



CONVENIOS ALA / 86 / 03 Y ALA / 87 / 23 - PERU Y BOLIVIA

**PLAN DIRECTOR GLOBAL BINACIONAL DE PROTECCION - PREVENCION DE
INUNDACIONES Y APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS DEL LAGO
TITICACA, RIO DESAGUADERO, LAGO POOPO Y LAGO SALAR DE COIPASA
(SISTEMA T.D.P.S.)**

ESTUDIO DE HIDROGEOLOGIA

Julio 1993



CONVENIOS ALA / 86 / 03 Y ALA / 87 / 23 - PERU Y BOLIVIA

**PLAN DIRECTOR GLOBAL BINACIONAL DE PROTECCION - PREVENCION DE
INUNDACIONES Y APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS DEL LAGO
TITICACA, RIO DESAGUADERO, LAGO POOPO Y LAGO SALAR DE COIPASA
(SISTEMA T.D.P.S.)**

ESTUDIO DE HIDROGEOLOGIA

Julio 1993

I N D I C E

	Pag.
1.- INTRODUCCION	1-1
1.1. Región del Proyecto	1-1
1.2. Objetivos y alcances del estudio	1-3
2.- RESUMEN	2-1
3.- METODOLOGIA	3-1
3.1. Informes y datos recopilados	3-2
3.1.1 Sector Peruano	3-2
3.1.2 Sector Boliviano	3-2
3.3. Instituciones Visitadas	3-9
4.- GEOLOGIA	4-1
4.1. Evolución paleogeográfica	4-1
4.2. Esquema estratigráfico	4-8
4.3. Sucesiones estratigráficas	4-12
4.4. Evolución geológica en el Cuaternario	4-23
4.5. Geotermia	4-27
5.- HIDROGEOLOGIA	5-1
5.1. Investigaciones realizadas	5-3
5.1.1 Inventario de fuentes de agua subterránea	5-3
5.1.2 Red de control de acuíferos	5-6
5.1.2.1 Evolución de los elementos bajo control	5-9
5.1.3. Pruebas de bombeo	5-10
5.1.4. Conductividad eléctrica y sus variaciones en el tiempo	5-12
5.1.5. Estudios geofísicos recopilados	5-13
5.2. Mapas Hidrogeológicos	5-15
5.2.1. Hoja EGH - 1	5-18
5.2.2. Hoja EGH - 2	5-18
5.2.3. Hoja EGH - 3	5-18
5.2.4. Hoja EGH - 4	5-30
5.2.5. Hoja EGH - 5	5-38
5.2.6. Hoja EGH - 6	5-40
5.2.7. Hoja EGH - 7	5-49
5.2.8. Hoja EGH - 8	5-49
5.2.9. Hoja EGH - 9	5-49
5.2.10. Hoja EGH - 10	5-50
5.2.11. Hoja EGH - 11	5-52
5.2.12. Hoja EGH - 12	5-52
6.- CONCLUSIONES	6-1
7.- RECOMENDACIONES	7-1
BIBLIOGRAFIA	

A N E X O S

ANEXO 1

Listado del inventario de fuentes de aguas subterráneas

ANEXO 2

Fichas de las fuentes de control

ANEXO 3

Variaciones del nivel freático en el tiempo

ANEXO 4

Pruebas de bombeo a caudal constante

ANEXO 5

Variaciones de la Conductividad eléctrica

MAPAS HIDROGEOLOGICOS

EGH	-	001
EGH	-	002
EGH	-	003
EGH	-	004
EGH	-	005
EGH	-	006
EGH	-	007
EGH	-	008
EGH	-	009
EGH	-	010
EGH	-	011
EGH	-	012

1. INTRODUCCION

1.1 LA REGION DEL PROYECTO

La región del Proyecto (Figura 1.1.) está constituido por el sistema de las cuencas hidrográficas del Lago Titicaca, Río Desaguadero, Lago Poopó y Lago Salar de Coipasa, al cual se le ha denominado Sistema T.D.P.S..

El sistema T.D.P.S. (figura 1.2) es una cuenca endorreica, sin salida al mar, que se encuentra ubicada entre Perú, Bolivia y Chile.) entre las coordenadas 14° 03', y 20° 00' de latitud Sur y entre 66° 21' y 71° 07' de longitud Oeste aproximadamente.

La superficie del Sistema T.D.P.S. es de 143.900 km², y comprende la parte altiplánica de la sub-región de Puno (en el Perú) y de los departamentos de La Paz y Oruro (en Bolivia). Las características geográficas de las cuencas que forman el sistema son las siguientes:

-	Lago Titicaca:	
.	cuenca vertiente	56.270 Km ²
.	superficie media (del lago)	8.400 Km ²
.	nivel medio del lago	3.810 m.s.n.m.
-	Río Desaguadero:	
.	cuenca vertiente	29.843 Km ²
.	longitud del cauce	398 Km
.	pendiente media	0,45 ‰

A lo largo del río Desaguadero se identifican los siguientes tramos:

- . Del Km 0 al Km 63: Llanuras anchas (del Puente Internacional a Nazacara);
- . Del Km 63 al Km 226: Zona montañosa (de Nazacara a Chilahuala);
- . Del Km 226 al Km 398: Llanuras de inundación (de Chilahuala al lago Poopó).

- Lago Poopó:
 - . cuenca vertiente 24.829 Km²
 - . superficie media (lago Uru Uru -Poopó) 3.191 Km²
 - . nivel medio del lago 3.686 msnm
- Río Laca Jahuira, que conecta el Lago Poopó con el Salar de Coipasa:
 - . longitud de cauce 130 Km
 - . pendiente media 0,2 ‰
- Salar de Coipasa:
 - . cuenca vertiente (intermedia) 32.958 Km²
 - . superficie media (del lago) 2.225 Km², y
 - . nivel medio del lago 3.657 msnm

Por medio de la quebrada Negrojahuira, de alrededor de 20 Km de largo, el Salar de Coipasa se conecta al Salar de Uyuni, el cual tiene una cuenca vertiente (intermedia) de 60.000 Km² y una superficie media de 12.000 Km². El nivel medio del Salar de Uyuni es de 3.653 msnm.

La pluviometría media anual de la zona varía de 800 mm/año en el Lago Titicaca a menos de 300 mm/año en el Salar de Coipasa.

La densidad de la población rural en la parte norte de la región del Proyecto, es relativamente alta, sobre todo a orillas del Lago Titicaca (llegando hasta 120 hab/km²) y también en el eje norte-sur, constituido por el río Desaguadero, en las cercanías del curso de agua.

En las zonas cercanas a las orillas del Lago Titicaca y del Desaguadero, la población vive principalmente de la agricultura, mientras que en las zonas más alejadas se dedica a la ganadería por falta de tierras apropiadas al cultivo, y como forma de poder compensar los mayores riesgos del clima inherentes a la agricultura.

Las condiciones climáticas irregulares, unidas a la gran altitud en que se encuentra la región (entre 3.700 msnm y 3.900 msnm), determinan que los resultados productivos del sector sean muy inestables, lo que ocasiona difíciles condiciones de vida de la población.

FIGURA 1.1 UBICACION DE LA ZONA DE ESTUDIO

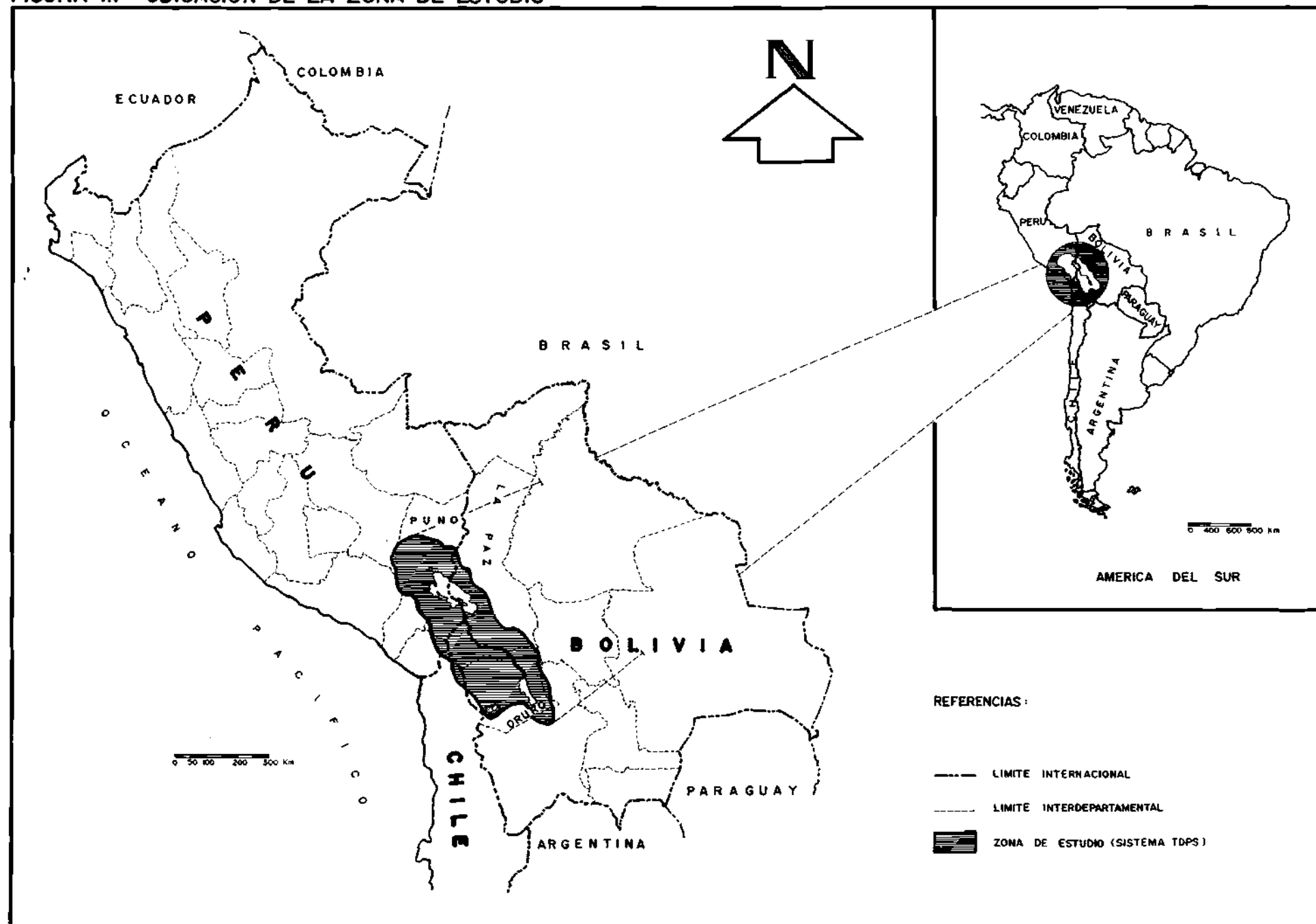
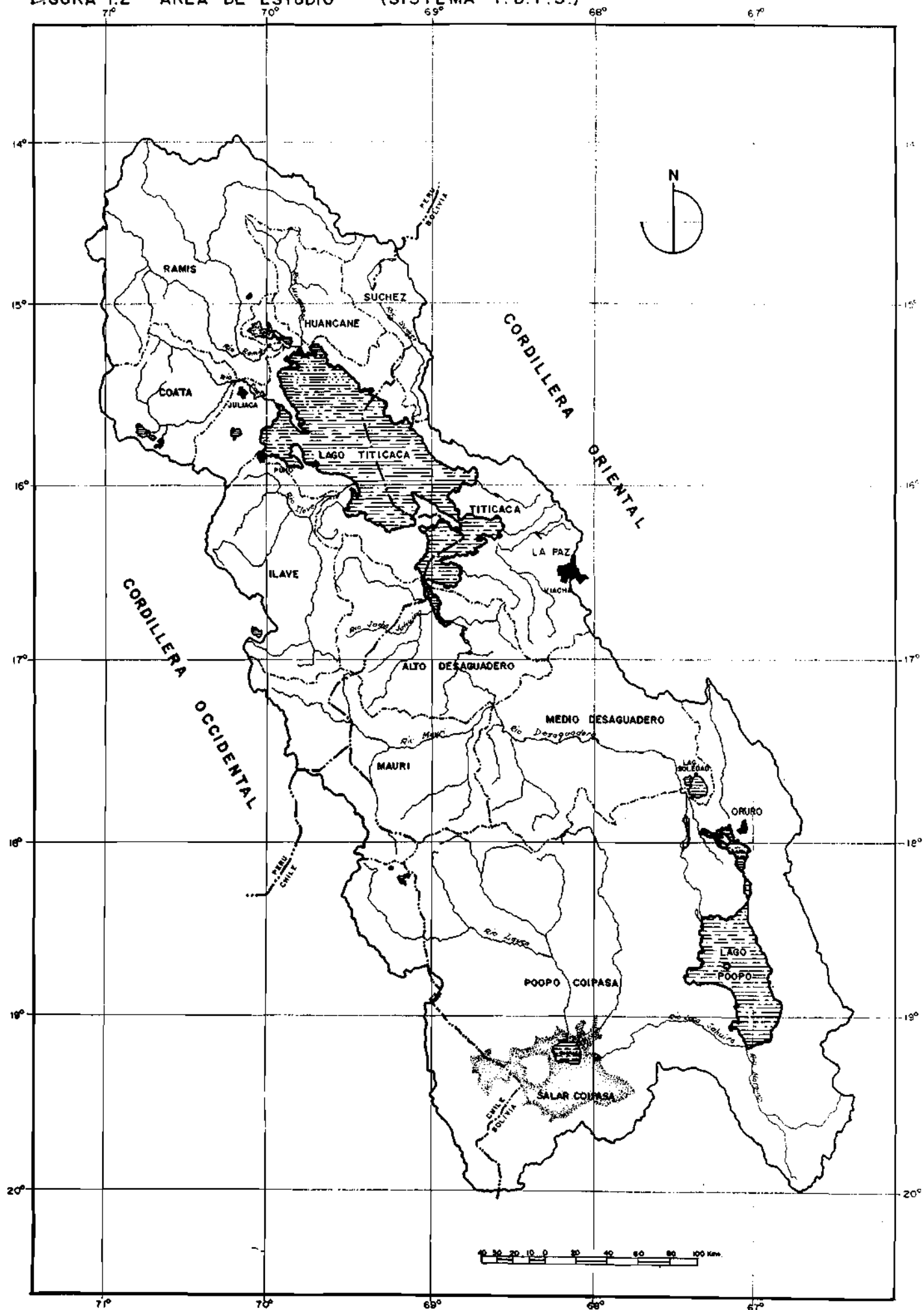


FIGURA 1.2 AREA DE ESTUDIO (SISTEMA T.D.P.S.)



1.2. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL ESTUDIO

El Estudio Hidrogeológico tiene como objetivo principal, la interpretación de las relaciones entre circulación hídrica subterránea y el sistema TDPS, y la evaluación de los recursos hídricos del subsuelo.

El estudio se ha desarrollado durante un período de 16 meses con una serie de mediciones directas (niveles de agua, caudales y conductividad eléctrica) en 882 puntos oportunamente elegidos de los cuales 132 fueron utilizados, en la red de control de los acuíferos.

Con los elementos recopilados, y las medidas, se ha elaborado un mapa hidrogeológico que ha permitido de definir los siguientes elementos:

- . Comportamiento de la circulación hídrica, con direcciones de flujo y gradiente;
- . Potencialidades de los acuíferos;
- . Calidad de las aguas
- . Delimitación de los acuíferos, acuitardos y acuicludos así como la evaluación de los recursos.

RESUMEN

El estudio geológico ha permitido la elaboración de un mapa que agrupa a las diferentes formaciones geológicas en función de su permeabilidad (capacidad de absorción, almacenaje y restitución de aguas); debiendo representar no sólo las características litológicas, sino también el volumen relativo (espesor y superficie) y la posición estratigráfica y morfológica de las formaciones aflorantes. Este estudio ha sido utilizado en los estudios geomorfológicos e hidrogeológicos.

En los mapas elaborados se han identificado las siguientes unidades:

- Terrenos del Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico constituidos de alternancias de lutitas, areniscas, diamictitas, calizas, margas, arcillas, volcanitas y evaporitas. Estos terrenos, aunque en el conjunto sean poco o nada permeables, tienen características de permeabilidad, sea por fisuración o por porosidad, muy variables, entre media a baja o nula. Las aguas meteóricas se infiltran en porcentaje muy bajo y, localmente pueden alimentar circulaciones hídricas de importancia limitada, colgadas sobre niveles menos permeables.
- Terrenos de edad plio-pleistocénica y recientes que generalmente rellenan los valles y las planicies aluviales, constituidos por materiales no consolidados o poco consolidados de origen fluvial, glacial y lacustre y, en la parte sur del altiplano, por terrenos eólicos (gravas, arenas, limos, arcillas, tobas y diatomitas). La granulometría de estos materiales varía mucho sea en sentido vertical u horizontal y las variaciones son rápidas y frecuentes. En relación a la granulometría varía la permeabilidad entre muy elevada a muy baja pasando de gravas a arcillas.

Con los resultados de las evaluaciones geológico-geomorfológicas del Estudio, se han discretizado las formaciones consolidadas y no consolidadas de poca o nula permeabilidad con los depósitos detríticos, que constituyen los mejores y únicos acuíferos; los cuales

están conformadas por depósitos cuaternarios de origen aluvial, fluvioglacial, fluvial, glacial y lacustre, con características variables en composición litológica, tamaños y formas, dependiendo de los agentes erosivos y de los ambientes de sedimentación.

Los espesores del Cuaternario son variables dependiendo del desarrollo de cada cuenca como consecuencia de los procesos de erosión, transporte y sedimentación. Las investigaciones permiten señalar que los depósitos aluviales de interés hidrogeológico, no superan los 150 metros de profundidad; de los cuales los primeros 60 a 80 m presentan las mejores condiciones para el aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos, como ha quedado evidenciado con las perforaciones ejecutadas en algunas regiones altiplánicas de Perú y Bolivia.

Durante el estudio se inventariaron, a partir de la documentación existente y de investigación directa, 822 fuentes de agua, es decir: pozos someros a tajo abierto, perforaciones o pozos tubulares, manantiales y manifestaciones de aguas termales.

Las manifestaciones termales se encuentran a lo largo de la Cordillera Oriental y las aguas son muy mineralizadas, con temperaturas que alcanzan hasta 75° C.

En la actualidad los mayores volúmenes de explotación del agua subterránea corresponden a los pozos tubulares destinados para el abastecimiento de agua de localidades o ciudades como es el caso de las ciudades de El Alto y la ciudad de Oruro en Bolivia; siguiendo en orden de importancia los de uso industrial, agrícola y doméstico-pecuario familiar en las comunidades campesinas.

Los estados de confinamiento o semi-confinamiento que se presentan en uno o más niveles de profundidad de los acuíferos, propician niveles piezométricos que alcanzan la superficie del suelo o la superan hasta más de 2,0 m de altura como ocurre en la cuenca del río Catari en el sector boliviano.

La morfología de las napas, establecida a partir de la curvas de hidroisohipsas, muestra que los flujos subterráneos, siguen sentidos impuestos por las configuraciones de los reservorios acuíferos, la

localización de las áreas de recarga y sus niveles de base. Así en las cuencas de los ríos Huancané, Ramis, Coata, Illpa, Ilave, Parco (Sector Peruano) y Tiwanacu, Catari, (Sector Boliviano), las napas escurren hacia el Lago Titicaca con gradientes hidráulicos promedios de 1% a 0,1%.

Las características hidrodinámicas de los acuíferos explorados, determinado a partir de las pruebas de bombeo realizadas, muestran que en algunos acuíferos del sector peruano las transmisividades alcanzan valores en el orden de 120 a 5.600 m²/día ($1,4 \times 10^{-3}$ a $6,5 \times 10^{-2}$ m²/s), mientras que en el sector boliviano se tiene un rango de 1 a 750 m²/día (10^{-5} a $8,7 \times 10^{-3}$ m²/s).

Los valores de coeficiente de almacenamiento, establecidos para las cuencas del sector boliviano, corresponden a acuíferos, de confinados a semiconfinados, y también libres con un rango de 10^{-2} a 10^{-10} .

Con los resultados de los ensayos a caudal variable se han determinado los rendimientos óptimos de los acuíferos y sus capacidades específicas. En el Sector Peruano, los valores varían, desde 4 a más de 100 l/s con capacidades específicas de 0,3 a 5 l/s/m. En el sector boliviano de 2 a 75 l/s con capacidades específicas de 0,3 a 4 l/s/m.

A lo largo del Desaguadero las napas, de menor importancia, escurren hacia el río.

La calidad del agua subterránea en los acuíferos, del sector peruano varía entre regular a muy buena. Sin embargo en algunas zonas por condiciones geológicas localizadas las aguas presentan calidades con ciertas características restrictivas para consumo humano e irrigaciones, como sucede en la cuenca del río Illpa. La conductividad eléctrica varía entre 120 a 1300 mmhos/cm a + 25° y en sectores localizados alcanzan valores de 2000 a 5900 micromhos/cm a + 25° C.

En el sector boliviano la calidad del agua es también variable en el espacio dependiendo de las condiciones geológicas de cada cuenca, y de las características de las fuentes de recarga de los acuíferos. Existen aguas con calidades que van desde aceptables a muy buenas para consumo humano, agrícola y otros usos sobre todo en los pozos profundos; pero también en

algunas cuencas se tienen aguas con ciertas limitaciones para su uso, como sucede en algunos sectores del río Desaguadero. La conductividad eléctrica (CE) varía entre 80 y 5200 micromhos/cm a + 25°C.

Todas las zonas meridionales tienen aguas muy salobres con valores que alcanzan fácilmente los 10.000-15.000 micromhos/cm a + 25°C de conductividad.

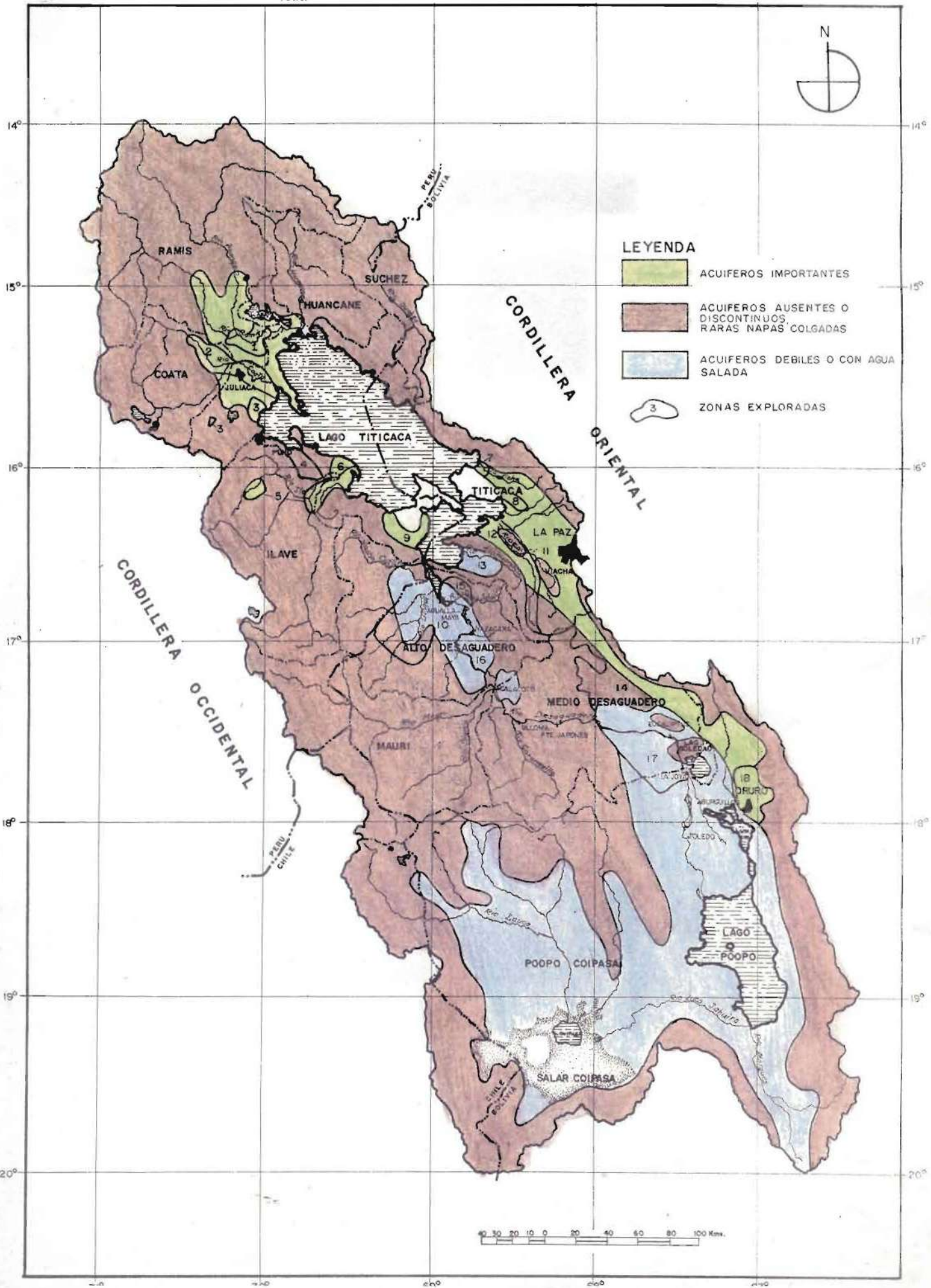
En conclusión se puede afirmar que todos los sistemas hídricos subterráneos escurren hacia la red hidrográfica y que desde un punto de vista hidrogeológico el sistema T.D.P.S. es endorreico. Ni el lago Titicaca ni los otros elementos del sistema tienen fugas. Los acuíferos en general, representan una parte muy limitada del total de la cuenca (Fig. 2.1).

En períodos de aguas altas pueden verificarse, en tramos particulares, una transferencia de aguas desde el Desaguadero hacia los acuíferos subterráneos.

El agua que circula en los acuíferos y que se mueve hacia la Red Hidrográfica se pierde en parte por evaporación. El volumen total de agua que desde el subsuelo pasa al sistema, no supera a los 3 m³/s.

Un desarrollo ulterior de la explotación de agua subterránea es aceptable aún porque con una explotación más intensiva se pueden reducir las pérdidas por evaporación y se puede aumentar la recarga de los acuíferos.

FIGURA 2.1 ESQUEMA HIDROGEOLOGICO Y ZONAS EXPLORADAS



METODOLOGIA

La metodología de trabajo ha comprendido las siguientes fases:

FASE I : Investigación de tipo bibliográfico, con la finalidad de recolectar información, incluso parcial, de datos textos e interpretaciones sobre la Hidrogeología del área en estudio.

FASE II : La realización de investigaciones hidrogeológicas de campo y de gabinete en función de los resultados de la I Fase, que comprendieron las tareas siguientes:

- Misiones de campo para el control de la geología; inventario de fuentes de agua, mediciones de niveles freáticos y de conductividad eléctrica de las aguas;
- Control periódico de los acuíferos del sistema TDPS, con medición de los niveles de agua en reposo, conductividad eléctrica y temperatura del agua. Para esta tarea se estableció una Red de observación con 132 puntos;
- Reinterpretación de 50 pruebas de bombeo a caudal constante y 97 pruebas a caudal variable.

FASE III : La elaboración de mapas hidrogeológicos preliminares en los cuales se evidenciaron los siguientes elementos:

- Comportamiento de la circulación hídrica, con direcciones de flujo y gradientes;
- Potencialidades de los acuíferos;
- Calidad de las aguas;
- Relación entre Sistema TDPS y circulaciones hídricas subterráneas;
- Delimitación de los acuíferos, acuitardos y acuicludos, y evaluación preliminar de los recursos;
- Areas de mayor importancia hidrogeológica.

FASE IV : Elaboración de los mapas hidrogeológicos definitivos del área de estudio a escala 1/250.000 .

3.1 INFORMES Y DATOS RECOPIADOS

En la primera fase del presente estudio, se identificaron las Instituciones Públicas y Privadas que han efectuado Estudios y/o Proyectos de aguas subterráneas, con la finalidad de recopilar el mayor número de Informes y/o datos de investigaciones realizadas, en el Sector Peruano y Boliviano.

A continuación se hace una descripción resumida de los principales Estudios y Proyectos recopilados.

3.1.1. Sector Peruano

Estudios

Se ha identificado y recopilado Estudios hidrogeológicos realizados en el ámbito del departamento de Puno, por Instituciones Públicas y privadas principalmente con propósitos de irrigación, y en menor escala para otros usos.

El mayor número de los Estudios recopilados corresponden a los trabajos ejecutados por el ex-Programa Nacional de Aguas Subterráneas y Tecnificación de riego del Ministerio de Agricultura, (PRONASTER) en áreas localizadas y con fines de irrigación. Esta Institución, entre los años 1987 a 1990 dentro del marco de un Programa de perforación y equipamiento de 80 pozos tubulares para riego en el departamento de Puno, ha efectuado un total de 21 estudios hidrogeológicos específicos, con el objeto de localizar y diseñar pozos, evaluando una superficie total de 118.540 Has (1.185,4 Km²). Con estos estudios se han proyectado un total de 206 perforaciones con fines de riego, en diversas comunidades campesinas del Altiplano de Puno/Perú; de los cuales se perforaron 94 entre pozos exploratorios y definitivos.

En estos estudios se han efectuado fundamentalmente evaluaciones localizadas, en los aspectos geológicos - geomorfológicos, inventario de fuentes de aguas subterráneas, piezometría e Hidrogeoquímica, prospección geofísica con el método de resistividad eléctrica y algunas perforaciones exploratorias.

Asimismo se han identificado en menor escala estudios específicos, realizados por otras instituciones públicas y privadas, con fines de abastecimiento de

agua potable y riego. En estos estudios igualmente se efectuaron evaluaciones hidrogeológicas con el objeto de zonificar las áreas favorables para la explotación del recurso.

Proyectos y/o Programas

Los principales proyectos y/o Programas identificados son los siguientes:

- a) Programa de perforación y equipamiento de 80 pozos tubulares para riego en el departamento de Puno, conducido por el Programa Regional de aguas subterráneas y tecnificación de riego de la Región José Carlos Mariátegui (PRASTER/PUNO). Este Programa en su I Etapa comprende la perforación y equipamiento de pozos, previa realización de Estudios hidrogeológicos específicos. Se ha perforado un total de 94 pozos profundos entre pozos de investigación y definitivos, con profundidades que van desde 45 a 118 metros. De gran número de las perforaciones se ha recopilado información litológica, diagráfias, diseños técnicos, gráficos de pruebas de rendimiento y de pruebas de acuífero e informes técnicos de algunas pruebas de bombeo; igualmente los resultados de análisis físico-químico. La totalidad de las perforaciones de este Programa se han incluido en el presente estudio.

- b) **PROYECTO DE BOMBAS MANUALES - CARE/PUNO**

La Cooperativa Americana de Remesas al Exterior (CARE/PUNO) en el período 1985 a 1990 construyó y equipó con bombas manuales un total de 928 pozos someros a tajo abierto, con profundidades medias de 5 a 6 metros, con revestimientos de concreto y mampostería o de piedra de 1,20 m de diámetro promedio con un emboquillado mínimo de 2,0 m y tapa de protección. Se ha obtenido información general de este Proyecto como número de pozos por Micro-regiones y Comunidades Campesinas y ciertas características constructivas. Algunos pozos de este Proyecto fueron inventariados en el presente estudio.

c) **PROYECTO "PERFORACION DE POZOS DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO EN COMUNIDADES CAMPESINAS DE PUNO" TECIRA**

El Organismo no gubernamental "Taller de Educación, capacitación e investigación rural Andina" (TECIRA), asociación civil, sin fines de lucro, entre los años 1986 y 1987, perforó 188 pozos para consumo humano en comunidades campesinas de los distritos de Ilave y Juli (Prov. Chucuito y distrito de Acora).

De este Proyecto se ha recopilado dos Informes anuales (1986 y 1987) donde se incluyen reportes de las perforaciones, descripción litológica de campo, rendimientos de algunos pozos y croquis generalizados de su ubicación. Los pozos perforados tienen diámetros de 4 a 5 pulgadas, profundidad máxima de 83 metros y rendimiento máximo de 5,5 litros por segundo. De estos pozos, algunos se han inventariado para el presente estudio.

d) **PEQUEÑOS PROYECTOS DE IRRIGACION CON AGUAS SUBTERRANEAS**

El ex-Proyecto especial "Ampliación de la Frontera agrícola con utilización de aguas subterráneas" (PE-AFATER) del Ministerio de Agricultura, entre los años 1984 y 1986, ejecutó pequeños proyectos de irrigación con aguas subterráneas, en áreas localizadas del departamento de Puno que comprendieron obras de perforación de pozos, construcción de bases de anclaje para motor y bomba, casetas de protección, infraestructura de riego y equipamiento de pozos. Algunas de estas perforaciones fueron inventariadas en el presente estudio.

3.1.2 Sector Boliviano

Estudios

Se han recopilado los estudios que se describen a continuación:

a) **INFORME FINAL DEL ESTUDIO DEL PROYECTO DE DESARROLLO DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS DE EL ALTO**

Este estudio fue ejecutado por la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), a solicitud del Servicio Autónomo Municipal de agua potable y Alcantarillado (SAMAPA) de la ciudad de La Paz - Bolivia, entre los años 1987 y 1988, en una área de 700 Km², con el objetivo fundamental de evaluar la factibilidad técnica y económica de explotar las aguas subterráneas con fines de abastecimiento de agua potable de El Alto.

En este estudio, se efectuaron los siguientes trabajos: topografía, geología e hidrogeología, sobre la base de información disponible; prospección geofísica en una área de 476 Km² con un total de 64 sondajes eléctricos con el método de resistividad eléctrica; 3 pruebas de bombeo a caudal variable para obtener el coeficiente de permeabilidad de los acuíferos, inventario de 43 pozos; observaciones de los niveles de agua subterránea en período lluvioso febrero/87 y en período seco julio/87; asimismo observaciones continuas en el pozo de GEOBOL (P-53-Hoja EHG-06) mediante un registrador automático, para el período 25 de febrero y el 31 de julio de 1987; evaluación de la calidad del agua en base a la información disponible y con monitoreos realizados durante el estudio; balance hidrogeológico y simulaciones del acuífero con un modelo matemático para estudiar el comportamiento futuro de la napa en función de la demanda de agua del Proyecto.

La conclusión principal de este estudio es la viabilidad técnica-económica del Proyecto, mediante el cual se extraería del subsuelo una masa diaria de 46.200 m³/día, que corresponde a la máxima demanda proyectada para el año 2.000.

b) **ESTUDIO DEL PROYECTO DE DESARROLLO DE LOS RECURSOS DE AGUAS SUBTERRANEAS EN EL ALTIPLANO**

Este estudio, referente al proyecto de desarrollo de aguas subterráneas en el Altiplano (BOL/68/514) fue efectuado dentro del marco del Programa de las Naciones Unidas para el desarro-

llo (PNUD), entre noviembre 1969 y 30 noviembre 1973. Las instituciones ejecutoras del estudio fueron Naciones Unidas (NNUU) y el Servicio Geológico de Bolivia (GEOBOL).

El área del Proyecto cubrió parte del Altiplano Boliviano, desde el Lago Titicaca hasta la costa sur del Lago Poopó (19°10' de latitud sur), en una extensión de 50.000 Km². Se menciona que en el estudio, no fue posible realizar una evaluación detallada de los recursos de aguas subterráneas en una área tan extensa en un período de 4 años de duración del Proyecto, y que solamente se efectuaron estudios detallados de los recursos en 2 áreas, una consignada como de prioridad I en el norte del Altiplano, ubicada en un radio de 100 Kms a partir de la ciudad de La Paz, comprendiendo las subcuencas de Peñas, Achacachi, Pucarani, Catari y Tiwanacu en una extensión total de 6.900 Km², y el área de prioridad II que incluye la cuenca de Oruro con una extensión de 3.312 Km².

En estos estudios detallados se llevaron a cabo trabajos de mapeo geológico, inventario de pozos, ejecución de 115 pozos exploratorios con una profundidad acumulada de 10.449 metros, con sacatestigos para reconstituir columnas litológicas, perfilajes eléctricos con los cuales se determinaron los espesores y las características de los acuíferos; pruebas de bombeo y de flujo, estudios de resistividad eléctrica, análisis de agua de la mayor parte de los pozos perforados por el Proyecto y también de otras fuentes (manantiales, vertientes y del Lago Titicaca); observaciones hidrometeorológicas y del nivel de agua subterránea; estudios de clasificación de tierras, de isótopos del medio ambiente, experimentos con lisímetros, parcelas experimentales; análisis granulométricos; análisis de suelos, inventario y valorización de los datos existentes.

Los aspectos mas relevantes de este estudio son los siguientes:

- Las áreas favorables para el desarrollo de aguas subterráneas en el norte del Altiplano, han sido definidas en base a informaciones geológicas, hidrológicas y geofísicas disponibles. Las áreas

seleccionadas con estos criterios son las zonas de Achacachi en las inmediaciones de Belén, Peñas entre los ríos Jacha-Jahuira y Keka Jahuira, Pucarani en una franja que se extiende entre Laja y Batallas, Lacaya parte baja de la cuenca del río Catari, Viacha entre Irpa Chica y Viacha zona de Chacoma e Ilata y Tiwanaku, principalmente margen izquierda del río del mismo nombre.

Para estas zonas se han proyectado un total de 77 pozos de explotación con una producción anual de 28.532.124 m³ para irrigar 2.736 Has de cultivos diversos y 1.302 has de pastos.

- El área de Viacha-Irpa Chica, en la cuenca de Pucarani es el área más favorable en el norte del Altiplano, para el desarrollo de recursos de aguas subterráneas. Esta área tiene también extensas tierras irrigables, recomendándose en consecuencia que sea la primera en desarrollarse con proyectos de irrigación.
- La zona más promisorio para el desarrollo de aguas subterráneas, en la parte sur de la subcuenca de Oruro, es el área norte de la ciudad de Oruro, ubicada al norte y oeste del campo de pozos de la misma. Otra área con posibilidades para el desarrollo de aguas subterráneas se encuentra cerca del aeropuerto, al este de la ciudad de Oruro. Se indica que antes de emprender cualquier proyecto, debe evaluarse su impacto en el campo de pozos de la ciudad de Oruro. Con la evaluación detallada se han proyectado 4 pozos de los cuales 3 se encuentran ubicados al norte y 1 al este de la ciudad, con una producción anual total de 2.522.880 m³.
- El desarrollo intensivo de recursos de aguas subterráneas y superficies para irrigación, uso industrial y humano, requiere una definición clara de derecho de agua y la operación efectiva mediante una agencia implicada en la planificación del desarrollo de recursos de agua. Por lo tanto se sugiere la adopción e implementación de los anteproyectos de la Ley General de aguas y de la Ley de Autoridades de Agua.

Proyectos

a) PROYECTO DE DESARROLLO DE AGUAS SUBTERRANEAS EN EL ALTO DPTO. DE LA PAZ

Este proyecto fue ejecutado en los años 1989 y 1990, por la constructora Japonesa Taise y Corporation, en base al estudio del Proyecto de desarrollo de las aguas subterráneas en El Alto, efectuado por la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), en el año 1987.

El proyecto comprendió la perforación de 30 pozos profundos en el Sector de Tilata, ubicado dentro del área de influencia de la Subcuenca del río Seco, entre El Alto y la localidad de Viacha, aproximadamente a 8 Kms del aeropuerto internacional de El Alto.

Los pozos se encuentran ubicados en 2 baterías más o menos transversales a la línea férrea Guaqui-La Paz, con las denominaciones de baterías "Wa y Wb". En cada batería se tiene un total de 15 pozos, distanciados entre sí a 800 metros y con una codificación correlativa del 1 al 15.

Estos pozos tienen profundidades que van desde 59 a 110 metros con rendimientos óptimos de 6 a 20 litros por segundo. Los pozos se encuentran equipados con electrobombas sumergibles, disponiendo además de casetas de protección, infraestructura eléctrica y vial necesaria para la operación y el mantenimiento.

En la actualidad el Servicio Autónomo Municipal de Agua Potable y Alcantarillado (SAMAPA) de la ciudad de La Paz, viene operando este proyecto, a través de una oficina instalada en el sector denominado Tilata-El Alto. Se vienen registrando diariamente datos sobre el funcionamiento de los pozos, incluyendo mediciones de los niveles de agua (niveles estáticos y dinámicos). De este proyecto se recopiló información de los pozos para el período mayo 1990 a mayo 1992.

b) PROYECTO DE DESARROLLO RURAL INGAVI

Este proyecto se desarrolló al este de la provincia de INGAVI, y al sur de la provincia de

LOS ANDES, en una área de 800 Km² (80.000 Has), con la finalidad de elevar el nivel de vida de la población rural, a cambio de un aumento de los ingresos y el suministro de alimentos de base, la mejora de las condiciones sanitarias y asimismo, la utilización efectiva de la asistencia técnica y del crédito.

El programa general del proyecto comprendió en una I fase de inventario de los datos existentes y diagnóstico; la II fase la planificación del desarrollo rural y la III fase, estudios y ejecución de proyectos prioritarios.

Este proyecto en la actualidad no funciona como tal por cuanto fue desactivado y transferido a la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA); por este motivo no fue factible ubicar el estudio del componente irrigación con aguas subterráneas. Solo se obtuvieron algunos documentos y datos aislados de pozos considerados en el proyecto.

El seguimiento que se hizo en la oficina de la UMSA-Viacha y en el área del proyecto ha permitido establecer que las acciones realizadas en materia de aguas subterráneas, se orientaron fundamentalmente a la instalación de bombas manuales en pozos someros con fines de uso doméstico, el equipamiento de algunos pozos perforados por el proyecto NNUU-GEOBOL y la perforación de 3 pozos profundos con fines de investigación hidrogeológica.

Los pozos profundos representativos de este Proyecto fueron inventariados para el presente estudio.

3.2 INSTITUCIONES VISITADAS

En el desarrollo del Estudio, se visitaron instituciones públicas y privadas de Perú y Bolivia con el objetivo de recopilar información, consultar y solicitar apoyo a las tareas del proyecto. A continuación presentamos la lista de las instituciones que nos brinda-ron su apoyo a las cuales expresamos nuestro sincero agradecimiento:

Proyecto Especial Lago Titicaca (PELT) Bolivia	Bolivia
Servicio Geológico de Bolivia (GEOBOL)	Bolivia
Servicio Autónomo de Agua Potable y Alcantarillado (SAMAPA) - La Paz y El Alto.	Bolivia
Servicio Local de Acueductos y Al- cantarillado de la ciudad de Oruro (SELA)	Bolivia
Corporación de Desarrollo del Departamento de La Paz (CORDEPAZ)	Bolivia
Corporación de Desarrollo del Departamento de Oruro (CORDEOR) - Recursos Hídricos	Bolivia
Oficina no Gubernamental CENTRO YUNTA	Bolivia
Misión Alianza Noruega - La Paz	Bolivia
Proyecto PMPR-CEE-CORDEPAZ - Patacamaya	Bolivia
Universidad Mayor de San Andrés	Bolivia
Oficina de Viacha y Granja Choquenaira	
Proyecto Especial Lago Titicaca (PELT) Puno	Perú
Programa Regional de Aguas Subterráneas y Tecnificación de riego (PRASTER) - Puno	Perú
Instituto Geológico Minero Metalúrgico (INGEMMET)	Lima-Perú
Servicio de Agua Potable y Alcantari- llado de la ciudad de Puno (SEDAPUNO)	Perú

GEOLOGIA

El estudio de la hidrogeología del área T.D.P.S. no puede prescindir de una reconstrucción, resumida, de la geología, la cual debe entenderse como la reconstrucción de los diversos eventos que se han sucedido en el tiempo y que han llevado a determinadas líneas evolutivas, como mera definición de las series litológicas.

La reconstrucción geológica adolece de una serie de inexactitudes, debido a las generalizaciones a las que, obligadamente, hay que recurrir en un estudio de esta magnitud (se trata de una historia evolutiva que abarca varios centenares de millones de años, en un área de alrededor de 144.000 Km²).

El estudio geológico se ha efectuado mediante el examen de los mapas geológicos, el análisis de la bibliografía existente y los trabajos efectuados durante las numerosas misiones de campo.

El objetivo del estudio geológico ha tenido doble propósito; por un lado, proporcionar al equipo encargado de la parte geomorfológica una base esquemática de la distribución geográfica de las distintas formaciones aflorantes, y por otra parte, proporcionar al equipo encargado de la hidrogeología los elementos básicos para poder distinguir, en las series examinadas, los terrenos permeables de los impermeables.

En lo que concierne a la hidrogeología, se ha llegado a la conclusión de que los niveles correspondientes al período que va del Paleozoico al Terciario son poco o nada permeables, a excepción de los volcánicos, mientras que los correspondientes a la parte alta del Terciario, del Plioceno y del Cuaternario son extremadamente variables, tanto vertical como horizontalmente.

4.1

EVOLUCION PALEOGEOGRAFICA

El área de estudio, que comprende casi todo el altiplano peruano y boliviano y las cordilleras Oriental y Occidental, ha sido afectada al menos por cuatro ciclos orogenéticos: Precámbrico, Caledónico, Herciniano y Andino.

Sobre la base de los conocimientos de que se dispone, puede pensarse que la orogénesis precámbrica se subdivide al menos en tres o cuatro fases tectónicas.

HIDROGEOLOGIA

Los restos de esta orogénesis antigua se identifican solamente al sur de Perú, Macizo de Arequipa, donde están representados por granulitas y ortogneiss, y en la parte oriental, representados por granitos y gneiss del escudo brasileño.

Sobre este basamento siálico, hacia fines de la orogénesis brasileña, durante el Paleozoico inferior, se forma un surco subsidente, bordeado por el escudo brasileño al norte y por el Macizo de Arequipa al suroeste, con dirección NO-SE, situado entre el lago Titicaca y la vertiente oriental de la Cordillera Oriental, que es el límite de la zona subandina.

El surco se llenará en el Paleozoico inferior, desde el Ordovícico hasta el Devónico superior, de una potente serie psamo-pelítica, que llega a alcanzar un espesor de 10.000-15.000 m. La deposición de esta serie fue interrumpida, y separada en dos ciclos diferentes, por un afloramiento que tiene lugar entre el Ordovícico y el Silúrico (orogénesis caledónica).

Durante el Ordovícico se deposita una serie, de una potencia de más de 7.000 m, que se diferencia por una sedimentación más pelágica hacia la cordillera, con deposición de lutitas, y una sedimentación más detrítica conforme se desplaza hacia el altiplano, con deposición de una serie cuarzosa e intercalación de sutiles estratos lutíticos.

A finales del Ordovícico, un hiato stratigráfico, que comprende el Asghiliano y la base del Llandoveryano, marca una emersión generalizada de toda el área; emersión que puede ser individualizada por una sedimentación marina con elementos glaciares que descansa en "overlap" regional sobre el Ordovícico.

Este tipo de emersión con sedimentación glacial es un fenómeno general, que se encuentra tanto en América del Sur como en todo el continente africano (Sahara, Sierra Leona, Africa del Sur) y en Europa Occidental.

El Silúrico se inicia con una ingresión marina y con la deposición de una serie compleja constituida por alternancias de lutitas y areniscas con frecuentes lentejones dolomíticos, con figuras del tipo "cone en cone", e intercalaciones en la serie de sills y presencia de algunos diques aislados.

Al final del Silúrico, esta serie pasa a una sucesión areno-cuarzosa que marca una tendencia a la emersión

de sectores completos de la zona (fase final de la orogénesis caledónica).

Después de esta tendencia, toda la América del Sur parece haber sido afectada por una transgresión devónica que, en el área, lleva a la deposición de una potente serie compleja constituida por lutitas, que será interrumpida en el Devónico medio por una fase de regresión con deposición de areniscas. Sucesivamente, una nueva transgresión lleva a la sedimentación de alternancias de lutitas y areniscas.

Al final del Devónico, el conjunto en su totalidad fue intensamente plegado por una primera fase de la orogénesis herciniana, llamada "eoherciniana".

El plegamiento eoherciniano, con dirección N 130°, tiene un eje de esquistosidad bien desarrollado, con un metamorfismo general epizonal que no supera la fase de esquistos verdes. A esta fase se asocian intrusiones graníticas sin y postorogenéticas.

La fase eoherciniana ha dado lugar a una importante superficie de erosión que ha afectado al Paleozoico inferior del Altiplano hasta el Siluro-Devónico y, en la Cordillera Oriental, hasta el Ordovícico, y que, además, ha modelado una morfología irregular, discontinua y separada por dorsales y relieves emergentes.

La serie del Paleozoico superior descansa con discordancia angular sobre la serie del Paleozoico inferior. La importancia exacta del hiato estratigráfico no se conoce bien.

A esta fase tectónica sucede un período de pseudo-estabilidad orogénica, a causa de movimientos orogenéticos. Durante el Carbonífero y el Permiano inferior, toda la zona fue afectada por estos movimientos, los cuales, por una parte, han llevado a una tectónica de bloques (horst y graben), a la que puede atribuirse la importante subsidencia del borde suroeste de la Cordillera Oriental; por otra, a un vulcanismo de tipo explosivo, responsable de la presencia de intercalaciones de areniscas verdes. La serie del Paleozoico superior se inicia en el Carbonífero, con la deposición de terrenos que derivan del desmoronamiento de los relieves eohercinianos, seguida por una transgresión marina, con sedimentación de terrenos de tipo nerítico proveniente del oeste, que ha afectado a toda la zona septentrional del Altiplano.

Simultáneamente, una tectónica sucesiva de tipo distensivo, al producir un continuo y progresivo rejuvenecimiento de las estructuras eohercínicas, alimentó con materiales detríticos la cuenca deposicional.

La serie así constituida -areniscas, cuarcitas y pelitas con intercalaciones de diamictitas- forma el pasaje hacia el Carbonífero superior, cuando se produjo una nueva regresión en ambiente glacial; pasaje que está representado por niveles tilíticos en la base y por depósitos continentales, que van de sublitoral y marino a fluvioglacial, con niveles carbonosos.

Sucesivamente, una nueva transgresión marina embiste la zona, afectando un surco estrecho a lo largo del borde suroeste de la Cordillera Oriental, en el que se deposita una potente serie arenácea-lutítica y caliza.

El origen de la presencia de series arenácea-feldespáticas, con pequeños rodados volcánicos de composición que va de riolítica a andesítica, presentes sobre todo en la zona norte del lago, hay que atribuirlo a un vulcanismo ácido y explosivo, cuyo centro de emisión, probablemente occidental, es difícil individualizar.

Este vulcanismo, presente en la zona hasta el Permiano inferior, parece estar relacionado con la tectónica de distensión. A inicios del Permiano inferior, una nueva transgresión recubrió casi toda la zona con sedimentación de tipo nerítico, abundantes depósitos carbonatados y pocos aportes detríticos.

A partir del Permiano medio, en el área se instaura una tectónica de compresión, con emersión y deposición de sedimentos, ricos en sílex, en ambiente marino cada vez menos profundo hasta una sedimentación de tipo arenácea y evaporítico.

Esta fase tectónica, denominada tardo-hercínica, llevó a la creación de una cadena con dirección N-S, que se extendía del Perú a la Patagonia.

Después de esta fase, se inicia un período de relativa calma tectónica.

El reconocimiento de la estructura tardo-hercínica no es fácil, ya que su rumbo y estilo tectónicos son similares, si no iguales, al de las estructuras andinas.

El Permiano superior y el Triás inferior se caracterizan por una tectónica distensiva, con sedimentación de depósitos continentales y magmatismo de tipo efusivo e intrusivo.

La emersión generalizada en el área provoca que los relieves creados por la orogénesis sean desmoronados rápidamente por intensos fenómenos erosivos. La erosión afecta profundamente tanto a los terrenos del Paleozoico superior como a los más antiguos.

Al pie de los relieves o en las depresiones internas, en un ambiente continental sub-acuático, se depositaron sedimentos detríticos de tipo molásico. A estos depósitos se intercalan episodios marinos con deposición de terrenos carbonatados.

La tectónica distensiva postorogénica, que ha contribuido al continuo rejuvenecimiento de los relieves, simultáneamente ha favorecido la instauración de intensos fenómenos volcánicos: grandes coladas de lava y el ascenso de un plutonismo que presenta grandes masas alcalinas y calco-alcalinas.

Esta tectónica, cuya dirección, es más o menos NNO-SSE controla la gran cuenca subsidente de deposición continental correspondiente al Permo-Triás y pondrá las bases de las grandes líneas estructurales que controlarán el conjunto de la evolución mesozoica y, en parte, cenozoica.

Durante el Triásico superior, una nueva transgresión marina marca el fin del ciclo sedimentario hercínico y el principio del dominio andino; a la serie vulcano-detrítica sigue la deposición de series carbonatadas.

Al final del Triás el mar ocupaba una cuenca bastante estrecha, la cual comprendía, en parte, la Cordillera Oriental y el Altiplano. Durante el Liás, este mar se expande hacia el oeste y el este, hasta alcanzar toda la cadena andina, desde la Amazonía hasta el océano Pacífico.

En esta cuenca marina se deposita una espesa serie calcárea y arenácea, algunas veces intercalada con episodios de tipo evaporítico, y con trazas de influencias volcánicas derivadas de una actividad eruptiva localizada en correspondencia con la costa actual del Perú.

Al final del Dogger la deposición de esta serie fue interrumpida por una emersión general del territorio, debida a movimientos epirogenéticos conocidos como "movimientos nevádicos". A esta emersión sigue un período de intensa erosión y deposición de materiales detríticos.

En el Cretácico inferior se inicia un período distensivo y las cuencas, continentales y no continentales, separadas por relieves sometidos a una intensa erosión, comienzan a ser rellenadas por una serie sedimentaria que tiene un espesor de varios miles de metros.

Una de estas cuencas evolucionará en el Altiplano y parte de la Cordillera Oriental.

En esta cuenca (cuenca del Puca), se distinguen muy bien dos depresiones: la primera en la región norte del lago Titicaca y la segunda en la región sur del lago Poopó. La base de las depresiones aparecen rellenas de espesos aportes de areniscas, seguidas por importantes acumulaciones de areniscas y conglomerados de margas, yesos y arcillas.

Una ingresión marina, marcada por un episodio de sedimentación calcárea, está conectada con movimientos epirogenéticos que, en general, se han manifestado por una tendencia a la emersión.

En conclusión, durante este período (Trias superior-Cretácico superior), la notable movilidad del área está dominada por una sucesión de movimientos epirogenéticos verticales, que han dado origen a una serie de ingresiones y regresiones marinas, las cuales, con sus rápidos cambios de facies, han llevado a la deposición de miles de metros de sedimentos arenáceos, conglomerádicos y carbonatados.

Estos movimientos culminan con la primera fase de la orogénesis andina, "fase peruana".

En el área de interés, la fase peruana se encuentra marcada por movimientos verticales, reconocibles sólo por las discordancias del Cretácico terminal sobre los terrenos precedentes.

Consecuencia de esta fase es el levantamiento y la emersión definitiva del dominio andino, con dirección orográfica y estructural N 150-160°, y la deposición de terrenos continentales molásicos y detríticos en

general y el inicio de una nueva actividad volcánica (conglomerados y areniscas intercaladas con brechas y lavas andesíticas).

Al principio del Terciario, la cordillera y el altiplano se ven afectados por un nuevo movimiento distensivo de componente vertical. Importantes fallas profundas dan lugar a la formación de horsts y grabens. Una fosa profunda afecta a toda la zona suroriental del lago Titicaca, desde Tiawanacu hasta el sur de Corocoro. La fosa se ve limitada al oeste por la falla de San Andrés desde San Andrés de Machaca hasta Turco- y al este se ve separada de una zona correspondiente al alto Paleozoico por la falla de Coniri.

En la fosa así formada se acumulan más de 8.000 m de sedimentos laguno-salobres y continentales: areniscas, margas con yesos y areniscas con conglomerados.

Esta sedimentación dura hasta el pasaje Eoceno-Oligoceno, cuando toda la zona se ve afectada por una intensa actividad volcánica y por un nuevo episodio orogenético. Este último, denominado "fase incaica" y reconocido en toda la cadena andina, presenta un estilo y una intensidad diversa de región a región, pero, en general, con deformaciones modestas, que se destacan más por estructuras quebradizas que por estructuras flexibles.

En general, parece existir una discordancia entre terrenos del final del Eoceno y terrenos oligocénicos, en la zona localizada al occidente de la falla de Coniri, la serie parece continua desde un punto de vista estratigráfico.

Durante el Oligoceno, en la zona, ya totalmente emergida, tuvo lugar una agudización de la erosión y, por lo tanto, la deposición de series importantes de moladas intramontanas. Estas series llenaron las grandes depresiones, localmente interrumpidas por horsts alargados en dirección NNO-SSE. En las cercanías de los relieves se deposita el material más grueso: brechas, conglomerados y areniscas, en general discordantes sobre terrenos precedentes. En cambio, hacia el centro de las cuencas, la sedimentación es más fina, de tipo laguno-salobre, con presencia de potentes espesores de areniscas, arcillas y evaporitas.

Durante el Mioceno, después de una nueva fase tectónica de intensidad limitada, acompañada de movimientos verticales, continúa la deposición de series molásicas con arcillas, margas con yesos y areniscas.

La parte occidental del área ha sido afectada por importantes fenómenos volcánicos, que han dado lugar a la deposición de una serie vulcano-sedimentaria, con un espesor de alrededor de 1.000 m, y a una serie ignimbrítica de espesor notable; simultáneamente, tienen lugar efusiones de magma profundo y deposición de grandes intrusiones.

Al final del Mioceno comienza un nuevo movimiento tectónico, con una amplia fase de plegamiento y una recuperación de los movimientos tectónicos iniciados durante la fase incaica. Las series oligocénicas y miocénicas son plegadas, falladas y recubiertas, en discordancia, por una secuencia ignimbrítica y arcillítica de poco espesor.

Localmente, las series terciarias pueden verse afectadas por una nueva fase tectónica de compresión, con plegamientos y fallas.

Después de esta fase intra-Plioceno, la zona sufre un rápido levantamiento, acompañado de un vulcanismo intenso, primero de tipo ignimbrítico y luego efusivo. El Plio-Pleistoceno constituye un período de intensa actividad tectónico-orogénica, con una sucesión de fenómenos distensivos y de compresión, atestiguados por la importancia de los depósitos volcánicos y lacustres.

Desde el Pleistoceno medio hasta hoy la zona ha sido sometida a un levantamiento continuo, durante el cual cuencas lacustres, sucesivamente, levantadas se encajarán las unas en las otras.

4.2 ESQUEMA ESTRATIGRAFICO

Siguiendo el esquema de la evolución geo-estructural del área reportado en el punto anterior, se ha intentado la reconstrucción de una sucesión estratigráfica capaz de representar en el modo más exhaustivo posible la compleja realidad geológica de la zona en estudio.

La sucesión reconstruida se basa en el examen crítico y de síntesis de la bibliografía sobre el sistema T.D.P.S. y, sobre todo, en el análisis de la cartografía geológica oficial de Perú y Bolivia.

La reconstrucción ha encontrado algunas dificultades, vinculadas, por un lado, a la escasez de los datos disponibles (por ejemplo, muy raramente fue posible disponer de datos precisos acerca de la edad de determinadas formaciones o series) y, por otro, a la complejidad de las líneas evolutivas, cuyos contactos terminan por enmascarar las relaciones reales.

Como se ha visto, a grandes rasgos, es posible reconstruir la evolución paleogeográfica del área, pero cuando se entra en el detalle, las cosas se complican notablemente. A menudo, resulta sumamente difícil seguir las líneas evolutivas de una cuenca o subcuenca, o recoger los elementos que explican su separación y diferenciación de la cuenca cercana y, por lo tanto, comprender las razones que han llevado a la deposición de una determinada serie en vez de otra.

A estas dificultades deben añadirse otras de orden interpretativo. Muy a menudo hemos encontrado áreas limítrofes con interpretaciones discordantes de la misma situación geológica. Por ejemplo, un manto de material piroclástico depositado en ambiente fluvio-lacustre ha sido interpretado, en una hoja geológica, como terreno aluvial y, en la hoja siguiente, como formación volcánica.

Del mismo modo, puede suceder que interpretaciones similares de una misma realidad se llamen de manera diferente, es decir, que una misma sucesión estratigráfica sea separada en modo distinto y se atribuya a formaciones diferentes.

Es necesario recordar que, para algunas de las formaciones reportadas en los mapas geológicos, no ha sido posible definir su edad cronológica y que, por lo tanto, en algunos lugares, la reconstrucción podría resultar deficitaria.

Por otra parte, en la breve descripción litológica de la sucesión se reportan solamente los términos más comunes encontrados y, en consecuencia, en cada formación pueden encontrarse diferencias de facies solamente locales que, justamente por este carácter local, no han sido tomadas en consideración.

El examen de las sucesiones estratigráficas peruana y boliviana, indica que las dos áreas han tenido, hasta un cierto momento, una historia evolutiva similar, o igual, para luego evolucionar en manera completamente diferente.

La historia geológica del T.D.P.S. muestra una uniformidad sustancial hasta el Paleozoico superior. Las diferencias entre las series peruana y boliviana son mínimas y pueden atribuirse más a las distintas metodologías que cada autor ha utilizado que a efectivas diferencias litológicas.

El Paleozoico inferior, muy potente, se caracteriza por una monótona sedimentación de lutitas y areniscas. A fines del Devoniano, o durante el Misisipiano basal, el conjunto en su totalidad fue intensamente plegado por la fase eohercínica, además de que soportó un metamorfismo epizonal, acompañado de un plutonismo sin y postorogénico.

Durante el Paleozoico superior se depositaron sedimentos continentales y marinos epicontinentales, que descansan en discordancia angular sobre el Paleozoico inferior.

Desde fines del Paleozoico, con la emersión del área de la Cordillera Oriental, a causa de la fase tardohercínica, se ha asistido a una separación progresiva de dos cuencas distintas; separación que, en el Mesozoico, se evidencia con una sedimentación marina sutil y epicontinental en el área del altiplano y deposición de arcillas, margas, lutitas y areniscas con intercalaciones calcáreas y evaporíticas. En el área peruana se observa la alternancia de una serie de ingresiones y regresiones marinas que, también alternativamente, depositan material detrítico y sedimentos pelágicos.

Durante el Cenozoico esta diferenciación alcanza su grado máximo con la formación de numerosos centros eruptivos, que se alínean a lo largo del borde occidental del área, y la deposición, en zona peruana, de materiales preponderantemente volcánicos (piroclastitas, ignimbritas y lavas), mientras que en el altiplano boliviano se asiste a la instauración de un ambiente deposicional sobre todo de tipo lacustre-lagunar, debido a la deposición de materiales arenosos y arcillosos con numerosos episodios evaporíticos intercalados.

El altiplano boliviano ha sido dividido en una serie de sub-cuencas, alargadas en dirección NNO-SSE, cuya geometría ha sido determinada por la tectónica (por ejemplo las fallas de San Andrés y falla de Coniri). Respecto al complejo juego de los movimientos epirogenéticos, las distintas cuencas en que se dividía el área podía encontrarse, alternativamente, en erosión o en deposición. Algunas veces las cuencas podían unirse y, por lo tanto, en un área muy vasta se podía encontrar uniformidad de deposición.

En conclusión, puede afirmarse que, mientras la parte boliviana del sistema T.D.P.S muestra una elevada variabilidad litológica, en la parte peruana se ha depositado una serie bastante homogénea y localizable, a excepción de pequeñas diferencias locales, tanto al N como al O y SO del lago Titicaca.

Las únicas diferencias encontradas se refieren al extremo límite occidental del área, donde la sucesión estratigráfica muestra la presencia de episodios volcánicos, con depósitos no individualizables en otras zonas.

El listado que sigue ofrece la descripción de las formaciones geológicas (del Paleozoico al Terciario) de Perú y Bolivia, así como las respectivas atribuciones.

Sucesión peruanaORDOVICICO

Formación Calapuja inf : constituida por una potente serie compuesta de areniscas, lutitas, limolitas y lutitas arenosas que contienen potentes intercalaciones de cuarcitas.

SILURIANO

Formación Calapuja sup.: es la base de la transgresión siluro-devoniana y corresponde a una serie compleja con alternancias de areniscas y lutitas. En la serie se intercalan lentes dolomíticos, sills y también está atravesada por diques.

SILURO-DEVONIANO

Grupo Cabanillas : constituido por una serie potente, compuesta de alternancias de lutitas, areniscas, cuarcitas y limolitas. DEVONIANO

Formación Lampa : constituida por limolitas laminadas y areniscas.

CARBONIFERO

Grupo Ambo : compuesto de depósitos detríticos, arcosas y areniscas, a veces conglomerádicas, con intercalaciones de lutitas arenosas.

Grupo Tarma : comprende una secuencia inferior vulcano-detrítica constituida por areniscas feldespáticas, lutitas margosas y raras intercalaciones de calizas, una

superior vulcano-detritica y carbonatada constituida de areniscas, cuarcitas, calizas y margas.

PERMICO

Grupo Copacabana : constituido por calizas negras con intercalaciones de calizas arenosas, areniscas, cuarcitas, lutitas y margas y por una secuencia detritica de areniscas, luti-detritica, brechas y conglomerados.

Grupo Mitu : depósitos continentales detriticos constituidos por intercalaciones de areniscas, limolitas con brechas y conglomerados.

Grupo Iscay : depósitos volcánicos que incluyen coladas, ignimbritas, brechas y cineritas.

TRIASICO

Grupo Pucara : calizas

JURASICO

Grupo Lagunillas : constituido en la base por calizas, además por lutitas que hacia el tope están intercaladas a calizas.

Grupo Yura : compuesto por arcillas, areniscas, lutitas y calizas interestratificadas con intercalaciones de tufos y derrames volcánicos en la parte basal y por areniscas y cuarcitas hacia el tope.

CRETACICO

Form. Sipin : constituida por areniscas cuarzosas conglomerados y calizas.

Form. Angostura : consiste en areniscas cuarcíticas con conglomerados.

- Form. Ayabacas : constituida por calizas con intercalaciones de lutitas.
- Form. Muni : compuesta por lutitas con capas de calizas y areniscas cuarzosas.
- Form. Huancane : constituida por areniscas y cuarcitas en la parte basal; lutitas y calizas en la parte superior.
- Form. Moho : constituida por lutitas y margas con areniscas y calizas, yesos en el tope.
- Form. Cotacucho : compuesta por areniscas cuarzosas y lutitas.
- Form. Vilquechico : consiste en alternancias de lutitas y areniscas cuarzosas.
- Form. Muñani : areniscas
- Form. Huilacollo : derrames lávicos y piroclásticos

Durante el Cretácico medio, en el extremo suroccidental del área, empezó a diferenciarse una zona sujeta a fuerte vulcanismo, con deposición de potentes series piroclásticas y lávicas. En el Terciario medio el área vuelve a asumir un aspecto de relativa uniformidad deposicional.

TERCIARIO

- Grupo Puno : constituido predominantemente por areniscas feldespáticas y conglomerados, además de limolitas, calizas y horizontes de tufo.
- Grupo Tacaza : consiste en bloques de tobas, lavas y flujos de brechas, lapillis e ignimbritas y conglomerados y areniscas.

- Grupo Palca** : compuesto preponderantemente por ignimbritas, además de lavas y conglomerados volcánicos.
- Grupo Sillipaca** : constituido por ignimbritas, lavas, tobas y conglomerados en la base.
- Grupo Maure** : secuencia formada por piroclásticos interestratificaciones de ignimbritas, tobas, lavas andesíticas, basaltos y tobas) y lacustinos (tobas retrabajadas, limolitas, fangolitas, calizas y areniscas).
- Grupo Barroso** : constituido por depósitos piroclásticos y lávicos intercalados con bloques de tobas, tobas e ignimbritas.
- Volcánico Sennca** : constituido esencialmente por tufos lapillíticos y brechoides con lavas, areniscas y conglomerados.
- Form. Capillune** : consiste en intercalaciones de arcillas, limolitas, areniscas, conglomerados y piroclásticos.
- Form. Azangaro** : compuesta de limos laminados, concreciones calcáreas y areniscas calcáreas.

Sucesión boliviana

ORDOVICICO

- Form. Licoma : lutitas
Form. Amutara : cuarcitas

SILURICO

- Form. Cancaniri : sedimentos glaciares marinos (clastos subredondeados en matriz areno-arcillosa).
Form. Huanuni : areniscas y filitas micáceas
Form. Llallagua : areniscas y cuarcitas

SILURO-DEVONIANO

- Form. Uncia : lutitas y pizarras
Form. Catavi : areniscas con intercalaciones de lutitas
Form. Vila-Vila : cuarcitas, areniscas cuarcíticas, areniscas con intercalaciones de lutitas.

DEVONICO

- Form. Belén : cuarcitas y lutitas
Form. Sica-Sica : areniscas con intercalaciones de lutitas, areniscas, cuarcitas, siltitas y lutitas.
Form. Colpacucho : alternancias de lutitas, siltitas y areniscas.
Form. Colquencha : areniscas
Form. Icla : lutitas

CARBONICO

- Form. Cumana : alternancias de areniscas y limolitas, a veces con tillitas y sedimentos glaciares marinos.

Form. Kasa : areniscas interestratificadas con limolitas; carbonosas en el tope.

Ambas formaciones pertenecen al Grupo Ambo.

PERMICO

Form. Copacabana : calizas con intercalaciones de areniscas; hacia el tope areniscas con intercalaciones de calcáreas, siltitas y calizas.

TRIASICO

Form. Campana : lutitas yesíferas diapíricas
Form. Chuquichambi : yesos y margas yesíferas diapíricas.

CRETACICO

Durante el Cretácico, en la zona del altiplano (la cordillera ya ha emergido definitivamente con la orogénesis hercínica), empezaron a separarse algunas áreas, más o menos en dirección NNO-SSE, que luego evolucionaron en modo diferente.

En el área del altiplano boliviano es posible distinguir al menos dos cuencas deposicionales, de las cuales no resultan claras las modalidades de separación que han llevado al depósito de dos series estratigráficas.

Serie oriental

Form. Orinoco : constituida por areniscas con componente calcáreo.

Form. Mulasi : lutitas

Form. Coroma : areniscas

Form. Pahua : compuesta por calizas y lutitas interestratificadas.

Form. Candelaria : lutitas

Form. Tusque : constituida por areniscas y cuarcitas.

Form. Abaroa : lavas interestratificadas con areniscas y conglomerados (formación no pre-terciaria, tal vez marca el pasaje entre el Cretácico y el Terciario).

Serie occidental

Form. Toro-Toro : areniscas

Form. Condo : constituida predominantemente por conglomerados que hacia el tope se hallan intercalados a bancos de arenas.

Form. La Puerta : areniscas

Form. Tarapaya : margas y arcillas con intercalaciones de areniscas

Form. Kosmina : lutitas y areniscas

Form. Miraflores : constituida por calizas alternadas en reducido porcentaje a lutitas y margas.

Form. Aroifilla : compuesta de arcillitas y margas con presencia de yeso y sal.

Form. Chaunaca : constituida en la base por capas delgadas de calizas alternadas a margas y lutitas; hacia el tope lutitas con intercalaciones de margas.

Form. El Molino : consiste en calizas con margas interestratificadas.

Form. Santa Lucia : compuesta por margas, arcillas y areniscas (marca el pasaje Cretácico Terciario).

TERCIARIO

Durante el Terciario, el fenómeno de la separación y diferenciación del área del altiplano en numerosas sub-cuencas deposicionales, orientadas, al parecer a, NNO-SSE, alcanza su punto máximo. Actualmente, el Terciario puede dividirse en, al menos, diez series diferentes. Algunas de estas series tienen términos en común, sobre todo las terminales, mientras que la mayor parte parece haberse depositado en ambientes, más o menos, similares, pero con una evolución diferentes.

Procediendo hacia el este han sido individualizadas las siguientes series:

1

- Form. Berenguela : areniscas
- Form. Mauri : constituida en sucesión por areniscas, lavas con tobas interestratificadas, conglomerados y areniscas tobáceas, lavas, areniscas tobáceas, conglomerados y areniscas tobáceas.
- Form. Cerke : lavas
- Form. Pérez : ignimbritas

2

- Form. Negrillos : lavas alteradas
- Form. Carangas : compuesta por una sucesión de brechas volcánicas mineralizadas, lavas, tobas riolíticas y lavas, tobas andesíticas y basalto oxidado.
- Form. Mauri : consiste en sedimentos tobáceos con intercalaciones de lavas.
- Form. Pérez : ignimbritas que localmente incluyen lentes de un conglomerado basal.

3

Form. Jalluma	: yesos diapíricos
Form. San Andrés	: areniscas
Form. Mauri	: conglomerados y areniscas tobáceas.
Form. Pérez	: ignimbritas

4

Form. Turco/Potoco	: constituida por areniscas y lutitas con intercalaciones de capas tobáceas.
Form. Azurita	: compuesta por conglomerados con clastos de granitos, gneises y pegmatites y areniscas intercaladas.
Form. Huayllapucara	: consiste en areniscas localmente conglomerádicas.
Form. Totorá	: constituida por areniscas y lutitas localmente yesíferas.
Form. Pomata /	: compuesta por conglomerados de piedemonte con clastos volcánicos.
Form. Crucero	: constituida por areniscas conglomerádicas y arcillosas.
Form. Mauri	: constituida por lavas riolíticas, tobas e ignimbritas con sedimentos tobáceos y conglomerados localmente intercalados.
Form. Pérez	: ignimbritas

5

- Form. Canasa : lutitas arenosas
- Form. Huayllamarca : compuesta por areniscas bien consolidadas, localmente conglomerádicas, con lentes cupríferas.
- Form. Crucero : sedimentos tobáceos con lentes conglomerádicos con clastos de cuarcitas y rocas volcánicas.

6

- Form. Chacarilla : lutitas yesíferas
- Form. Huayllamarca : constituida por areniscas bien consolidadas localmente conglomerádicas.
- Form. Totora : compuesta por areniscas y lutitas localmente yesíferas con algunos mantos de tobas.
- Form. Crucero : sedimentos tobáceos con lentes conglomerádicos.
- Form. Umala : constituida por areniscas y arcillas margosas con intercalaciones de tobas y mantos yesíferos.
- Form. Topohoco : conglomerados con clastos sedimentarios e ígneos.

7

- Form. Jalluma : yesos diapíricos
- Form. Pando : constituida por areniscas con intercalaciones de arcillas y lentes de conglomerados, horizonte yesífero con diapirización de flujo
- Form. Ballivián : compuesta por lutitas con intercalaciones de areniscas y mantos yesíferos.

Form. Comanche	: yesos y arcillas yesíferas
Form. Coniri	: constituida por conglomerados con clastos sedimentarios y areniscas intercaladas.
Form. Kollu-Kollu	: alternancias de areniscas y lutitas.
Form. Pisaqueri	: constituida por arcillas y areniscas con lentes conglomerádicas; en la base un banco tobáceo y otro ferroso.
Form. Caquiaviri	: compuesta por areniscas conglomerádicas con algunos bancos de tobas.
Form. Totora	: constituida por areniscas y lutitas localmente yesíferas con bancos tobáceos.
Form. Umala	: constituida por arcillas margosas y arenitas con intercalaciones de tobas.
Form. Topohoco	: consiste en conglomerados con clastos sedimentarios e ígneos.
8	
Form. Aranjuez	: compuesta por conglomerados y areniscas.
Form. Tiahuanacu	: constituida por areniscas y arcillitas con lentes conglomerádicos; en la base intercalaciones de lutitas.
Form. Coniri	: constituida por conglomerados con clastos sedimentarios y areniscas intercaladas.
Form. Kollu-Kollu	: alternancias de areniscas y lutitas con tobas intercaladas.

Form. Taraco : compuesta por conglomerados con clastos de rocas sedimentarias e ígneas.

Form. Umala : constituida por arcillas margosas y arenitas con intercalaciones de tobas.

9

Form. Luribay : alternancias de areniscas y conglomerados.

Form. Salla : constituida por areniscas arcillosas localmente yesíferas y bancos tobáceos.

Form. Umala : compuesta por areniscas y tobas con intercalaciones de cenizas volcánicas y conglomerados.

10

Form. Coca : lutitas yesíferas diapíricas

Form. Chamarra : constituida por areniscas y conglomeradas poco consolidadas

Form. Potoco : alternancias de lutitas y areniscas

Form. Tambillo : constituida por lavas, areniscas y lutitas

Form. Los Frailes : alternancias de lavas, e ignimbritas

Form. Quehua : alternancia de areniscas y lutitas

4.4 EVOLUCION GEOLOGICA EN EL CUATERNARIO

La historia del Cuaternario se correlaciona con la evolución hidrográfica del Altiplano y también se puede utilizar para explicar fenómenos morfológicos importantes de la cuenca.

Los estudios realizados por Servant y Fontes (1978), sobre la alternancia de períodos húmedos y secos, glaciares y cálidos, muestran que esta alternancia ha determinado en la cuenca endorreica del Altiplano el desarrollo de lagos más o menos amplios que, en algunos casos, ocupan casi toda la superficie de la cuenca. En períodos secos los lagos se redujeron a cuencas cerradas mucho más pequeñas que los lagos actuales.

A estas diferentes situaciones hidrológicas corresponden diferentes depósitos que van de morrenas glaciares, al borde de las cordilleras, a sedimentos fluviales en la parte media, entre el piedemonte y la planicie, hasta sedimentos evaporíticos en la parte central que es la más lejana de las cordilleras.

Los estudios de Servant y Fontes y de Berggren y Lavenue, nos permiten apuntar algunas consideraciones de gran interés para la reconstrucción de la hidrogeología de la cuenca.

En base a los datos proporcionados por los arqueólogos y los geólogos, del Cuaternario, (Fig. 4.1 y 4.2), se sabe que, desde el Plioceno hasta el Pleistoceno superior, se sucedieron varias fases glaciares que, según los autores, determinaron una progresiva reducción de la superficie lacustre, que al comienzo del Pleistoceno, se nivelaba alrededor de 400 metros por encima del nivel actual, con un área de más de 50.000 Km² contra los aproximadamente 8.000 actuales.

Los lagos más antiguos del Cuaternario (Mataro y Cabana) constituían un solo espejo de agua que ocupaba todo el altiplano el cual, evidentemente, ya estaba cerrado con morfología endorreica. Más tarde el lago Ballivián, al norte, y el lago Escara, al sur, coevos, no comunicaban y estaban separados por el paso de Ulloma-Callapa. Es en la época del lago Minchín que se realiza la captura y toda el agua del altiplano comienza a tributar al sur, hacia los salares de Coipasa y de las otras depresiones del sur.

Con el ulterior descenso del nivel del agua (lago Tauca) el paso de Ulloma podría haber retomado su función de divisoria y podría haberse abierto con un ulterior descenso del nivel del Titicaca, cuando se concreta la divisoria Aguallamaya y, quizás, el río Mauri abre el paso de Ulloma.

Evidentemente en las figuras la representación resulta ser muy esquematizada y no se toman en cuenta las fluctuaciones negativas menores del nivel (cotas más bajas que la actual), que se verificaron después de las grandes glaciaciones del Pleistoceno inferior. Probablemente los geólogos no hayan podido observar directamente los más bajos niveles porque la única manera era medir el espesor de los aluviones.

Para el Oloceno (Fig. 4.3), sobre la base de las informaciones arqueológicas y los datos de espesor de aluviones que hemos recopilado, se puede constatar un notable descenso del nivel del lago Titicaca que evidentemente en los últimos 10.000 años ha fluctuado de manera considerable entorno al nivel actual.

Conforme variaba el clima, variaban los lagos en cuanto a nivel, número y superficie. El nivel actual del Titicaca y de los otros lagos (Poopó, Uru Uru y Coipasa) puede ser todavía un nivel inestable, con tendencia, posiblemente, a cambiar aún mas. El nivel actual de ≈ 3808 era más alto en algunos metros hace 500 años. La historia de las terrazas fluviales y lacustres nos indica las variaciones positivas del nivel en los últimos 8.000 años; la arqueología y el estudio sedimentológico de los aluviones que se encuentran en las perforaciones a cota más baja que la del lago, nos proporcionan información acerca de los descensos en los últimos 2.000 - 3.000 años.

Prescindiendo de los eventos más llamativos (200-400 metros por encima y 60 metros por debajo del nivel actual), es interesante subrayar que una variación de pocos metros influye directamente en el régimen del Desaguadero o en la posibilidad de riego de la zona más cercanas al lago.

Durante los períodos de descenso el clima era seco y el Desaguadero no llevaba agua afuera de la cuenca endorreica del Titicaca. Su divisoria, entre el mismo Titicaca y las cuencas del sur, se encontraba en una zona cercana a Aguaymalla; los ríos que tributaban al Titicaca tenían los lechos erosionados en forma de canales que entraban en el lago y seguían, como tales, por centenares de metros en las orillas y en el mismo lago actual.

Estos canales todavía se encuentran en el fondo del lago a una profundidad máxima de 10-20 metros.

Según datos arqueológicos, en el año 0 de la época actual, el Lago tenía todavía un nivel de 10 metros más bajo que el actual. Con 10 metros menos el Desaguadero vertía en el lago.

Según datos más recientes (P. Mourguiart 1992), en base a los resultados de perforaciones hechas en el lago menor del Titicaca, en los últimos 7000 años el nivel del agua ha fluctuado 20 metros aproximadamente.

Como consecuencia hidrogeológica, todas las napas alrededor del lago, hasta la divisoria cerca de Aguaymalla, tenían flujos hacia el lago Titicaca; al sur de Aguaymalla los flujos se dirigían hacia el Desaguadero y los lago meridionales.

Esta reconstrucción nos permite explicar la presencia de los canales que se encuentran al borde del lago, en frente de la desembocadura actual de los ríos; se entiende además por que en la zona de Aguallamaya se crea continuamente en el lecho del río una zona de barrera de lodo y arena, justo en correspondencia con el lugar donde se encuentra un cambio de pendiente que coincide aproximadamente con la antigua divisoria.

La erosión natural todavía no termina y, como lo demuestra el perfil topográfico a lo largo del río, en la zona sigue presente un tope que corresponde precisamente a la antigua divisoria; el río intenta ganar poco a poco su perfil de equilibrio natural con escorrentía hacia el sur.

Siempre sobre la base de datos arqueológicos, alrededor del 1.500 d.J.C., el lago tenía un nivel de algunos metros más alto que el actual. Probablemente este excedente de nivel permitía el cultivo con el sistema de los camellones (campos elevados) y el aprovechamiento del agua por medio de canales de los cuales se encuentran vestígios.

Las fluctuaciones del nivel de los lagos ha determinado fases de depósitos y fases de erosión muy acentuadas.

En la parte peruana abajo de un relleno de limos, arenas y gravas, se encuentra una formación arcillosa lacustre que representa el lecho de las circulaciones hídricas en el cuaternario. En esta formación arcillosa se han detectado paleocauces colmatados de material aluvial con cotas mínimas de 3.750 (30 m. más bajos del nivel actual del lago).

Cuadro 4.1: MANIFESTACIONES TERMALES

NOMBRE	ALTURA msnm	DEPAR- TAMENTO	TEMP (°C)	CAUDAL L/S
MINA MATILDE	4020	La Paz	52	2 a 4
AGUAS CA- LIENTES DE HUANUNI	3920	Oruro	41	2
OBRAJES	3850	Oruro	75	6
CAPACHOS	3820	Oruro	51	4
POOPO	3800	Oruro	73	20
URMIRI DE PAZÑA	3830	Oruro	47	4
PAZÑA	3750	Oruro	50	2
CHALLAPATA	3770	Oruro	60	1
RIO PARIA (ORCKORANI)	3900	Oruro	55	2

En la parte boliviana este nivel de arcilla no parece presente, lo que se podría explicar con una tectónica cuaternaria reciente que ha tenido parte de la cuenca a una cota más alta que no permitiría la deposición de los depósitos lacustre.

4.5

GEOTERMIA

A través de las investigaciones de carácter hidrogeológico, desarrolladas en la cuenca hidrográfica del Altiplano Boliviano - Peruano, se ha podido constatar la existencia de numerosas manifestaciones hidrotermales, localizadas preponderantemente a lo largo de la margen oriental de la cuenca, en la base de la Cordillera Oriental. En la Cordillera Occidental, a pesar de una intensa actividad volcánica reciente, las manifestaciones termale son raras y están ubicadas a cota muy alta, en correspondencia con la cabecera del río Lauca, tributario del lago Coipasa.

Las emergencias más importantes encontradas en el borde oriental de la cuenca, en el contacto entre las formaciones del relleno cuaternario y los primeros afloramientos del paleozoico, son presentados en el Cuadro 4.1.

El caudal promedio es del orden de algunos litros por segundo por cada emergencia; la temperatura de las manifestaciones varía entre 40 y 70 grados C. (Cuadro 4.1)

Sin entrar en la problemática geológica de la geotermia es posible afirmar que una fuente de calor natural está conectada con dos elementos: un cuerpo caliente profundo en vía de enfriamiento, generador de calor, y un sistema de circulación hídrica que transfiere el calor con movimientos convectivos de la profundidad a la superficie.

Cuando estas dos condiciones se verifican, existe la posibilidad de una utilización del calor geotérmico para producir energía o para usarlo directamente como fuente de calefacción.

Las manifestaciones termale en el área deben haber sido mucho más abundantes y frecuentes en el Oloceno, como indican los numerosos afloramientos de "travertino" (caliza química de origen hidrotermal), presentes alrededor del Coipasa y, en general, en el sur del altiplano. Puede ser que la fuente de calor profunda siga presente y que, en cambio, esté ausente el ciclo hidrológico que permite la circulación del

calor. En este caso, perforaciones localizadas con una prospección geotérmica podrían permitir un desarrollo de campos geotérmicos a baja entalpía.

Es conocido que los flujos geotérmicos pueden ser utilizados de diferente manera en razón de la temperatura, el caudal, las características químicas del agua y, en fin, las características socio-económicas del contexto territorial.

Hasta ahora, a excepción del yacimiento situado al sur del Coipasa, donde está desarrollándose una actividad explorativa con perforaciones, las temperaturas de las aguas son bajas y pueden ser utilizadas solamente para fines que prevean una baja entalpía.

En Europa, Japón, China, Australia y en los Estados Unidos la baja entalpía se utiliza en la calefacción de invernaderos.

Naturalmente las cantidades de fluidos necesarias varían y son proporcionales al empleo que se les quiera dar, pero también caudales limitados y temperaturas no demasiado elevadas pueden ser utilizadas.

Un litro por segundo de agua caliente puede proporcionar 1 Kilocaloría por segundo por cada grado que baje la temperatura del fluido mismo. Para un invernadero, en las condiciones climáticas del altiplano boliviano, se necesitan alrededor de 300 Kcal/h por cada metro cuadrado de superficie de invernadero.

Por lo tanto, con los caudales que emergen naturalmente y las temperaturas respectivas, se puede estimar que es posible calentar invernaderos de tamaño reducido.

Con un caudal de 1 l/s y temperatura de 45°C, y pérdida supuesta de 15 grados, se producen alrededor de 54.000 Kilocalorías/h, suficientes para calentar un invernadero de 180 m². El diseño final y el costo de un invernadero tipo con utilización de agua termal puede ser el objetivo de un proyecto específico.

Además en la previsión de utilizar el agua termal, es necesario resolver problemas de incrustación y de presencia de gases nocivos para los vegetales.

FIG. 4.1 ESQUEMAS DE PERIODOS GLACIALES Y NIVELES DEL LAGO EN EL PLEISTOCENO - PLIOCENO

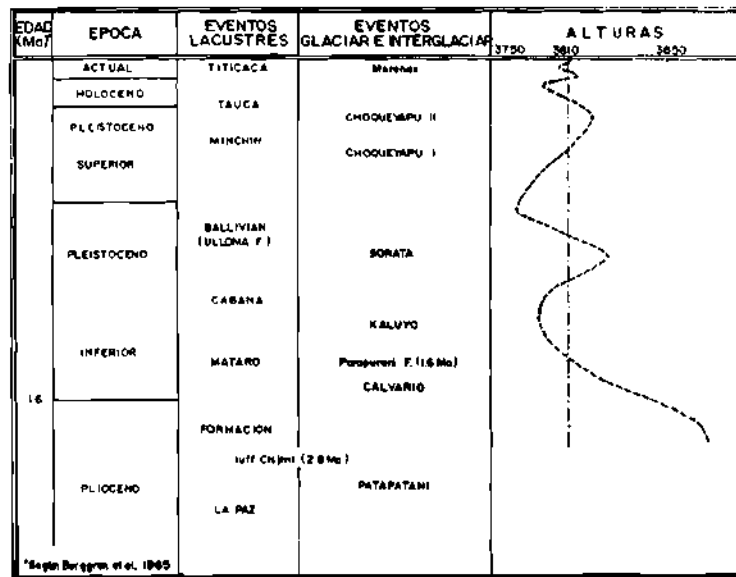


FIG. 4.2 ESQUEMA DE LOS DIFERENTES NIVELES LACUSTRES EN EL NORTE DEL ALTIPLANO (según LAVENU et al., 1984)

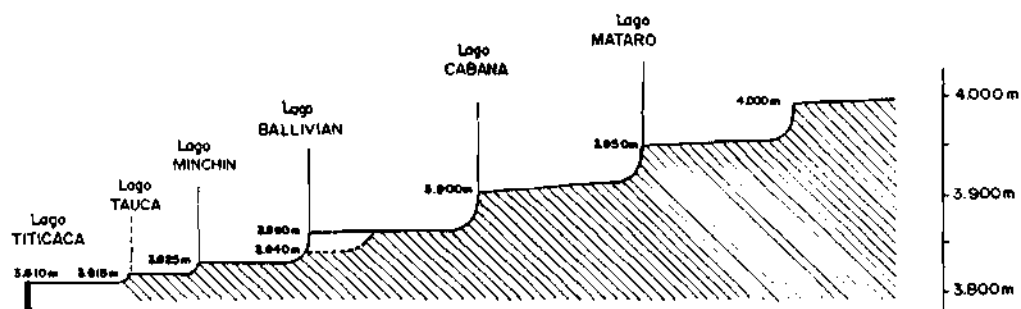
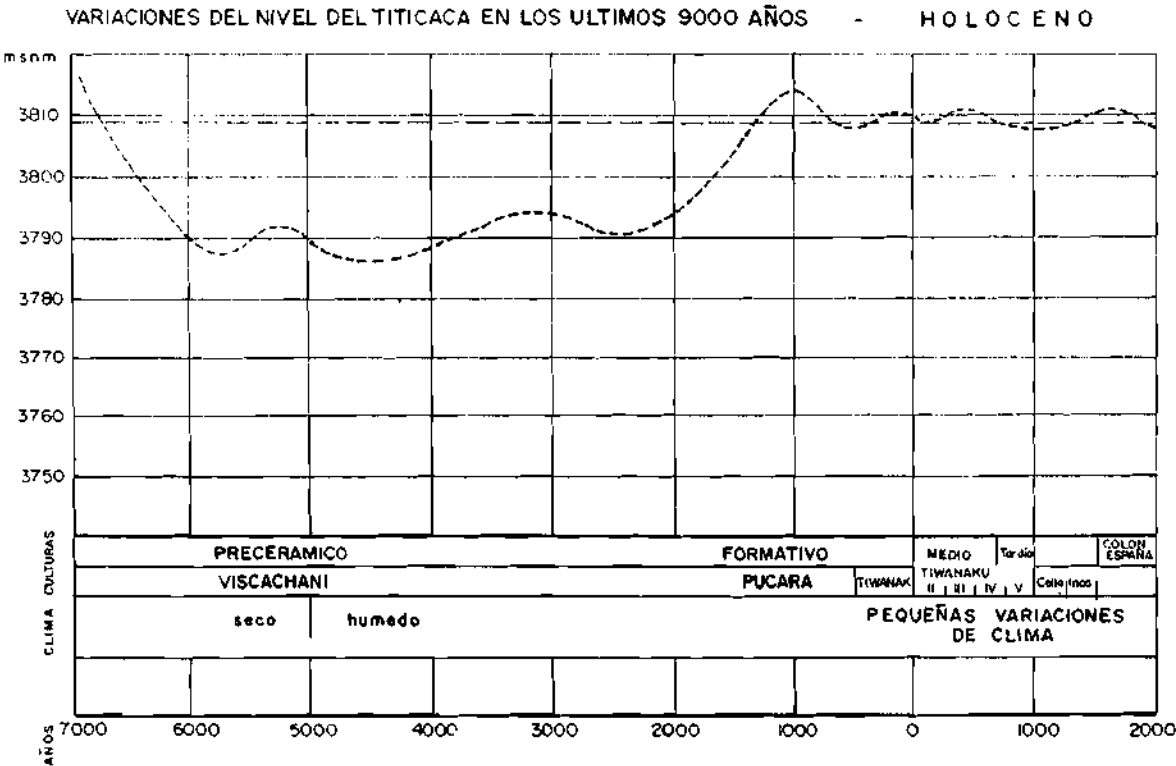


FIG.43 ESQUEMA DE LAS VARIACIONES DE NIVEL DEL LAGO EN EL HOLOCENO SEGUN VARIOS AUTORES



Como puede deducirse es difícil pensar en grandes proyectos de desarrollo; pero sin embargo se puede pensar en la realización de proyectos piloto como estímulo a la utilización de una fuente de calor prácticamente desconocida a fines de producción agrícola. Hipotetizando un empleo de la mitad del caudal termal global de los manantiales inventariados se podrían realizar 3.600 m² de invernaderos.

Un proyecto piloto que busque y utilice nuevas fuentes de calor (caudal más temperatura) podría constituir un elemento de esperanza para un mejor desarrollo de la región.

Las áreas investigadas están comprendidas en 12 hojas a escala 1:250.000.

El estudio hidrogeológico ha llegado a reconstruir, en todas las zonas más importantes de la cuenca, las características generales de los acuíferos principales.

En general se puede afirmar que los terrenos precuaternarios son poco o nada permeables y revisten un interés local por la presencia, no demasiado difundida, de manantiales de altura conectados con circulaciones hídricas localizadas y colgadas. Exclusivamente los terrenos volcánicos presentan una modesta porosidad y permeabilidad superficial más acentuada en las zonas de alteración. En estos casos se pueden formar napas colgadas en cotas altas que podrían ser explotadas antes que el agua regrese a la red hidrográfica.

Los únicos verdaderos acuíferos, son representados por las formaciones fluvio-glaciares del cuaternario que con origen en las zonas pedemontanas, se desarrollan en casi todos los valles que de las cordilleras bajan al sistema T.D.P.S.

En total se individualizaron 18 zonas hidrogeológicas de interés particular. Todas presentan características similares y el menor o mayor interés es función de los parámetros de evaluación que, son muy variables:

- Tamaño de la cuenca aguas arriba del valle
- Superficie de los valles
- Posibilidad e importancia de recarga
- Clima
- Espesor del paquete acuífero
- Transmisibilidad del material

Todos estos parámetros varían zona por zona y en la misma zona. En base a características comunes se pueden distinguir 4 diferentes áreas, dentro las cuales se comprenden las 18 zonas examinadas.

- a) Los valles alrededor del Titicaca en Perú muestran paquetes de material aluvial que descansan, con espesores más o menos grandes (máximo 60 - 80 metros) sobre una formación

arcillosa lacustre. Es un relleno cuaternario de una morfología antigua desarrollada sobre un sedimento lacustre cuaternario arcillosos erosionado. Los paleocauces representan los elementos más interesantes para una búsqueda de agua. La recarga es importante y se realiza a lo largo de la Cordillera con la contribución determinante de la escorrentía superficial. En zonas de estrechamientos geomorfológicos y cerca del lago se manifiestan importantes pérdidas por evaporación.

- b) Areas comprendidas entre la Cordillera real y el Titicaca de Bolivia.

En estas áreas la cordillera sigue siendo la fuente de recarga pero el paquete de Cuaternario, que sigue siendo prácticamente el único acuífero, tiene un espesor mucho más potente, no se encuentra al nivel arcilloso lacustre de base y los acuíferos son, generalmente, lentejones de grava y arena con distribución espacial variable. Las napas más importantes son confinadas o semiconfinadas.

- c) Valles que confluyen en el Desaguadero desde el Puente Internacional hasta la Joya.

Todos los ríos que desembocan al Desaguadero han formado "deltas" o planicies con superficies y espesores muy distintos de material aluvial más o menos permeables. En el tramo central del Desaguadero desde Aguallamaya aproximadamente hasta el Puente Japonés, el espesor del cuaternario es muy reducido porque toda la zona fue un alto morfológico hasta hace 3.500 años. Las napas del Cuaternario que se encuentran en este tramo tienen escaso interés.

El tramo, al norte de la zona precedente, al contrario está en contacto hidráulico con un paquete de material aluvial importante debido a la estructura morfológica antigua (descenso del nivel del Titicaca por el norte y fosas lacustres por el Sur).

En correspondencia de este tramo la circulación hídrica subterránea, en forma general, es muy importante y talvez de manera particular más relevante en la subcuenca del Río Jacha Mauri.

d) Area de Oruro

En el valle al norte de Oruro se encuentra un paquete de cuaternario importante (80 m. aproximadamente) con acuíferos sobrepuestos.

La recarga es como en otros casos en el borde de la cordillera y el flujo es hacia el sistema hídrico superficial.

Desde un punto de vista cualitativo el agua es siempre más salada desde el norte hacia el sur.

La salinidad es debida a la progresiva evaporación, al déficit pluviométrico (norte lluvioso-sur seco) y, en fin, a las rocas del Terciario y del Cuaternario que contienen, sobre todo en la parte central de la cuenca, grandes cantidades de sales y yeso.

5.1. INVESTIGACIONES REALIZADAS

5.1.1. Inventario de fuentes de agua subterranea

Esta fase de trabajo comprendió una primera etapa de revisión, análisis y clasificación de la información disponible en los Estudios, Proyectos y Programas sobre aprovechamiento de las aguas subterráneas; con el objetivo de identificar y ubicar en cartas a escala 1/250.000, las fuentes más representativas. En el mismo tiempo se recolectaron todas las informaciones de caracter geológico, mapas e informes para identificar, en primera instancia, los problemas técnicos más importantes.

En una segunda etapa de trabajo se llevaron a cabo diversas misiones de campo, con el propósito de inventariar fuentes de agua en aquellas zonas donde no se disponía de información o donde se requería complementar y actualizar información de fuentes inventariadas para el estudio. Se visitaron directamente alrededor de 600 puntos de agua; en cada uno de los cuales se midió el nivel freático y se determinó aproximadamente la cota sobre la base de la cartografía existente y con la utilización de un altímetro.

La metodología utilizada para la ubicación y codificación de cada fuente, consistió en asignar números correlativos en las cartas a escala 1/250.000, siguiendo una secuencia de Oeste a Este y de Norte hacia el Sur, en la medida de lo posible, con el

objeto de encontrar fácilmente en dichas cartas las fuentes inventariadas. En las hojas que incluyen sectores de Perú y Bolivia, se asignaron números diferentes para los dos países.

La simbología utilizada para identificar a las fuentes de agua inventariadas se aprecia en las leyendas de los mapas hidrogeológicos a escala 1/250.000.

En el Anexo 1 se aprecia el listado, hoja por hoja, de las fuentes de aguas subterráneas inventariadas.

En el cuadro siguiente se muestra en resumen el número de fuentes de agua inventariadas en cada una de las cartas a escala 1/250.000. Los números de las hojas fueron establecidos por el Consorcio.

**Resumen del Inventario de Fuentes de
aguas subterráneas en el área del
Proyecto TDPS**

Hoja Nº (Escala 1/250.000)	Total de Fuentes	Perforaciones (Pe)	Pozos Someros (Po)	Manantiales (Ma)	Manifestaciones Termales
01	03	03	----	----	----
02	----	----	----	----	----
03	180	94	85	01	----
04	73	38	33	02	----
05	97	16	58	23	----
06	356	119	185	51	01
07	07	01	04	02	----
08	----	----	----	----	----
09	50	08	41	01	----
10	51	41	05	02	03
11	----	----	----	----	----
12	05	04	----	01	----
TOTAL	822	324	411	83	04

Se puede apreciar que se han inventariado un total de 822 fuentes de aguas subterráneas de las cuales 324 corresponden a perforaciones o pozos tubulares (39,4%), 411 a pozos someros a tajo abierto (50%), 83 manantiales (10,1%) y 4 manifestaciones termales (0,5%). Se ha tratado de buscar el mayor número posible de perforaciones profundas, tanto en el Sector Peruano como en el Boliviano, con la finalidad de tener un soporte de información consistente, para la evaluación de los acuíferos profundos.

En las perforaciones inventariadas se distinguen 2 tipos según su aplicación: las perforaciones exploratorias con fines de estudios, y los pozos definitivos de explotación para usos diversos.

Las perforaciones exploratorias se caracterizan por tener profundidades que varían entre 12 y 201 metros, entubamientos definitivos de acero con diámetros de 100 a 250 mm, filtros mayormente ranurados, de 100 a 200 mm de diámetro, con longitudes variables entre 2 y 40 m aproximadamente y además empaques de grava.

Principalmente en el sector boliviano existen perforaciones surgentes, por estar emplazados en acuíferos bajo presión. En la actualidad en algunos pozos se aprecian surgencias naturales con alturas piezométricas mayores de 2,60 metros sobre la superficie del suelo.

Las perforaciones definitivas presentan características variadas según su tipo de uso, existiendo además diferencias de factores constructivos entre los sectores de Perú y de Bolivia.

En el sector altiplánico de Puno-Perú las perforaciones con fines de irrigación, tienen profundidades que varían entre 30 y 112 metros, con entubamientos de acero común mayormente de una sola sección, con diámetros de 377 - 381 mm y espesores de 4,7 a 6,35 mm. Disponen de filtros pre-fabricados del tipo trapezoidal en mayor escala, con aberturas de 1 y 2 mm. y longitudes variables dependiendo de los espesores de los acuíferos aprovechables; disponen de empaques de grava seleccionada de 3 a 6 mm de diámetro. Los rendimientos óptimos de los pozos varían entre 3,6 y 100 litros dependiendo de sus localizaciones específicas dentro del contexto hidrogeológico de cada cuenca.

Los pozos de abastecimiento de agua potable y de uso industrial, alcanzan profundidades de 60 a 70 metros, con diámetros de 381 mm, filtros ranurados de tipo trapezoidal con rendimientos de 10 a 75 litros por segundo.

Las perforaciones con fines de uso doméstico-pecuario alcanzan una profundidad máxima de 83 metros, con entubamientos de acero de 140 mm x 5 mm, filtros tipo Johnson 304 de acero inoxidable con diámetro interior de 88,9 mm, abertura de 0,25 mm. El rendimiento máximo de estos pozos es de 5.5 litros por segundo.

En el sector boliviano, los pozos de explotación alcanzan profundidades máximas de 111 metros, mayormente en el Altiplano Norte con entubamientos de PVC, diámetros de 4 a 8 pulgadas y rendimientos de 2

a 13 litros por segundo; en el sector de Oruro los entubamientos son de acero con diámetros de 10 a 12 pulgadas, filtros prefabricados y con rendimientos máximos de 75 litros por segundo.

De la totalidad de pozos tubulares inventariados, los que se encuentran funcionando con regímenes de bombeos intensivos, son de uso doméstico-poblacional e industrial del sector boliviano, mientras que en el sector peruano, la explotación del agua subterránea con este tipo de captación, no es muy importante en la actualidad, por cuanto el mayor número de pozos existentes con fines de riego, se encuentran inactivos, debido a que el 80% aproximadamente de los mismos no disponen de equipos de bombeo y los que se encuentran equipados (20%), se usan eventualmente.

Los pozos someros a tajo abierto atraviesan los primeros metros de los acuíferos superficiales con profundidades no mayores a 10 metros, con diámetros de 1,0 a 2,0 metros, revestidos con anillos de concreto y/o mampostería de piedra. En su gran mayoría estos pozos se utilizan para consumo doméstico-comunal, extrayéndose el agua subterránea manualmente y/o con bombas manuales.

Las oficinas no gubernamentales (ONG) han perforado pozos de diámetro pequeño en sectores localizados del altiplano peruano y boliviano. Se disponen de escasos datos relacionados con los acuíferos. Se encuentran equipados con bombas manuales para consumo doméstico-comunal. Algunos de estos pozos se han incluido en el presente estudio.

Los manantiales inventariados generalmente se encuentran ubicados en partes altas de las colinas y montañas; originándose mayormente por las condiciones geológicas-estructurales y estatigráficas que determinan napas discontinuas colgadas.

5.1.2. Red de control de acuíferos

Para obtener datos sobre niveles de agua, conductividad eléctrica y temperatura se ha establecido una Red de control de acuíferos a través de la cual se efectuaron mediciones periódicas, a partir del mes de marzo de 1992, con una frecuencia de 1 vez cada 2 meses aproximadamente.

Para el establecimiento de la Red definitiva de control de acuíferos del Proyecto TDPS, se estableció en primer término en gabinete, una Red preliminar, tomando como base la información del inventario de fuentes de aguas subterráneas y posteriormente en el terreno se eligieron las fuentes de control con carácter definitivo, siguiendo los siguientes criterios:

- a) Identificación en el terreno de las fuentes de agua seleccionada en gabinete.
- b) Evaluación del estado de las fuentes en relación al objetivo de los trabajos a desarrollarse.
- c) Elección definitiva de la fuente de control, o en su defecto su reemplazo por razones técnicas o de accesibilidad.
- d) Obtención de datos básicos de la fuente para elaborar su ficha correspondiente.
- e) Ubicación de la fuente de control en cartas a escala conveniente para su rápida identificación en el terreno.

Con los trabajos de campo se seleccionaron en el mes de marzo de 1992, un total de 126 puntos de observación para la Red definitiva, de los cuales 62 correspondieron a la parte boliviana y 64 a la parte peruana. Posteriormente durante la segunda campaña de controles de acuíferos del mes de mayo de 1992, la red fue complementada con 6 puntos adicionales, de los cuales 4 correspondieron al sector de Bolivia y 2 al sector del Perú.

En principio uno de los criterios técnicos principales, para la elección definitiva de la fuente de control del nivel de agua, era su estado de uso, en lo posible no utilizado; pero sin embargo en algunos sectores de interés esta situación no ocurría, por lo que fue necesario escoger fuentes utilizadas intermitente-mente, lo cual obligó a tomar precauciones en cada campaña de control para efectuar las mediciones correspondientes.

En lo que se refiere a los pozos someros a tajo abierto, el criterio determinístico fue su profundidad, con el fin de que se garantizaran los controles periódicos sobre todo en los períodos de marcada sequía. En cambio en las perforaciones profundas las limitaciones de acceso para las

mediciones fueron superadas en algunas zonas, como en la cuenca del Lago Poopó-Coipasa, en donde el Servicio Local de Acueductos y Alcantarillado de la ciudad de Oruro (SELA) apoyó con personal y equipos, para abrir y sellar los pozos de control en las campañas realizadas.

Consecuentemente la Red definitiva de control, quedó constituida por 132 fuentes de aguas subterráneas, (Anexo 2); de las cuales 66 en Perú (34 pozos someros y 32 perforaciones) y un número igual (66) en Bolivia (40 pozos someros, 23 perforaciones y 3 manantiales).

En la Fig. 5.1 se aprecian las ubicaciones de las áreas de la Red de control y en el Anexo 2 las 132 fichas de las fuentes de control que incluyen sus características generales y ubicaciones detalladas.

Para obtener datos exactos sobre el flujo de las napas hacia elementos del Sistema TDPS en algunas áreas de control de acuíferos, donde existen fuentes de agua ubicadas en líneas y en direcciones más o menos perpendiculares a los niveles de base de los flujos de aguas subterráneas, se efectuaron nivelaciones topográficas en 5 secciones de pozos de control. A continuación se indican las secciones niveladas que comprenden un total de 16 pozos:

ALTO DESAGUADERO

Sección : Río Desaguadero P-6, P-7 y P-8
Ubicación : Margen izquierda del río Desaguadero, aproximadamente a 7,2 Kms del puente Internacional (Fig. 5.5)

RIO COATA

Sección : P-86, P-88, P-91 y LAGO TITICACA
Ubicación : Zona circunlacustre, margen derecha del río Coata (Fig. 5.2)

AZIRUNI - PUNO

Sección : P-116, P-114, P-112 y LAGO TITICACA
Ubicación : Aziruni - Puno (FIG. 5.3)

RIO ILAVE

Sección : P-17, P-15, P-10, P-11 y LAGO TITICACA
Ubicación : Zona circunlacustre, margen izquierda del río Ilave (Fig. 5.4)
Sección : P-27, P-24, P-23 y LAGO TITICACA
Ubicación : Zona circunlacustre, margen derecha del río Ilave (Fig. 5.4)

5.1.2.1 Evolución de los elementos bajo control

Con la finalidad de evaluar la evolución de los elementos bajo control se han elaborado gráficos de variación de los niveles de agua en reposo con respecto al suelo (NE/Suelo) y de la Conductividad eléctrica del agua (CE), en función del tiempo, en forma puntual y por sectores hidrogeológicos. (Anexo 3)

Los resultados gráficos nos muestran lo siguiente.

Los niveles del agua en reposo han seguido una tendencia predominante de descenso en el período de control. En forma localizada y para ciertos períodos se han evidenciado picos de ascensos del nivel del agua ya sea por recargas localizadas, o por la desactivación de pozos de bombeo próximos a las fuentes de control. Las magnitudes de los descensos, fueron mayores en el sector de Bolivia que en Perú. En Bolivia se registraron descensos hasta 6,2 metros (Batería pozos SAMAPA El Alto/Bolivia) y en Perú hasta 2,4 metros (pozo sin uso). Cabe resaltar que el valor más alto de Bolivia corresponde a un pozo de control ubicado en el campo de pozos de explotación de SAMAPA-El Alto, vale decir con el acuífero deprimido por bombeo.

La elección de pozos someros y profundos en una misma área de estudio, ha permitido conocer el comportamiento de los niveles de agua de los acuíferos superficiales y de los profundos, así como las interrelaciones hidráulicas entre los acuíferos.

En algunos sectores de la Red de observación donde existe un pozo somero a tajo abierto y un pozo profundo, ubicados muy próximos entre sí, la profundidad del nivel del agua, acusó marcada diferencia, lo cual indica que los pozos están captando acuíferos diferentes. En cambio en otros sectores, para esta misma condición, la profundidad del nivel del agua era más o menos la misma lo cual evidenciaba que los pozos están captando el mismo tipo de acuífero pero a profundidades diferentes.

Se recopilaron datos históricos de evaluación en el Proyecto de Desarrollo de aguas subterráneas del Servicio Autónomo Municipal de Agua Potable y Alcantarillado (SAMAPA) de la ciudad de El Alto-La Paz- Bolivia, en donde se viene registrando diariamente cierta información básica de los 30 pozos de explotación ubicados en dos baterías (Wa y Wb).

La información recopilada de piezometría, corresponde al período mayo 1990 a mayo 1992. Con estos datos se han elaborado hidrogramas para los 30 pozos, relacionando la profundidad del nivel del agua (N.E./S en metros N.E./S: Nivel estático en relación a la superficie del suelo), con sus correspondientes fechas de medición; las más representativas se muestran en las Figuras 5.6 - 5.11.

De estos hidrogramas, se han elegido seis de la batería de pozos "Wb", con el propósito de evaluar el comportamiento de los niveles de agua durante un período aproximado de 2 años. Los pozos elegidos para el análisis son los siguientes: P-65 (Wb-15), P-67 (Wb-14), P-69 (Wb-13), P-76 (Wb-10), P-87 (Wb-5) y P-94 (Wb-2). (Anexo N° 5).

La interpretación de estos hidrogramas permite señalar que las mayores variaciones en descenso de los niveles de agua se evidencian en los pozos que se encuentran ubicados en las áreas próximas al río Seco (Pozos P-65/Wb-15 y P-67/Wb-14), comparativamente a los otros pozos que se encuentran a mayor distancia con respecto al río. Este resultado indica que las zonas próximas al río, se comportan como zonas de recarga.

Se observa también oscilaciones piezométricas bien definidas, de descenso entre junio 1990 y febrero 1991, seguido de una recuperación del nivel del agua marzo a mayo 1991, repitiéndose en el año siguiente las mismas tendencias en los mismos períodos; lo cual es concordante con el comportamiento hidrológico del río.

En los otros pozos, a medida que su ubicación es mas distante con respecto al río, las ondas de variaciones son más leves.

En los hidrogramas analizados, se reflejan las repercusiones de los bombeos de explotación del campo de pozos, no obstante que las mediciones de los niveles de agua, corresponden a estados en reposo y después de haber transcurrido en promedio 62 horas de suspensión de los bombeos.

5.1.3 Pruebas de Bombeo

En la fase de recopilación de información, se identificaron informes y resultados de pruebas de bombeo, efectuados en estudios de evaluaciones hidrogeológicas; así como en proyectos y programas de aprovechamiento de las aguas subterráneas. En esta fase de trabajo se han revisado y analizado informes

y reportes de pruebas a caudales escalonados o variables orientadas a establecer curvas de rendimiento o de producción de pozos y también pruebas a caudal constante para la cuantificación de los parámetros hidrogeológicos de los acuíferos: transmisibilidad o transmisividad (T), permeabilidad (K) y coeficiente de almacenamiento.

Posteriormente después de revisarse la información recopilada se programó y se ejecutó unas pruebas de bombeo a caudal constante de las cuales, un ejemplo es la prueba realizada en la margen izquierda del río Ilave en un sector denominado Jayu-Jayu del distrito de Acora Prov. y Depto. Puno/Perú.

El mayor número de pruebas de bombeo recopiladas a caudales variables, corresponden al sector altiplánico peruano, las mismas que se han efectuado dentro del programa de perforación y equipamiento de 80 pozos tubulares para riego en el departamento de Puno.

En este sector se identificaron 94 pruebas de bombeo a caudales variables con sus respectivas curvas de rendimiento.

Los resultados de las pruebas de bombeo, fueron analizados e interpretados, mediante un procesamiento computarizado, con el objeto de estudiar la ecuación del descenso de cada pozo, tomando como base los criterios propuestos por Jacob y Rorabaugh, en relación a la ecuación general del descenso cuya expresión matemática es la siguiente:

$$\begin{aligned} S &= BQ + CQ^n ; \text{ donde} \\ S &= \text{Descenso (L)} \\ BQ &= \text{Abatimiento debido al acuífero (L)} \\ CQ^n &= \text{Abatimiento por pozo (L)} \end{aligned}$$

En el sector noliviano, se han identificado solo 3 registros de estas pruebas, en el Informe Final del Estudio del Proyecto de Desarrollo de las aguas subterráneas de El Alto - La Paz/Bolivia, efectuado por la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) Diciembre 1987.

A partir de los registros de campo de estas 3 pruebas, se han elaborado sus correspondientes curvas de rendimiento y con los datos de los escalones de cada prueba, se aplicó también la metodología referida anteriormente para estudiar la ecuación del descenso de cada pozo.

En lo que concierne a pruebas de bombeo-caudal constante en el sector peruano, se recopilaron en total 77 gráficos de pruebas con su respectiva interpretación del programa de perforación y equipamiento de 80 pozos tubulares para riego, del Dpto. de Puno.

Se dispone de pocas pruebas, con resultados de controles en piezómetros cercanos al pozo de bombeo; por tal motivo los datos del coeficiente de almacenamiento (S) y de porosidad son escasos.

Los resultados de 50 pruebas, reinterpretadas y clasificadas por hojas a escala 1/250.000 se pueden apreciar en el Anexo 4.

En el sector boliviano mayormente se ha identificado solo datos finales de los parámetros hidrogeológicos Transmisividad (T) y coeficiente de almacenamiento (S) en estudios de evaluación de los recursos hídricos subterráneos tales como GEOBOL-NNUU (1973), Proyecto INGAVI, CORDEOR-SCIDE entre los principales. En total se disponen de resultados de 36 pruebas efectuadas en pozos de investigación principalmente y también en pozos de explotación.

Asimismo se recopiló registros de campo de 3 pruebas realizadas por un organismo no gubernamental (ONG) Centro YUNTA. Las pruebas, se han interpretado en el método semi-logarítmico de Theis-Jacob (Ver Anexo Nº 4).

5.1.4 Conductividad eléctrica y sus variaciones en el tiempo

En el curso de las investigaciones hidrogeológicas se recopilaron datos químicos, se tomaron 34 muestras de agua para efectuar análisis en laboratorio, se hicieron mediciones de la conductividad (CE) en casi todos los puntos de agua y se controlaron los valores de la CE en los puntos de la red de observación durante el período de monitoreo.

Todos los datos químicos ingresaron en el archivo químico, para realizar el informe hidroquímico.

Desde un punto de vista general se puede afirmar que la salinidad muestra valores crecientes desde el norte hacia el sur con valores medios que pasan de menos de 500 hasta 5000 micromhos/cm a + 25°C.

En la red de control se midió la conductividad en 111 pozos (someros y profundos) con los valores siguientes: 97 pozos cm menos de 1.500, 12 cm más de 1.500 y 2 con más de 3.000 micromhos/cm a + 25°C.

Con mediciones periódicas (Anexo N° 5) se estableció que en la gran mayoría de los pozos no hubieron variaciones significativas; solamente en 4 pozos se constataron variaciones (si se eliminan las diferencias debidas posiblemente a errores del instrumento) importantes que se pueden explicar de la siguiente manera:

Pozo 17 de la hoja EHG-9

El valor aumenta hasta más de 5000 con el nivel freático mínimo (máximo de evaporación) y baja (3000) cuando el nivel freático asciende.

Pozo 96 de la hoja EHG-3

Tiene un comportamiento similar al precedente con aumento del valor de la CE (de 1500 a 2500) con el descenso del nivel freático.

Pozo 111 de la hoja EHG-3

Un fuerte aumento de la CE en este pozo que no se individualiza en los pozos cercanos, puede ser atribuida a una contaminación de la fuente.

5.1.5 Estudios geofísicos recopilados

Durante el estudio se han recopilado informes de estudios geofísicos realizados en Perú y Bolivia con el método de resistividad eléctrica, en su variante de sondajes eléctricos verticales (SEV). Dichos estudios han proporcionado importantes elementos de juicio para las ubicaciones de las perforaciones exploratorias y de explotación.

En algunos casos, sobre todo en las cuencas peruanas, en la zona circunlacustre, la geofísica ha sido muy útil para reconstruir el marco general del subsuelo y localizar los paleocausas. Así se tiene que los acuíferos están encajonados sobre una formación arcillosa con un fuerte contraste de resistividad.

En las cuencas bolivianas, la geofísica presenta débiles contrastes de resistividad, en consecuencia los resultados son menos claros. Estos evidencian la presencia de acuíferos discontinuos, con potentes espesores y con variaciones laterales y verticales de la permeabilidad.

Los estudios recopilados y analizados se presentan a continuación:

<u>NOMBRE DEL ESTUDIO</u>	<u>UBICACION</u>	<u>SEV (Nº)</u>	<u>INSTITUCION</u>	<u>PAIS</u>
- Estudio Hidrogeológico Lampa-Cabanilla-Programa 80 pozos Depto. Puno	Dist. y Prov. Lampa, Depto. Puno	179	PRONASTER	PERU
- Estudio Hidrogeológico comunidades de Ancacea Muñamarca, Tolamarca y Soquesani. Programa 30 Pozos Depto. Puno.	Dist. Pichacane Prov. y Depto. Puno	64	PRONASTER	PERU
- Estudio Hidrogeológico Patacollo. Programa 80 Pozos Puno.	Dist. Zepita Prov. Chucuito Depto. Puno	83	PRONASTER	PERU
- Estudio Hidrogeológico Tacamani, Pucachupa	Dist. Juliaca Prov. San Román Depto. Puno	34	PRONASTER	PERU
- Estudio Hidrogeológico Ichu	Dist., Prov. y Dpto. Puno	25	AFATER	PERU
- Estudio Hidrogeológico Mañazo	Dist. Mañazo Prov. y Depto Puno	80	AFATER	PERU
- Estudio Hidrogeológico Tahuaco	Dist. Yunguyo Prov. Chucuito Dpto. Puno	26	AFATER	PERU
- Proyecto de Irrigación Oray Jaran	Dist. Juliaca Prov. San Román	35	AFATER	PERU
- Irrigación Pampa de Suchis	Dist. Caracoto Prov. San Román Dpto. Puno	No se precisa	AFATER	PERU
- Evaluación de los recurso hídricos para el abastecimiento de agua de la ciudad de Puno	Dista. Puno Huata, Paucarcolle, Prov. Depto. Puno	60	Aguas Subterráneas, Consultoría y Servicios (ASCOSESA)	PERU
- Estudio Hidrogeológico cuenca alta del río Ilave	Dist. Ilave Prov. Chucuito Dpto. Puno	173	PRONASTER	PERU
- Proyecto "Pozos de agua para consumo humano en comunidades campesinas"	Dista Ilave, Acora Provs. Chucuito, Puno Acora. Depto. Puno	65	ONG Taller de educación, capacitación e investigación rural andina (TECIRA)	PERU

<u>NOMBRE DEL ESTUDIO</u>	<u>UBICACION</u>	<u>SEV (Nº)</u>	<u>INSTITUCION</u>	<u>PAIS</u>
- Estudio Hidrogeológico Cuenca Baja del Río Ilave	Dist. Ilave, Pílcuyo Prov. Chucuito (ahora Prov. Collao) Depto. Puno	En Proceso de publica- ción (no se precisa)	PRONASTER	PERU
- Proyecto de Desarrollo de los recursos de aguas sub- terráneas en el Altiplano NNUU/Geobol	Norte del Altipla- no boliviano (cuen- cas de Peñas, Acha- cachi, Pucarani, Catari y Tiwanaku) y Oruro	No se precisa	NNUU/Geobol	BOLIVIA
- Final report for the study on groundwater developement project on el Alto District in La Paz city	Subcuenca Río Seco ciudad del Alto La Paz	15	Japan International Cooperation Agency (JICA)	BOLIVIA

5.2 MAPAS HIDROGEOLOGICOS

Los mapas hidrogeológicos muestran en forma objetiva e integral las principales características de los sistemas acuíferos, es decir las formaciones constituidas por sedimentos detríticos sueltos, las formaciones consolidadas de bajas a nulas permeabilidades, las fuentes de agua subterráneas inventariadas, los sentidos de escurrimiento, gradientes de los flujos subterráneos y las interrelaciones con los niveles de base (lagos, ríos).

Con estos elementos, para cada sistema acuífero que dispone de información, generalmente zonas exploradas con pozos someros y perforaciones profundas, se han elaborado curvas de hidroisohipsas. En algunos sectores con escasos datos disponibles se han inferido curvas manteniendo las tendencias de sectores que cuentan con información suficiente. En base a estas curvas se han trazado los sentidos de escurrimientos de los flujos subterráneos hacia los niveles de base (lagos y ríos).

En términos generales la circulación hídrica subterránea se concentra en los paquetes de material aluvial cuaternario.

En la Fig. 5.12 se ha esquematizado el sistema tipo de circulación y recarga de los acuíferos, modelo que con pocas variaciones se encuentra en las cuencas que vierten al lago y las cuencas que tributan al Desaguadero.

En la descripción de las hojas hidrogeológicas se hará una estimación de los recursos hídricos subterráneos, es decir de los volúmenes de agua que anualmente se renuevan y pasan a través de secciones de acuífero.

Para estimar estos recursos, debidos a la infiltración eficaz, se utilizan varios métodos de análisis, aptos para las napas freáticas, de los cuales los más comunes son:

- a) Conociendo el valor de transmisibilidad media de un acuífero (t en m^2/s) y el gradiente de la superficie freática (i), se puede calcular el caudal de agua que pasa (en m^3/s) a través de una sección (L) con un ancho medido en metros, según la fórmula $Q=TiL$. Con esta fórmula se obtiene un valor medio en m^3/s del caudal de agua que, en el transcurso del tiempo, se mueve y que, por lo tanto, deriva de una recarga que se verifica en zonas aguas arriba.
- b) Conociendo la fluctuación anual del nivel freático de una napa y atribuyendo un valor promedio a la porosidad eficaz del terreno acuífero, se puede calcular el volumen, expresado en milímetros, de agua que se infiltra anualmente. Si se conoce la superficie de infiltración se puede obtener el volumen de agua que anualmente entra en el acuífero, es decir, la recarga.
- c) Un tercer sistema de evaluación indirecto de los recursos hídricos subterráneos consiste en el análisis de los datos mensuales de lluvia, temperatura y de insolación. Con estos datos se puede obtener el valor de la evapotranspiración mensual y anual y, por diferencia, el valor de la lluvia eficaz, o sea la lluvia que escapa a la evapotranspiración y contribuye a la escorrentía superficial y a la infiltración.

Conociendo el valor de la escorrentía se puede obtener el valor real de la infiltración eficaz, o sea de la recarga.

Si los valores así obtenidos son similares, los resultados de los cálculos pueden ser tomados como suficientemente aproximados y confiables para los cálculos de los recursos.

El acuífero está constituido por estratos de sedimentos de origen fluvial de espesores variables, predominando los materiales finos (arenas finas y arcillas) sobre los gruesos (gravillas), salvo en algunos lugares como es el caso de la Comunidad Sucapaya pozo P-40, margen derecha del río Ramis, en donde se evidenció un paleocause enterrado compuesto por arenas medias a gruesas. En este pozo se obtuvo el mayor rendimiento óptimo de la zona ($Q=60$ litros por segundo); sin embargo esta condición es localizada por cuanto en la zona predominan los sedimentos finos. La perforación exploratoria en la comunidad de Conra-concapata (P-35) ubicada en la margen izquierda del río Ramis, hasta una profundidad de 100 metros, muestra que los 20 primeros metros del acuífero están constituidos por depósitos fluviales y los 80 restantes corresponden a la formación lacustre compuesta por arcilla que se degrada a medida que aumenta la profundidad de este depósito.

En esta zona, tomando como base las perforaciones exploratorias, los niveles de agua de pozos someros y profundos y otras investigaciones realizadas, se establece la existencia de una napa predominantemente libre y superficial.

La napa fluye desde el oeste hacia los niveles de base (Lagos Arapa y Titicaca).

La transmisibilidad del acuífero varía entre 112 y 1.123 $m^2/día$, con un rango más representativo de 112 y 709 $m^2/día$. ($1,3 \times 10^{-3}$ - $8,2 \times 10^{-3}$ m^2/seg) que corresponde a una mezcla de arena fina con gruesa predominantemente, con lo cual se clasifica al acuífero como de regular a bueno.

El caudal subterráneo que estaría alimentando el lago Titicaca, se ha estimado con la ecuación de Darcy, que nos proporciona un valor de 100 l/s aproximadamente. Para este cálculo se ha considerado una transmisibilidad de $t=605$ $m^2/día$ (7×10^{-3} m^2/seg), un gradiente hidráulico de $i= 0,28\%$ y un ancho de la sección de flujo de 5,5 Kms.

Si tenemos en cuenta la fluctuación promedio del nivel freático de los pozos, atribuyendo a la formación acuífera una porosidad eficaz del 0,05 se obtiene en el período de observación, que la napa ha perdido alrededor de 100 l/s, valor equivalente al caudal que la napa aporta al lago.

La geología del área se caracteriza por la existencia de formaciones volcánicas y sedimentarias generalmente de escasa a baja permeabilidad en las partes más altas de las cuencas, y en las partes bajas existen depósitos aluviales y fluvio-lacustres. En la parte meridional de la hoja hay depósitos aluviales volcánicos de transmisibilidad muy alta.

Las principales cuencas de esta región son las de los ríos, Ramis, Coata, Illpa e Ilave

En las partes bajas de estas cuencas circula el agua subterránea en los depósitos constituidos por materiales sedimentarios cuaternarios sueltos.

Cuenca baja del río Ramis - Zona 1

La zona 1 se encuentra ubicada en la parte baja de la cuenca del río Ramis.

En esta zona se han inventariado un total de 39 Fuentes de agua subterráneas, de las cuales 17 son pozos perforados y 22 pozos someros a tajo abierto.

En la zona 1, la red de control constituida por 14 pozos, ha permitido evaluar el comportamiento de los acuíferos en el tiempo.

En el período de control la napa acusó una tendencia general de descenso, con una variación comprendida entre 3 y 72 cm.; siendo el valor medio de variación de 20 cm.

El acuífero de esta zona está constituido principalmente por sedimentos cuaternarios sueltos de origen fluvio-lacustres.

Con las perforaciones existentes se ha determinado que el relleno sedimentario fluvial, de un espesor comprendido entre 40 y 60 metros, se encuentra por encima de una formación lacustre arcillosa totalmente impermeable. Esta condición del subsuelo corresponde a un sector ubicado entre San Pedro de Collana por el norte y Suapaya al sur a unos 20 a 25 Kms de la orilla del Lago Titicaca, en ambos márgenes del río Ramis.

Además las perforaciones muestran la existencia de paleocausas compuestas por arenas y gravillas.

La explotación actual de las aguas subterráneas es poco significativa debido a que un solo pozo perforado está equipado y su uso es eventual con fines de riego. Por otro lado con los 22 pozos someros inventariados en la cuenca del río Ramis, se estima una extracción anual de 200 m³ aproximadamente.

Sin embargo cabe mencionar que con las perforaciones existentes en la zona, del programa PRONASTER/Puno, se ha planificado extraer del subsuelo, un caudal total de 230 litros/segundo, con fines de irrigación, durante los meses donde se presentan déficits de agua superficial. La extracción de este caudal no debería afectar la napa porque se supone aumente la infiltración y disminuya la evaporación.

Cuenca media y baja del río Coata-Zona 2

La zona 2 se encuentra ubicada en la parte media y baja de la cuenca del río Coata, comprendiendo la subcuenca del río Lampa en la vertiente Noreste de esta zona. Está delimitada por el norte con la cuenca del río Ramis y por el sur con la cuenca del río Illpa.

Por el flanco occidental la zona se encuentra delimitada por estructuras de montañas y colinas de sustrato volcánico predominantemente, de formas irregulares, disectadas y fuertemente cortadas, con pendientes variables, generalmente altas. Por los otros flancos, bordeando la zona, existen cadenas de colinas de sustrato sedimentario y también en forma aislada. Los valles de los ríos están constituidos por sedimentos de gruesos a finos de origen fluvial.

En la zona se han inventariado un total de 51 pozos de los cuales 31 son pozos perforados y 20 pozos someros a tajo abierto.

En la zona 2, la red de control constituida por 15 pozos ha permitido determinar que la profundidad del nivel del agua en reposo varía entre 2,5 a 4,5 metros por debajo de la superficie del terreno.

En el período de marzo a diciembre 1992, la napa acusó una tendencial de descenso, con una variación de 15 a 42 cm con un promedio de 20 cm.

El acuífero de esta zona, que incluye las subcuencas de los ríos Lampa y Cabanillas, está constituido por depósitos cuaternarios de origen fluvial, lacustre y aluvial.

Las perforaciones existentes en la zona indican, para algunos sectores explorados las principales características litológicas de los acuíferos. Así, la parte alta de la zona entre los lugares denominados Marno y Orcohuayta, el acuífero está constituido por un depósito fluvio-aluvial, cuyo espesor varía entre 30 y 50 metros. Debajo de este relleno se encuentra una formación compuesta por arcilla y/o una mezcla de limos con arcilla de baja a nula permeabilidad. La correlación litológica en este sector, indica que los materiales más gruesos del relleno fluvio-aluvial se encuentra en las partes altas, mientras que en las partes mas bajas los sedimentos mayormente son finos y con una marcada estratificación.

En la parte media de la zona 2, en el sector de Tacamani, sobre la margen izquierda del río Lampa, el acuífero está constituido principalmente por un relleno fluvial, de 50 a 55 metros de potencia, que se caracteriza por la presencia de sedimentos finos y gruesos como gravillas y gravas mal graduadas, evidenciándose una marcada estratigrafía, con espesores variables; generalmente la presencia de arcilla como estrato diferenciado o como matriz de los sedimentos gruesos confiere limitadas características de permeabilidad.

Al oeste de la ciudad de Juliaca, sobre la margen derecha del río Coata, aguas abajo de la confluencia del río Cabanillas, en una zona muy próxima al lecho actual del río Coata, existe un paleocauce subterráneo, bien desarrollado en profundidad, con un espesor explorado de 63 a 85 metros, compuesto por sedimentos gruesos permeables con predominio de gravas, gravillas y arenas en estratos de espesor variable, que descansan sobre una formación arcillosa.

En la parte baja de la zona 2, en los lugares de Suchis, Sucasco y Ccarata, un relleno de sedimentos fluviales con espesores que van desde 42 a 60 metros, se encuentra por encima de una formación lacustre arcillosa totalmente impermeable. El relleno fluvial está compuesto de arenas en mayor proporción, con poca cantidad de gravas y gravillas, limos y arcillas como matriz en algunos horizontes.

En los sectores explorados de la zona 2, la napa acuífera es predominantemente libre y superficial; pero sin embargo por las características litológicas de las perforaciones existentes no se descarta la posibilidad de que existan en forma localizada napas en estados de semi-confinamiento.

La napa subterránea fluye desde la parte alta de la subcuenca del río Lampa hasta su nivel de base, el lago Titicaca, en el sentido noroeste al sur este, con un gradiente hidráulico de 0,3% en la parte alta y de 0,04% entre la ciudad de Juliaca y la localidad de Coata cerca del lago Titicaca.

La transmisibilidad (T) de los acuíferos varía de 198 a 1.115 m²/día ($2,3 \times 10^{-3}$ - $1,3 \times 10^{-2}$ m²/s).

El caudal subterráneo que estaría alimentando el lago Titicaca es alrededor de 10 litros por segundo, considerando una transmisividad de 346 m²/día, un gradiente hidráulico de $i = 0,04 \%$ y un ancho de 6 Kms de la sección natural de flujo en la orilla del lago.

La explotación actual de las aguas subterráneas no es muy importante por cuanto del total de los pozos perforados inventariados (31 Pozos) solamente 3 pozos son utilizados, uno de uso industrial y dos con fines de uso agrícola.

En la actualidad de un total de 7 pozos equipados, solo 3 pozos cuentan con equipos operativos y en el resto de pozos los equipos se encuentran inoperativos.

Con los pozos perforados utilizados y los pozos someros, se extrae en la actualidad, una masa anual del orden de los 500.000 m³ aproximadamente.

Considerando los proyectos existentes en la zona, y los pozos que en la actualidad se encuentran inactivos por desperfectos mecánicos y/o falta de infraestructura de riego, el volumen de agua subterránea que se extraería con la totalidad de la infraestructura existente sería la siguiente:

a)	Pozos utilizados	500.000 m ³ /año
b)	Pozos inactivos que entrarían en funcionamiento	2.000.000 " "
c)	Programa PRONASTER/Puno	5.000.000 " "
TOTAL		8.000.000 m³/año =====

El caudal previsto es muy alto si se compara con el caudal natural que pasa en el acuífero, sin embargo se podrían reducir las pérdidas por evaporación y aumentar la recarga pero el caudal de explotación programado parece alto y podría afectar el equilibrio hidrogeo-lógico de la cuenca.

Cuenca media y baja del río Illpa Zona 3

La zona 3 incluye la parte baja de la cuenca del río Illpa, y algunos sectores de las subcuencas de los ríos Totorani al sur de la localidad de Paucarcolla y Conaviri en las inmediaciones de Mañazo. Los dos primeros sectores se encuentran ubicados a una altitud media de 3811 a 3820 msnm, y el sector de Mañazo a 3944 msnm.

En la parte baja de la cuenca del río Illpa existe una Terraza fluvio-lacustre, como paisaje geomorfológico predominantemente, mientras que en las subcuencas del río Totorani y Conaviri se tienen planicies aluviales. En la zona circunlacustre del río Illpa se tienen áreas inundables.

En la zona en total se han inventariado 19 pozos de los cuales 10 se encuentran ubicados en la parte baja de la cuenca del río Illpa, 6 en la subcuenca del río Totorani y 3 en Conaviri-Mañazo. Del total de pozos inventariados 9 son pozos perforados.

En el sector de influencia del río Illpa, en su parte baja en ambas márgenes con los 4 pozos que se han controlado en el período de marzo a diciembre 1992, se establece que la profundidad del nivel del agua varía entre 2 y 4 m., con una variación general de descenso de 0,20 a 0,40 metros. En la zona de Totorani el nivel del agua se encuentra a una profundidad de 2 m. y en Mañazo Conaviri que corresponde al sector más alto, entre 3 y 9 metros.

El acuífero de la parte baja de la cuenca del río Illpa, está constituido por depósitos fluvio-lacustres del Cuaternario reciente, compuesto mayormente por arenas finas a gruesas, limos y arcillas. Con 2 perforaciones existentes en el sector denominado Illpa, se ha determinado que el relleno fluvial con un espesor de 50 metros se encuentra por encima de una formación lacustre arcillosa impermeable.

En la zona de Totorani, con 3 perforaciones se han determinado que el espesor de este relleno varía entre 22 y 30 metros de profundidad. En su parte inferior se encuentran rocas volcánicas que constituyen el límite inferior del acuífero.

En la zona de Mañazo-Conaviri, con 3 perforaciones existentes que alcanzan una profundidad máxima de 80 metros, se ha determinado que el relleno cuaternario que constituye el acuífero, tiene un espesor de 58 a 76 metros, el mismo se encuentra por encima del basamento rocoso constituido por areniscas fuertemente alteradas. El relleno sedimentario está compuesto por materiales gruesos permeables (arenas, gravas y guijarros), intercalados con sedimentos finos (arcillas con arenas muy finas).

En los tres sectores de la zona 3, la napa subterránea es predominante libre.

En el sector de Illpa la napa subterránea fluye desde oeste hacia su nivel de base, el Lago Titicaca, con un gradiente hidráulico de 0,06%.

En el sector de Mañazo-Conaviri la transmisibilidad varía entre $1.146 \text{ m}^2/\text{día}$ y $1.495 \text{ m}^2/\text{día}$ ($1,3 \times 10^{-2}$ - $1,7 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$). El rango de valores de los parámetros señalados tipifica a rellenos sedimentarios gruesos permeables, que le confieren buenas características hidrogeológicas al acuífero de este sector. El fuerte descenso del nivel indica que la parte alta de la cuenca está vaciándose por falta de recarga, y el agua fluye hasta las partes más bajas.

Para la zona baja de la cuenca del río Illpa solo se dispone de un valor de transmisibilidad en el sector Caracoto, el cual es $T = 259 \text{ m}^2/\text{día}$ ($3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{seg}$) con cuyo parámetro se establece que el acuífero posee características regulares para la explotación del agua subterránea.

El caudal subterráneo que estaría alimentando al lago Titicaca en la parte baja de la cuenca del río Illpa, es de 20 litros por segundo aproximadamente, considerando una transmisibilidad de $T = 259 \text{ m}^2/\text{día}$, un gradiente hidráulico de $i = 0,06\%$ y un ancho de la sección natural del flujo subterráneo de $l = 14 \text{ Kms}$.

En la actualidad la explotación del agua subterránea es poco significativa en los tres sectores señalados anteriormente, por cuanto de los 9 pozos perforados solamente 2 se utilizan con fines de abastecimiento de agua. Con los pozos perforados utilizados y con los pozos someros se extraen aproximadamente $170.000 \text{ m}^3/\text{año}$.

Intercuenca Illpa - Ilave - sector Acora - Plateria - Aziruni - Zona 4

La zona 4, que comprende el sector Acora - Plateria y Aziruni se encuentra ubicada entre las ciudades de Puno e Ilave a una altitud comprendida entre 3835 y 3810 msnm.

En este sector existen terrazas fluvio-lacustres y depósitos aluviales recientes. Por el flanco oriental se encuentra delimitado por cadenas de colinas de sustrato sedimentario predominantemente, estructurado de formas redondeadas y pendientes medias. Por el flanco occidental conformando una divisoria de aguas, se encuentran estructuras de montañas con sustrato sedimentario y volcánico, de formas redondeadas de pendientes medias a altas.

El acuífero de este sector está conformado por depósitos fluvio-lacustres compuestos por sedimentos finos arenosos, limosos y arcillosos y en forma localizada y dispersa, depósitos aluviales.

En este sector se han inventariado un total de 14 pozos de los cuales 8 son pozos someros de 4 a 6 metros de profundidad y 6 pozos perforados con profundidades que van desde 33 a 57 metros.

La profundidad del nivel del agua varía entre 2 y 5 metros. Con las mediciones periódicas efectuadas en un pozo somero ubicado en el sector de Capalla, localizado aproximadamente en el Km. 46 de la carretera Puno-Ilave, se establece que la napa acusó una tendencia de descenso en el período marzo a diciembre de 1992, con una variación de 0,36 metros.

En base a la información disponible de esta zona y teniendo en cuenta las condiciones geológicas se establece que los pozos someros están captando una napa libre y superficial, mientras que con las perforaciones profundas se ha identificado napas confinadas en escasos rendimientos.

La napa en este sector fluye de suresta a noroeste desde al parte alta hacia el lago Titicaca con un gradiente hidráulico $i = 0,1\%$.

En este sector no se dispone información acerca de los parámetros hidrogeológicos del acuífero.

El caudal subterráneo proveniente de este sector que estaría alimentando el lago Titicaca es del orden de los 5 litros por segundo, estimando una transmisibilidad de $86 \text{ m}^2/\text{día}$ en función de las características litológicas del acuífero cercano a la orilla del lago. Para esta estimación del caudal se ha considerado un gradiente hidráulico de 0,1% y un ancho de la sección del flujo natural de 4 Kms.

En la actualidad la extracción del agua subterránea se hace manualmente y en los pozos perforados con bombas manuales, estimándose una masa anual explotada con fines de uso doméstico de 10.000 m^3 .

En esta zona se incluye también los sectores hidrogeológicos de Aziruni-Puno e Ichu ubicados al sur de la ciudad de Puno y las cercanías del lago Titicaca.

El sector de Aziruni tiene un acuífero conformado por sedimentos de origen lacustre principalmente. Las perforaciones existentes en este sector que alcanzan los 70 metros de profundidad, evidencian la presencia de materiales finos en mayor proporción, intercalados con sedimentos gruesos, permeables. Con los 4 pozos controlados incluyendo uno en la ciudad de Puno, se ha establecido que la napa descendió levemente en función del tiempo entre 2 y 34 cm.

En el sector de Ichu el acuífero está constituido por sedimentos aluviales y lacustres con espesores de 50 a 200 metros respectivamente. Con las pruebas realizadas en pozos someros se ha establecido que la transmisibilidad de los primeros metros del acuífero varía entre 38 y $81 \text{ m}^2/\text{día}$ ($4,4 \times 10^{-4}$ - $9,4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{seg}$).

Cuenca alta y media del río Ilave Zona 5

La zona 5 comprende la parte alta de la cuenca del río Ilave, en el área de influencia del río Loricongo, cerca de la localidad de Laraqueri, a una altitud de 3932 a 3967 msnm, y asimismo la parte media del río Ilave, incluyendo la subcuenca del río Zapatilla.

La geomorfología de la parte alta de la zona, comprende mesetas de lavas e ignimbritas, colinas de sustrato volcánico de formas redondeadas y pendientes medias, y planicie fluvio-aluvial.

En la parte media, la geomorfología comprende al oeste y al sur de este sector, montañas de sustrato volcánico y colinas sedimentarias, terrazas fluvio-lacustres levantadas sobre el nivel de base actual y depósitos aluviales recientes a lo largo del lecho actual del río Ilave.

La estratigrafía está conformada por rocas volcánicas y sedimentarias cuyas edades varían desde el Terciario medio al Cuaternario reciente.

En esta zona se han inventariado las siguientes fuentes de agua.

En la parte alta un total de 9 pozos de los cuales 8 son pozos perforados con profundidades de 30 a 57 metros y un pozo somero de 4 metros. En la parte media 17 pozos de los cuales 9 son pozos someros y 8 perforaciones. Los pozos perforados tienen profundidades de 24 a 112 metros y los pozos someros de 3,0 a 8,0 metros.

La profundidad del nivel del agua en reposo (N.E.), en la parte alta, varía en función del relieve topográfico entre 2 y 12 metros. Las variaciones del nivel de agua, controladas en 3 pozos (2 pozos perforados y 1 somero), acusan una tendencia de descenso en el período marzo a diciembre de 1992, con una magnitud de 1,50 a 2,40 metros. En la parte media los niveles de agua se encuentran entre 7 y 19 metros de profundidad, dependiendo del paisaje geomorfológico del sector. Con 4 pozos de control de los cuales 2 ubicados en la margen derecha del río Ilave (1 pozo tubular y 1 pozo somero) en el sector denominado Chijichaya y 2 en la margen izquierda (pozos someros) en los sectores de Queña Faja y Ullacachi, se ha determinado un descenso general, con una magnitud comprendida entre 0,16 y 0,39 metros.

El acuífero explorado en la parte alta con 8 perforaciones profundas, en el área de influencia del río Loripongo, está constituido por un relleno fluvio-aluvial compuesto de arenas, gravas, cantos rodados y guijarros con poca cementación, cuyo espesor es de 30 a 75 metros, pero que puede alcanzar espesores de 100 metros en la parte central de la subcuenca, según los estudios geofísicos existentes. Debajo de este relleno se encuentra una formación compuesta por limos arcillosos, arcillas limosas y formaciones volcánicas de naturaleza andesítica.

La parte media del acuífero está constituido principalmente por materiales no consolidados de origen aluvial y deltaico compuesta de gravas subredondeadas, arena gruesa y pequeños lentes de limos. Las perforaciones existentes evidencian que el acuífero está constituido por una sucesión de estratos compuestos principalmente por sedimentos finos limosos, arcillosos con poca cantidad de gravilla y gravas. Su espesor varía entre 30 y 80 metros.

El sustrato rocoso está constituido por rocas volcánicas y sedimentarias que afloran en el río Ilave y Zapatilla.

En la parte alta por la configuración litológica del acuífero, los niveles de agua en reposo y su comportamiento en el tiempo, se establece que la napa es libre.

En la parte media, las zonas exploradas con pozos someros y profundos, muestran que la napa es libre, pero por la estratificación del acuífero no se descarta la existencia de napas localmente a presión.

La napa subterránea, en la parte alta, fluye desde suroeste a noreste con un gradiente hidráulico medio de 0,2%. La circulación hídrica subterránea continúa hacia aguas abajo, siguiendo sentidos impuestos por la configuración lateral de los acuíferos y recibiendo las aportaciones de las subcuencas de los río Huenque y Aguas Caliente hasta llegar a la parte media, en donde fluye con el mismo sentido de la parte alta con un gradiente hidráulico de 0,5%. En el tramo de interconexión hidráulica de las napas, delimitado por mesetas y colinas volcánicas se observan sectores completamente saturados, debido al estrechamiento del acuífero y al incremento del flujo subterráneo en tránsito hacia la parte media del río Ilave.

En la parte alta no se dispone de información acerca de los parámetros hidrogeológicos del acuífero, sin embargo, por las características de los sedimentos detríticos no consolidados se puede señalar que el acuífero posee buenas condiciones de transmisibilidad y de porosidad, por la presencia de arenas, gravillas, gravas, cantos rodados y guijarros ($T = 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$).

En la parte media la transmisibilidad del acuífero varía entre 550 y 1.040 $\text{m}^2/\text{día}$ ($6,4 \times 10^{-3} - 1,2 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{seg}$).

En la parte alta, la explotación del agua subterránea, es mínima debido a que solamente un pozo perforado dispone de equipo de bombeo operativo, pero su uso es eventual con fines de riego.

Consecuentemente la explotación del recurso proviene mayormente de los pozos someros a tajo abierto. Como referencia se menciona que en el marco de un estudio hidrogeológico realizado por PRONASTER/Puno en el año 1987 en un área de 40 Km², se determinó una masa explotada de 26.000 m³/año con 52 pozos a tajo abierto y 3 manantiales.

En la parte media, la explotación del agua subterránea también proviene de pozos someros a tajo abierto, por cuanto los pozos perforados con fines de irrigación se encuentran inactivos. En un estudio hidrogeológico realizado por PRONASTER/Puno, en el año 1988 en una área de 60 Km², incluyendo la subcuenca del río Zapatilla, se identificaron 61 pozos a tajo abierto, 3 pozos tubulares de uso doméstico-comunal y 2 manantiales. Con el 70% de los pozos que se encontraban en uso, mayormente equipados con bombas manuales, incluyendo los pozos perforados; se estimó una masa explotada del orden 30.000 m³/año.

Sobre la base de los datos recopilados se puede afirmar que el acuífero de la parte alta es muy interesante con un flujo natural de 200 l/s aproximadamente. Este dato encuentra una confirmación en las fluctuaciones del nivel freático (2 metros promedio) que, con una porosidad eficaz del 3%, nos proporciona un volumen de agua de 200 l/s como variación de los recursos en el año.

En la parte media el flujo natural es menos interesante por cuanto una parte del agua se pierde por evaporación en los estrechamientos geológicos que se encuentran entre la parte alta y la media.

5.2.4 Hoja N° 4

En esta hoja se hallan ubicadas las partes bajas de las cuencas del flanco sureste, noreste y sureste que drenan la cuenca principal del lago Titicaca.

El flanco nor-oriental caracteriza por presentar un paisaje complejo e irregular con un relieve topográfico de pendientes variables que van decreciendo desde las partes altas hacia la zona lacustre. En este flanco la red hidrográfica es densa

y bien desarrollada. En los otros flancos se encuentran las partes bajas de la cuencas, con un relieve menos escarpado, con tendencia decreciente hacia el lago Titicaca.

Desde el punto de vista geomorfológico esta zona comprende estructuras de montañas y colinas con sustrato volcánico y sedimentario, predominantemente, pie de montes que comprenden acumulaciones detríticas y coluviales, abanicos aluviales, depósitos fluvioglaciales y morrénicos y cuerpos de derrumbe; depósitos aluviales, terrazas fluvio-lacustres y cumbres con nieves perennes.

La geología de la región se caracteriza por la presencia de rocas volcánicas en el flanco sur-occidental principalmente y por rocas sedimentarias en los otros flancos de la cuenca del lago Titicaca.

Las principales cuencas que existen en la región son: Ilave, incluyendo su afluente el río Zapatilla, en sus partes bajas, las subcuencas de los ríos Jacha-Jahuira (Peñas), Keka (Achacachi) y Khullu Cachi (sur de Peñas hacia Batallas).

Cuenca baja de los ríos Ilave y Zapatilla Zona 6

La zona 6 comprende la parte baja de la cuenca del río Ilave, fundamentalmente la zona de su delta en la zona circunlacustre con altitudes comprendidas entre 3810 y 3830 msnm, incluye también la subcuenca del río Zapatilla en su parte baja.

En esta zona se han identificado los pozos perforados con fines de irrigación del programa PRONASTER/Puno, que se encuentran ubicados principalmente en la margen izquierda del río Ilave y en menor proporción en la margen derecha.

Los pozos someros inventariados se encuentran ubicados en ambas márgenes del río Ilave y también en el área de influencia del río Zapatilla. Los resultados del inventario y las características generales de las fuentes de agua subterránea son las siguientes: Existen 40 pozos de los cuales 25 son pozos perforados y 15 pozos someros a tajo abierto.

La profundidad del nivel del agua en reposo (NE) en la zona varía entre 1,50 y 4,50 metros, correspondiendo las menores profundidades a las zonas más próximas a la orilla del lago Titicaca, y a los sectores con relieve topográfico más plano.

En esta zona se dispuso de 11 pozos de control de los cuales 6 son perforaciones sin uso y 5 pozos someros sin equipos de bombeo; se ha determinado que la napa acuífera subterránea evolucionó con una leve tendencia de descenso en el período de marzo a diciembre de 1992, con variaciones comprendidas entre 5 y 15 cm.

Los estudios geológicos, geomorfológicos complementados con las diversas perforaciones existentes, indican que el acuífero de la parte baja del río Ilave en sus dos márgenes está constituido por sedimentos detríticos no consolidados de origen fluvio-aluvial, compuestos por gravas, gravillas y arenas en espesores variables entre 40 y 70 metros. En algunas zonas en el perfil litológico del acuífero se distingue una secuencia de sedimentos gruesos permeables intercaladas con estratos de limo arcillosos que indicarían estados de napas a presión en forma localizada. Debajo de este relleno se ha identificado en varios lugares explorados una formación lacustre arcillosa totalmente impermeable.

Los diversos estudios realizados, complementados con las perforaciones profundas y los pozos someros, evidencian la existencia de una napa predominantemente libre; sin embargo, en algunos lugares la configuración de la litología del acuífero constituida por estratos permeables intercalados con capas limosas-arcillosas o arcillas, propician napas a presión. Los resultados de dos pruebas de bombeo a caudal constante efectuadas en un mismo pozo, pero con piezómetros profundos diferentes, han confirmado la existencia de una napa a presión no surgente.

La napa acuífera en la parte baja del río Ilave fluye en el sentido sur-oeste a nor-este con un gradiente hidráulico medio de 0,2% y en el sector bajo del río Zapatilla con 1,7% en el sentido oeste a este. El gradiente hidráulico de la napa en el río Ilave, se ha determinado con los trabajos de nivelación topográfica efectuados en baterías de pozos profundos, ubicados en dirección más o menos perpendicular al lago Titicaca.

En el área, la transmisibilidad del acuífero (t) tiene un rango de variación de 536 m²/día ($6,2 \times 10^{-3}$ m²/seg) a 5.616 m²/día ($6,5 \times 10^{-2}$ m²/seg). La transmisibilidad promedio en esta zona es del orden de 1.857 m²/día ($2,15 \times 10^{-2}$ m²/seg).

En la prueba de bombeo a caudal constante efectuada en el presente estudio, en el sector de Jayu-Jayu, margen izquierda del río Ilave, se obtuvieron valores de transmisibilidad de 536 a 752 m²/día, y un coeficiente de almacenamiento de $6,4 \times 10^{-4}$.

En la actualidad la explotación de las aguas subterráneas no es muy importante por cuanto los pozos perforados con fines de riego del programa PRONASTER/Puno continúan aún inactivos por no haberse concluido la segunda etapa del programa que comprende la construcción de la infraestructura de riego. Del total de pozos perforados en esta zona, 8 disponen de equipos de bombeo e infraestructura parcial de riego; pero su uso es muy eventual por las razones anteriormente indicadas.

La modalidad de explotación más utilizada en la zona la constituye los pozos someros a tajo abierto.

Con los 15 pozos inventariado se estima una masa anual explotada de 6.600 m³/año aproximadamente, con lo cual se confirma que la explotación con este tipo de fuente es poco significativa.

Con los elementos disponibles se puede afirmar que el flujo de agua subterránea desde el acuífero hacia el lago es de 24 litros por segundo (gradiente 0,1%, $t = 2,10^2$ m²/s, sección de 12 Km).

La disminución de las reservas en el período de control comprendido de marzo a diciembre de 1992, para un descenso medio de 0,10 metros, asciende a 3.000 m³/Km² con un total de 20 l/s para toda el área; valor muy cercano al valor deducido en el cálculo del flujo.

Cuenca del Titicaca-Keka Zona 7

La zona 7 que comprende la subcuenca del río Keka-Achacachi se encuentra ubicada al norte del altiplano Boliviano.

Se encuentra delimitada por el norte y nor-este por la cordillera Real al oeste y sur-oeste por el lago Titicaca y las serranías paleozoicas y al sur-este por la subcuenca de Peñas.

En el flanco oriental, constituido por la cordillera Real, se encuentran rocas sedimentarias talvés metamorfosadas e intrusivas poco permeables. Conformando los pie de montes, se tienen extensas morrenas de guijarros con arcillas consideradas también como impermeables.

Bordeando el área, en su flanco sur y sur-oriental, se encuentran rocas volcánicas y sedimentarias.

En esta zona se han inventariado un total de 9 pozos de los cuales 6 son pozos perforados y 3 pozos someros a tajo abierto. Los pozos someros con profundidades de 3 a 4 metros se encuentran ubicados, más o menos, en línea en la granja experimental Belén de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA). Los pozos perforados con fines exploratorios del proyecto Naciones Unidas (NNUU) Servicio Geológico de Bolivia (GEOBOL) se encuentran ubicados dentro de los terrenos de la granja experimental Belén de la UMSA. De este proyecto se identificó un grupo de pozos constituido por un pozo central o piloto y 3 piezómetros. Asimismo se ubicó un pozo perforado por Geobol, el cual manifiesta una surgencia que alcanza la superficie del suelo. La profundidad de los pozos exploratorios de NNUU/Geobol varía entre 36 y 311 metros y el perforado por Geobol tiene una profundidad de 110 metros. Al este de la granja Belén se identificó también un pozo exploratorio de 70 metros de profundidad con surgencia natural sobre la superficie del terreno.

En esta zona se han controlado 2 pozos en el período marzo a diciembre de 1992. En un pozo somero de la granja experimental Belén P-5 (EHG-005) se controló nivel de agua, conductividad eléctrica y temperatura del agua y en el pozo perforado P-08 (EHG-005) se controló la surgencia natural y la conductividad eléctrica con su correspondiente temperatura.

El nivel del agua en reposo (NE) en el área de la granja experimental Belén se encuentra a una profundidad de 2 a 3 metros con respecto a la superficie del suelo. En el período de control la napa evolucionó con una tendencia de descenso, con una variación de 0,66 metros.

El acuífero de esta zona está constituido por depósitos cuaternarios de origen fluvioglacial, fluvial y lacustre. Los depósitos fluvioglaciales y fluviales están compuestos por arenas y gravas con matrices limo arcillosas y los depósitos lacustres por limos y arcillas.

Con los resultados de las perforaciones exploratorias del proyecto NNUU/Geobol en los sectores de granja experimental Belén de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) y del sector Tamayo, se ha determinado que el acuífero hasta una profundidad de 311 metros está constituido por una sucesión de estratos de gravas con arenas, intercaladas con estratos de arcilla y limo, con espesores variables de 4 hasta 52 metros aproximadamente. En las perforaciones que alcanzaron profundidades de 36 a 105 metros, no se han identificado estratos arcillosos, sino más bien predominancia de gravas y arenas con matrices arcillosas. En la perforación que alcanzó mayor profundidad (311 metros), no se identificó el basamento rocoso.

La presencia de estratos arcillosos por debajo de los 135 metros de profundidad y a diferentes niveles puede explicar el estado de artesianismo de la napa.

Por la configuración litológica de las perforaciones exploratorias y las mediciones del nivel del agua efectuadas en algunos pozos, a la napa de esta zona, se la define como libre y superficial, en los lugares donde se hallan emplazados los pozos someros; pero por la secuencia estratigráfica de las perforaciones existentes en los terrenos de la granja experimental de Belén de la UMSA, existe también una napa bajo presión, pero probablemente en forma localizada y a partir de profundidades mayores de 100 metros.

En granja Belén y en el sector Tamayo, en pozos perforados con profundidades de 100 y 70 metros respectivamente, actualmente se observan surgencias naturales de la napa, a pesar que en los perfiles litológicos de estos pozos no se ha identificado estratos claramente impermeables confinantes.

En esta zona la napa fluye en el sentido sur-este a nor-oeste, hacia su nivel de base, el lago Titicaca, con un gradiente hidráulico del 0,3% aproximadamente.

Las características hidrodinámicas del acuífero se han determinado mediante una prueba de bombeo, efectuada en el pozo P-4 (EHG-004), en donde se obtuvo una transmisibilidad de $T = 303 \text{ m}^2/\text{día}$ ($3,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{seg}$) y un coeficiente de almacenamiento $S = 2,3 \times 10^{-3}$. Estos parámetros son concordantes con la litología del acuífero y además con la presencia de una napa a cierta presión en algunos sectores.

En la actualidad el agua subterránea se explota únicamente con pozos someros a tajo abierto de poca profundidad; consecuentemente el volumen de explotación es mínimo.

Con los datos disponibles se ha estimado el valor del flujo natural de la napa (gradiente 0,3%, $T = 3,5 \times 10^{-3}$ y sección de 8.000 m) en 80 l/s.

La evaluación por medio de la fluctuación del nivel nos indica valores un poco más elevados (150 l/s) pero la estimación del valor de la porosidad eficaz puede ser muy dudosa.

Cuenca del Titicaca - Peñas Zona 8

La zona que comprende la subcuenca de Peñas se encuentra ubicada entre las subcuencas de Achacachi y Pucarani.

Las unidades geomorfológicas existentes en esta zona son las colinas sedimentarias bordeando en flancos occidental, norte y nor oriental y depósitos aluviales del Cuaternario reciente.

Se han inventariado 8 fuentes de aguas subterráneas de las cuales 5 son perforaciones exploratorias del proyecto NNUU/Geobol, 2 pozos someros y un manantial de la localidad de Peñas. Las perforaciones exploratorias alcanzan profundidades de 73 a 187 metros y los pozos someros de 2 a 3 metros.

En la parte más baja de esta zona, el nivel del agua subterránea se encuentra muy cerca de la superficie del suelo o aflorando originando bofedales o zonas pantanosas expuestas a una fuerte evaporación. En las partes topográficamente más altas el nivel del agua se encuentra entre 3 y 8 metros debajo de la superficie del suelo.

En el pozo somero de control de acuíferos del presente estudio, ubicado al nor-oeste de Peñas (P-18), en un sector lateral del acuífero, el nivel del agua subterránea se encuentra a una profundidad de 0,50 a 0,60 metros; en el período comprendido de marzo a diciembre de 1992, la napa acusó mínimas variaciones de descenso y ascenso.

El acuífero está constituido por depósitos cuaternarios de origen glacial, fluvio-glacial, fluviales y coluviales.

Los depósitos glaciales distribuidos mayormente en el borde norte de la zona están constituidos por gravas y guijarros con matriz limo-arcilloso. Los depósitos fluvio glaciales están compuestos por gravas, arenas y con matriz limo arcillosa. Los depósitos fluviales conjuntamente con los fluvio-glaciales conforman la mayoría de los depósitos permeables de la zona.

Las perforaciones exploratorias existentes indican que los depósitos fluviales están compuestos principalmente por gravas y arenas con poca cantidad de sedimentos limosos-arcillosos. El espesor de este relleno varía entre 85 y 130 metros.

Los espesores más potentes se encuentran en la parte central y nor-occidental de la zona, y los menores espesores se presentan hacia el sur y el oeste.

En esta zona la napa contenida en los depósitos cuaternarios es predominantemente libre; sin embargo, por la configuración de la litología del acuífero explorado, los lentes de arcilla, de extensión limitada originan condiciones de artesanismo surgente y no surgente en sectores localizados.

La napa subterránea fluye en el sentido principal sureste a nor-oeste hacia la subcuenca del río Keka - Achacachi, con un gradiente hidráulico del 0,43% aproximadamente.

Con la interpretación de pruebas de bombeo y de flujo efectuadas en 2 perforaciones exploratorias del proyecto NNUU/Geobol, se ha determinado que la transmisibilidad del acuífero es de 80 a 120 m²/día ($9,3 \times 10^{-4}$ a $1,4 \times 10^{-3}$ m²/seg); y el coeficiente de almacenamiento de 2×10^{-4} y 1×10^{-2} (1%) que caracterizan a napas bajo presión y libres respectivamente.

En la actualidad el agua subterránea se explota con los pozos someros, mediante los cuales se extrae reducidas masas anuales, asimismo se aprovechan los manantiales que se localizan mayormente en las colinas con sustrato sedimentario impermeable predominantemente. No se han identificado pozos perforados en funcionamiento, solamente existen los pozos exploratorios del proyecto NNUU/Geobol.

Los recursos hídricos de la zona, en base a los datos recopilados, alcanzan los 20 l/s (gradiente 0,4% $t=10^{-3}$ m²/seg y sección de 5000 m) que en parte entran en la zona 7 y en parte se pierden por evaporación en los bofedales.

5.2.5. Hoja N° 5

La hoja N° 5 interesa un tramo del río Desaguadero desde el Puente Internacional hasta una zona un poco al norte de Aguallamaya y el extremo suroeste del lago Titicaca.

Se han diferenciado dos zonas de interés hidrogeológico con napas bien claras e hidroisohipsas reconstruibles.

Sector Ancoputo - Patacollo Zona 9

Se encuentra alrededor de un relieve volcánico (Cerro Ccapia) casi aislado entre las últimas estribaciones de la Cordillera Occidental y el lago Titicaca.

Este relieve por estar constituido de rocas volcánicas fracturadas y permeables permite una fuerte infiltración y origina en las planicies que lo bordean napas freáticas interesantes.

Las principales fuentes de agua superficial son el río Molino Ccapia en el sector de Chua Chua y el río Parco en el sector de Patacollo y Ancoputo; asimismo la laguna de Huara Huarina, ubicada a 4500 msnm en la cumbre del volcán Ccapia o Pampajase que, tal vez, corresponde al mismo cráter volcánico como sucede en casi todos los volcanes recientes del mundo.

Al norte de la zona central, el acuífero está compuesto por gravas y arenas subangulares que evidencian poco transporte y selección. Al sur de esta zona los sedimentos son más seleccionados con mayores permeabilidades. El sustrato está constituido por rocas volcánicas y sedimentarias, prácticamente impermeables.

La napa es predominantemente libre y por sectores a presión; existiendo pozos con leves surgencias en los sectores de Tambillo y Ancoputo.

El nivel del agua en reposo se encuentra a 2 metros en el sector Ancoputo y 8 m en Patacollo.

La napa en el sector norte fluye hacia el lago Titicaca con un gradiente hidráulico del 0,7%, y en el sector sur este con un gradiente hidráulico del 1,3% desde el cerro Ccapia donde se encuentra la zona de alimentación hacia su nivel de base, el lago Titicaca.

En esta zona se han inventariado un total de 26 pozos de los cuales 17 son pozos someros y 9 pozos perforados.

La transmisibilidad varía entre 32 y 337 m²/día ($3,7 \times 10^{-4}$ a $3,9 \times 10^{-3}$ m²/seg).

En la zona de Ancoputo el valor de este parámetro es de 248 m²/día ($2,9 \times 10^{-3}$ m²/seg) con un coeficiente de almacenamiento de 10^{-3} aproximadamente.

El caudal que estaría alimentando el lago Titicaca es de 14 l/s, considerando una transmisibilidad media de 115 m²/día, un gradiente hidráulico de 0,13% y en un ancho de la sección de flujo de 8.000 m.

Zona 10 Sector Ccallacame - Jaccha Mauri

Esta zona se encuentra en la margen derecha del río Desaguadero y está constituida por una amplia planicie "deltaica" de los ríos Jaccha Mauri y Ccallacame con una superficie total próxima a los 1.500 Km².

En la zona se inventariaron 57 fuentes de agua subterráneas de los cuales 12 son manantiales, pozos someros 40 y pozos perforados 5, con los cuales se han reconstruido las curvas hidroisohipsas y la dirección de flujo del sur hacia el norte con una pendiente hidráulica de 0,1%.

El acuífero está formado por material aluvial del Cuaternario antiguo y reciente limitado por formaciones impermeables.

No se disponen de datos de pruebas de bombeo y por lo tanto para estimar el caudal del flujo subterráneo podemos asumir valores de transmisibilidad mínimas y máximas en base a resultados obtenidos en zonas similares de la cuenca TDPS.

Los valores que podemos asumir para la transmisibilidad son $T = 1 \cdot 10^{-3}$ y 5×10^{-2} m²/seg. Con estos valores, los caudales circulantes a través de una sección de todo el acuífero y paralelo al Desaguadero, son de 32 l/s y 1,6 m³/seg.

El valor máximo no corresponde a las condiciones hidrogeológicas de esta zona por cuanto en otras cuencas cuaternarias exploradas no se han determinado valores medios tan altos de transmisibilidad. Pero en este tramo del Desaguadero cuando el lago Titicaca, y entonces todo el sistema sube mucho de nivel (hasta

los 3.810 y más) y después baja, se crean fenómenos de saturación y después pérdidas de magnitud importante.

En esta zona con 3 metros más de altura que el nivel de base, se puede saturar todo el acuífero (en el cual en este período el nivel está 2-3 metros bajo el suelo y al bajar del nivel de base, el vaciado puede ser importante aún porque en la parte más superficial del acuífero la porosidad eficaz y la transmisibilidad son más altas.

5.2.6 Hoja N° 6

La región comprendida en esta hoja corresponde a la parte norte del altiplano Boliviano; se encuentra ubicada entre las cordilleras Occidental y Real u Oriental. Se caracteriza por ser una planicie elevada como resultado de movimientos verticales conectados con la orogenesis andina.

Las subcuencas hidrológicas principales son las del río Keka, el río Khullu-Cachi, río Catari y río Tiwanaku, afluentes del Titicaca, una parte del río Desaguadero al sur de esta región y el río Grande que fluye hacia el sur.

El paisaje geomorfológico está caracterizado por la presencia de montañas y colinas de sustrato sedimentario impermeable de formas irregulares con pendientes variables, en gran parte de la región; constituyendo los límites laterales de los acuíferos. Asimismo se distinguen terrazas fluvio lacustres, más o menos levantadas sobre el nivel de base actual, y también con superficies degradadas, depósitos cuaternarios de origen aluvial, fluvio aluvial, glaciario, fluvio glaciario y bofedales.

En la parte sur de la región existen mesetas de sustrato de lavas e ignimbritas, delimitando rellenos aluviales y terrazas fluvio lacustres.

Sectores Pucarani - El Alto - Viacha Zona 11

La zona 11 comprende 3 áreas hidrogeológicas, la primera se encuentra ubicada en la parte baja del río Khullu-Cachi entre las localidades de Batallas y Pucarani; la segunda en el área de influencia del río Seco entre El Alto y Viacha y la tercera, la parte sur de la localidad de Viacha.

Esta extensa zona se encuentra delimitada por el norte con la subcuenca de Peñas, por el este con la Cordillera Real y la cuenca de La Paz y por el oeste con el lago Titicaca y las serranías paleozoicas.

El paisaje geomorfológico está conformado por colinas de sustrato sedimentario en cadenas o en forma aislada principalmente hacia el oeste y sur de la zona, montañas sedimentarias y cumbres con nieves perennes al norte; pie de montes de la Cordillera Oriental, conformados por depósitos detríticos del Cuaternario, terrazas fluvio-lacustres y bofedales en las zonas bajas de las subcuencas.

Delimitando la zona en su flanco occidental y sur se encuentran rocas sedimentarias impermeables de edad paleozoica y terciaria en cadenas alineadas o aflorando en forma aislada.

Los rellenos sedimentarios cuaternarios, no consolidados, están constituidos por depósitos coluviales, coluviofluviales, glaciares, glaciofluviales, fluviales y lacustres.

En esta zona se han identificado en mayor proporción pozos perforados con fines de investigación hidrogeológica del proyecto NNUU/Geobol y pozos de explotación con fines de abastecimiento de agua. Los pozos someros se encuentran ubicados generalmente en las zonas donde el nivel del agua subterránea se encuentra muy cerca a la superficie del suelo.

En la zona se han inventariado un total de 113 fuentes de aguas subterráneas de las cuales 91 pozos perforados, 18 pozos someros a tajo abierto y 4 manantiales.

Los pozos perforados con fines exploratorios alcanzan profundidades de 30 a 202 metros, los pozos de explotación de 60 a 11 metros y los pozos someros tienen una profundidad máxima de 8 metros.

Se controlaron los niveles del agua en reposo en las fuentes de la red de observación, evidenciándose una tendencia general de descenso. Se registran variaciones de 0,35 a 0,70 m en el sector bajo de Khullu Cachi, de 0,50 a 2,00 m en la batería de pozos de SAMAPA-El Alto (río Seco), y de 0,60 a 1,20 m. en Viacha. Las variaciones del sector río Seco, están influenciadas por los bombeos intermitentes del campo de pozos de SAMAPA.

En el sector de río Seco entre El Alto y Viacha los niveles del agua en reposo (NE) siguen una tendencia decreciente en el sentido general de la pendiente, y se encuentran a una profundidad de 30 a 35 metros, a la altura de la carretera Panamericana, desvío río Seco y de 3 a 5 metros en las inmediaciones de la localidad de Viacha. En el sector comprendido entre Pucarani y Batallas el nivel del agua se encuentra muy cerca a la superficie del suelo entre 0,50 y 4,0 metros. Al sur de la localidad de Viacha, igualmente los niveles de agua son superficiales entre 1 y 4,0 metros.

En las partes bajas de las subcuencas de los ríos Khullu-Cachi, entre Pucarani, Batallas y la comunidad de Chipamayu, existen pozos surgentes cuyos niveles piezométricos sobrepasan la superficie del terreno en 0,55 a 0,65 metros, asimismo en las cercanías de la localidad de Laja en el pozo surgente P-45 (EHG-006), el nivel piezométrico alcanza una altura de 2,60 metros aproximadamente y al sur de Viacha en pozos exploratorios del proyecto NNUU/Geobol el nivel piezométrico alcanza la superficie del suelo o lo supera en pocos centímetros.

El acuífero de esta zona principalmente en su parte central está constituido por sedimentos detríticos sueltos de origen fluvial y glacio fluvial, compuestos de gravas, arenas y arcillas con espesores que alcanzan los 160 metros y hasta los 316 m con un espesor medio de 88 metros.

Los sedimentos lacustres se encuentran mayormente al oeste y al sur de la zona, intercalados con los sedimentos fluviales, conformando estratos confinantes que originan estados de artesianismos de la napa.

El modelo sedimentario de esta zona sigue una tendencia general decreciente de su granulometría desde la Cordillera Real hacia el oeste en la dirección del transporte de los sedimentos.

En la parte intermedia y alta de la zona principalmente en los abanicos aluviales existen napas libres o freáticas. Así en el área de influencia del río Seco, en el sector de Tilata ubicado entre El Alto y Viacha, con los 30 pozos perforados del Proyecto de Aguas subterráneas SAMAPA - El Alto, se ha determinado que la napa es predominantemente libre.

Con las curvas hidroisohipsas del mapa hidrogeológico, se establece que la napa de esta zona fluye en el sentido principal nor-este a sur-oeste con un gradiente hidráulico medio del 1%.

Las características hidrodinámicas del acuífero de esta zona han sido determinadas a partir de la interpretación de pruebas de bombeo de los pozos de los Proyectos NNUU/Geobol, Jica/El Alto e Ingavi.

En la subcuenca del río Khullu-Cachi, principalmente en su parte baja, con 12 pruebas de bombeo se ha determinado que la transmisibilidad (T) varía entre 30 y 355 m²/día, y el coeficiente de almacenamiento (s) entre $3,6 \times 10^{-10}$ y $1,9 \times 10^{-3}$.

En la subcuenca del río Seco la transmisibilidad (T) varía entre 69 y 190 m²/día con un valor medio de 124 m²/día, el coeficiente de almacenamiento (s) entre $1,2 \times 10^{-4}$ y $3,3 \times 10^{-3}$.

En la parte sur de Viacha, la transmisibilidad (T) varía entre 59 y 303 m²/día, con un valor medio de 291 m²/día, el coeficiente de almacenamiento (s) entre $2,3 \times 10^{-3}$ y 8×10^{-3} .

Los pozos de uso industrial ubicados principalmente alrededor de El Alto y en los ejes de desarrollo Industrial, carretera Panamericana, El Alto - Viacha y carretera a la ciudad de Oruro, dispone de electrobombas sumergibles con funcionamiento automático de acuerdo a las demandas de agua. La batería de pozos de SAMAPA - El Alto, ubicada en el sector de Tilata, entre El Alto y Viacha, está constituida por 30 pozos profundos, que son sometidos a explotación en 3 grupos y con una frecuencia de 3 veces por semana por grupo. Con estos pozos de SAMAPA se está explotando aproximadamente una masa anual menor de un millón de m³ (30 l/s). La estimación del caudal total que están explotando en la zona puede alcanzar a los 300 l/s.

En Viacha existe un proyecto de abastecimiento de agua cuya fuente la constituyen 2 pozos tubulares con un caudal promedio por pozo de 30 litros/segundo. Este proyecto próximamente entrará en funcionamiento, bajo la administración de SAMAPA.

Los recursos totales de la zona 11 son de difícil determinación pero considerando toda la sección paralela a la cordillera (75 Km), una transmisibilidad media de 1.10^{-3} y un gradiente de 1% se obtiene un flujo natural de 750 l/s. Valor elevado pero no tanto tomando en cuenta que en el área, con los pozos Samapa, se ha planificado explotar 300 l/s en una zona concéntrica y que las explotaciones actuales ya alcanzan los 300 l/s.

Una parte importante de los recursos se pierden en los bofedales de las zonas de estrechamiento que ponen en contacto hidráulico la zona 11 con la 12. Una parte llega al lago al oeste de Batallas y una parte vierte en la zona 12.

Cuenca Media y Baja de Catari Zona 12

La zona 12 comprende la parte media y baja del río Catari entre la Estancia Yampani que se encuentra al sur-este de la localidad de Viacha y el lago Titicaca. Esta zona se encuentra delimitada por el norte y nor-este con las subcuencas de los ríos Khullu-Cachi y río Seco; por el sur con la parte alta de la cuenca del río Catari, por el oeste y sur-oeste con las serranías paleozoicas impermeables que constituyen la divisoria con la subcuenca del río Tiwanacu.

Los terrenos acuíferos están encajonados entre lomas impermeables que muestran aberturas que ponen en contacto hidráulico diferentes zonas. Los relieves en sus flancos constituyen los límites laterales del acuífero. Durante períodos de agua alta la morfología de las isofreáticas tiene que ser muy diferente.

Las rocas más antiguas aflorantes en la zona, de edad paleozoica, son impermeables. Las rocas de edad terciaria que afloran al oeste, conformadas por intercalaciones de areniscas y lutitas, y un conjunto de conglomerados compuestos por clastos de rocas ígneas y sedimentarias con material arenoso, son poco o nada permeables.

Los sedimentos cuaternarios permeables ocupan la mayor extensión de la zona y están conformados por depósitos fluviales y lacustres, compuestos por arcillas, arenas y gravas. Los abanicos aluviales y coluvio-fluviales que se encuentran disectando las colinas con sustrato sedimentario, constituyen la zona de recarga de los acuíferos.

En esta zona se han inventariado 19 pozos de los cuales 9 son perforaciones profundas del proyecto NNUU/Geobol y 5 son pozos someros a tajo abierto.

Los pozos exploratorios alcanzan profundidades de 30 a 130 metros y los pozos someros no superan los 4 metros.

En la zona se distinguen los niveles piezométricos que corresponden a los pozos exploratorios que captan los acuíferos artesianos y los niveles de los pozos someros de poca profundidad que atraviesan los primeros metros del acuífero libre. Los niveles piezométricos en algunos sectores sobrepasan la superficie del suelo en 1 y 2 metros y los niveles freáticos se encuentran entre 1 y 2 metros debajo de la superficie del suelo.

Los controles periódicos efectuados en 2 puntos evidencian una leve disminución de la cota de los niveles piezométricos con una disminución de los caudales surgentes. Los niveles freáticos, acusaron también una tendencia de descenso con una variación de 0,53 y 0,23 metros en el sector medio y bajo de la zona.

Con las perforaciones exploratorias se ha determinado la presencia de acuíferos con dos niveles de artesianismo. Un acuífero profundo que corresponde a una formación de arenisca terciaria y el otro superficial a sedimentos cuaternarios recientes.

Se encuentra también un acuífero con napas libres en los depósitos cuaternarios recientes.

Las curvas hidroisohipsas de esta zona muestran que la napa fluye en el sentido sur-oeste a nor-este, con un gradiente hidráulico de 0,6% hacia su nivel de base constituido por el lago Titicaca.

En la parte baja el débil gradiente de escurrimiento de la napa, la topografía más o menos plana y las características litológicas del acuífero propician zonas con un nivel freático cercano a la superficie del suelo, en donde se producen pérdidas considerables por evapotranspiración (bofedales).

Los acuíferos artesianos están, posiblemente, cerrados con contactos hidráulicos complejos con el lago Titicaca.

En la parte norte de la zona el acuífero artesiano en la formación de arenisca terciaria tiene una transmisibilidad de $469 \text{ m}^2/\text{día}$ y un coeficiente de almacenamiento de $2,7 \times 10^{-7}$.

En base a la transmisibilidad del acuífero, ($469 \text{ m}^2/\text{día}$), al gradiente hidráulico medio ($i = 0,6\%$) y el ancho de 8,500 metros de la sección de flujo natural, se ha determinado un caudal subterráneo de alimentación al lago Titicaca de 31 litros aproximadamente.

En esta zona la explotación del agua subterránea es poco significativa por cuanto no existen pozos perforados con fines de abastecimiento de agua; solamente algunos pozos exploratorios surgentes son utilizados con fines de uso doméstico y riego, pero los caudales son muy bajos del orden de 1 litro por segundo, como ocurre en la Comunidad Ilata Centro al este de la localidad de Viacha. Con los pozos someros la explotación es muy baja por no disponer de equipos de bombeo.

Sub cuenca del río Tiwanacu Zona 13

La zona 13 comprende la subcuenca del río Tiwanacu que se encuentra ubicada entre las localidades de Tiwanacu y Guaqui. La zona está delimitada por las serranías de rocas terciarias impermeables y el lago Titicaca por la parte occidental.

Delimitando la zona se encuentran colinas con sustrato sedimentario predominantemente, con formas redondeadas y también irregulares con pendientes variables. Los depósitos aluviales se encuentran distribuidos en gran parte de esta zona. Existen depósitos de pie de monte en las proximidades de las colinas que bordean la zona en sus flancos norte y sur. Existen también zonas inundables en la parte baja.

Los sedimentos cuaternarios ocupan la mayor parte de la zona y están constituidos por depósitos de origen lacustre, fluvio-lacustre y fluvial.

En esta zona se han inventariado 12 fuentes de aguas subterráneas de las cuales 6 son pozos perforados, 5 pozos someros y un manantial.

Los pozos exploratorios alcanzan profundidades de 81 a 128 metros y los pozos someros entre 3 y 5 metros.

Existe un manantial en la parte alta de la zona, en una colina sedimentaria que constituye uno de los límites laterales del acuífero.

En esta zona se efectuaron mediciones periódicas en 3 pozos someros en un pozo profundo artesiano y también en un manantial.

En los pozos someros que captan los primeros niveles del acuífero, el nivel del agua en reposo se encuentra entre 1 y 2 metros. En el pozo artesiano el nivel piezométrico alcanza la superficie del suelo.

En los pozos someros, los niveles de agua evolucionaron en el período de control con una tendencia general de descenso; siendo la variación de 0,25 a 0,74 metros.

El acuífero está constituido por depósitos cuaternarios de origen lacustre y fluvial, con espesores variables e importantes, principalmente en la parte central de la zona. En el acuífero predominan los sedimentos arcillosos de origen lacustre con intercalaciones de arenas y gravas de origen fluvial.

Los resultados de las perforaciones exploratorias del proyecto NNUU/Geobol, evidencian la existencia de una napa acuífera a presión. El artesianismo proviene de un acuífero localizado a una profundidad de 40 metros.

La napa fluye en el sentido de este a oeste aproximadamente, hacia su nivel de base, el lago Titicaca, con un gradiente medio del 2,4%.

Con pruebas de flujo en tres pozos se ha determinado que la transmisibilidad del acuífero varía entre 133 y 252 m²/día ($1,5 \times 10^{-3}$ y $2,9 \times 10^{-3}$ m²/seg); el coeficiente de almacenamiento determinado en una prueba es del orden de $3,7 \times 10^{-5}$.

Los valores señalados confirman las características sedimentológicas del acuífero y el tipo de napa (artésiana).

Considerando una transmisibilidad del acuífero de 252 m²/día ($2,9 \times 10^{-3}$ m²/s) que es el valor máximo de la zona, un gradiente hidráulico de 0,2% y una longitud de la sección natural del acuífero de 15.000 metros, se obtiene un caudal natural de alimentación al lago de 60-70 litros por segundo.

En la actualidad la explotación de agua subterránea es poco significativa, por cuanto existen solamente pozos perforados exploratorios del proyecto NNUU/Geobol y pozos someros de poca profundidad, mayormente sin equipo de bombeo, con los cuales se extraen reducidos volúmenes de agua subterránea. En toda la zona el único pozo somero equipado pertenece a la granja Juan Pablo II (P-32/EHG-006).

Cuenca media del río Desaguadero-Margen izquierda Zona 14

Esta zona comprende la depresión encajonada entre las estribaciones de la Cordillera Oriental y los relieves terciarios impermeables, que ocupan la parte central del altiplano. Está ubicada a lo largo de la carretera que une las ciudades de La Paz y Oruro.

En la zona se inventariaron 3 pozos perforados, 60 pozos someros y 11 manantiales surgentes de agua.

En el último tramo comprendido entre Puente Japonés y La Joya, el flujo de la circulación hídrica se dirige desde los relieves, donde posiblemente están las zonas de recarga, hasta la pampa al norte del río Desaguadero.

El gradiente medio de la napa es de 0,6%. La transmisibilidad media estimada es de $1,10^{-3}$ m²/s y el caudal natural que proviene de la sección norte se estima en 90 l/s aproximadamente, que probablemente se pierden por evaporación antes de llegar al Desaguadero.

En la zona situada al este el flujo es más débil de 10-15 l/s, el cual también se pierde por evaporación en la pampa.

Subcuenca del río Jacha Jahuira Zona 15

Es una zona de escaso interés hidrogeológico ubicada en la cuenca del río Jacha Jahuira (Jesús de Machaca).

Existen pozos someros y manantiales de rendimiento muy bajo con un flujo subterráneo que alimenta al Desaguadero con un caudal posiblemente de 10-15 l/s.

El acuífero está limitado por los afloramientos terciarios al este y el Desaguadero al oeste.

Cuenca alta del río Desaguadero-Margen izquierda Zona 16

En la margen izquierda también se está en una situación de escaso interés hidrogeológico con flujo débil (decenas de litros/s) y napa freática de espesor limitado entre las terrazas cuaternarias.

En la margen derecha del Desaguadero, entre este río y el Mauri, la circulación hídrica es muy escasa y colgada sobre sedimentos terciarios impermeables.

5.2.7. Hoja Nº 7

La hoja comprende solamente una parte de montaña donde se inventariaron 2 manantiales y 4 pozos someros en pequeños valles cuaternarios. El interés hidrogeológico de las área es muy escaso.

5.2.8. Hoja Nº 8

En la hoja no se inventariaron puntos de agua. La hoja comprende valles intramontanosos cuaternarios que constituyen acuíferos colgados que almacenan agua y la restituyen con retraso a la red hidrográfica.

5.2.9. Hoja Nº 9

Cuenca media del río Desaguadero Zona 17

En la hoja 9 se individualiza una sola zona de interés hidrogeológico, localizada entre el Desaguadero y la Cordillera Occidental.

En la zona se inventariaron 46 puntos de agua (7 perforaciones y 39 pozos someros) con los cuales se reconstruyó una napa freática con flujo desde NO a SE y gradiente de 0,05% con niveles muy próximos a la superficie topográfica. La napa aflora a continuación con pérdidas por evaporación y consiguiente salinización del agua.

La alimentación puede ser directa (por las escasas lluvias), y en parte, indirecta proveniente de los relieves de la cordillera.

La transmisibilidad del acuífero es del orden de 16 a 35 m²/día, ($1,8 \times 10^{-4}$ a $4,4 \times 10^{-4}$ m²/seg); sin embargo localmente se ha obtenido un valor más alto de 1,555 m²/día ($1,8 \times 10^{-2}$ m²/seg).

Con los escasos datos de estatigrafía y de transmisibilidad se puede decir que la napa tiene un caudal general de pocos litros por segundo.

5.2.10 Hoja N° 10

Sector Oruro Zona 18

La zona 18 comprende una planicie al norte de la ciudad de Oruro, que se encuentra disectada por las subcuencas de los ríos Caracollo, Legue Palca y Paria. Esta zona pertenece a la cuenca principal Coipasa - Poopó -Oruro.

La planicie está delimitada al este por montañas de sustrato sedimentario. Al pie de las montañas se encuentran acumulaciones detríticas fluvio-glaciales.

La llanura fluvio lacustre deposicional está compuesta por sedimentos cuaternarios poco o no consolidados; depósitos eólicos y en menor proporción, terrazas fluvio lacustres. La porción superior de la planicie es muy poco permeable e inundable.

En esta zona se han inventariado un total de 40 fuentes de aguas subterráneas, de los cuales 4 son pozos someros con profundidades de 6 a 12 metros, 35 pozos perforados de 26 a 125 metros y un manantial.

Existen pozos perforados con fines de investigación hidrogeológica y pozos definitivos para el abastecimiento de agua de la ciudad de Oruro.

Se controlaron niveles en un total de 8 pozos.

En los pozos someros de la subcuenca del río Caracollo el nivel del agua en reposo, se encuentra entre 3,50 y 11,0 m de profundidad. En las perforaciones sin uso, de carácter exploratorio, los niveles de agua medidos, probablemente corresponden a los acuíferos bajo presión en algunos lugares levemente surgentes y en otros debajo de la superficie del terreno. Los niveles piezométricos surgentes se evidenciaron al norte del campo de pozos de la ciudad de Oruro en el pozo P-27, en donde la surgencia natural alcanzó 0,20 metros sobre la superficie del terreno. En los otros lugares de control, en las inmediaciones del aeropuerto de Oruro, los niveles de agua se encuentran entre 1,50 y 2,20 metros aproximadamente por debajo del suelo.

En la época de la realización de las perforación todos los pozos eran surgentes.

En el período de control los niveles de agua fluctuaron entre 0,03 a 0,26 m.

Con las perforaciones exploratorias y definitivas de explotación se han definido las características litológicas de los acuíferos existentes en el relleno cuaternario. Aproximadamente a 6 Kms hacia el nor-este de la ciudad de Oruro, el acuífero tiene un espesor de 60 a 65 metros, existiendo un acuífero libre entre 2 y 15 metros de profundidad, más abajo se encuentra una capa de arcilla impermeables de 3 metros que constituye el techo de un primer acuífero artesiano entre 18 y 28 metros y en su parte inferior entre 40 y 52 metros se encuentra el segundo acuífero artesiano.

Al norte de la ciudad de Oruro, el basamento rocoso se encuentra a una profundidad de 125 metros.

El acuífero confinado se encuentra entre 65 y 80 metros.

En la parte sur de la zona, al este de la ciudad de Oruro, el acuífero aprovechable se encuentra entre los 20 y 38 metros de profundidad, en un relleno cuaternario, investigado hasta los 113 metros. En este sector no se encontró el basamento rocoso.

La napa fluye en el sentido general del nor-este a sur-oeste hacia su nivel de base constituido por, los lagos Uru-Uru y Poopó, con un gradiente hidráulico medio de 0,1%.

Con los resultados de pruebas de bombeo y de flujo, se ha determinado que al norte de la ciudad de Oruro la transmisibilidad del acuífero es de $122 \text{ m}^2/\text{día}$ ($1.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$), con un coeficiente de almacenamiento de $1,3 \times 10^{-2}$, al sur-este de Oruro la transmisibilidad varía entre 4 y $183 \text{ m}^2/\text{día}$ y el coeficiente de almacenamiento entre $2,5 \times 10^{-6}$ y $2,9 \times 10^{-4}$. En un relleno cuaternario de una pequeña subcuenca del río Pallka Mayu al este de Oruro la transmisibilidad es $0,37 \text{ m}^2/\text{día}$ con un coeficiente de almacenamiento de $4,1 \times 10^{-2}$ que corresponde a un acuífero libre.

Con los parámetros encontrados se puede deducir que el flujo natural del conjunto de las napas artesianas es de pocas decenas de litros por segundo.

La mayor explotación de las aguas subterráneas de esta zona, corresponde a los pozos de agua potable de la ciudad de Oruro que se encuentra ubicado al norte de la ciudad en Challapampita y Calacaja. Con estos pozos se extrae un caudal total aproximado de 200 litros por segundo, con un régimen de bombeo continuo; estimándose una masa anual de 6.300.000 m³/año. (200 l/s aproximadamente).

El flujo natural de las napas explotables es inferior al caudal extraído y es posible que con la explotación actual se estén extrayendo aguas fósiles (reservas geológicas). En un trabajo del 1989 (Estudio hidrológico en las subcuencas Oruro-Caracollo del Ing. J.S. Delgado) se determinó que el agua subterránea tenía edades de 10.000 años.

Es posible que con los bombeos se deprima la napa y aumente la recarga que tendría que verificarse en las zonas de pie de monte de la cordillera.

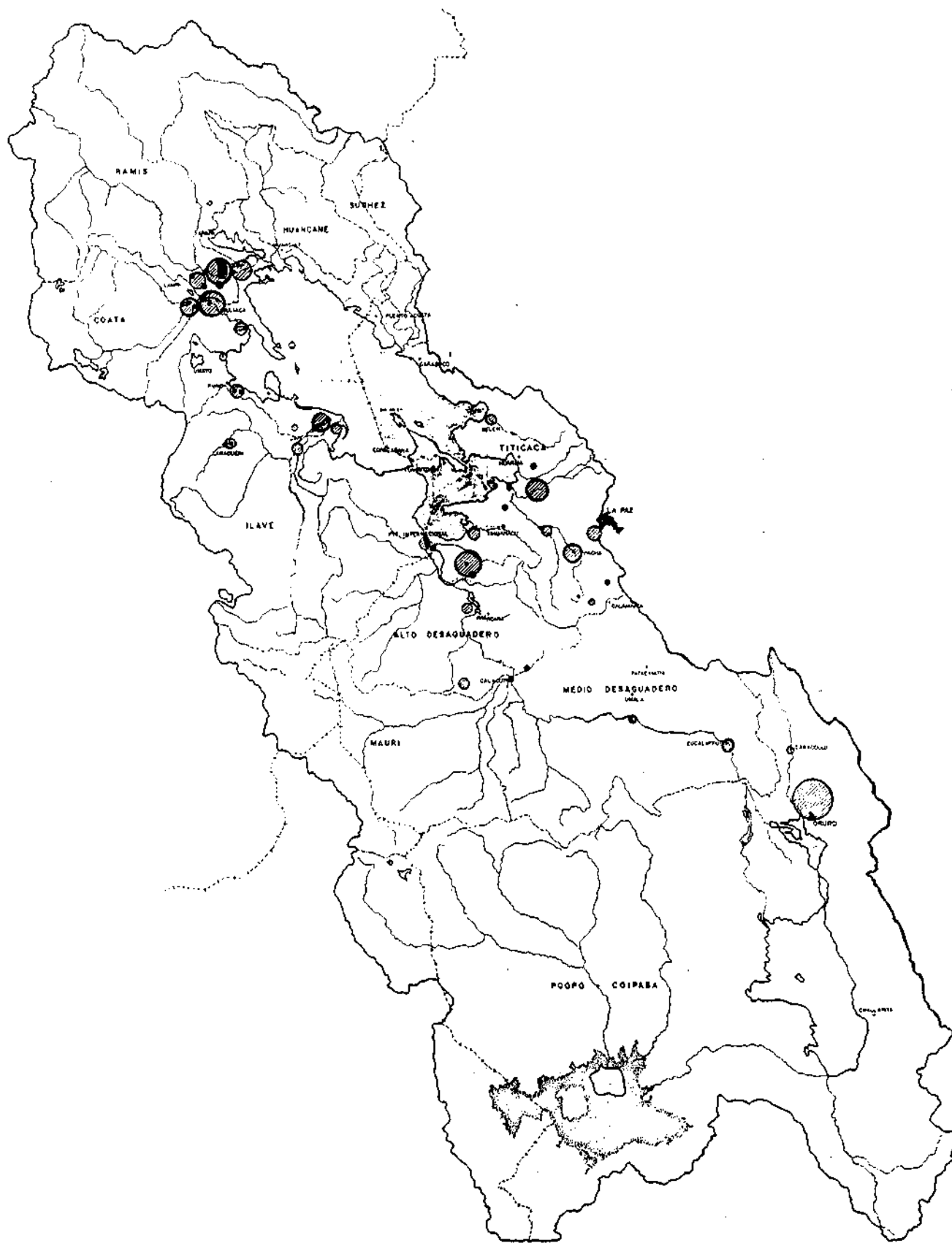
5.2.11 Hoja N° 11

En la hoja no se inventariaron puntos de agua. Es la zona más seca de todo el sistema con acuíferos pobres y salinizados.

5.2.12 Hoja N° 12

De la hoja 12 interesa la parte meridional de la cuenca endorreica del sistema T.D.P.S. con la parte sur del lago Poopó y su vertiente oriental. Se inventariaron 5 puntos de agua que permiten reconstruir un flujo desde la cordillera hacia el lago. Las aguas son de pésima calidad.

FIG. 5.1 UBICACION DE LAS AREAS BAJO CONTROL DE ACUIFEROS DEL SISTEMA T.D.P.S.



SECCIONES DE POZOS DE CONTROL NIVELADOS

FIGURA 5.2

A - A'

SECCION POZOS 86 - 88 - 91 RIO COATA

ESC. 1 : 100 000

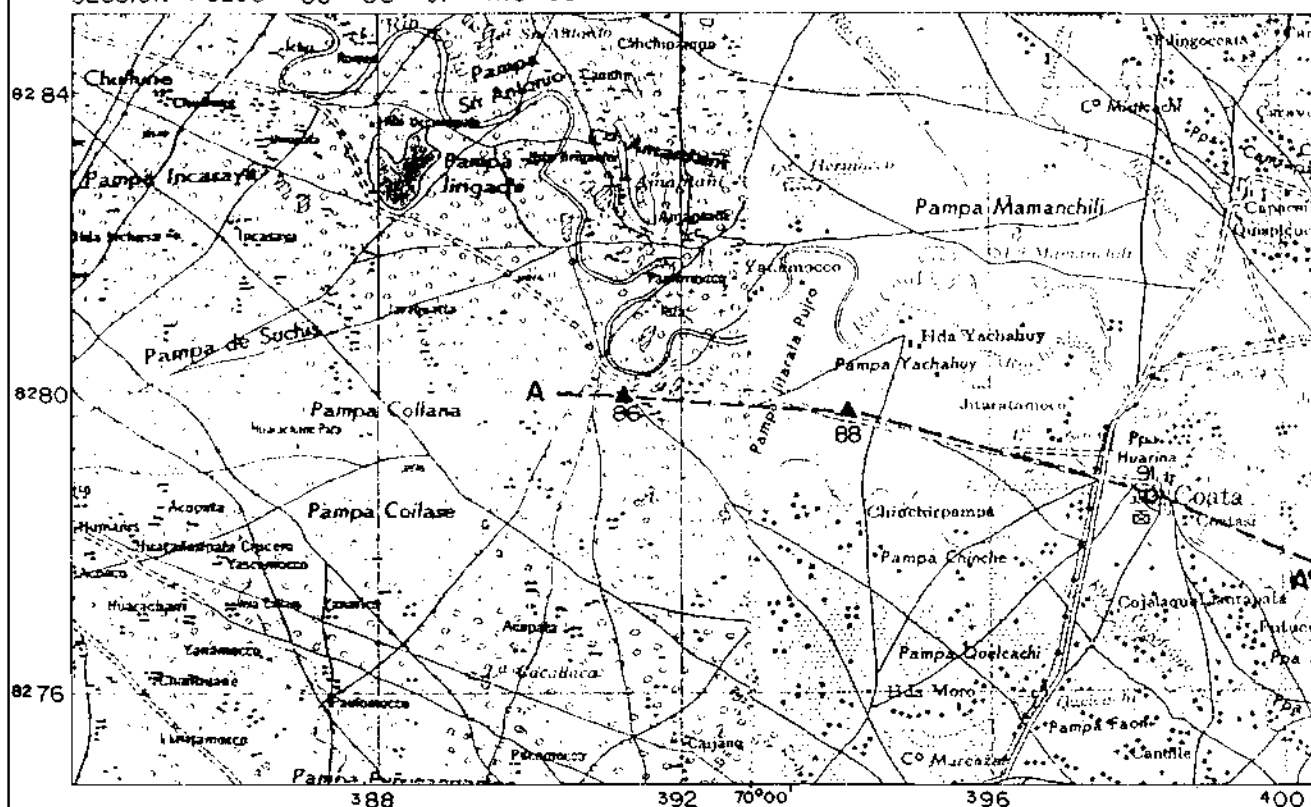
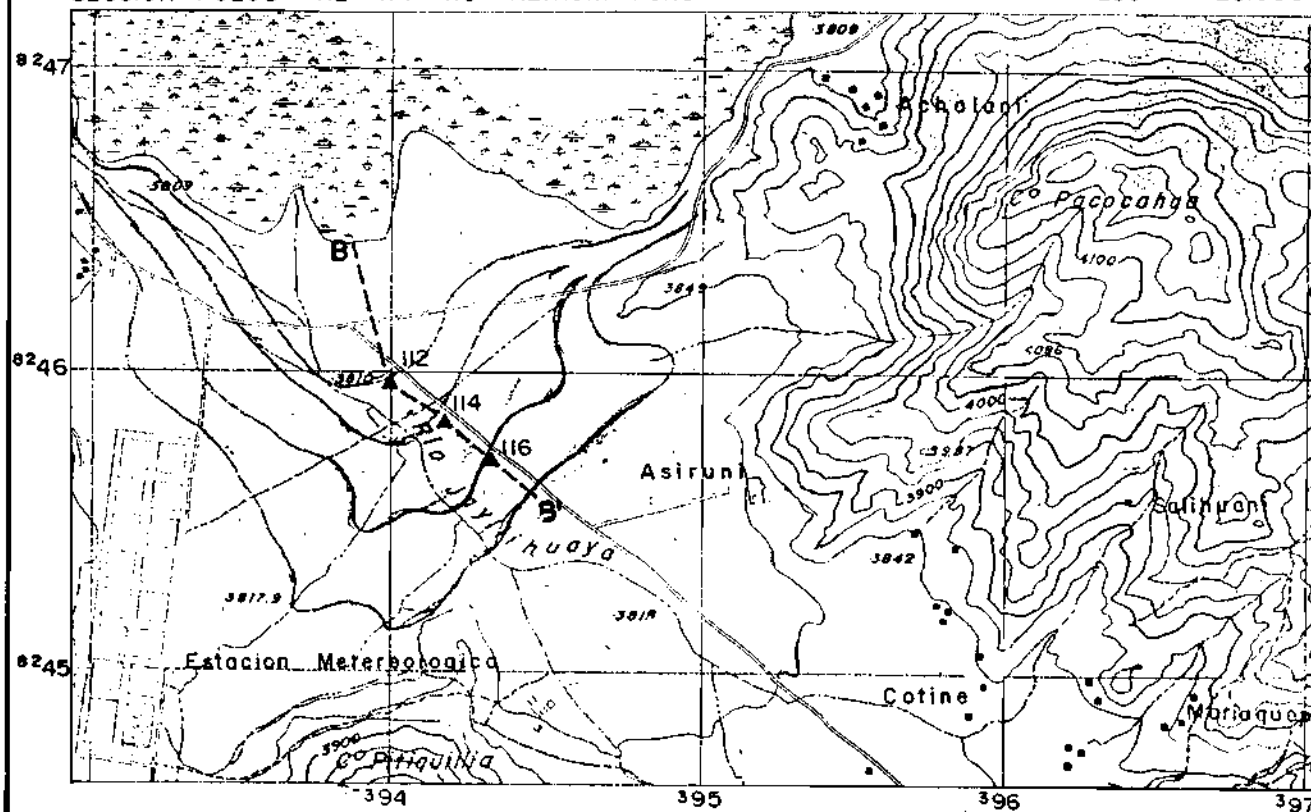


FIGURA 5.3

B - B'

SECCION POZOS : 112 - 114 - 116 AZIRUNI PUNO

ESC. 1 : 25 000



SECCION POZOS : 23 - 24 - 27 RIO ILAVE C - C'
SECCION POZOS : 10 - 11 - 12 - 15 - 17 RIO ILAVE



E - E'
SECCION POZOS : 6 - 7 - 8 RIO DESAGUADERO

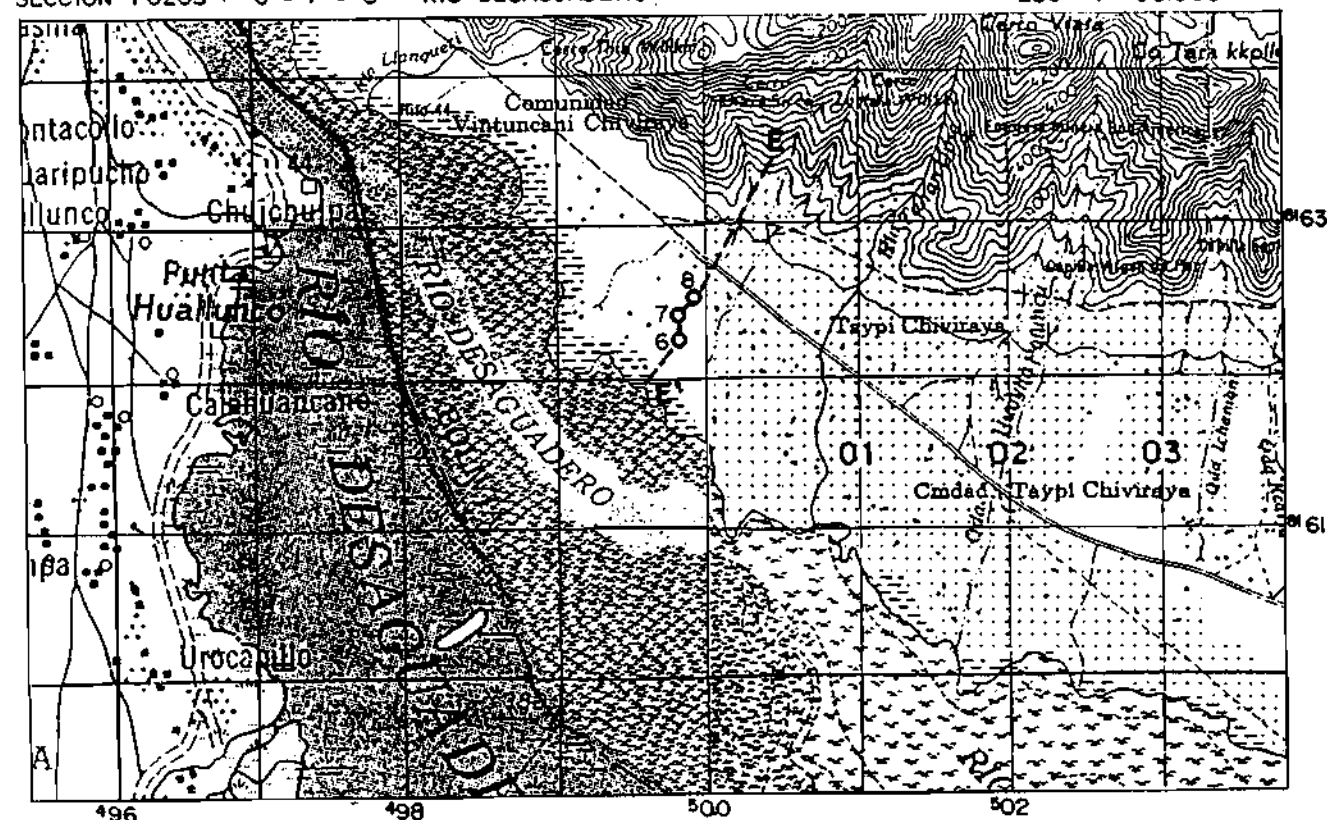


FIGURA 5.6 HIDROGRAMA DEL POZO P - 69 HOJA 6 BOL.
(WB - 13) SAMAPA - EL ALTO

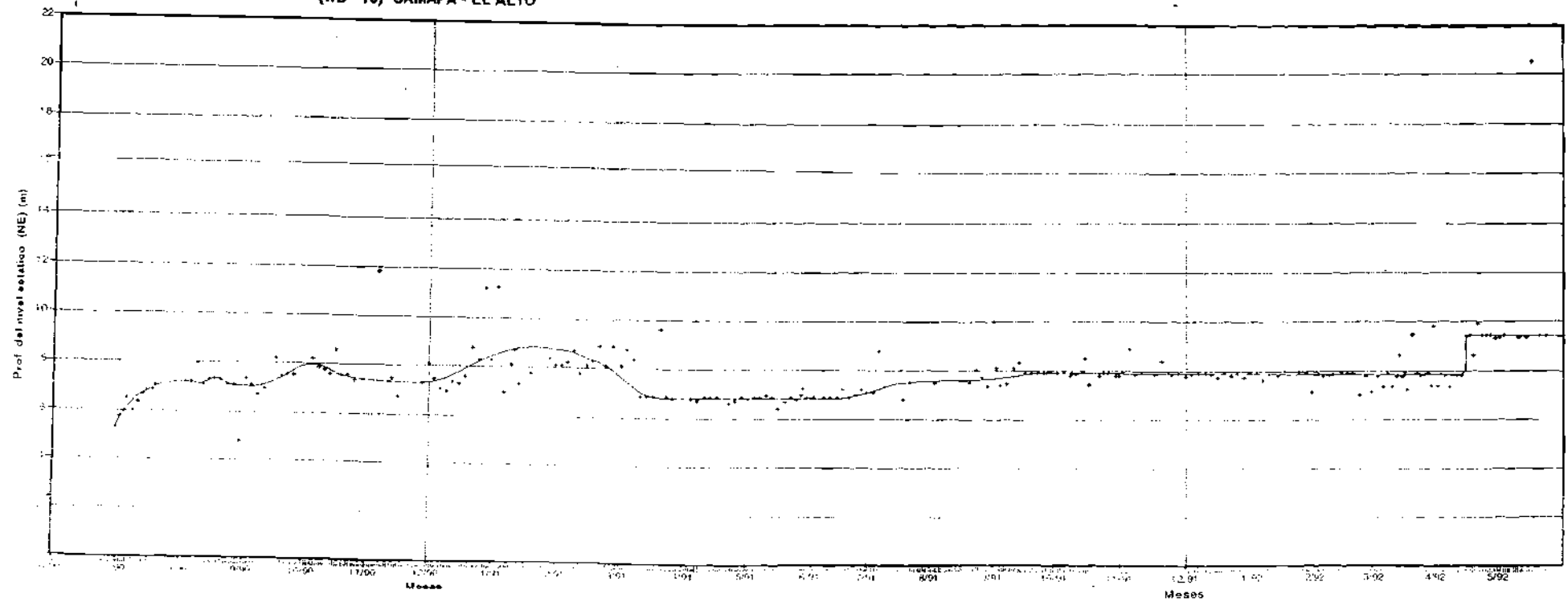


FIGURA 5.7 HIDROGRAMA DEL POZO P - 67 HOJA 6 BOL
(Wb - 14) SAMAPA - EL ALTO

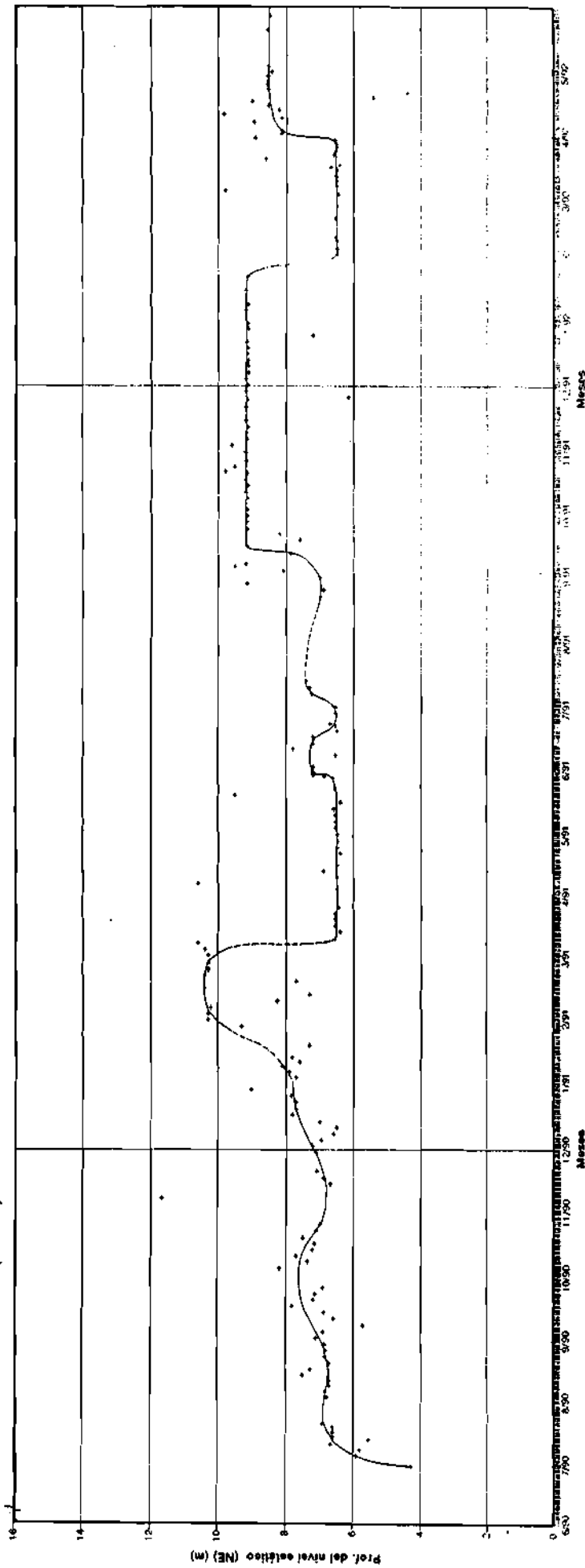


FIGURA 5.8 HIDROGRAMA DEL POZO P - 94 HOJA 6 BOL
(Wb - 2) SAMAPA - EL ALTO

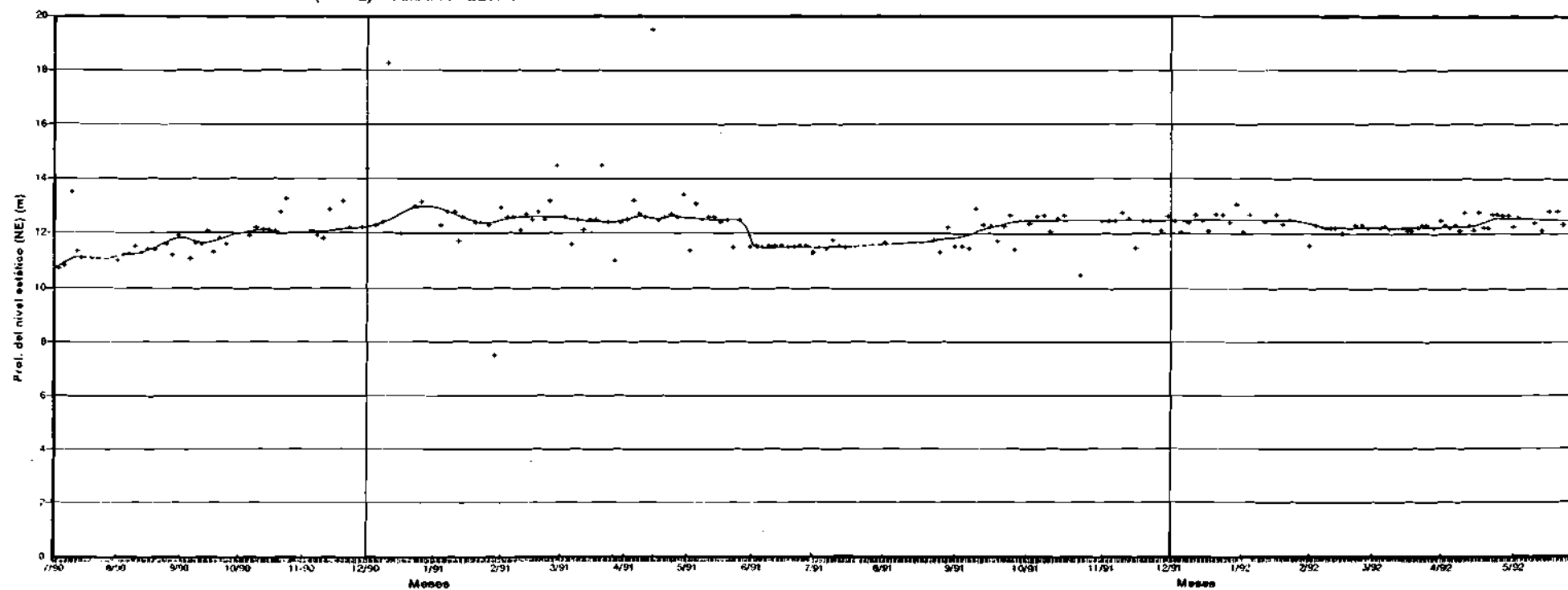


FIGURA 5/9

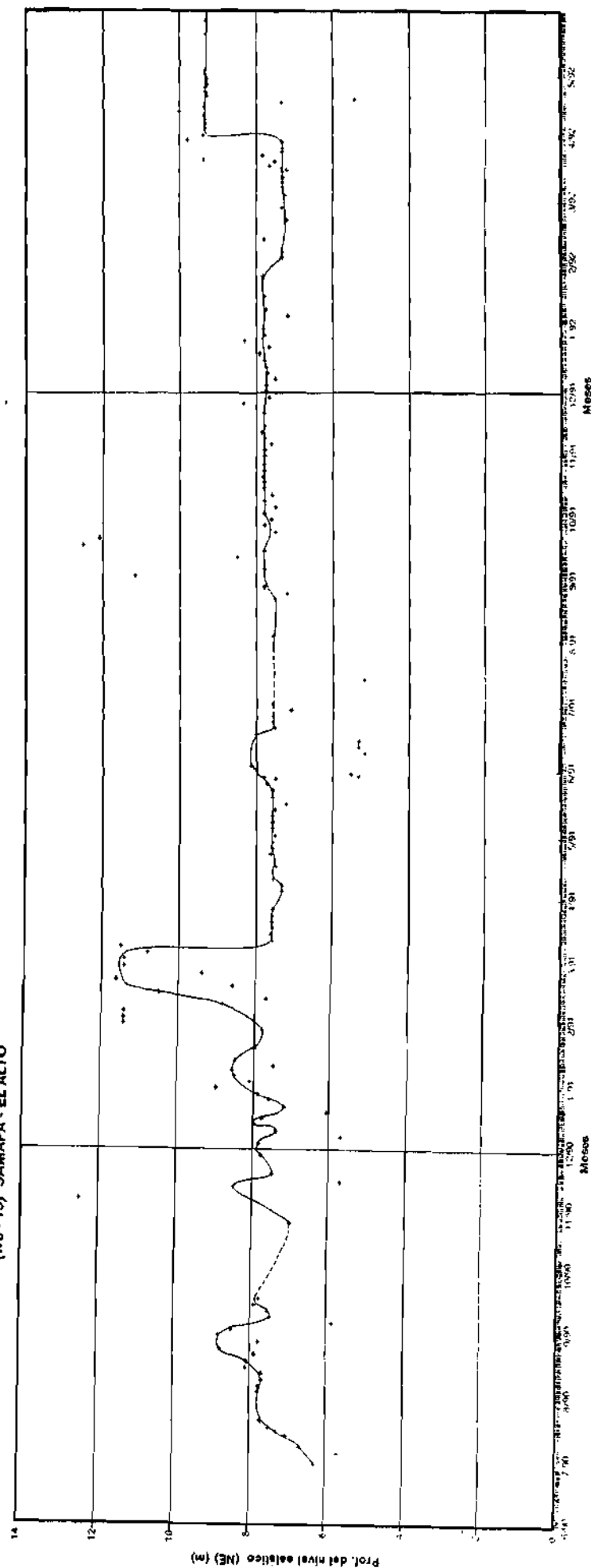


FIGURA 5/10 HIDROGRAMA DEL POZO P - 76 HOJA 6 BOL
(WB - 10) SAMAPA - EL ALTO

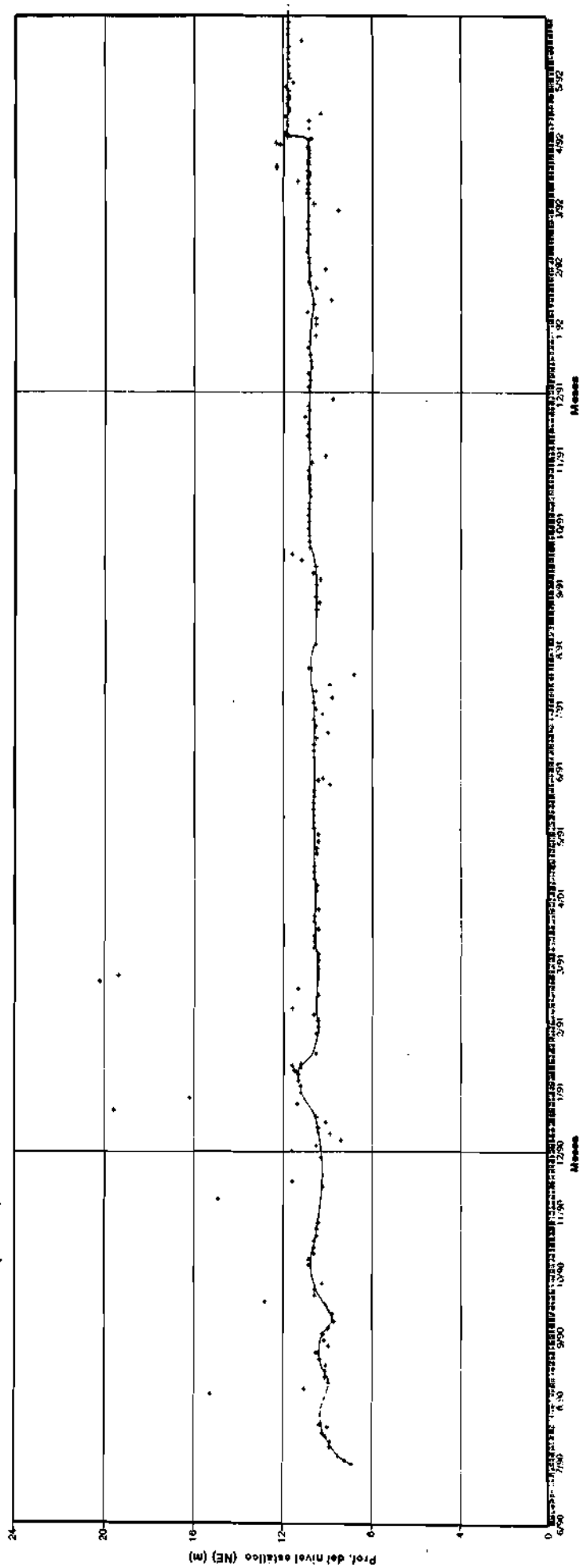


FIGURA 5.11

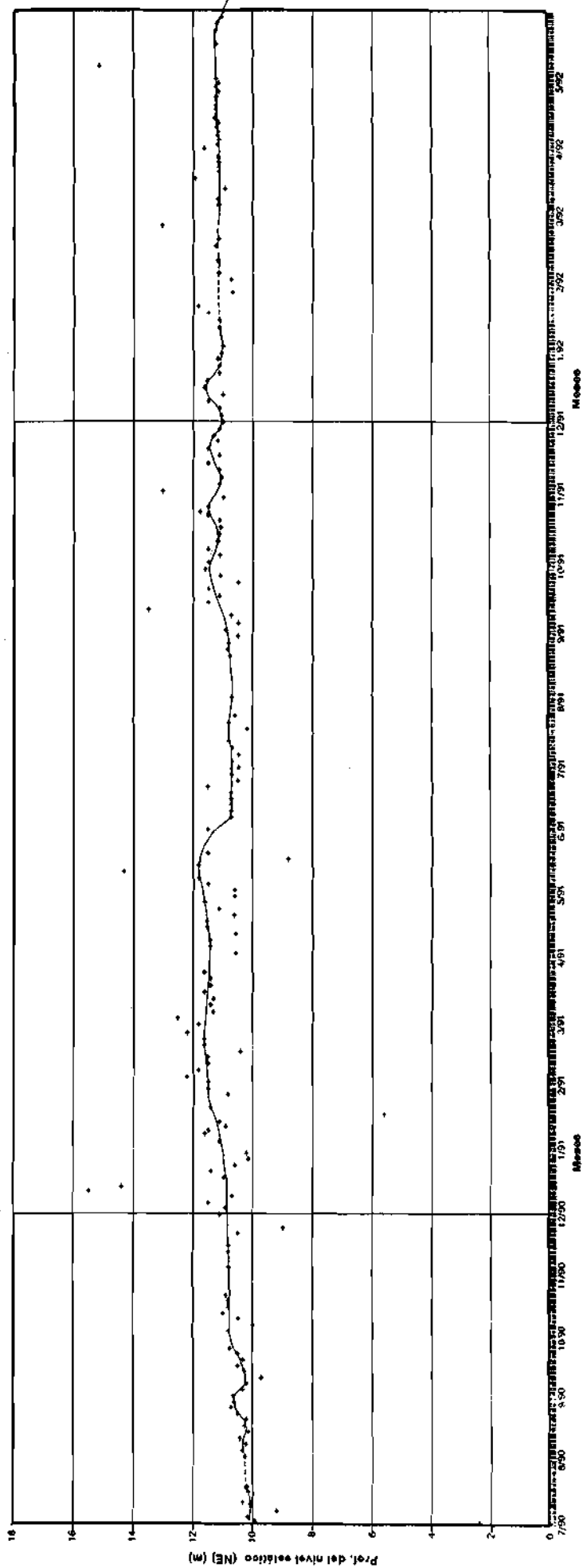
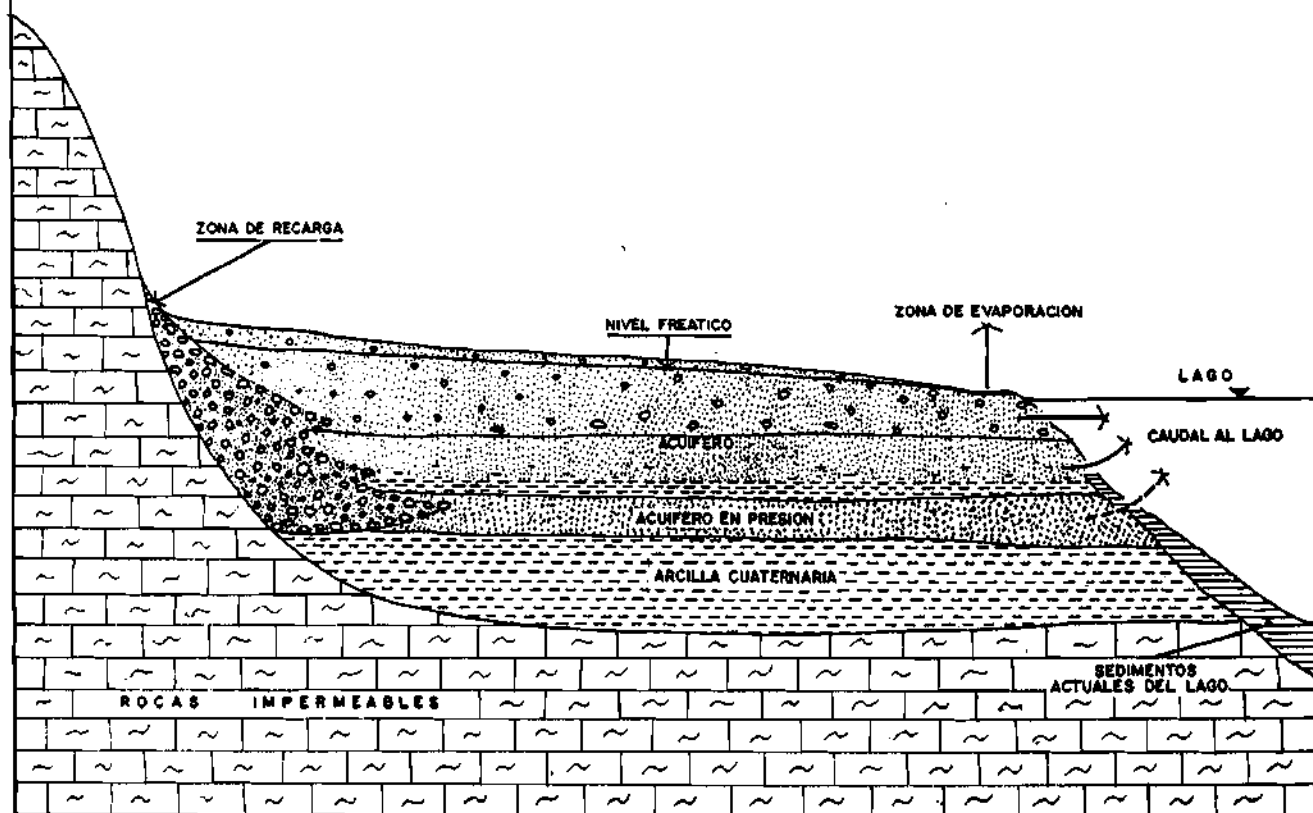


FIGURA 5J2 ESQUEMA HIDROGEOLOGICO DE LAS CUENCAS



CONCLUSIONES

Sobre la base de lo anotado en los párrafos previos, se pueden sacar conclusiones de carácter hidrogeológico, relativas al conjunto del sistema T.D.P.S., siempre tomando en cuenta la escala del proyecto y su representación.

- Los terrenos del Paleozoico y del Mesozoico, e incluso gran parte de los elementos del Terciario, pueden ser considerados poco o nada permeables, a excepción de zonas muy fracturadas, donde pueden crearse circulaciones hídricas localizadas y colgadas, cuya importancia es normalmente escasa para la evaluación general de los recursos, a pesar de que es determinante para algunos problemas locales. Los elementos volcánicos, presentes en la parte occidental de la cuenca (Cordillera Occidental), muestran una permeabilidad discontinua por porosidad, con diafragmas impermeables y constituyen acuíferos localizados y colgados, además de que representan la única fuente de aprovechamiento con obras de captación cuyos caudales van desde algunos litros por segundo hasta varias decenas de l/s.
- Los únicos acuíferos importantes se encuentran en los valles cuaternarios cercanos a la red hidrográfica. Se individualizaron 18 zonas de interés hidrogeológico que en el conjunto representan un porcentaje reducido de la superficie total de la cuenca T.D.P.S.
- Las fuentes de recarga de los acuíferos están casi exclusivamente localizadas en las zonas pedemontanas donde se encuentran los componenets más gruesos (de origen fluvio-glaciar) de los depósitos continentales. Es en estas zonas donde, conforme a la intensidad de la lluvia, llega la escorrentía superficial y se origina la infiltración que en el norte de la cuenca puede llegar a ser muy fuerte. En la llanura de la puna la permeabilidad superficial es muy baja y se puede pensar que la posibilidad de recarga esté localizada solamente en zonas particulares, donde el manto superficial arcilloso lacustre no está presente. En la parte meridional de la cuenca la recarga es más débil y se concentra en las zonas pedemontanas de la Cordillera Oriental, de particular interés en la región de Oruro. Más

al sur y al oeste, zona del Salar de Coipasa, la recarga es muy débil, debido al déficit de lluvia que se verifica casi exclusivamente en las zonas altas, donde hay una intensidad de lluvia y quizás de nieve, un poco más fuerte que en la zona de llanura.

En la Cordillera Occidental, en áreas volcánicas, hay una infiltración suplementaria que se verifica en los valles intramontañosos que determina bofedales y/o manantiales con agua que regresa después a la red hidrográfica superficial.

- Proporcionalmente a la intensidad de lluvia, el agua de infiltración entra en las formaciones porosas de las series continentales cuaternarias y se subdivide en varios acuíferos superpuestos, de los cuales son freáticos los superiores y artesianos los inferiores. Dado que los depósitos cuaternarios, posiblemente acuíferos, se presentan encajonados, como depósitos fluvio-glaciares entre laderas de las lomas terciarias y mesopaleozoicas impermeables, las napas freáticas y artesianas son completamente independientes, siendo el nivel de las napas artesianas siempre más alto del de las napas freáticas.
- La reconstrucción de las hidroisohipsas presenta algunas dificultades que es necesario poner en evidencia. En primer lugar existen dificultades para establecer la cota exacta del punto de agua; en segundo lugar, muchas veces los pozos captan dos o más acuíferos que, como sabemos, tienen niveles estáticos diferentes: el nivel que se mide en una perforación es la resultante de los diferentes niveles con cota más cercana al nivel del horizonte de transmisibilidad más alta. A pesar de estas imprecisiones, en los valles más importantes, se pueden reconstruir curvas hidroisohipsas con dirección de flujo muy clara. Los mapas evidencian las áreas donde se puede individualizar una napa definida.
- Desde el punto de vista de las relaciones entre las aguas subterráneas y el sistema hídrico superficial (lagos y Desaguadero), en las áreas, donde fue posible reconstruir las hidroisohipsas, se ve muy claramente que la dirección de los flujos es siempre hacia el sistema hídrico superficial. El agua subterránea de la napa

freática alimenta el sistema superficial en todas las zonas donde hay un flujo. A lo largo del lago Titicaca y también del Desaguadero, el flujo subterráneo que realmente llega al sistema hídrico superficial es limitado en razón de la baja transmisibilidad y del bajo gradiente. Además una parte del flujo de la napa freática, obligado a ascender para verter en el lago, llega a la superficie topográfica y en gran parte se pierde por evaporación. Las napas artesianas también tienen una dirección de flujo hacia el sistema hídrico superficial, pero es posible que los acuíferos tengan una conformación a "pinch out" (pico de flauta) y que sean cerrados o muy aguzados, sin contactos hidráulicos o, en todo caso, muy complejos y, por lo tanto, contribuyen escasamente al sistema superficial.

- Corolario de los puntos antecedentes es que ni el lago Titicaca ni el Desaguadero tienen posibilidad de fuga de agua y, por lo tanto, se puede considerar que el sistema superficial sea totalmente cerrado y sin ninguna pérdida hacia afuera. En el pasado el tema de las fugas fue objeto de largas discusiones. Con las supuestas fugas subterráneas se explicaba el déficit de balance hídrico del lago Titicaca que resultaba de cálculos hechos asumiendo parámetros de evaporación y evapotranspiración aproximados y valores de los caudales, en entrada al sistema, también estimados. La geología y la hidrogeología de la cuenca del Titicaca indican que el lecho del lago está compuesto de un material aluvial que va de grueso a muy fino, con espesor muy alto y permeabilidad prácticamente nula. Las paredes del lago están constituidas por formaciones precuaternarias impermeables y las únicas zonas de permeabilidad son los valles rellenos de aluviones que están saturados por agua cuya dirección de flujo va hacia el lago. Podrían existir zonas fisuradas dentro de las cuales podría crearse un flujo de fuga. Los datos recopilados obligan a descartar esta hipótesis además porque las fisuras nunca se presentan abiertas y mucho menos sin colmatar a profundidades superiores a los 50-100 metros. En conclusión, se puede afirmar que la idea de un flujo desde el lago hacia afuera es mera especulación geológica.

Tal vez diferente es el comportamiento del Lago, de los ríos y del Desaguadero que en correspondencia de períodos de nivel de agua muy alta pueden transformarse de sistemas drenantes en sistemas alimentantes de las napas, con posible inversión temporal de las direcciones del flujo subterráneo en tramos de longitud limitada.

- Desde un punto de vista cualitativo, el informe de hidroquímica toma en cuenta todos los aspectos de las diferencias químicas de las aguas superficiales y subterráneas de la cuenca. Como consideración general se puede decir que la calidad del agua es función directa del volumen de lluvias; cuanto más abundante es la lluvia menor es la carga de sales disueltas y, en consecuencia, dada la diferencia de clima entre el norte y el sur, hay un progresivo aumento de la conducibilidad eléctrica (salinidad) desde el norte hacia el sur. La calidad del agua cambia también porque conforme disminuye la lluvia aumenta el efecto de la evaporación.

Otro factor que influye directamente en la salinización del agua son las características de las rocas dentro de o sobre las que se mueve el agua. En las formaciones terciarias y cuaternarias no son raros terrenos evaporíticos, con yeso y sal, que pueden transferir una importante mineralización al agua.

- Para establecer la cantidad de los recursos hídricos de la región se han aplicado los métodos clásicos de la hidrogeología utilizados para estimar los recursos hoja por hoja. El volumen total de agua subterránea que pasa al sistema superficial alcanza algunos m³/s. La utilización actual es muy reducida y existen decenas de perforaciones entubadas, no utilizadas, que podrían resolver problemas de abastecimiento humano, pecuaria y de riego. Gran parte de los recursos subterráneos se pierde por evaporación o confluye en el sistema superficial.
- Las áreas más interesantes para la explotación de los recursos subterráneos se encuentran a lo largo de las cordilleras y a distancia reducida de estas, en las zonas pedemontanas donde hay recarga, evaporación mínima y sedimentos de granulometría más gruesa. De gran interés son

las napas artesianas que, en base a las investigaciones realizadas, resultan separadas de las napas freáticas, no contaminadas y alimentadas por las morrenas pedemontanas. Una ulterior explotación de estas napas podría disminuir el escurrimiento superficial, aumentar la infiltración (recarga forzada) y reducir la evaporación.

- La posibilidad de uso del agua desde un punto de vista cualitativo y cuantitativo es muy amplia, pero una concentración de las explotaciones, como por ejemplo en El Alto o en Oruro, puede ser muy peligrosa, y la explotación tiene que efectuarse bajo un control continuo en el sentido de que en estas zonas ya los bombeos actuales están superando posiblemente la cantidad de la recarga y explotando recursos geológicos no renovables. Los caudales de los recursos que se indican en los mapas hidrogeológicos deben ser tomados en cuenta en cualquier plan o programa de desarrollo agrícola, industrial o de agua potable que se quiera llevar a cabo. Estos caudales pueden ser superados, bajo control, esperando que se estimule un incremento de recarga y una disminución de evaporación.
- Con las investigaciones de carácter hidrogeológico en la cuenca hidrográfica del Altiplano boliviano-peruano, se ha podido constatar la existencia de numerosas manifestaciones hidrotermales, localizadas principalmente a lo largo del flanco oriental de la cuenca, en la base de la Cordillera Oriental. En la Cordillera Occidental a pesar de una intensa actividad volcánica reciente, las manifestaciones termales son escasas y ubicadas en cotas altas en correspondencias de la cabecera del río Lauca, tributario del lago Coipasa. El caudal promedio total de las emergencias hidrotermales es del orden de algunas decenas de litros por segundo con temperatura de 40 a 70 grados centígrados.

Las manifestaciones en el pasado, deben haber sido mucho más abundantes y frecuentes, como indican los numerosos afloramientos de "travertino" (caliza química de origen hidrotermal), existentes alrededor de Coipasa y en general al sur del Altiplano.

Es posible hipotetizar una utilización del calor geotérmico a baja entalpía para invernaderos.

- Con respecto a la población diseminada en el territorio, el problema del aprovechamiento hídrico se puede resolver, considerando que el consumo per cápita es muy bajo, con pozos someros, de tipo moderno y protegido contra la contaminación; mejor que con pozos profundos perforados de diámetro reducido y bomba manual.
- Cada proyecto específico y puntual de explotación del agua subterránea tiene que ser estudiado tomando en cuenta el marco general y evaluando, zona por zona, los recursos, las utilidades en curso y las reales posibilidades de obtener determinados caudales del acuífero.

En conclusión tenemos que subrayar que la evaluación de los recursos en el estudio, es pesimista porque se refiere a un período de déficit pluviométrico y de aguas bajas. En situaciones más favorables los recursos estimados serían un poco más altos.

La evaluación de los recursos no toma en cuenta las pérdidas de evapotranspiración, de las napas. Las mismas que podrían ser reducidas con una explotación más intensiva de los recursos subterráneos.

CUADRO N° 6.1 : PRINCIPALES CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS DE LAS ZONAS EXPLORADAS

ZONA	NOMBRE	MAPA HIDRO- GEOLOGICO	ESTADO DE LAS NAPAS	ESPESOR DE LOS ACUIFEROS (m)	PROF. DEL NIVEL DEL AGUA EN REPOSO (m)	CONDUCT. ELECT. DEL AGUA (m mhos/cm a +25°C)	TRANSMISI- BILIDAD (m2/días)	POROSIDAD EFICAZ/COEF. DE ALMAC.	CAUDAL NAT. CIRCUL. EN LOS ACUIFEROS (l/s)
1	CUENCA BAJA DEL RIO RAMIS	EHG - 003	LIBRE	40 - 60	2 - 13.5	200 - 1.800	112 - 1.123	—	110
2	CUENCA MEDIA Y BAJA DEL RIO COATA	EHG - 003	LIBRE	30 - 85	2.5 - 4.5	160 - 1.300	198 - 1.115	—	10
3	CUENCA MEDIA Y BAJA DEL RIO ILLPA	EHG - 003	LIBRE	22 - 76	2 - 9	1.600 - 2.700	259 - 1.495	—	25
4	SECTOR ACORA - PLATERIA - AZIRUNI	EHG - 003	LIBRE * A PRESION	50 - 100	2 - 5 -0.20	340 - 850	—	—	5
5	CUENCA ALTA Y MEDIA DEL RIO ILAVE	EHG - 003	LIBRE	30 - 100	2 - 19	170 - 880	550 - 1.040	—	200
6	CUENCA BAJA DE LOS RIOS ILAVE Y ZAPATILLA	EHG - 004	LIBRE	40 - 70	1.5 - 4.5	130 - 620	536 - 5.616	—	24
7	CUENCA TITICACA - KEKA SECTOR ACHACACHI	EHG - 004	LIBRE * A PRESION	Prof. Expl. 311 m	-1.30 2 - 3	180 - 460	303	2.3 E-3	80
8	CUENCA TITICACA - PEÑAS	EHG - 004	LIBRE * A PRESION	85 - 130	0 - 8 -1 a -3	125 - 410	80 - 120	2 E-4 a 1 E-2	20
9	SECTOR ANCOPUTO - PATACOLLO	EHG - 005	LIBRE * A PRESION	50 - 130 **	2 - 8	170 - 200	32 - 337	1 E-3	14
10	SECTOR CCALLACAME-JACHA MAURI	EHG - 005	LIBRE	—	0 - 4	200 - 4.300	—	1 E-3 a 5 E-2	32
11	SECTORES PUCARANI - EL ALTO - VIACHA	EHG - 006	LIBRE A PRESION	160 - 316	0.5 - 30 -0.6 a -2.6	90 - 450	30 - 355	3.6 E-10 a 8 E-3	750
12	CUENCA MEDIA Y BAJA DEL RIO CATARI	EHG - 006	LIBRE A PRESION	—	-1 a -2 1 a 2	210 - 1.000	469	2.7 E-7	31
13	CUENCA BAJA DEL RIO TIWANACU	EHG - 006	LIBRE A PRESION	Prof. Expl. 311 m	0 1 a 2	610 - 1.000	133 - 252	3.7 E-5	60 - 70
14	CUENCA MEDIA DEL RIO DESAGUADERO MARGEN IZQUIERDA	EHG - 006	LIBRE	—	1 - 13	180 - 1.900	—	—	10 - 90
15	SUBCUENCA RIO JACHA JAHUIRA	EHG - 006	LIBRE	—	1 - 2	430 - 920	—	—	10 - 15
16	CUENCA ALTA DEL RIO DESAGUADERO MARGEN IZQUIERDA	EHG - 006	LIBRE	—	3 - 10	870 - 2.350	—	—	Escasas decenas de l/s
17	CUENCA MEDIA DEL RIO DESAGUADERO MARGEN DERECHA	EHG - 009	LIBRE	—	1 - 9	1.120 - 5.200	16 - 35	—	Escasas decenas de l/s
18	CUENCA POOPO-COIPASA SECTOR ORURO	EHG - 010	LIBRE A PRESION	60 - 65	-0.2 3.5 a 11	820 - 2030	0.4 - 183	2.5 E-6 a 4.1 E-2	Menor de 200 l/s

(*) : Estados de presión localizados

(**) : Espesores estimados con prospección geofísica.

RECOMENDACIONES

En base al estudio hidrogeológico realizado en la cuenca endorreica del sistema T.D.P.S. se pueden plantear algunas recomendaciones de carácter general válidas para una utilización racional del agua subterránea.

- A pesar de los resultados de las estimaciones efectuadas del flujo natural en secciones significativas de los valles cuaternarios, que proporcionan valores muy bajos de caudales circulantes en los acuíferos a la red hidrográfica, el volumen global de recursos subterráneos es alto.
- Existen acuíferos en cotas altas que restituyen agua a la red y que podrían ser explotados antes de que cedan el agua a la escorrentía superficial o se evaporen. Esta recomendación se refiere sobretodo para las zonas volcánicas de la Cordillera Occidental.
- Para las 18 zonas diferenciadas de los valles cuaternarios que vierten en el sistema, se pueden plantear diferentes alternativas.

Si verdaderamente hay necesidad de agua, antes que todo se deben explotar los pozos perforados que se encuentran inactivos hace varios años por diversas razones.

- Con prioridad se lograrían mayores rendimientos hídricos si se explotara el agua subterránea, aguas arriba de las zonas de bofedales, alrededor del lago y del Desaguadero, con el objetivo de reducir las pérdidas por evapotranspiración (Un Km² de bofedal pierde alrededor de 60-80 l/s).
- Asimismo se obtendrían mayores rendimientos hídricos si se explotara el agua subterránea en las áreas bajas de los valles para permitir un aumento de la recarga y una disminución de la evapotranspiración.
- El volumen total de agua que potencialmente se podría extraer de los acuíferos de las 18 es muy alto pero necesitaría un control continuo con un red de puntos de observación que permitirá un monitoreo de la evolución dinámica de las napas.

Para la población diseminada, los proyectos que estén realizando las ONG con pozos perforados y bombas manuales, constituyen una alternativa ideal, pero se tiene que tomar en cuenta el problema del mantenimiento de las bombas que requiere una organización y un flujo de dinero de solución no fácil.

- Para la utilización del agua termal en invernaderos se debería buscar el financiamiento de un proyecto piloto para resolver los problemas de la transferencia del calor y de las incrustaciones.
- Para la localización de nuevos pozos profundos en las partes bajas de los valles aluviales, se recomienda identificar los paleocauces enterrados con la finalidad de asegurar caudales compatibles con una explotación económica del agua subterránea.
- En las áreas donde existe un número importante de perforaciones aún sin utilizar, se recomienda implementar una red de control de los acuíferos cuando los pozos sean sometidos a explotación, a fin de cuantificar el comportamiento de los niveles piezométricos y en base a los resultados tomar las previsiones del caso para que la explotación del recurso sea concordante con las reservas dinámicas.

B I B L I O G R A F I A

- 1.- Los recursos de agua del Altiplano norte y del área de Oruro NNUU/Geobol año 1973 - Bolivia.
- 2.- Final reporte the Study on Groundwater Development Project in El Alto District in La Paz - City. JICA December 1987 Bolivia.
- 3.- Proyecto Saneamiento Básico componente perforación de nuevos pozos e implementación de los existentes Cordeor año 1989 - Bolivia.
- 4.- Estudio de los Recursos hídricos subterráneos con isótopos ambientales en la subcuenca de Oruro Caracollo - Servicio Geológico de Bolivia - Organismo Internacional de Energía Atómica Viena Austria/Instituto Boliviano de Energía Nuclear y Universidad Técnica de Oruro año 1987 - Bolivia.
- 5.- El lago Titicaca síntesis de conocimiento limnológico actual ORSTOM/HISBOL año 1991 - Bolivia.
- 6.- Estudio Hidrogeológico para la ubicación y diseño de pozos en Lampa Cabanilla Programa de perforación y equipamiento de 80 pozos en el departamento de Puno. PRONASTER/651, octubre 1989 - Perú.
- 7.- Estudio Hidrogeológico para la ubicación y diseño de pozos en la zona de Patacollo Programa 80 pozos. Puno PRONASTER/Puno octubre 1988 - Perú.
- 8.- Estudio Hidrogeológico para la ubicación y diseño de pozos en la cuenca alta del río Ilave. Programa 80 pozos-Puno PRONASTER/Puno, Nov. 1988 - Perú.
- 9.- Estudio Hidrogeológico para la ubicación y diseño de pozos en el Sector de Tacamani, Pucachupa PRONASTER/Puno, marzo 1991.
- 10.- Estudio Hidrogeológico para la perforación de pozos en la zona de Mañazo AFATER/222, octubre 1984 - Perú.
- 11.- Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua con fines de riego en las Comunidades de Anccaca, Nuñamarca, Tolomarca y Soquesani. AFATER/458, Nov. 1987 - Perú.
- 12.- Evaluación de los recursos hídricos para el abastecimiento agua de la ciudad de Puno Tomo II ASCOSES, abril 1983 Perú.

- 13.- Estudio hidrogeológico para la perforación de pozos tubulares en la zona de Ichu. AFATER/196, junio 1984 Perú.
- 14.- Informe del Proyecto de pozos de agua para consumo humano en las comunidades campesinas de Puno. Taller de educación, capacitación e investigación rural andina (TECIRA) diciembre 1986 - Perú.
- 15.- Informe del Proyecto de perforación de pozos de agua para consumo humano en comunidades campesinas de Puno (TECIRA), diciembre 1987 - Perú.
- 16.- Boletines del Instituto Geológico Minero - Metalúrgico INGEMMET Lima-Perú.
- 17.- Informe sobre las investigaciones hidrogeológicas efectuadas en el Altiplano de Puno Consultor Ing. Carlos M. Vallejos V., octubre 1991 - Perú.
- 18.- Reportes Técnicos del Programa de perforación y equipamiento de 80 pozos tubulares para riego en el departamento de Puno PRONASTER/Puno - Perú.
 - Prospección hidrogeológica área ríos Mauri y Desaguadero - Misión Alianza Noruega Consultor Dante Gumiel R. Julio 1991 - Bolivia.
 - Informe provisional del mapa hidrogeológico de Bolivia Servicio Geológico de Bolivia 1992 - Bolivia.
 - Tesis de Hidrogeología en zona de Viacha Alfredo Soria Bolivia.