated concentration

AB7 - Lead



AB7 - Zinc



■ Transport based on analyzed concentration

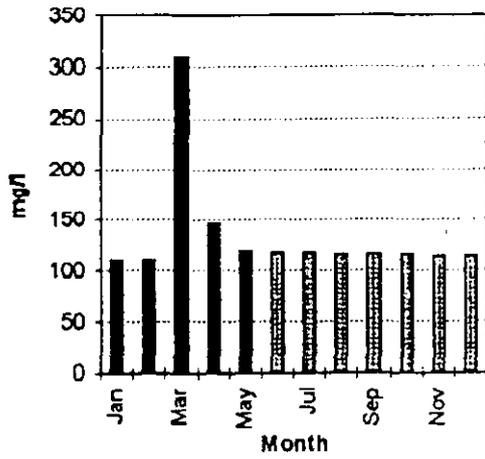
▨ Transport based on estimated concentration

**Monthly average modified concentrations AM-3**

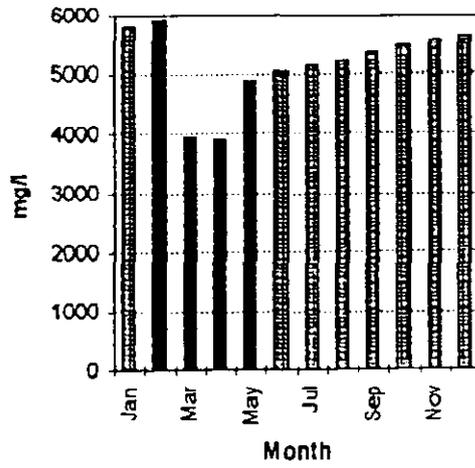
Month	Cl- mg/l	SO4- mg/l	Ag mg/l	Cd mg/l	Cu mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	Pb mg/l	Sb mg/l	Zn mg/l	As ug/l
Jan	113	5785	0.02	1.29	6.10	1507	3.3	0.3	0.2	253	
Feb	112	5894	0.02	1.35	6.40	1553	3.1	0.3	0.2	266	177
Mar	309	3947	0.02	1.08	5.05	922	3.1	0.1	0.5	218	188
Apr	147	3909	0.01	1.10	5.25	908	3.2	0.1	0.3	235	181
May	119	4916	0.01	1.42	7.20	1139	3.7	0.2	0.7	284	184
Jun	118	5025	0.01	1.23	6.60	1185	3.6	0.2	0.6	315	
Jul	117	5133	0.01	1.80	8.40	1231	7.1	0.1	0.5	346	
Aug	117	5242	0.01	0.99	4.60	1277	4.3	0.1	0.2	190	
Sep	116	5351	0.01	1.05	4.90	1323	4.1	0.1	0.2	203	
Oct	115	5459	0.02	1.11	5.20	1369	3.9	0.2	0.2	215	
Nov	114	5568	0.02	1.17	5.50	1415	3.7	0.2	0.2	228	
Dec	114	5677	0.02	1.23	5.80	1461	3.5	0.2	0.2	241	
Year	134	5159	0.01	1.24	5.92	1274	3.9	0.2	0.3	250	183

Morococata			Cl-trpt	SO4-trpt	Ag-trpt	Cd-trpt	Cu-trpt	Fe-trpt	Mn-trpt	Pb-trpt	Sb-trpt	Zn-trpt	As-trpt
l/s	s/month	m3	tonnes	tonnes	kg	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	kg	tonnes	kg
10.1	2678400	27052	3.05	157	0.51	0.03	0.17	40.8	0.09	0.007	5.4	6.9	
14.3	2419200	34595	3.87	204	0.69	0.05	0.22	53.7	0.11	0.010	6.9	9.2	6.13
9.7	2678400	25980	8.03	103	0.39	0.03	0.13	23.9	0.08	0.003	13.0	5.7	4.90
4.5	2592000	11664	1.71	46	0.12	0.01	0.06	10.6	0.04	0.001	3.5	2.7	2.11
2.2	2678400	5892	0.70	29	0.06	0.01	0.04	6.7	0.02	0.001	4.1	1.7	1.08
0.8	2592000	2074	0.25	10	0.02	0.00	0.01	2.5	0.01	0.000	1.2	0.7	
0.6	2678400	1607	0.19	8	0.02	0.00	0.01	2.0	0.01	0.000	0.8	0.6	
0.6	2678400	1607	0.19	8	0.02	0.00	0.01	2.1	0.01	0.000	0.3	0.3	
0.6	2592000	1555	0.18	8	0.02	0.00	0.01	2.1	0.01	0.000	0.3	0.3	
2.2	2678400	5892	0.68	32	0.09	0.01	0.03	8.1	0.02	0.001	1.2	1.3	
2.4	2592000	6221	0.71	35	0.10	0.01	0.03	8.8	0.02	0.001	1.2	1.4	
4.5	2678400	12053	1.37	68	0.21	0.01	0.07	17.6	0.04	0.003	2.4	2.9	
52.5	2628000	137970	18.52	712	2.01	0.17	0.82	175.8	0.54	0.024	46.0	34.4	25.20
	Total:	136192	20.93	708	2.26	0.17	0.80	178.8	0.46	0.028	40.5	33.8	

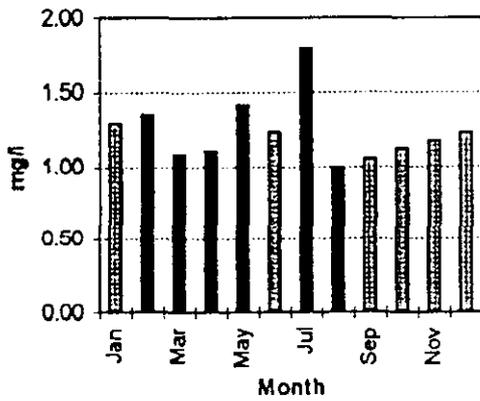
AM3 - Chloride



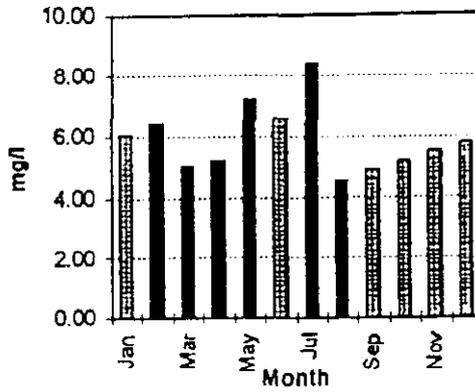
AM3 - Sulfate



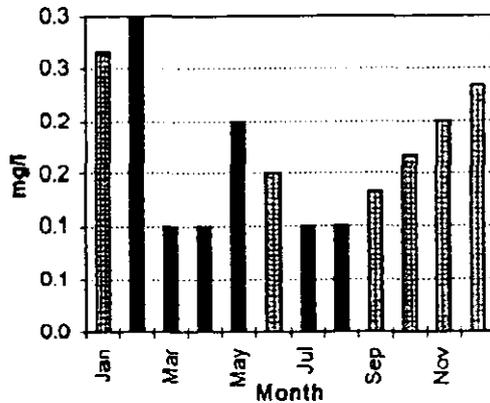
AM3 - Cadmium



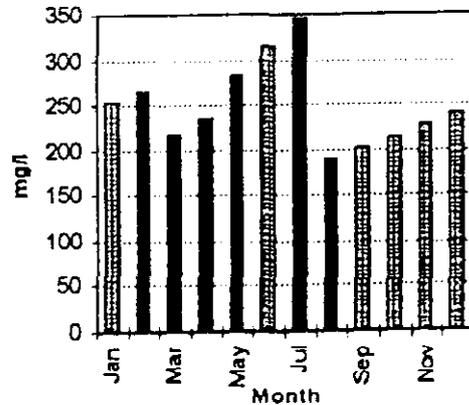
AM3 - Copper



AM3 - Lead

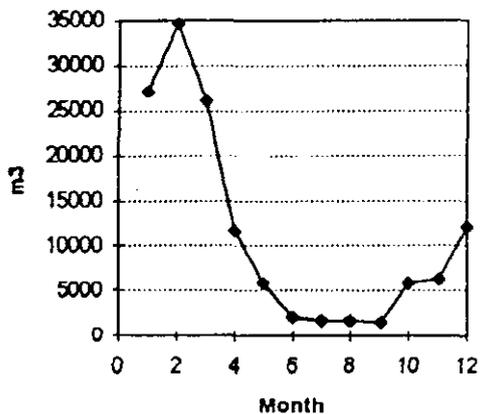


AM3 - Zinc

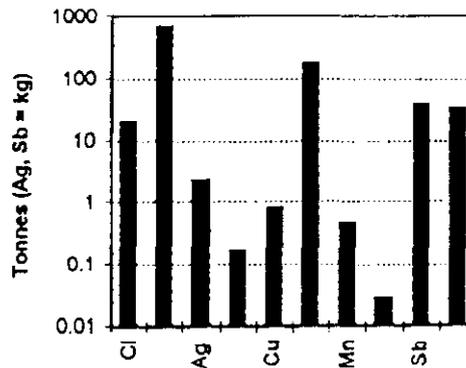


■ Analyzed concentration    ▨ Extrapolated concentration

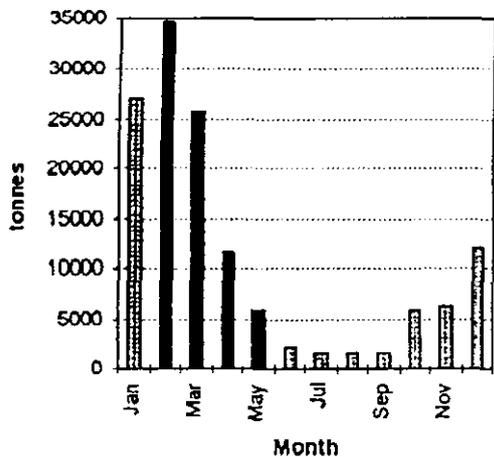
AM3 - Monthly discharge flow rate



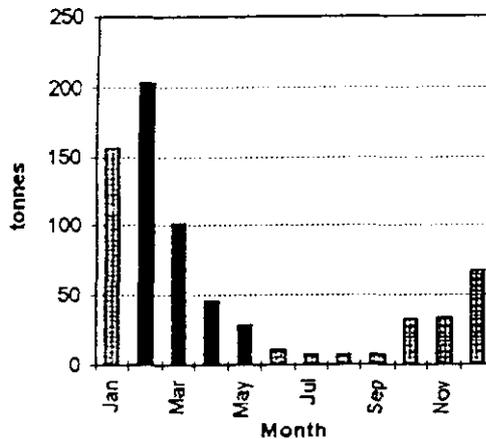
AM3- Annual transport



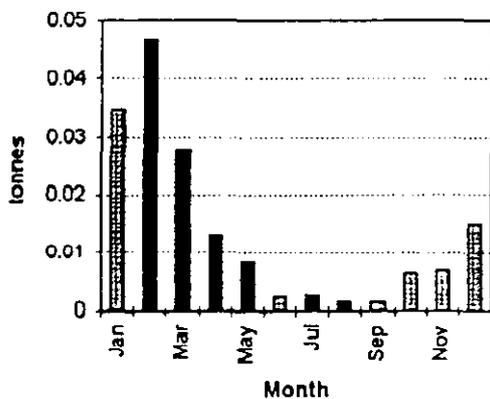
AM3 - Chloride



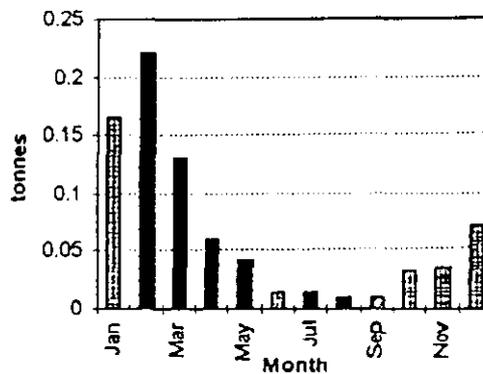
AM3 - Sulfate



AM3 - Cadmium



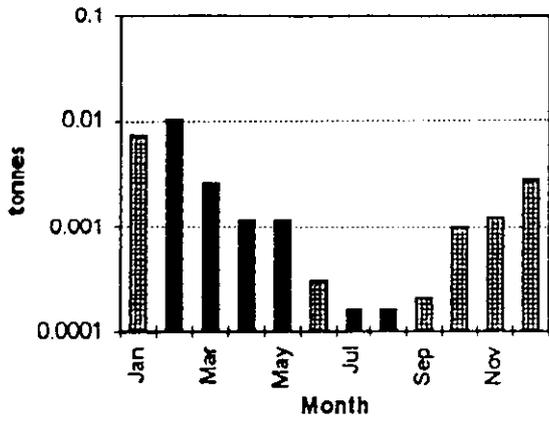
AM3 - Copper



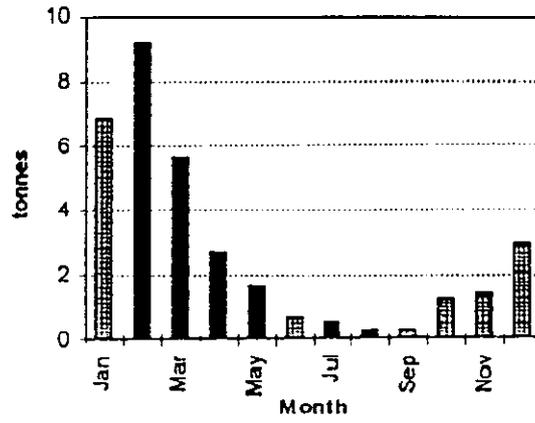
■ Transport based on analyzed concentration

▨ Transport based on estimated concentration

**AM3 - Lead**



**AM3 - Zinc**



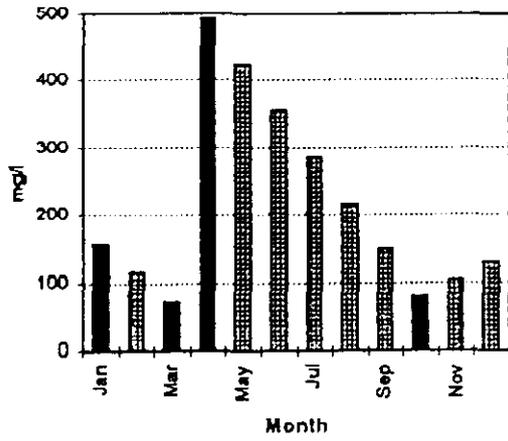
■ Transport based on analyzed concentration

▨ Transport based on estimated concentration

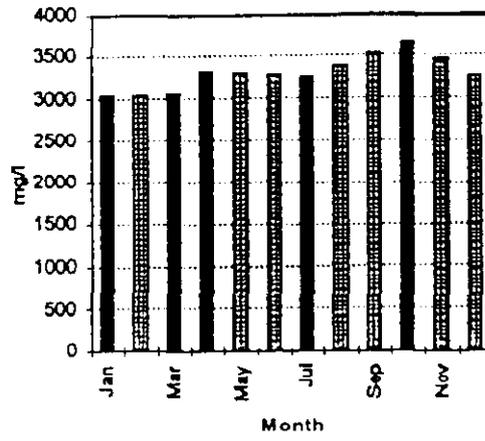
Monthly average modified concentrations AJ-1													
Month	Cl-	SO4-	Ag	Cd	Cu	Fe	Mn	Pb	Sb	Zn	As		
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	ug/l		
Jan	155.2	3032	0.01	4.35	7.5	849	5.9	0.1	0.25	60	191		
Feb	114.0	3040	0.01	4.58	7.3	821	6.3	0.1	0.33	65	166		
Mar	72.7	3049	0.01	4.80	7.1	793	6.8	0.1	0.40	70	141		
Apr	492.2	3309	0.02	5.35	9.0	817	7.8	0.1	0.22	68	172		
May	423.5	3288	0.02	6.53	14.0	857	8.6	0.3	0.16	79	222		
Jun	354.9	3268	0.02	7.71	18.9	897	9.4	0.6	0.11	90	273		
Jul	286.2	3248	0.02	8.89	23.9	937	10.1	0.8	0.06	101	323		
Aug	217.6	3390	0.02	7.46	17.5	977	10.9	0.5	0.88	84	301		
Sep	149.0	3532	0.02	6.03	11.0	1018	11.9	0.2	1.70	67	279		
Oct	80.3	3674	0.03	6.80	10.4	108	11.8	0.2	1.70	80	257		
Nov	105.3	3460	0.02	5.98	9.4	355	9.8	0.2	1.22	73	235		
Dec	130.3	3246	0.02	5.17	8.5	602	7.8	0.1	0.73	67	213		
Year	215.1	3295	0.02	6.14	12.0	752	8.9	0.3	0.65	75	231		

Japo	Vs	s/month	m3	Cl-trpt	SO4-trpt	Ag-trpt	Cd-trpt	Cu-trpt	Fe-trpt	Mn-trpt	Pb-trpt	Sb-trpt	Zn-trpt	As-trpt
				tonnes	tonnes	kg	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	kg	tonnes
17.3	2678400	46336	7.19	140	0.46	0.202	0.35	39.3	0.27	0.005	11.6	2.78	8.83	
24.6	2419200	59512	6.78	181	0.60	0.272	0.43	48.9	0.38	0.006	19.3	3.87	9.86	
16.7	2678400	44729	3.25	136	0.45	0.215	0.32	35.5	0.30	0.004	17.9	3.13	6.31	
7.7	2592000	19958	9.82	66	0.30	0.107	0.18	16.3	0.15	0.002	4.3	1.36	3.43	
3.8	2678400	10178	4.31	33	0.16	0.066	0.14	8.7	0.09	0.003	1.7	0.80	2.26	
1.4	2592000	3629	1.29	12	0.06	0.028	0.07	3.3	0.03	0.002	0.4	0.33	0.99	
1.1	2678400	2946	0.84	10	0.05	0.026	0.07	2.8	0.03	0.002	0.2	0.30	0.95	
1.1	2678400	2946	0.64	10	0.06	0.022	0.05	2.9	0.03	0.001	2.6	0.25	0.89	
1.1	2592000	2851	0.42	10	0.06	0.017	0.03	2.9	0.03	0.001	4.8	0.19	0.80	
3.8	2678400	10178	0.82	37	0.31	0.069	0.11	1.1	0.12	0.002	17.3	0.81	2.61	
4.2	2592000	10886	1.15	38	0.25	0.065	0.10	3.9	0.11	0.002	13.2	0.80	2.55	
7.7	2678400	20624	2.69	67	0.34	0.107	0.17	12.4	0.16	0.003	15.1	1.37	4.38	
90.5	2628000	237834	51.16	784	4.06	1.460	2.86	179.0	2.12	0.045	153.7	17.93	64.92	
Total:		234775	39.2	741	3.10	1.196	2.03	177.9	1.71	0.034	108.5	15.99	43.97	

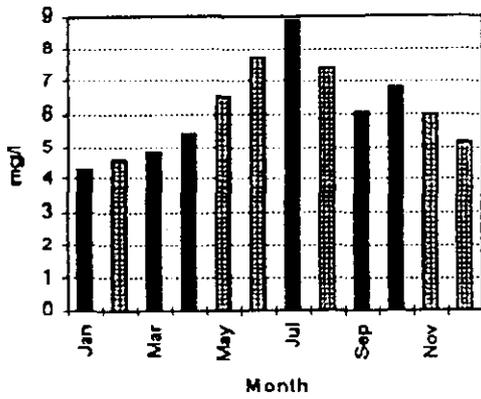
AJ1 - Chloride



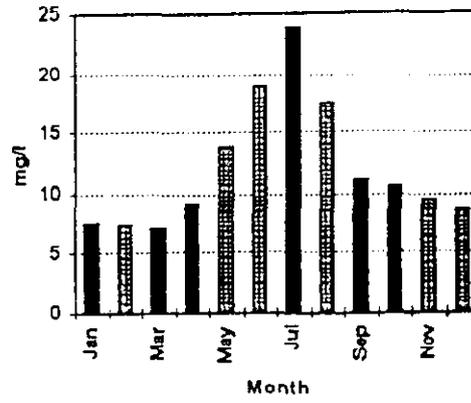
AJ1 - Sulfate



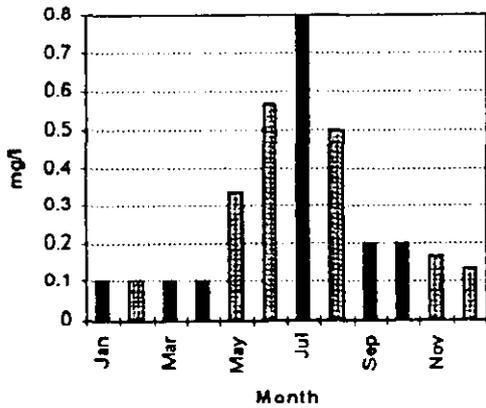
AJ1 - Cadmium



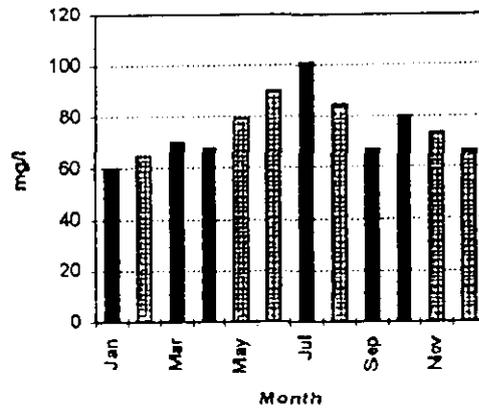
AJ1 - Copper



AJ1 - Lead

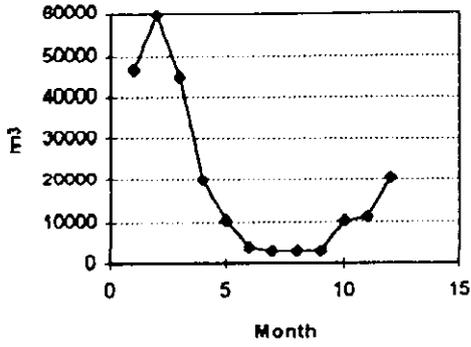


AJ1 - Zinc

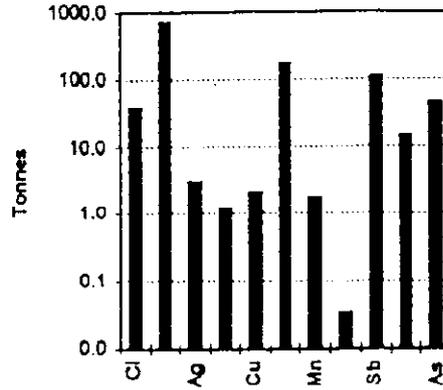


Analyzed concentration
  Extrapolated concentration

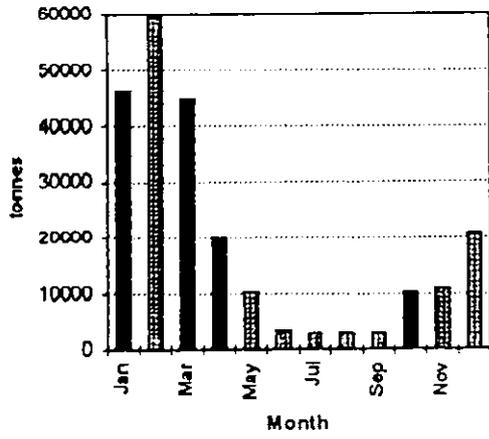
AJ1 - Monthly discharge rate



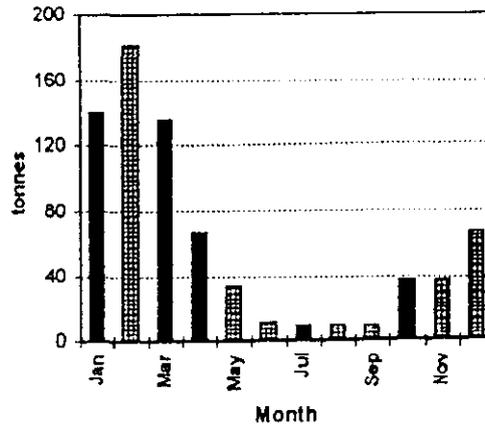
AJ1 - Annual transport



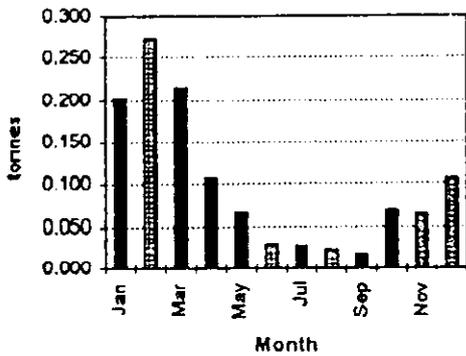
AJ1 - Chloride



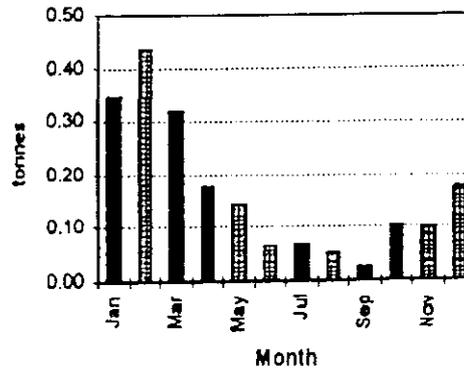
AJ1 - Sulfate



AJ1 - Cadmium



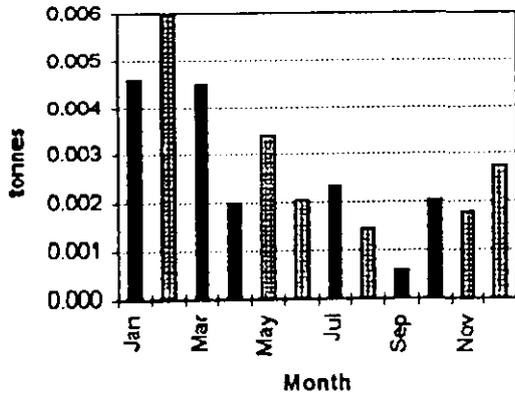
AJ1 - Copper



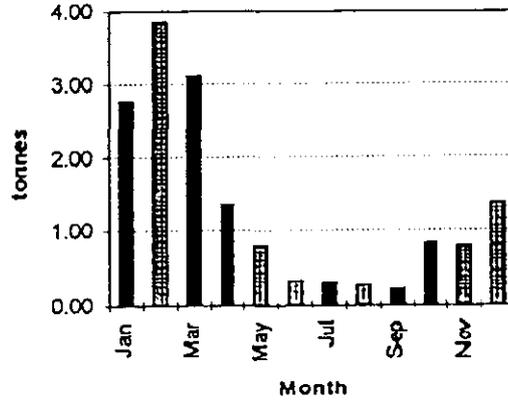
■ Transport based on analyzed concentration

▨ Transport based on estimated concentration

**AJ1 - Lead**



**AJ1 - Zinc**



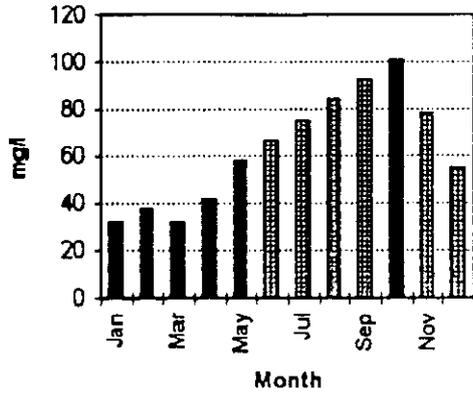
■ Transport based on analyzed concentration

▨ Transport based on estimated concentration

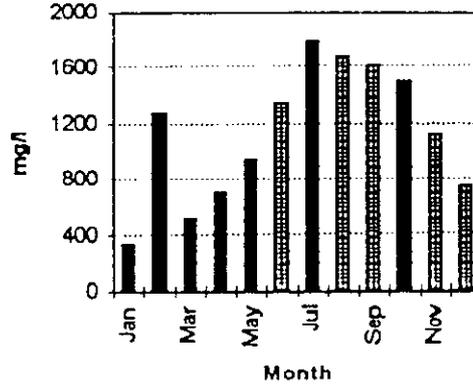
Monthly Average modified concentrations BH-4													
Month	Cl- mg/l	SO4- mg/l	Ag mg/l	Cd mg/l	Cu mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	Pb ug/l	Sb mg/l	Zn mg/l	As ug/l		
Jan	32.00	332.2	0.010	0.47	2.20	49.2	15.1	100	0.10	24	15.9		
Feb	38.40	1267	0.010	0.50	1.65	7.8	17.8	100	0.10	22	1.2		
Mar	31.40	523.6	0.010	0.33	0.96	4.5	10.2	30	0.16	9	2.8		
Apr	41.63	705.1	0.010	0.48	1.03	5.7	17.5	37	0.18	5	0.4		
May	58.00	926	0.010	0.47	1.27	10.4	17.5	18	0.02	20	0.6		
Jun	66.60	1356.0	0.010	0.86	3.34	75.3	22.5	159	0.02	34	0.8		
Jul	75.20	1786.0	0.010	1.24	5.40	140.1	27.4	300	0.02	49	1.1		
Aug	83.80	1694.7	0.010	0.89	2.11	150.5	35.5	105	0.85	44	3.5		
Sep	92.40	1603.3	0.010	1.10	3.07	240.0	38.8	100	0.90	36	6.0		
Oct	101.00	1512.0	0.020	0.85	3.58	204.0	31.8	100	0.90	51	8.5		
Nov	78.00	1118.7	0.017	0.72	3.12	152.4	26.2	100	0.63	42	11.0		
Dec	55.00	725.5	0.013	0.60	2.66	100.8	20.7	100	0.37	33	13.4		
Year	62.79	1129	0.012	0.71	2.53	95.1	23.4	104	0.4	31	5.4		

Huanni	s/month	m3	Cl-trpt tonnes	SO4-trpt tonnes	Ag-trpt Kg	Cd-trpt tonnes	Cu-trpt tonnes	Fe-trpt tonnes	Mn-trpt tonnes	Pb-trpt tonnes	Sb-trpt tonnes	Zn-trpt tonnes	As-trpt Kg
1725	2678400	4620240	148	1535	46.2	2.2	10.2	227	70	0.46	0.46	111.8	73.46182
2444	2419200	5912525	227	7491	59.1	3.0	9.8	46	105	0.59	0.59	131.3	7.1
1662	2678400	4451501	140	2331	44.5	1.5	4.3	20	45	0.13	0.71	39.6	12.6
764	2592000	1980288	82	1396	19.8	0.9	2.0	11	35	0.07	0.36	9.1	0.9
377	2678400	1009757	59	935	10.1	0.5	1.3	11	18	0.02	0.02	20.0	0.6
135	2592000	349920	23	474	3.5	0.3	1.2	26	8	0.06	0.01	12.0	0.3
108	2678400	289267	22	517	2.9	0.4	1.6	41	8	0.09	0.01	14.1	0.3
108	2678400	289267	24	490	2.9	0.3	0.6	44	10	0.03	0.25	12.7	1.0
108	2592000	279936	26	449	2.8	0.3	0.9	67	11	0.03	0.25	10.2	1.7
377	2678400	1009757	102	1527	20.2	0.9	3.6	206	32	0.10	0.91	51.7	8.6
413	2592000	1070496	83	1198	17.8	0.8	3.3	163	28	0.11	0.68	45.2	11.7
764	2678400	2046298	113	1485	27.3	1.2	5.4	206	42	0.20	0.75	67.9	27.6
6985	2628000	23612580	1483	26683	275.5	16.7	59.8	2245	533	2.48	8.38	777.1	126.8
Total:		23309251	1049	19827	257.1	12.1	44.1	1068	412	1.89	4.99	526.6	146.6

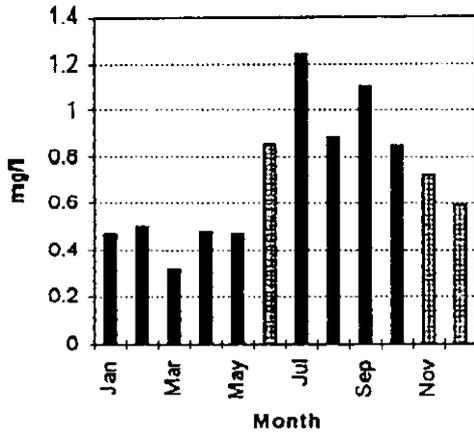
BH4 - Chloride



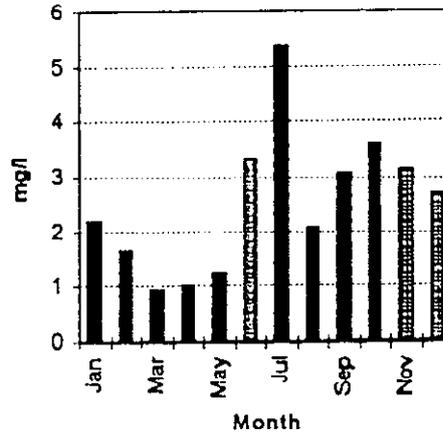
BH4 - Sulfate



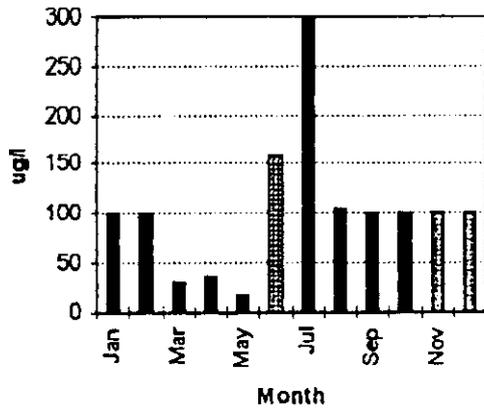
BH4 - Cadmium



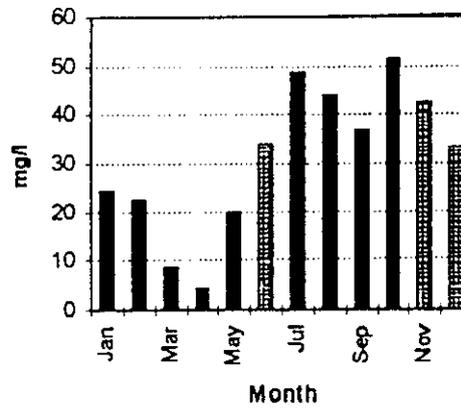
BH4 - Copper



BH4 - Lead



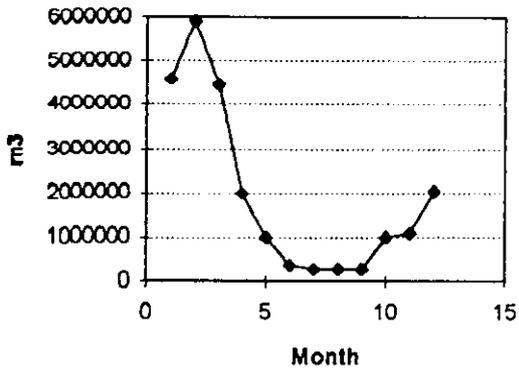
BH4 - Zinc



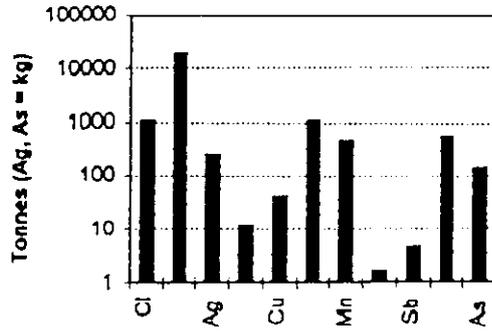
■ Analyzed concentration

▨ Extrapolated concentration

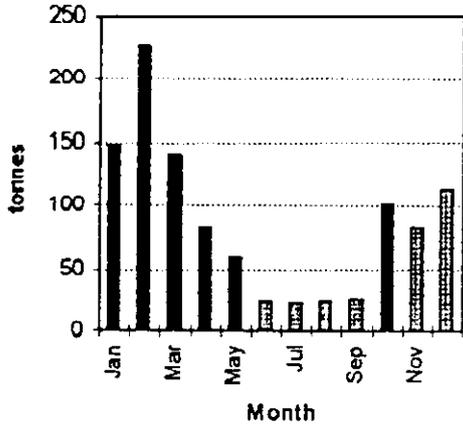
BH4 - Monthly discharge flow rate



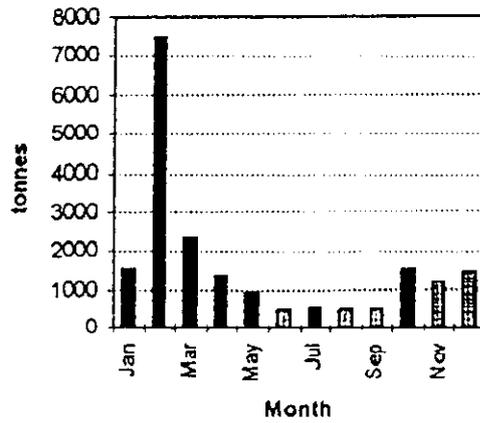
BH4 - Annual transport



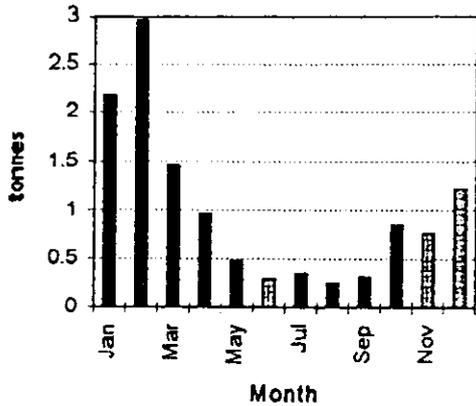
BH4 - Chloride



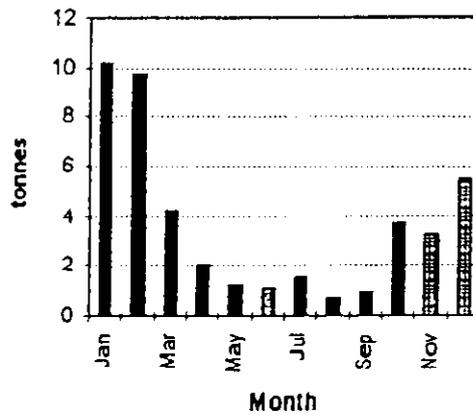
BH4 - Sulfate



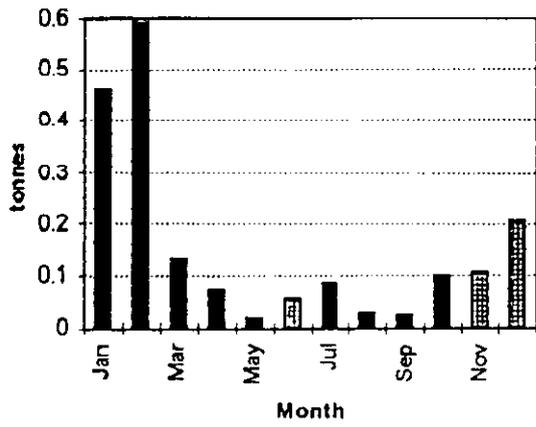
BH4 - Cadmium



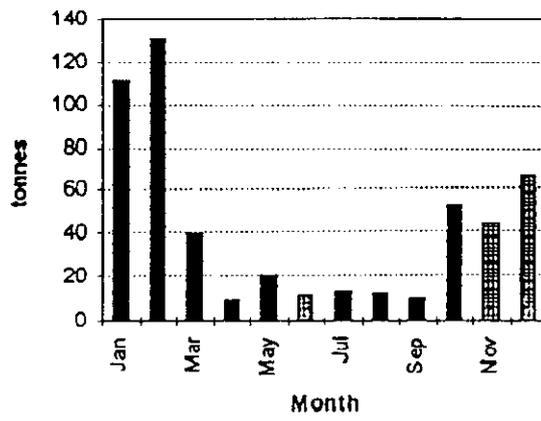
BH4 - Copper



**BH4 - Lead**



**BH4 - Zinc**



■ Transport based on analyzed concentration

▨ Transport based on estimated concentration

**Monthly average concentrations BH-8**

Month	Cl- mg/l	SO4- mg/l	Ag mg/l	Cd mg/l	Cu mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	Pb mg/l	Sb ug/l	Zn mg/l	As ug/l
Jan											
Feb											
Mar											
Apr											
May											
Jun											
July											
Aug											
Sep			0.01	1.24	3.04	493	39	0.2	1.4	51.4	
Oct			0.03	1.17	3.77	628	33.8	0.1	0.9	64.2	
Nov											
Dec											
Year	mean v.	94.3	2069.2	0.02	1.21	3.405	561	36.4	1.15	57.8	
Year	median v.	94.3	2069.2	0.02	1.21	3.405	561	36.4	1.15	57.8	

Huanuni l/s	s/month	m3	Cl-trpt tonnes	SO4-trpt tonnes	Ag-trpt tonnes	Cd-trpt tonnes	Cu-trpt tonnes	Fe-trpt tonnes	Mn-trpt tonnes	Pb-trpt tonnes	Sb-trpt tonnes	Zn-trpt tonnes	As-trpt tonnes
693	2678400	1856131											
982	2419200	2375654											
668	2678400	1789171											
307	2592000	795744											
152	2678400	407117											
54	2592000	139968											
43	2678400	115171											
43	2678400	115171											
43	2592000	111456			0.001	0.14	0.34	55	4	0.02	0.16	6	
152	2678400	407117	38	842	0.012	0.48	1.53	256	14	0.04	0.37	26	
166	2592000	430272											
307	2678400	822269											
3610	2628000	9487080	895	19631	0.180	11.43	32.30	5318	345	1.42	10.91	648	
			895	19631	0.180	11.43	32.30	5318	345	1.42	10.91	648	

Month	Cl- mg/l	SO4- mg/l	Ag mg/l	Cd mg/l	Cu mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	Pb mg/l	Sb ug/l	Zn mg/l	AB-7 flow l/s
Jan	118	1288	0.01	0.58	1.5	27	21	31.10	65.6	38	2382
Feb	90	1405	0.02	0.50	1.4	7	15	25.00	52.4	25	3375
Mar	113	1136	0.01	0.57	1.4	58	14	23.70	49.4	33	2295
Apr	51	1248	0.02	0.55	1.0	5	20	26.70	42.8	40	1055
May	65	1427	0.02	0.58	1.1	6	20	21.63	28.6	43	521
Jun	80	1606	0.01	0.62	1.2	7	20	16.57	14.3	46	186
Jul	94	1785	0.01	0.85	1.3	8	20	11.50	0.1	49	149
Aug	108	1964	0.01	0.74	1.3	10	26	7.00	500.0	61	149
Sep	122	2142	0.01	0.92	1.2	64	28	200.00	1100.0	62	149
Oct	136	2321	0.01	1.19	1.3	35	39	140.00	650.0	82	521
Nov	150	2500	0.01	1.45	1.3	6	49	80.00	200.0	103	571
Dec	103	1575	0.01	0.68	1.4	18	20	70.00	200.0	57	1055
Year	102	1700	0.01	0.75	1.3	21	24	54.43	241.9	53	12408

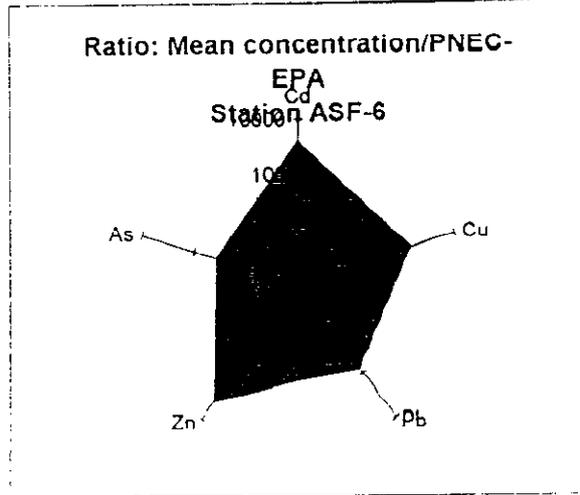
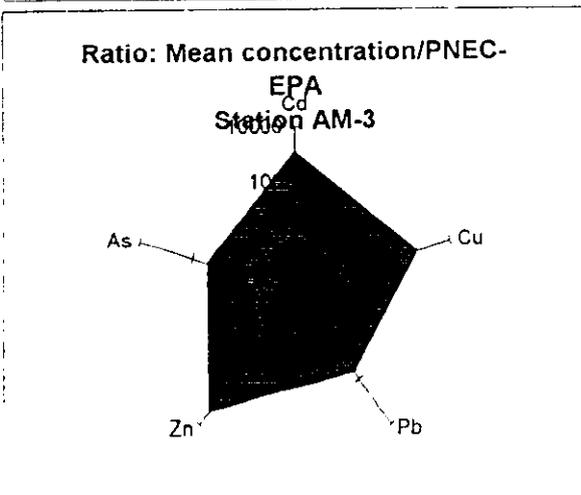
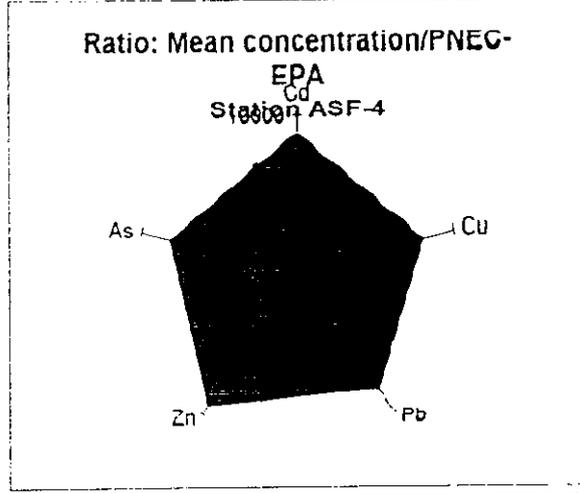
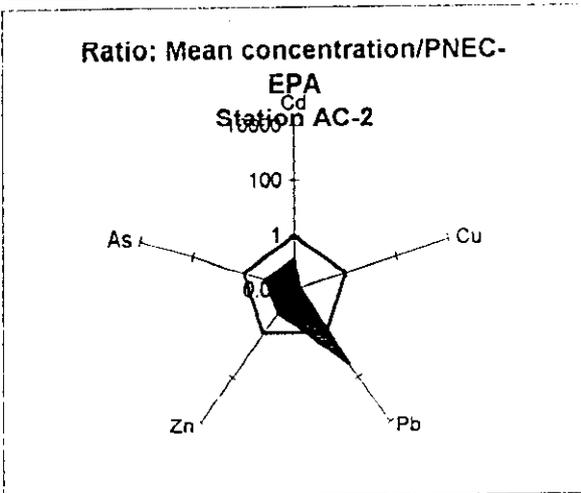
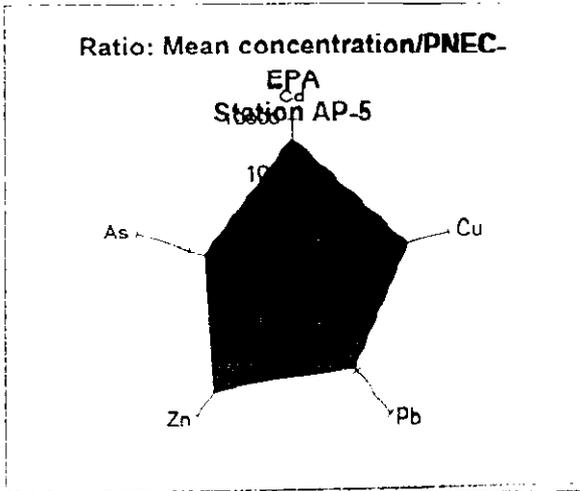
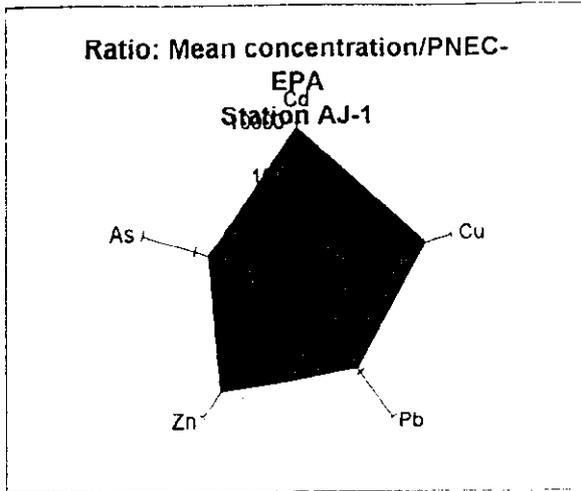
M-2 flow l/s	s/month	m3	Cl-trpt		SO4-trpt		Ag-trpt		Cd-trpt		Cu-trpt		Fe-trpt		Mn-trpt		Pb-trpt		Sb-trpt		Zn-trpt	
			tonnes	tonnes	kg	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes
2549	2678400	6826545	806	8795	26.8	3.96	10.04	185.9	143	212	448	260										
3611	2419200	8736336	782	12270	48.4	4.37	12.14	60.0	130	218	458	218										
2456	2678400	6577213	743	7474	26.8	3.75	9.01	381.9	91	156	325	220										
1129	2592000	2928979	150	3653	51.8	1.61	3.01	14.5	60	78	125	117										
557	2678400	1493128	98	2131	44.6	0.87	1.65	8.9	30	32	43	64										
199	2592000	515860	41	828	34.6	0.32	0.61	3.6	10	9	7	24										
159	2678400	427017	40	762	26.8	0.28	0.54	3.4	8	5	0	21										
159	2678400	427017	46	838	26.8	0.32	0.55	4.2	11	3	214	26										
159	2592000	413243	50	885	25.9	0.38	0.51	26.4	12	83	455	26										
557	2678400	1493128	203	3466	26.8	1.77	1.91	52.1	58	209	971	123										
611	2592000	1583634	238	3959	25.9	2.30	2.09	9.5	78	127	317	162										
1129	2678400	3023512	311	4762	26.8	2.06	4.10	53.8	62	212	605	172										
13277	2628000	34890800	3574	59308	32.9	26.24	44.45	777.2	850	1889	8441	1856										
Total:		34442812	3508	49824	392.0	21.97	46.16	804.0	693	1343	3966	1413	Annual base: flow ' mean concentration	Sum of monthly transports								

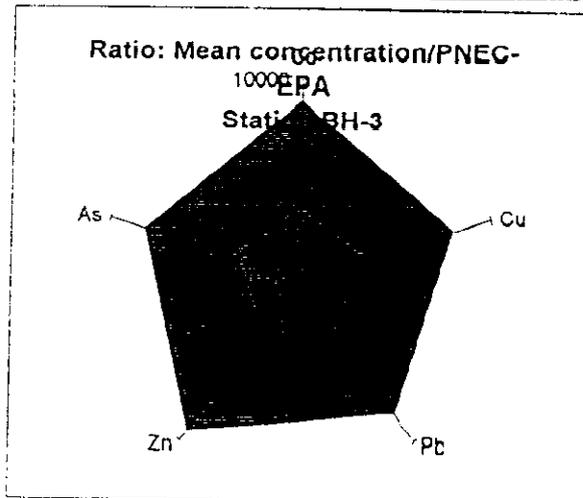
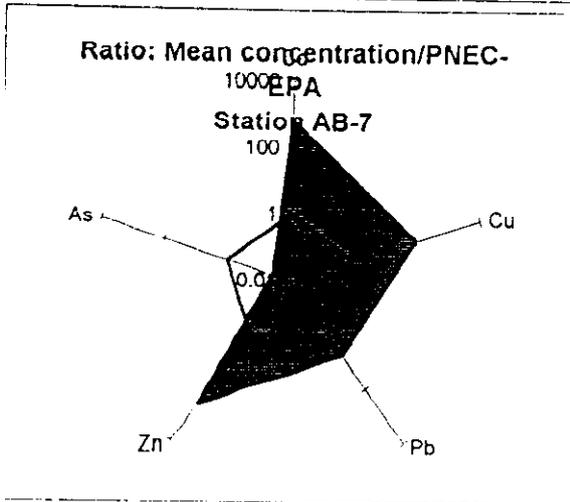
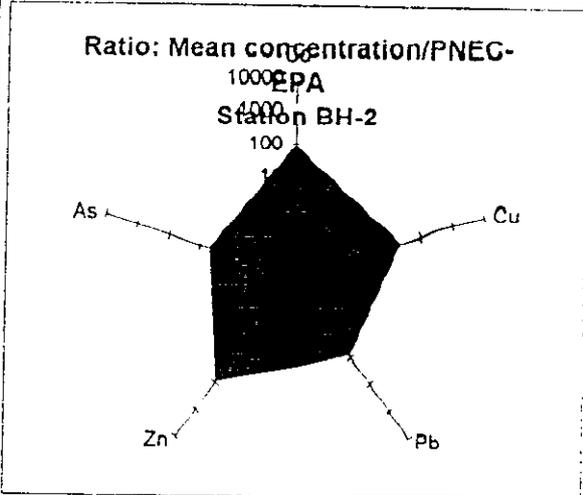
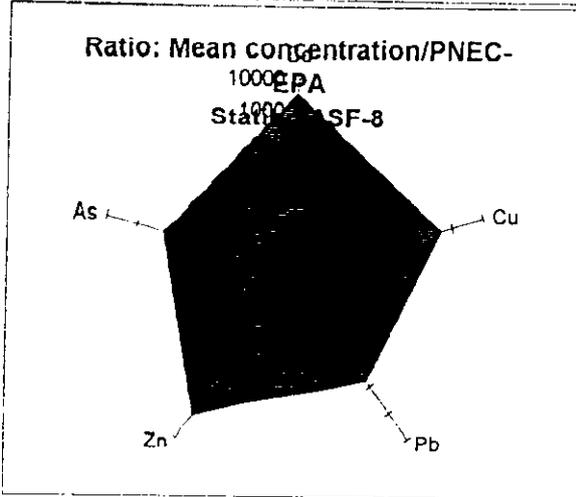
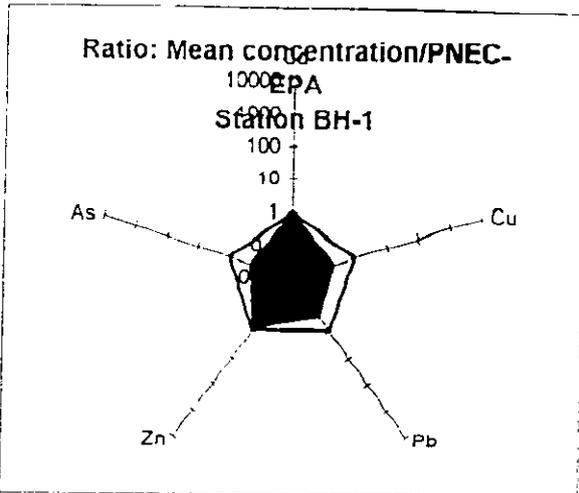
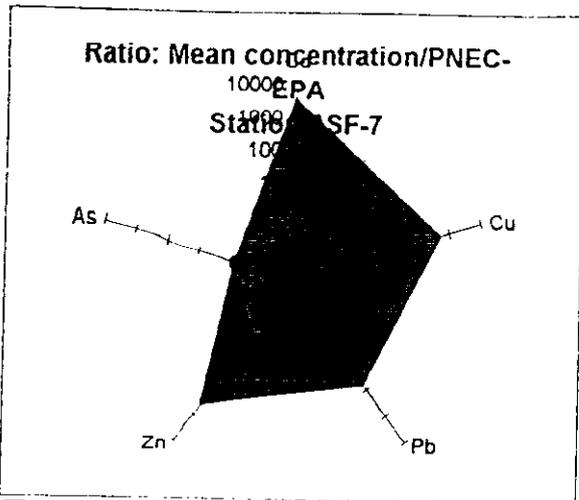
## *APPENDIX 2*

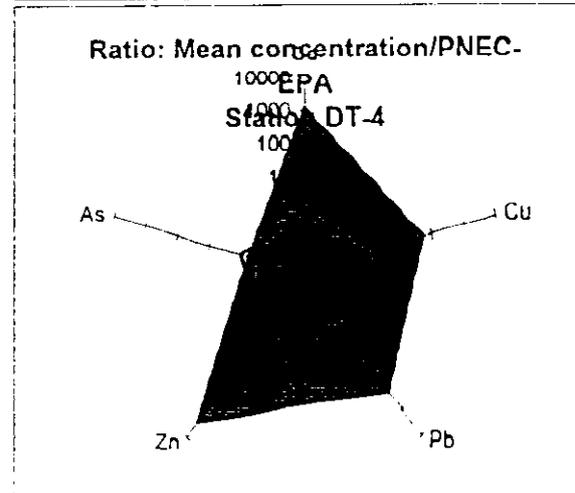
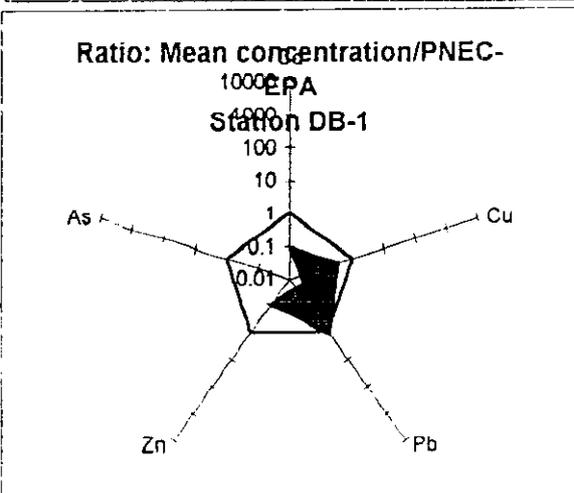
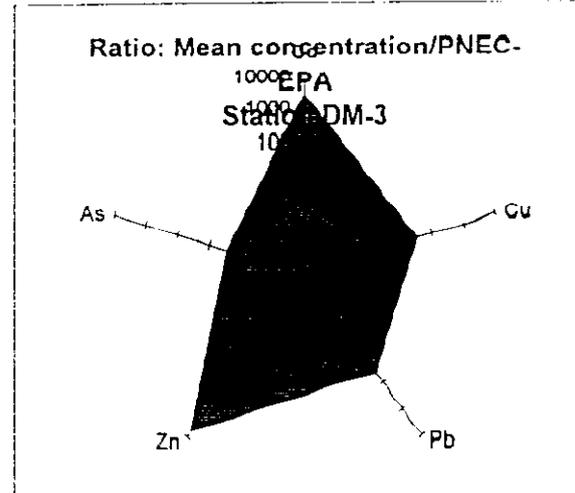
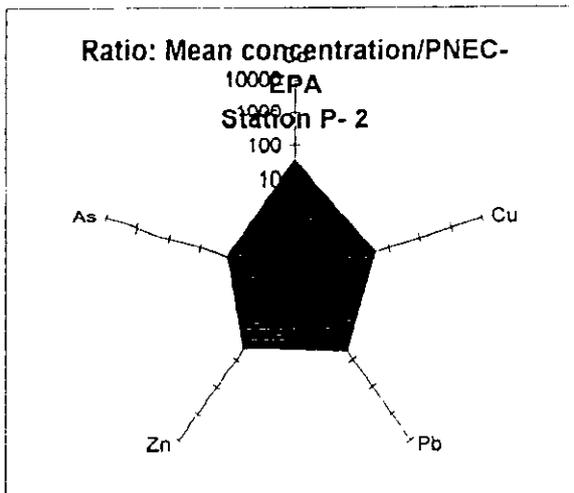
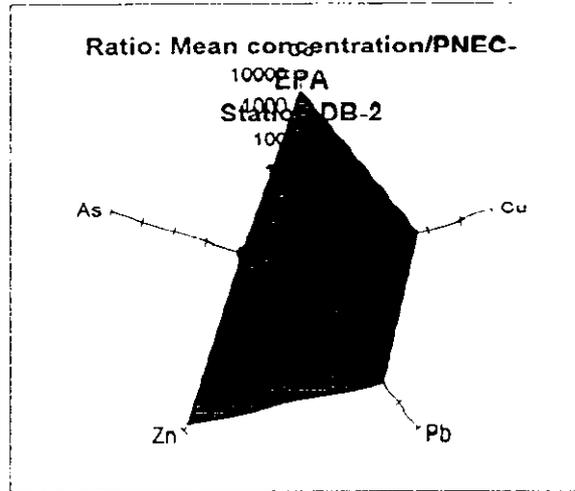
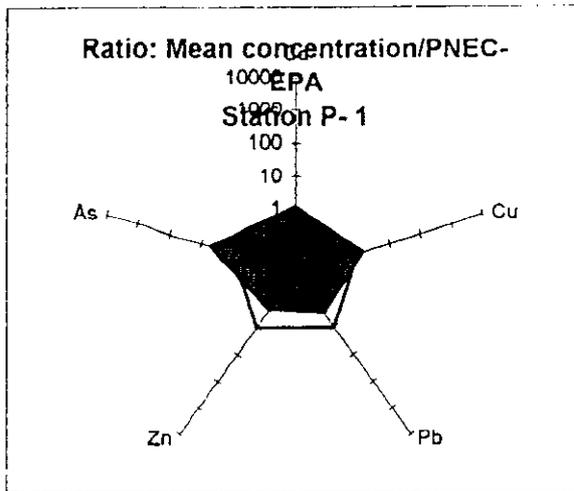
*Radial diagrams, ratios of concentrations in rivers and lakes to  
reference values*

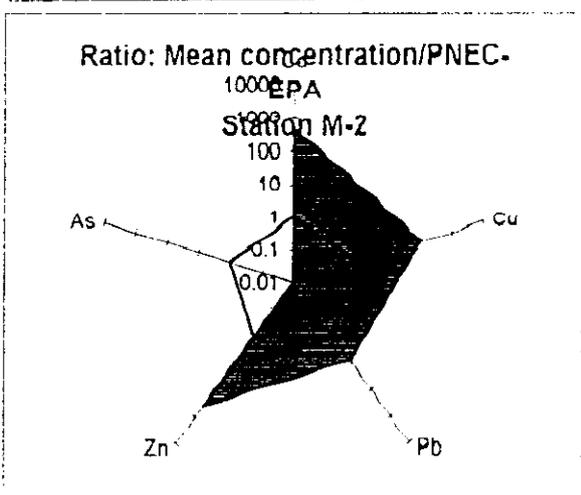
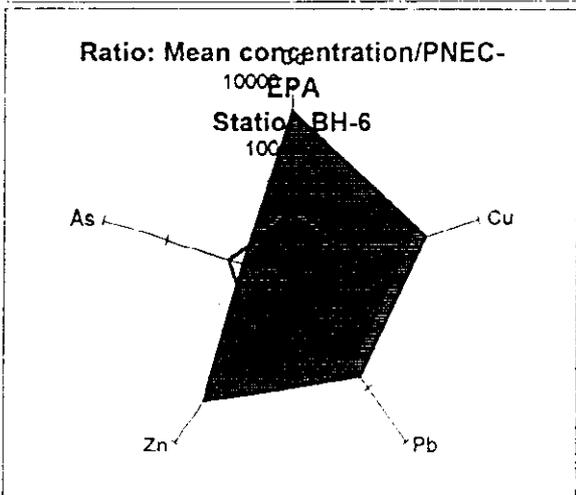
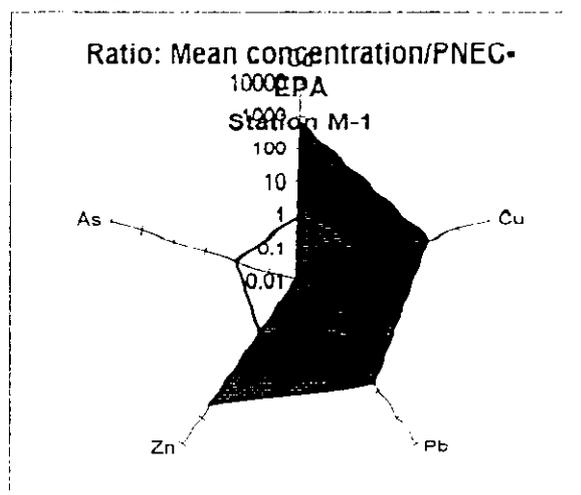
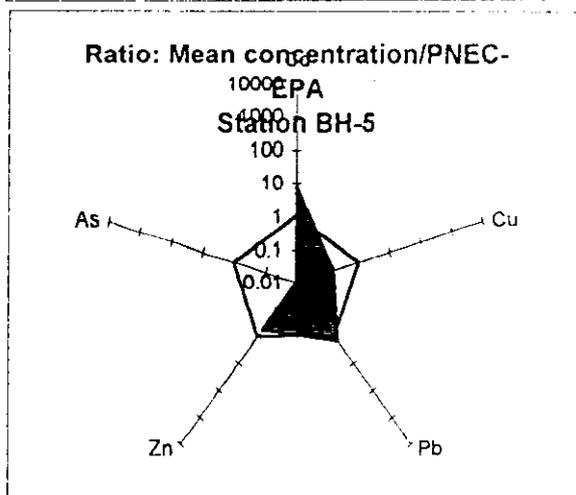
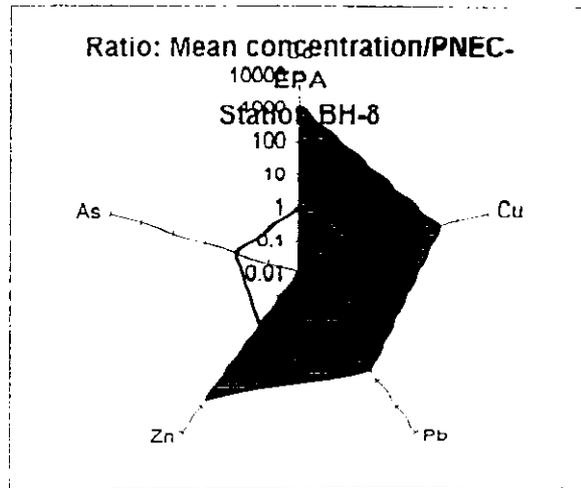
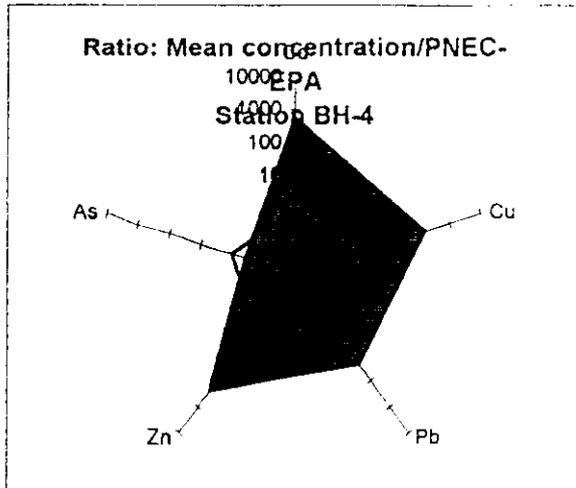
Annual Station	mean concentrations in rivers from mining areas										means of all data		
	Cl- mg/l	SO4-- mg/l	Ag ug/l?	Cd mg/l	Cu mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	Pb mg/l	Sb ug/l?	Zn mg/l	As ug/l		
AJ1	235	3236	0.02	5.74	10.7	773.4	8.24	0.19	0.6	71.8	203		
AG2	31.9	65.2	0.1	2E-04	2E-04	0.01	0.003	0.075	0.51	0.013	1.1		
AM3	191	4420	0.013	1.24	5.92	1058	3.85	0.14	0.4	249	183		
AP5	246	1633	0.013	1.89	2.89	289	9.5	0.23	0.3	82.7	177.1		
ASF4	129	4371	0.019	2.34	7.46	1116	5.1	2.8	1.1	406	5789		
ASF6	73.9	2424	0.02	1.61	2.25	180	14.06	0.18	0.3	171.8	102		
ASF7	84.8	970	0.03	3.76	6.09	529	13	0.2	1.6	44.8	5.9		
ASF8	63.7	2673	0.02	3.2	5.1	494	18.7	0.2	0.83	130	1153		
AB7	83.4	1381	0.01	0.76	1.19	17	17.4	0.02	0.32	47	0.3		
BH1	22.4	43.2	0.1	0.001	0.003	0.25	0.027	9E-04	0.0009	0.096	1.7		
BH2	28	149	0.16	0.083	0.24	5.06	1.86	0.025	1.89	8.36	37.6		
BH3	32.9	329.6	0.01	0.95	2.6	150.1	5.26	0.1	31.6	38	11.3		
BH4	42.6	804	0.01	0.62	1.98	63.3	20	0.085	2.84	27.6	3.06		
BH5	24	92.4	0.01	0.009	0.002	1.22	0.028	0.005	5.29	0.065			
BH6	54.6	905	0.01	1.51	2.51	120	31.4	0.13	0.54	37.1	3		
BH8	94.3	2069	0.02	1.21	3.41	561	36.4	0.15	1.15	57.8			
M1	37	1105	0.01	0.65	1.35	14.7	17.8	0.2	17	43.7	0.1		
M2	63	1155	0.013	0.57	1.27	30.4	18.4	0.026	29.7	41.6			
P1	1606	105.5	0.26	0.001	0.018	0.23	0.027	0.001	5	0.025	42.8		
P2	1937	151.9	0.02	0.039	0.042	0.14	0.09	0.016	3	0.44	10.44		
DB1	49.4	40.9	0.1	1E-04	0.004	1.02	0.087	0.004	1.1	0.01	0.028		
DB2	36	1727	0.011	3.06	0.56	109.4	8.19	0.49	3	611	5.5		
DM3	33.8	2351	0.02	2.7	0.41	5.4	18	0.13	7.79	592	21		
DT4	97.6	1369	0.006	1.29	0.65	32.6	12.93	0.68	2.28	310	4.6		
DA5	155.2	1519	0.015	1.06	0.8	54.9	15.33	0.11	1.12	312	7.57		
PZ1	78.4	1583	0.01	0.72	0.67	1.3	14.16	0.048	3.6	163.8	26		
PZ2	436	93.1	0.01	0.001	0.114	0.092	0.014	0.026	5.21	0.11	7.66		
PZ3	140.5	1042	0.012	0.51	0.41	0.53	10.2	0.032	1.58	127.3	8.33		
Mean:	218.1	1350.2	0.0	1.3	2.1	200.3	10.7	0.2	4.6	127.6	312.2		
Median:	76.2	1130.0	0.0	0.9	1.0	31.5	9.9	0.1	1.6	45.9	8.3		
PNECP-EPA				0.001	0.012			0.003		0.11	0.008		
MAC-WHO				0.003	2			0.01		3	0.01		

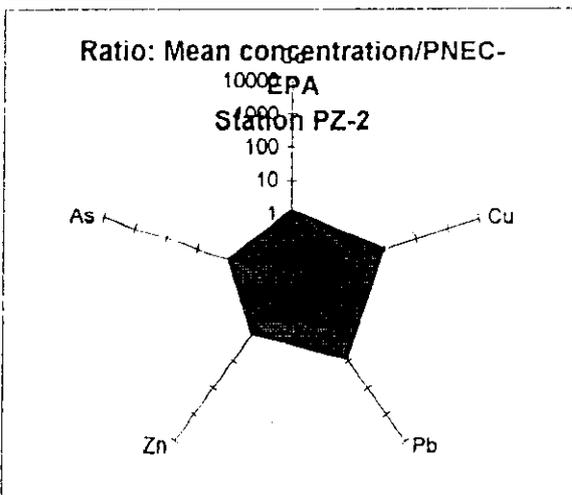
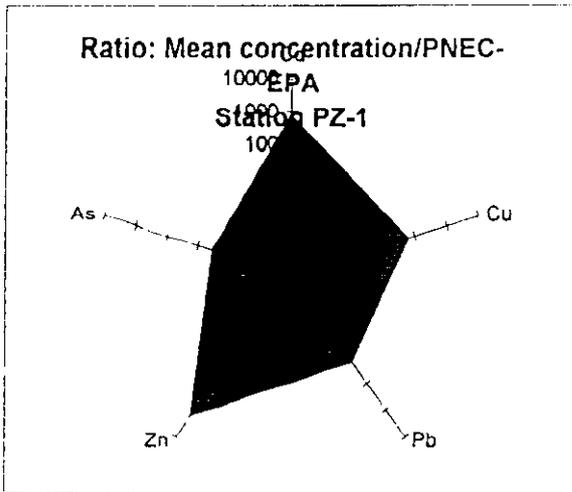
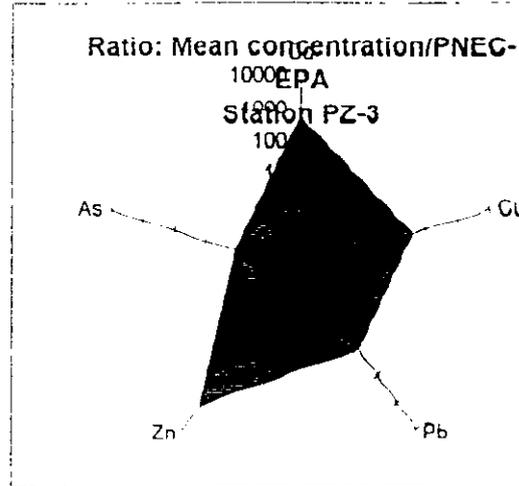
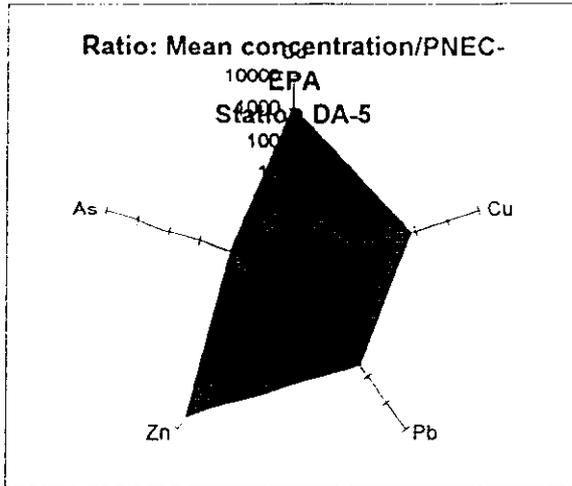
Station	Ratio Mean conc. / PNEC-EPA					Station	Ratio Mean conc./MAG-WHO				
	Cd	Cu	Pb	Zn	As		Cd	Cu	Pb	Zn	As
AJ1	5218.2	891.7	59.38	652.7	25.0617	AJ1	1913.33	5.35	19	23.933	20.3
AC2	0.1364	0.017	23.44	0.115	0.1358	AC2	0.05	0.0001	7.5	0.0042	0.11
AM3	1127.3	493.3	43.75	2264	22.5926	AM3	413.333	2.96	14	83	18.3
AP5	1718.2	240.8	71.88	751.8	21.8642	AP5	630	1.445	23	27.567	17.71
ASF4	2127.3	621.7	875	3691	714.691	ASF4	780	3.73	280	135.33	576.9
ASF6	1463.6	187.5	56.25	1562	12.5926	ASF6	536.667	1.125	18	57.267	10.2
ASF7	3418.2	507.5	62.5	407.3	0.7284	ASF7	1253.33	3.045	20	14.933	0.59
ASF8	2909.1	425	62.5	1182	142.346	ASF8	1066.67	2.55	20	43.333	115.3
AB7	690.91	99.17	6.25	427.3	0.03704	AB7	253.333	0.595	2	15.667	0.03
BH1	0.9091	0.217	0.281	0.873	0.20988	BH1	0.33333	0.0013	0.09	0.032	0.17
BH2	75.455	20	7.813	76	4.64198	BH2	27.6667	0.12	2.5	2.7867	3.76
BH3	863.64	216.7	31.25	345.5	1.39506	BH3	316.667	1.3	10	12.667	1.13
BH4	563.64	165	26.56	250.9	0.37778	BH4	206.667	0.99	8.5	9.2	0.306
BH5	8.1818	0.167	1.563	0.591	0	BH5	3	0.001	0.5	0.0217	
BH6	1372.7	209.2	40.63	337.3	0.37037	BH6	503.333	1.255	13	12.367	0.3
BH8	1100	284.2	46.88	525.5	0	BH8	403.333	1.705	15	19.267	
M1	590.91	112.5	62.5	397.3	0.01235	M1	216.667	0.675	20	14.567	0.01
M2	518.18	105.8	8.125	378.2	0	M2	190	0.635	2.6	13.867	
P1	1.1818	1.5	0.313	0.227	5.28395	P1	0.43333	0.009	0.1	0.0083	4.28
P2	35.455	3.5	5	4	1.28889	P2	13	0.021	1.6	0.1467	1.044
DB1	0.0909	0.367	1.25	0.086	0.00346	DB1	0.03333	0.0022	0.4	0.0032	0.003
DB2	2781.8	46.67	153.1	5555	0.67901	DB2	1020	0.28	49	203.67	0.55
DM3	2454.5	34.17	40.63	5382	2.59259	DM3	900	0.205	13	197.33	2.1
DT4	1172.7	54.17	212.5	2818	0.5679	DT4	430	0.325	68	103.33	0.46
DA5	963.64	66.67	34.38	2836	0.93457	DA5	353.333	0.4	11	104	0.757
PZ1	654.55	55.83	15	1489	3.20988	PZ1	240	0.335	4.8	54.6	2.6
PZ2	1.1818	9.5	8.125	1	0.94568	PZ2	0.43333	0.057	2.6	0.0367	0.766
PZ3	463.64	34.17	9.938	1157	1.0284	PZ3	170	0.205	3.18	42.433	0.833
	1153.4	174.5	70.2	1160.4	34.4						
	777.3	82.9	32.8	417.3	0.9						
PNECP-	1	1	1	1	1	PNECP-	1	1	1	1	1
MAC-W	1	1	1	1	1	MAC-W	1	1	1	1	1



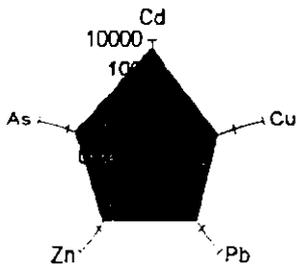




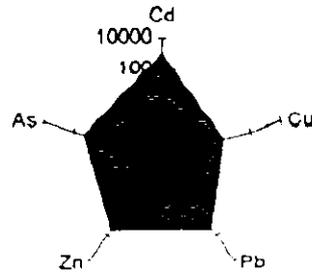




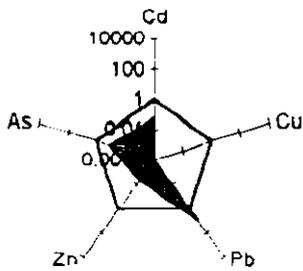
Ratio: Mean concentration/MAC-  
WHO  
Station AJ-1



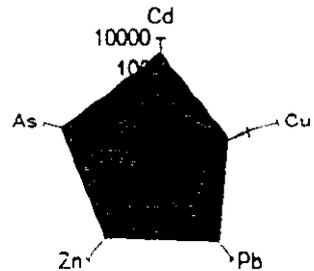
Ratio: Mean concentration/MAC-  
WHO  
Station AP-5



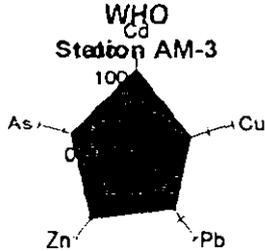
Ratio: Mean concentration/MAC-  
WHO  
Station AC-2



Ratio: Mean concentration/MAC-  
WHO  
Station ASF-4



Ratio: Mean concentration/MAC-  
WHO  
Station AM-3



Ratio: Mean concentration/MAC-  
WHO  
Station ASF-6

