

## ESTUDO DE POTENCIALIDADE HÍDRICA DO AQÜÍFERO SEDIMENTAR DA FORMAÇÃO AZÁNGARO NA ÁREA DE ILAVE PUNO - PERU

**Prof. Victoriano R. A Campos**

Universidade Nacional Del Altiplano Puno – Peru

E-mail: rapaza@unap.edu.pe

sympo = 1002846

**Prof. Uriel Duarte**

Instituto de Geociências – USP

E-mail: urduarte@usp.br

### RESUMO

O presente trabalho, mostra em seu conteúdo a potencialidade de recursos hídricos subterrâneos dos depósitos lacustres da Formação Azángaro, localizada no Departamento de Puno - Peru. Regionalmente está inserida na Bacia do Lago Titicaca, situado a 3840 m de altitude, cuja pesquisa desenvolvida abrange uma extensão de 180 km<sup>2</sup>. O padrão geológico local caracteriza-se por apresentar uma superfície plana suavemente ondulada, desenvolvida sobre formações sedimentares e vulcânicas - Cretácicas a Terciárias, de grande complexidade estrutural, relacionadas à evolução tectônica dos Andes Peruanos. Hidrogeologicamente foram investigados os depósitos não consolidados da Formação Azángaro, que formam o sistema aquífero, utilizando dados litológicos de 25 poços perfurados e 37 sondagens elétrica verticais, além de testes hidrodinâmicos realizados.

### ABSTRACT

The assessment of the groundwater resources of the Azángaro formation dominantly composed of the lacustrine it deposits and located in Peruvian territory, departament of Puno. The area of interest is part of the Titicaca Lake Basin, which is about 3840 m height a.s.l., and covers 180 km<sup>2</sup>. The local morphology of the area is characterized by a soft waved plain surface contrasting with a set of elongated shaped hills or isolated slopes. This geomorphological pattern was developed over volcanic and sedimentary Formations from Cretaceous to Tertiary. These rock sequences it exhibits great structural complexity and are related to the tectonic evolution of the Peruvian Andean Cordillera. The unconsolidated deposits of the Azángaro Formation, which represent the aquifer system, were hidrogeologically investigated using lithological, wich data from 25 wells and 37 vertical electrical soundings besides hydrodynamic tests.

## 1. INTRODUÇÃO

Projetos de exploração de águas subterrâneas na Região Altiplânica do Peru, vem tendo uma atenção especial nos últimos anos, por serem necessários ao desenvolvimento sócio econômico desta região.

Balanços hídricos realizados na bacia do Lago Titicaca, pela "Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales", ONERN (1966), revelam que a massa de água evaporada pelo lago é muito superior as massas anuais de água aportadas pelos rios que nele deságuam. Pesquisas realizadas por ONERN indicam que este desequilíbrio é compensado pelo aporte águas subterrâneas regionais, desta forma o nível do lago conserva-se constante dentro do limites de flutuação. A existência de sistemas aquíferos não explorados na zona sul de Puno já foi observado por VEGA (1968), quem indica possibilidades de exploração em grandes volumes.

Por outro lado, na zona de llave existem grandes extensões de terras aptas para agricultura, cuja demanda de água segundo o *Ministério de Agricultura do Peru*, atinge a 2 m<sup>3</sup>/s. A expectativa é beneficiar a população rural com projetos de irrigação, utilizando águas subterrâneas e promover o desenvolvimento do setor agropecuário que permitiria melhorar os níveis de produção agrícola atual.

### 1.1. Localização da área pesquisada

O distrito de llave localiza-se ao SE do território peruano ( Fig. 1). Jurisdição do departamento de Puno, província de Collao. Pertence a Região Altiplânica do Lago Titicaca, situada a 3840 m de altitude, e limitada pelas divisórias das Cordilheiras Ocidental e Oriental dos Andes. A área avaliada abrange uma superfície de 180 km<sup>2</sup>, dentro das coordenadas 16° 04' 21" a 15° 58' 55" Latitude Sul e 69° 39' 00" a 69° 29' 12" Longitude Oeste

### 1.2. Objetivo e problemática da água na região

A pesquisa foi desenvolvido com o propósito de Avaliar o potencial hídrico subterrâneo do Aquífero Sedimentar da Formação Azángaro, na área do distrito de llave, e determinar suas características geométricas e hidrodinâmicas.

Na região Altiplânica do Peru, o desenvolvimento da agricultura é limitado por seu regime pluviométrico irregular, apresentando anos de baixas pluviosidades e baixas temperaturas, que afetam negativamente as diferentes culturas desta região. A esta se agrega a crescente demanda de água para a atividade agropecuária e abastecimento para as cidades, que tornaram-se muito preocupantes nos últimos anos. A expectativa é que as águas subterrâneas contribuam como uma das alternativas que permitam diminuir o déficit hídrico.

### 1.3. Aspectos metodológicos

Com a finalidade de obter informação adequada e a compreensão dos fatores analisados ou monitorados em cada fase do trabalho, utilizaram-se métodos diretos e indiretos, em concordância com os objetivos propostos.

Na fase de campo foram monitorados 23 poços profundos, levantamento de dados geológicos, cadastramento de poços, avaliação da qualidade das águas, trabalhos geofísicos para caracterizar o aquífero, complementados com testes hidrodinâmicos do aquífero.

## 2. ASPECTOS DE CLIMATOLOGIA E METEOROLOGIA

A extensão do Lago Titicaca que é de 8562 km<sup>2</sup> (WIRIMANN, 1992), produzindo um efeito termo-regulador na climatologia local e regional entre 3809 m (cota do lago), até 4000 m de altitude. O calor absorvido de dia é irradiado durante a noite. Este fenômeno equilibra a dispersão da temperatura e mudanças de clima em inverno e verão, ROCHE *et. al.*, (1992). Além disso, a região de Puno, por se encontrar na faixa da Zona de Convergência Intertropical Semipermanente (ZCIT), é influenciada pela circulação geral da atmosfera do continente, que determina a variação temporal e espacial dos parâmetros climáticos (PELT, 1993).

Na análise da climatologia local e sua influência no ciclo hidrológico, foi utilizado a serie histórica de dados meteorológicos do período 1964 a 1993 de cinco estações do "Servicio Nacional de Meteorología e Hidrologia" SENAMHI (FIG. 2). A amplitude utilizada permite ter maior consistência e homogeneidade na interpretação das diferentes variáveis consideradas.

Na análise estatística de freqüências de precipitação dos últimos 30 anos, observou-se uma distribuição irregular desta variável através dos anos, na TABELA 1 ilustra-se os resultados encontrados. A precipitação média anual para 30 anos é de 701,14 mm, valor que é importante considerar, na análise da recarga dos aquíferos.

### 2.1. Balanço hídrico

A área de interesse foi avaliada dentro do esquema geral do método de *Thornthwaite* (CASTANY 1967) que esta baseado sobre elementos de precipitação e evapotranspiração potencial ETP, A TABELA 2 e FIG. 3 apresenta o comportamento mensal do balanço realizado. Observa-se que nos meses de Janeiro a Abril se produz excedentes de água de precipitação; esta condição favorece ao processo de recarga e armazenamento do aquífero. Nos meses seguintes de Maio a Agosto a evapotranspiração real é superior à precipitação, as reservas armazenadas são utilizadas para manter o equilíbrio do meio. De Setembro a Novembro é uma época de seca, que impossibilita o desenvolvimento de qualquer tipo de cultura. Algumas precipitações isoladas desta época não restituem as perdas.

### 3. CONSIDERAÇÕES GEOMORFOLÓGICAS E GEOLÓGICAS

O relevo regional do sul do Peru apresenta uma superfície acidentada, devido a presença da Cordilheira dos Andes. As estruturas dominantes da região, desenvolveram diversas configurações morfoestruturais, de características peculiares nas diversas localidades, todas elas desenvolvida sobre Formações Mesozóicas e Cenozóicas.

Segundo a classificação das características geomorfológicas do Peru, a área de pesquisa encontra-se circunscrita dentro da unidade morfoestrutural denominada "O Altiplano" (INGEMMET 1995). Abrange a *Depressão da Bacia do Titicaca* compreendida na faixa de 3809 m, cota do lago, a 3900 m de altitude, esta unidade esta limitada pelas Cordilheiras Ocidental e Oriental dos Andes do Sul do Peru. Como expressão geomorfológica importante destaca-se o Lago Titicaca, cujo posicionamento ocorre ao longo de uma depressão estrutural NW - SE, que segundo LAVENU (1981) foi gerada por uma fase de distensão ocorrida a fins do Terciário, com preenchimento posterior durante o Plioceno - Pleistoceno, onde se desenvolveu o antigo lago denominado "Ballivian" .

Nas áreas que circundam ao lago e entorno da área do estudo, apresentam-se grandes extensões de planalto, de relevo semiondulado desenvolvidas sobre depósitos lacustres e fluvio-lacustres da formação Azángaro. A forma suave do planalto é contrastada pelo conjunto de morros de formas alongadas e piramidais ou colinas isoladas que se apresentam bordejando o lago. Na área de pesquisa, essas elevações constituem a fronteira do aquífero, formado por afloramentos de rochas calcáreas e arenitos vermelhos do Grupo Puno. (FIG.4.) É de interesse destacar a presença do rio llave, de curso fluvial sinuoso e perfil de vale pouco profundo. Este rio constitui um dos afluentes principais do lago, formado por numerosos tributários, alguns de carácter temporário, ligados a épocas de chuva.

#### 3.1. Estratigrafia

Na área afloram quatro unidades estratigráficas (FIG. 4): Formação Calcários Ayavacas do Cretáceo superior. Arenitos vermelhos do Grupo Puno de Idade Cretáceo Superior - Terciário Inferior. Estas unidades apresentam litologias de pouco interesse para fins hidrogeológicos, sendo toda atenção voltada para os sedimentos Cenozóicos.

Formação Azángaro de idade Plioceno - Pleistoceno. Esta unidade é de ampla distribuição regional no planalto altiplânico. Na área de pesquisa forma o sistema aquífero de interesse hidrogeológico, caracterizada por sua natureza de depósitos Lacustres de facie fluvial. Estudos geofísicos e estratigráficos detalham a geometria e natureza das camadas litológicas.

Depósitos Quaternários recentes, apresentam-se caoticamente distribuídos nas margens do córrego do rio llave, formando aquíferos importantes por sua boa permeabilidade, com recarga contínua ligados a antigos paleo vales. Sua litologia esta constituída por materiais de granulometria variada, sendo comum a presença



de argilas, areias e cascalhos grosseiros, provenientes de diferentes tipos de rochas

### 3.2. Elementos Estruturais

A tectônica Andina desenvolveu na região Altiplânica uma grande complexidade estrutural, como resultado de episódios de evolução polifásica e policíclica da Cordilheira dos Andes, descrita como a Orogenia Peruana por ESTEIMAN (1929). A sequência evolutiva teve seus inícios no *Cretáceo Superior - Santoniano* (MEGAR Apud. INGEMMET, 1993), com comportamentos diferentes, em distintas Latitudes do território Peruano; continuando até o Quaternário recente - *Holoceno*, que atingiu a configuração atual e posição geográfica (INGEMMET, 1995). No processo evolutivo desenvolve-se um graben tectônico entre as cordilheiras Ocidental e Oriental dos Andes do sul do Peru, constituindo a atual Bacia do Lago Titicaca ( Op. cit ) com um sistema de drenagem centrípeto e fechado.

Todas as estruturas lineares na Região e na área de pesquisa, seguem um rumo dominante NW -SE, como o alinhamento alongado do Grupo Puno e estruturas desenvolvidas nesta unidade. Localmente estas estruturas influem na dinâmica das águas subterrâneas, deslocando o fluxo das águas em direção NNE. Este controle estrutural direciona as águas de recarga subterrânea das partes altas de Ilave e da Cordilheira Ocidental, movimentando-as segundo a orientação das estruturas principais e secundárias. Esta disposição dos elementos lineares favorece no aporte de recargas para o reservatório da área de pesquisa.

## 4. PROSPESÃO GEOFÍSICA

Tendo em vista definir algumas informações básicas do aquífero como: extensão e natureza das camadas, variação lateral e vertical das litofácies, espessuras, posicionamento do aquífero, etc. utilizou-se o método geofísico da resistividade elétrica, para obter informações das características da formação Azángaro na área de estudo e definir o modelo sedimentar.

### 4.1. Procedimento aplicado

Para levantamento de dados foi utilizado um resistivímetro modelo DDC - 2B, com uma extensão máxima de 150 metros para o emissor AB/2. Os eletrodos foram dispostos seguindo um arranjo simétrico linear da configuração Schulumberger.

A área explorada por métodos geofísicos abrange uma superfície aproximada de 96 Km<sup>2</sup>. A amplitude desta informação obtida é representativa para toda a área de pesquisa e concordante aos objetivos do projeto. Utilizou-se mapas em escala 1:25.000 e 1:50.000 para correlação e interpretação das sondagens (FIG. 4)

### 4.2. Interpretação

Os dados de campo foram interpretados com ajuda de softwares ( programa RESIST ) aplicado a interpretação de SEV. O procedimento consiste em harmonizar a curva gerada pelo programa, com a curva de campo; esta se consegue

ajustando os parâmetros de resistividade e espessura da sondagem, até obter uma boa aproximação da curva de campo ao modelo. Os desvios de cada ponto de ajuste são calculados pelo programa e mostrados como erro em porcentagem. Na interpretação quantitativa das SEV, observou-se duas famílias de curvas, que correspondem a modelos físicos de três e quatro camadas, diferenciando-se por sua morfologia e comportamentos diferentes.

A identificação do tipo de material correspondente de cada camada geoeletrica, foi definido por correlação com sondagens de pontos de perfuração e perfis elétricos de poços ou diagrfias. Estas foram confrontados com dados de perfil litológico descritivo.

Com a finalidade de visualizar o ambiente sedimentar da formação Azángaro, foi elaborado seis perfis de corte geológico - geofísico, que ilustram as variações laterais e verticais das diferentes camadas que conformam o aquífero. Suas características são descritas com ajuda de mapas de isorresistividades, mapas de isopacas e mapas de morfologia da base e topo da camada aquífera.

#### 4.3. Perfis Geológico - Geofísicos

As seções longitudinais e transversais (FIG. 4, 5, 6,) mostram uma adequada visualização da variação lateral e vertical das diferentes camadas, morfologia e geometria do aquífero em toda sua extensão. Os perfis são apresentadas de modo resumido, utilizando escala horizontal 1:40,000 e 1:20,000, e escala vertical 1:100, nos quais são exibidos os horizontes R1, R2, R3, R4:

**Horizonte 1 (R 1)** - Está constituído por sedimentos secos acima do nível da água; sua espessura varia entre 1,6 a 6,5 metros (SEV 20,21,22 ) e em alguns lugares atinge até 11,0 metros como aparece no perfil CC' (FIG. 6 ). Os valores de resistividade desta camada variam amplamente: de 6 a 150,207, 500 ohm. m., estas correspondem a solo de uso agrícola (areias, siltes, areias siltosas, areias argilosas). A distribuição desta camada é relativamente homogênea em toda a área.

**Horizonte 2 (R 2)** - Corresponde a zona saturada, nos perfis AA', BB', mostram-se bastante conspícuos e sua espessura varia notavelmente em toda a área. Na zona "A" e B (Fig. 5 ) foi identificado espessuras menores a 8 metros.(SEV 2; 7; 13; 15; 17e 19,). Em alguns sondagens varia entre 20 a 54 metros, como se observa nas SEV 3, 4, 9, 10,14, 29, 21-24, 34. Esta camada constitui o aquífero principal, com resistividades mais freqüentes entre 30 e 80 ohm. m. Em alguns casos ultrapassam os valores indicados, seja este mais baixo ou mais alto; no primeiro caso correspondem a presença de siltes ou argilas no meio de areias e no segundo caso a presença de cascalhos grossos. De modo geral estas resistividades, correspondem a areias de granulação grossa, areias siltosas e cascalhos finos de depósitos fluvio - lacustres.

**Horizonte 3 (R 3)** - Representa a maior espessura da formação Azángaro, em média 40 metros suas características granulométricas varia no sentido vertical e horizontal. Na camada superior distingue-se presença de areias de grão fino a

médio, intercaladas com silte. Na camada intermediária apresenta uma granulometria mais grossa de areias, cascalhos finos a grossos, intercalados com areias e pequenos horizontes de silte. Em profundidade a granulometria muda para areias finas, areias siltosas e maior presença de silte. As resistividades mais freqüentes, que caracterizam estas camadas, variam entre 50 a 150 ohm. m. Observa-se que a granulometria diminui em direção ao lago (PERFIL CC' -FIG. 6 ).

**Horizonte 4 (R 4)** - A profundidades de 60 a 70 metros apresentam-se camadas de silte e argilas, caracterizadas por baixa resistividade, menores que 30 ohm. m. Constitui o limite do aquífero em profundidade, de espessura não definida.

#### 4.4. Mapa de contornos de resistividade aparente

**a) Interpretação de mapas de resistividade para  $AB/2 = 50$  m. e  $AB/2 = 70$  m.-** Estes mapas foram elaborados com o objetivo de conferir a interpretação descrita no item anterior referente a natureza dos depósitos e variações laterais dos sedimentos a profundidades de 25 a 35 metros. Na FIG. 7 torna-se evidente o predomínio de resistividades maiores que 50 ohm. m até 130 ohm. m na zona "B" e parte direita da zona "C", os quais estão relacionados a camadas de areias de granulação média a grossa e cascalho. Também observa-se que, as curvas de isoresistividades diminuem menores que 50 ohm. m, na zona "A" e parte da zona "B", estas correspondem a sedimentos finos (siltes, areias siltosas e argilas) como se aprecia no PERFIL CC', sua espessura não supera os 20 metros.

**b) Interpretação de mapas de resistividade para  $AB/2 = 100$  m. e  $AB/2 = 150$  m.-** Estes mapas correspondem a camadas mais profundas em torno de 50 a 75 metros. Na FIG. 7 distingue-se claramente uma concentração de curvas de resistividades maiores que 50 ohm. m, até 115 ohm. m no canto inferior direito da zona "B" projetando-se em direção leste zona "C". O material presente é uma continuação da sequência de sedimentos que se aprofundam dos níveis superiores, BB' (FIG. 5 ). Em direção Oeste os valores diminuem, tornando-se menores que 50 ohm. m (zona "A" e parte da zona "C"), litologicamente correspondem a depósitos de silte e argilas, (Perfil CC" - FIG. 6 )

#### 4.5. Mapa de Isópacas do aquífero

Foi elaborado a partir da espessura das camadas Geoelétricas e correlacionadas com perfis dos poços (FIG. 8 ). Observa-se que as espessuras variam de 30 metros na zona "A", aumentando progressivamente em direção da zona "B" e "C" até 60 metros.

#### 4.6. Mapa da morfologia da base do aquífero

Na FIG. 9 mostra-se a configuração da base do aquífero, sua morfologia é irregular, com gradiente em direção ao lago. A cota mais alta de 3790 m apresenta-se na zona "C", (PERFIL CC'). A menor cota de 3760 e 3750 m. apresenta-se contornando a área central da figura, correspondendo a um paleo vale.

## 5. HIDROQUÍMICA

As águas subterrâneas da área de estudo apresentam as seguintes características físicas: a condutividade elétrica varia entre 0,1 a 1,0 mmhos/cm, em alguns poços até 1,5 mmhos/cm como mostra a mapa de isocondutividade (FIG. 11). São águas de baixa a moderada salinidade, o pH varia entre 6,9 a 9,6 e dureza total varia entre 36,59 a 303,01 ppm, revelando águas de caráter brandas com tendência a águas duras. Segundo o diagrama de PIPER, FIG. 12 são do tipo Cloretada cálcica.

### 5.1. Qualidade da água para o consumo humano e irrigação

São de qualidade  $C_1S_1$  (*baixo sódio e baixa salinidade*),  $C_2S_1$  (*Baixo sódio, salinidade media*) e  $C_3S_1$  (*Baixo sódio e salinidade alta*) (FIG. 13). O índice de (SAR) estimado varia entre 0,05 a 4,1 e um valor máximo de 8,96 no P-80, são águas apropriadas para irrigação sem perigo de alcalinização dos solos e de boa qualidade para uso doméstico segundo o Diagrama Logarítmico de SCHOELLER.

### 5.2. Características físico-químicas das águas superficiais

Duas importantes fontes apresentam-se nesta área o lago Titicaca e o rio Ilave; estas têm sido objeto de estudo por vários pesquisadores como CARMOUSE et al (1978); ARZE et al. (1992) e outros, que avaliaram as características físico-químicas. Segundo WIRIMAN (1987) as águas do lago caracterizam-se por ser de composição cloretadas sódicas, com uma concentração de 1,2 gr/L de sais dissolvidos, pH varia de 8,7 a 7,8, condutividade  $1.343 \mu S.Cm^{-1}$  (ILTIS et al. 1992). Esta composição físico química limita seu uso para fins agrícolas, devido a alto conteúdo de sais dissolvidos, que pode gerar problemas de salinização dos solos. Por outro lado o rio Ilave segundo ARZE & QUINTANILLA, (1992) em diferentes épocas do ano varia de composição físico-química. Na temporada seca, a salinidade do rio é de 9,5 mg/L, apresentando um perfil cloretada sódica, e em época de precipitação a salinidade diminui a 4,35 mg/L, e sua composição torna-se bicarbonatada cálcica.

## 6. CONSIDERAÇÕES HIDROGEOLÓGICAS

### 6.1. O reservatório aquífero

A Formação Azángaro constitui a unidade estratigráfica de interesse hidrogeológico na área de estudo, cuja extensão é superior a  $96 km^2$ . As características sedimentares e hidrogeológicas desta formação, analisadas a partir de um conjunto de informações provenientes da geologia, geomorfologia, prospeção geofísica, correlação de registros elétricos de poços, perfil estratigráfico de vinte e cinco poços perfurados, e outros dados de monitoramento, objetivou a reconstrução paleomorfológica e conhecimento do modelo sedimentar da área de estudo. A informação associada, analisada e interpretada é apresentada nos diferentes perfis longitudinais e transversais levantados para esta finalidade.



## 6.2. Perfis Geológico - Geofísicos A-A' e BB' (Fig. 5)

Mostra as características do reservatório nas proximidades do lago (orientação NW - SE). Na FIG. 5 distinguem-se três camadas bem diferenciadas:

**Unidade 1** - Nos perfis AA' e BB', distingue-se no topo da camada aquífera, uma cobertura de sedimentos areno siltosos, silte laminados e areno argilosas, com uma espessura de 6,50 a 11,0 metros, sendo de ampla distribuição em toda a área.

**Unidade 2** - Debaixo da unidade anterior, aparece uma seqüência conspícua de materiais de granulometria grossa, com resistividades maiores que 35 ohm. m, pobremente classificadas no sentido vertical. Sua espessura varia entre trinta metros no setor oeste (zona "A"), a sessenta metros no setor leste (Zona "B"). Em contato com a unidade 1 apresenta uma intercalação de areias e siltes, com predomínio de areias em toda a espessura do aquífero da zona A. Na parte central a seqüência esta constituída por materiais de granulometria grossa: areias e cascalho de diferente granulometria, presença de pequenas lentes de argilas e siltes interestratificados. Em profundidade ocorrem areias finas siltosas e argilosas.

**Unidade 3** - Identifica o embasamento do aquífero (R4), e está formado por sedimentos argilosos, argilas arenosas e argilas siltosas. Nas sondagens apresentam resistividades menores que 30 ohm. m., não sendo definida a espessura destas camadas, e provavelmente entram em contato com a rocha regional. Quanto ao seu paleo relevo, o perfil BB' apresenta uma superfície suavemente ondulada.

## 6.3. Perfis Geológico - Geofísicos CC', DD' (Fig.6)

**PERFIL CC'** - Neste perfil mostra-se o predomínio de sedimentos argilosos nas proximidades do lago, interestratificados com areias e cascalhos, mudando na faixa central a um perfil de areias nas camadas superiores, cascalhos arenosos no médio e areias finas na base do aquífero. A vazão dos poços desta área é de 187 m<sup>3</sup>/h.

**PERFIL DD'** - O material aquífero nesta área é mais homogêneo, constituído por cascalhos arenosos com tendência a predomínio de areias em direção ao lago. A vazão dos poços nesta área é de 252 m<sup>3</sup>/h (P-66) e 219 m<sup>3</sup>/h (P-62).

## 6.4. Geometria do aquífero

A área possui como condição de contorno, os domínios do Lago Titicaca ao Norte, rio Ilave ao Leste, no Sul e Oeste as formações sedimentares de arenitos vermelhos do Grupo Puno e Calcários da Formação Ayavacas, constituindo as fronteiras do aquífero. Em profundidade, esta limitado por sedimentos argilosos.

Nos mapas de contorno morfológico da base e do topo da camada aquífera e mapas de isópacas, evidencia-se uma geometria de forma prismática alongada no sentido leste oeste, deformada pela espessura irregular. O relevo da base

apresenta-se levemente deformado, e o limite superior suavemente ondulado. Este meio está preenchido por sedimentos quase homogêneos, interpretados dentro de um panorama sedimentar generalizado.

### **6.5. Comportamento do nível da água e tipo do aquífero**

A variação do nível freático observado entre a época de precipitação e época de estiagem é de 0,59 a 1,60 m, até um máximo de 2,79 m registrado nos poços P-75, P-82, P-83, localizados em pontos de cota topográfica elevada. Na FIG. 14 observa-se a mapa potenciométrico de morfologia suave e direção de fluxo de águas de SE a NW sob a influencia de um gradiente de 0,8 %

### **6.6. Aspectos de Recarga**

Os aportes hídricos que o reservatório recebe durante o ano, provem na sua maior parte da infiltração de águas de épocas de precipitação. As recargas locais são favorecidas pela qualidade da textura dos materiais existentes neste meio, condições topográficas planas, que facilitam o processo de infiltração, pela menor velocidade de escoamento após a chuva. O regime pluviométrico esta caracterizado por uma estação marcadamente chuvosa, com precipitações entre 700 a 1000 mm. O balanço hídrico realizado prova este fato. O Rio Ilave próximo a área de pesquisa, também contribui na recarga durante a época da chuva.

Em épocas de estiagem o reservatório recebe recargas regionais, proveniente do deslocamento de águas subterrâneas, desde a Cordilheira dos Andes em direção ao lago. Nos perfis geológicos observou-se que o aquífero prolonga-se por debaixo do Lago, levando a supor a probabilidade de recarga induzida por águas provenientes do Lago. Porem comparando a composição química das águas, não foi evidenciando a recarga induzida. As águas do lago, são do tipo cloretada sódica (CARMOUSE et al. In: WIRIMAN 1987) e de alta salinidade; as águas dos poços são do tipo cloretada cálcica,.

## **7. HIDRÁULICA DE POÇOS**

Foram feitos testes de bombeamento no poço P-52, com piezômetro localizado a uma distância de 566 m. Durante o período monitorado registrou-se a evolução de níveis da água em função do tempo, observando-se um rebaixamento máximo de 8,46 m em 23 horas. Os primeiros efeitos da expansão do cone de rebaixamento foram notados no piezômetro após 59 minutos do inicio do teste, evoluindo lentamente nos primeiros minutos, até um máximo de 0,94 m ao término do teste. Concluída esta primeira fase, foi iniciado um controle de recuperação de nível, sendo os primeiros efeitos sentidos após 54 minutos do fim do bombeamento A curva representativa deste teste é ilustrada na FIG. 15.

### **7.1. Análise e interpretação de testes de bombeamento**

Segundo as condições de contorno do aquífero e do poço da área de estudo, e por se adaptar a este meio, aplicou-se, o método de análise de COOPER - JACOB, determinando-se os seguintes parâmetros hidrodinâmicos.

POÇO DE BOMBEAMENTO P-52		POÇO DE OBSERVAÇÃO P-59	
Rebaixamento	Recuperação	Rebaixamento	Recuperação
$T = 777 \text{ m}^2/\text{dia}$ $K = 20 \text{ m}/\text{dia}$	$T = 826 \text{ m}^2/\text{dia}$ $K = 21 \text{ m}/\text{dia}$	$T = 758 \text{ m}^2/\text{dia}$ $K = 19 \text{ m}/\text{dia}$	$T = 764 \text{ m}^2/\text{dia}$ $K = 20 \text{ m}/\text{dia}$

Raio de influencia fictício  $R = 1220 \text{ m}$

Os valores estimados e comparados com parâmetros que identificam características dos aquíferos, indicam que os resultados correspondem a tipos de aquífero de alta capacidade produtiva e de características semiconfinados.

## 7.2. Análise da Capacidade Produtiva do Aquífero

A análise estatística de vazões dos poços, permitiu um tratamento adequado na interpretação e ponderação dos dados observados. Em um universo de 25 poços, observou-se áreas com vazões mínimas de  $36 \text{ m}^3/\text{h}$  até  $360 \text{ m}^3/\text{h}$ . A vazão média é de  $178 \text{ m}^3/\text{h}$ . O 45 % dos poços destacam-se por sua alta capacidade específica superiores a  $16 \text{ m}^3/\text{h.m}$  (FIG. 16). Em 2 poços ( P-64 e P-74 ) esta relação atinge a  $80 \text{ m}^3/\text{h.m}$ , para vazões de  $360 \text{ m}^3/\text{h}$  e rebaixamento de 4,50 m. A mapa da FIG. 17 mostra isovalores de capacidade específica e sua distribuição, diferenciando áreas de boa e de baixa capacidade produtiva.

## 8. CONCLUSÕES

A formação Azángaro apresenta o seguinte modelo:

Meio físico constituído por três pacotes sedimentares bem identificados. Na parte superior distingue-se uma cobertura de 6,50 a 11,0 m de sedimentos areno-siltosos, areias finas e siltes laminados. Na parte intermediária apresenta-se a camada aquífera, de uma espessura de 30 m, no setor W a 60 m, em direção E. É constituída por areias de diferentes granulometrias, cascalhos e ocorrências de pequenos horizontes de argilas ou siltes no meio da camada. Em profundidade ocorre uma seqüência de sedimentos argilosos, de espessura não definida.

A geometria do aquífero apresenta uma forma prismática, com eixo alongado no sentido E – W, deformado pela irregular espessura das camadas. Em relação a suas propriedades hidrodinâmicas, é um meio de alta capacidade específica. Em 45% dos poços é superior a  $16 \text{ m}^3/\text{h.m}$ ,  $T = 826 \text{ m}^2/\text{dia}$ ,  $K = 21 \text{ m}/\text{dia}$  e  $S = 1,1 \times 10^{-3}$ .

O reservatório recebe recargas locais de precipitação e recargas regionais de águas subterrâneas em trânsito, que se deslocam da divisória das águas da Cordilheira Ocidental em direção ao lago, seguindo a orientação NW - SE das estruturas regionais, que exercem um controle sobre o fluxo das águas, tendo como reserva permanente  $5,00.10^6 \text{ m}^3$  e uma reserva reguladora de  $3,34.10^6 \text{ m}^3$  por ano.

Em matéria de controle e proteção do aquífero a área pesquisada requer o desenvolvimento de políticas de prevenção, em defesa da qualidade da água.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARZE, C. & QUINTANILLA, J. (1992) La Regulación Hidroquímica del Lago y la Hidroquímica de sus Tributarios In: DEJOUX, C.; ILTIS, A. **El Lago Titicaca Síntesis del Conocimiento Limnológico Actual**. Bolivia, ORSTOM. Pg. 115 - 126

CARMOUSE, J.P; ARZE, C; QUINTANILLA, A. J; MIRANDA, G. (1978) **Estudio de la Regulación Hidroquímica del Sistema Fluvio Lacustre del Altiplano**. La Paz, Rev. Boliviana de Química, 2(1): 2-22

OFICINA NACIONAL DE EVALUACION DE RECURSOS NATURALES - ONERN (1966) **Programa de Inventário y Evaluación de los Recursos Naturales del Departamento de Puno - Sector Prioridad I**. Lima. 350 p

PROGRAMA NACIONAL DE AGUAS SUBTERRANEAS Y TECNIFICACION DE RIEGO - PRONASTER (1989) **Estudio Hidrogeológico para la Ubicación y Diseño de Pozos en la Cuenca Alta del Río Ilave**. Puno, DGI. 176p. (Programa 80 Pozos - Puno - Perú)

PROYECTO ESCIAL LAGO TITICACA PELT (1993) Estudio Climatológico In: **Plan Director Binacional de Protección - Prevención de Inundaciones y Aprovechamiento de los Recursos del Lago Titicaca, Río Desaguadero, Lago Poopo y Salar de coipasa (Sistema TDPS)** La paz PELT s.n,t (Relatório final, Convenio Perú - Bolivia.).

ROCHE, M.A.; BOURGES, J.; CORTES, J. ; MATTOS, R.(1992) Climatología e Hidrología de la Cuenca del Lago Titicaca In: CLAUDE, D. & ILTIS, A. **El Lago Titicaca Síntesis del Conocimiento Limnológico Actual**. La Paz, ORSTOM/HISBOL. p.81 - 103.

STEIMAN, G (1930) **Geología del Perú**. Lima, Sociedad Geológica del Perú 458p.

VEJA, C.L. (1968) Estudio de Niveles del Lago Titicaca. In: **V Seminario Latino Americano de Irrigación Caracas**. Caracas, . 75 p.(Boletín de SENAMHI Lima)

WIRRMANN, D. (1992) Morfología y Batimetría. In: DEJOUX, C.; ILTIS, A. Ed. **El Lago Titicaca Síntesis de Conocimiento Limnológico Actual**. La Paz, ORSTOM/HISBOL. Pg.31-37.

WIRRMANN, D. (1987) **El Lago Titicaca Sedimentología Y Paleohidrología Durante el Holoceno (10000 años B.P- actual)**. La Paz, UMSA/ORSTOM. 59p. (Relatório 6).

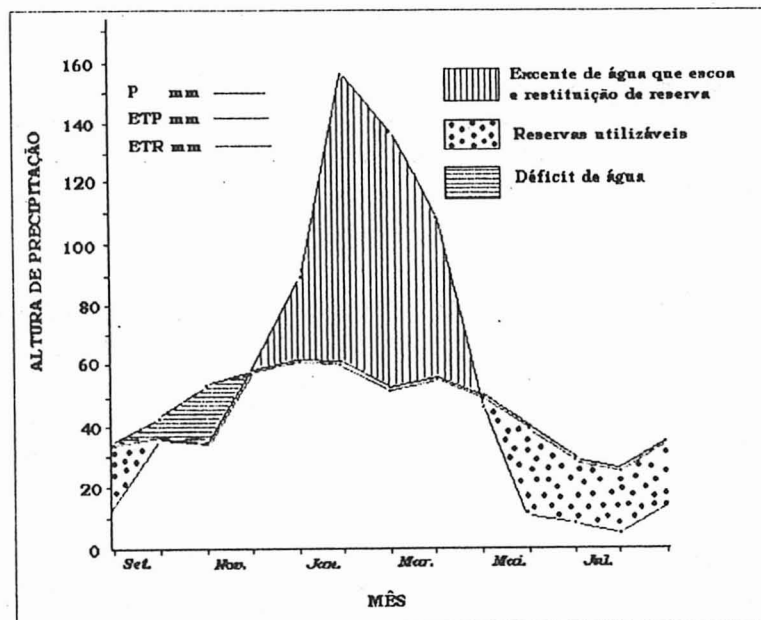


FIGURA 3: GRÁFICO DO BALANÇO HÍDRICO - MÉTODO DE THORNTHWAITE



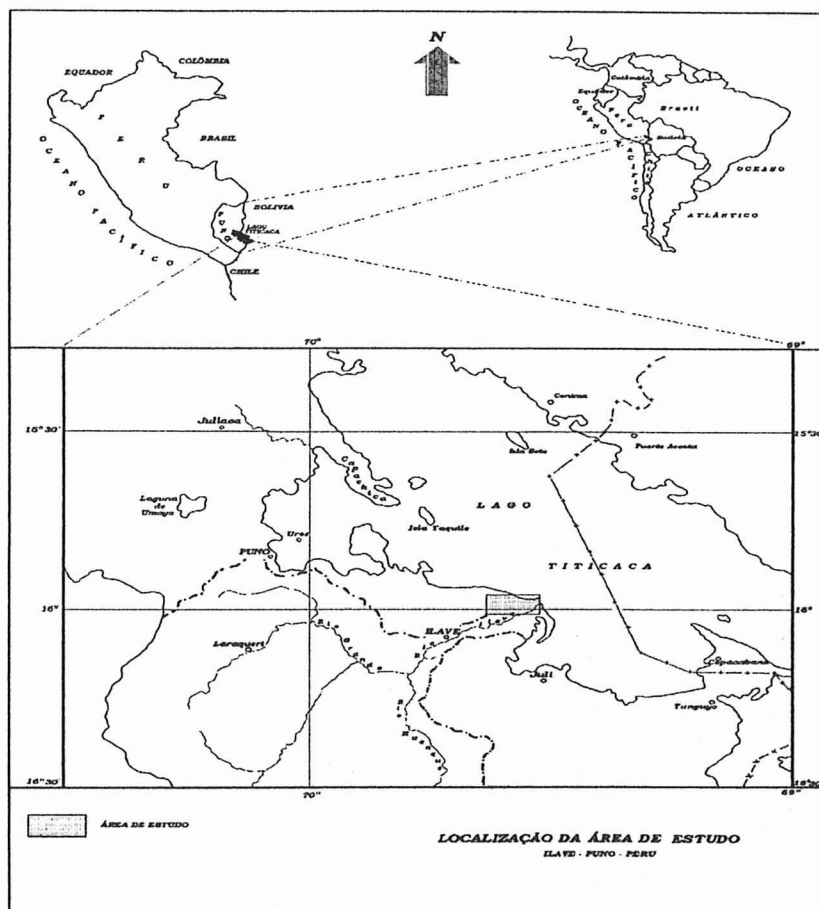


FIGURA 1: LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

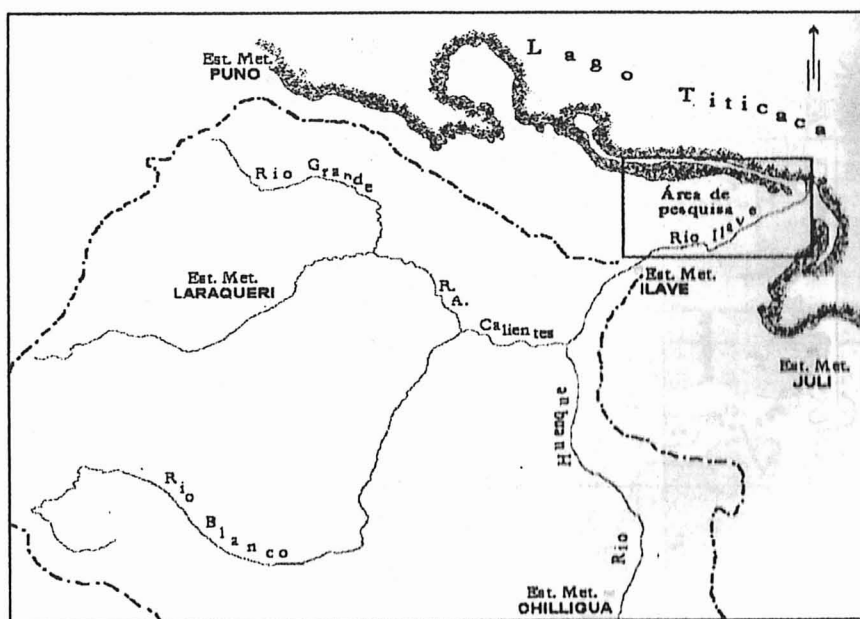


FIGURA 2: LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS



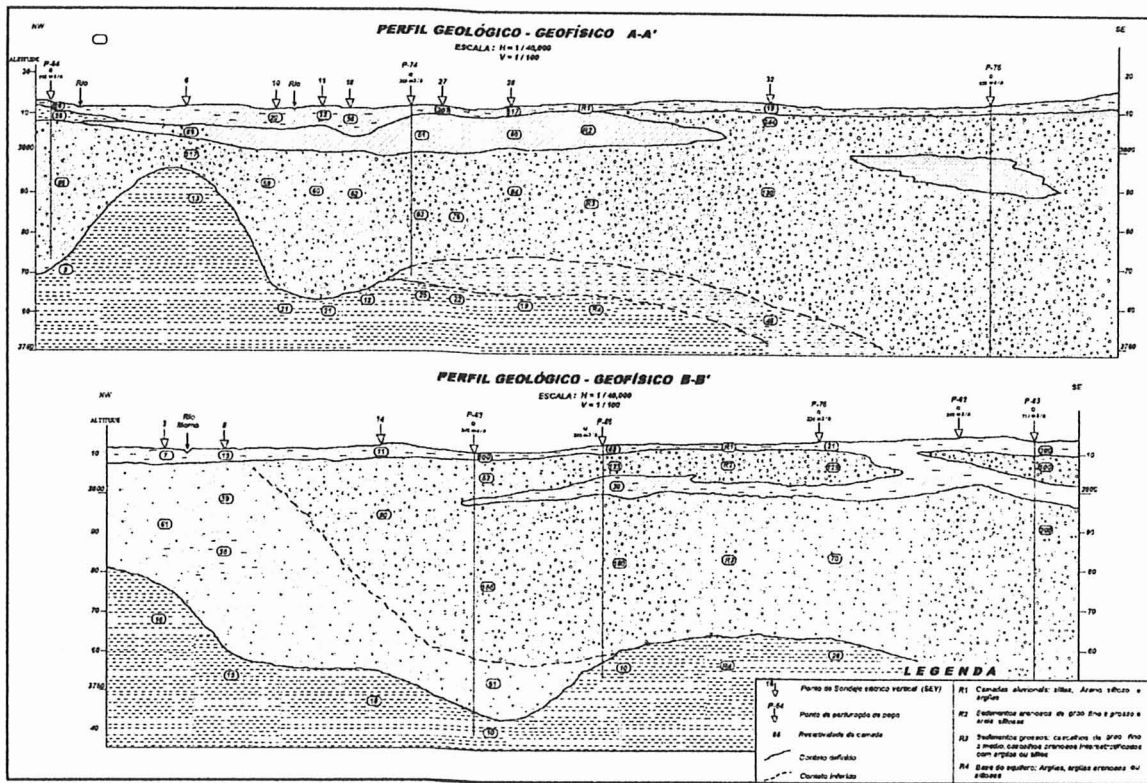


FIGURA 5 - PERFIL GEOLÓGICO - GEOFÍSICO AA', BB'.

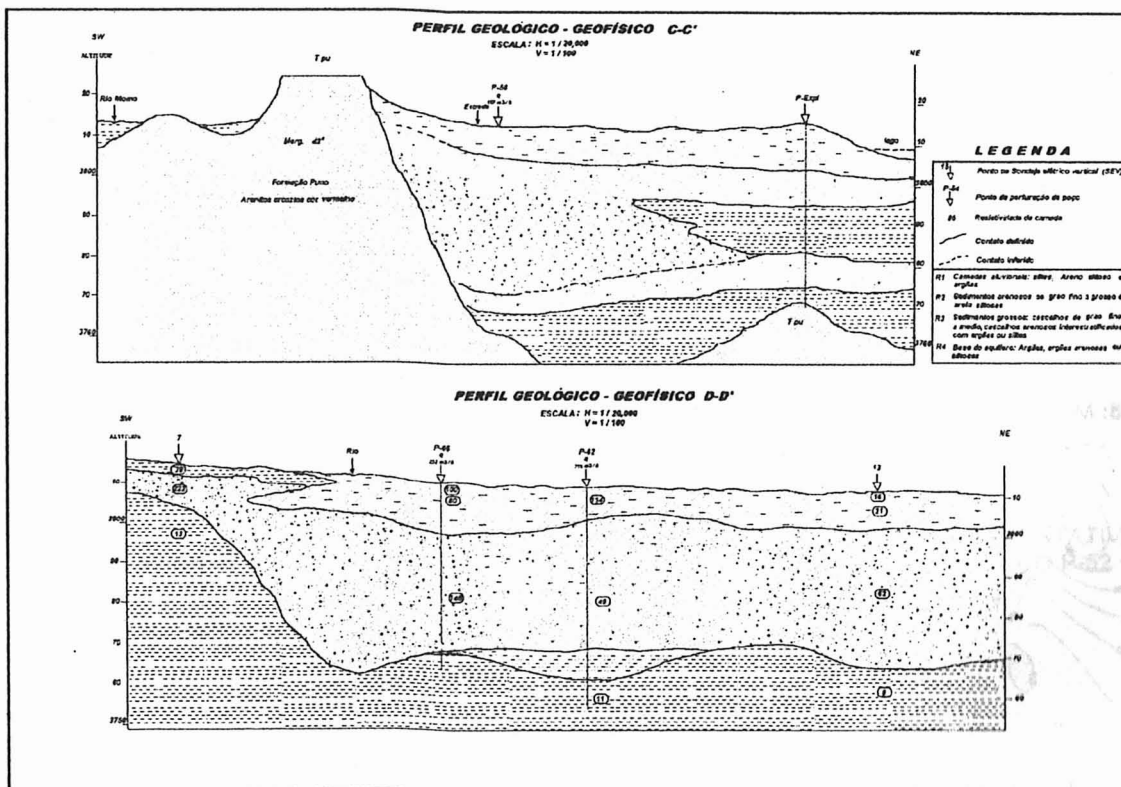


FIGURA 6 - PERFIL GEOLÓGICO - GEOFÍSICO CC', DD'.

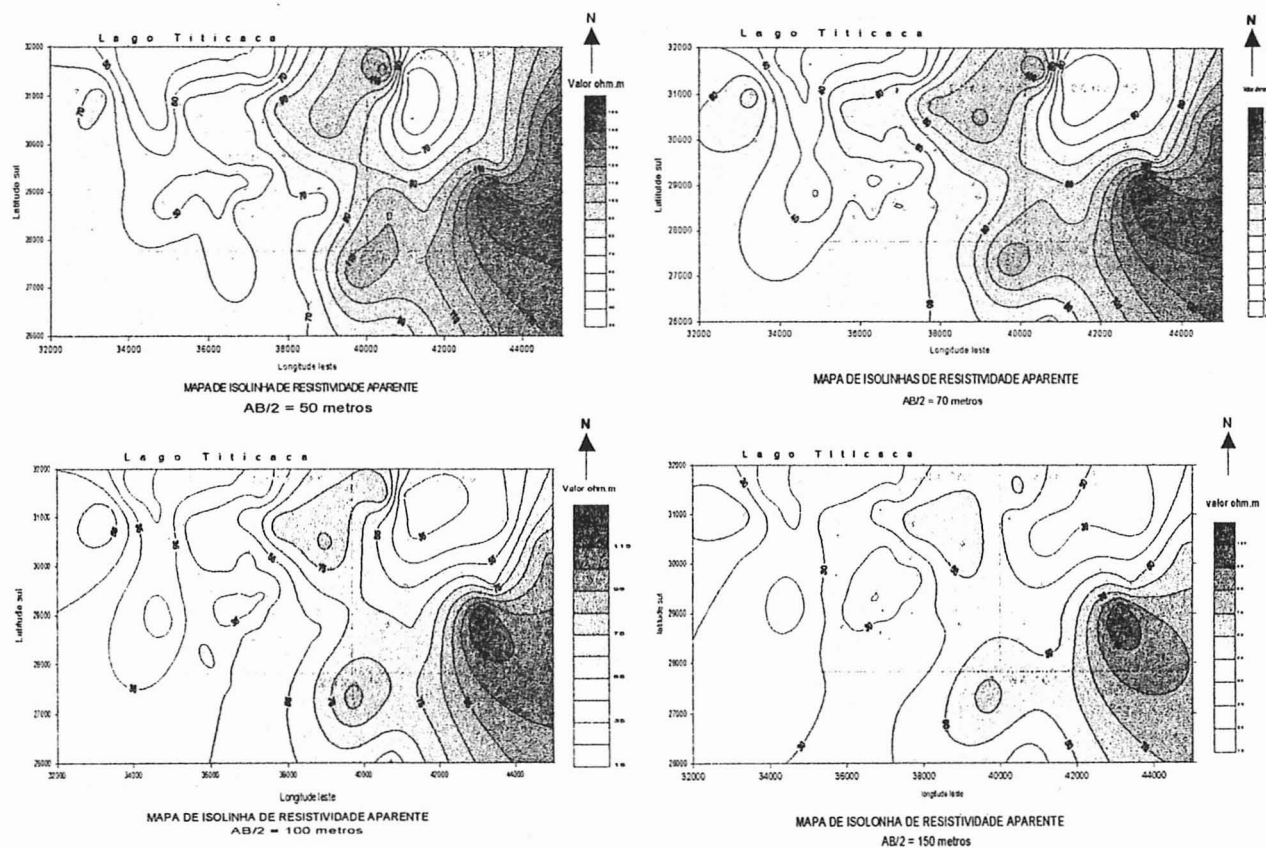
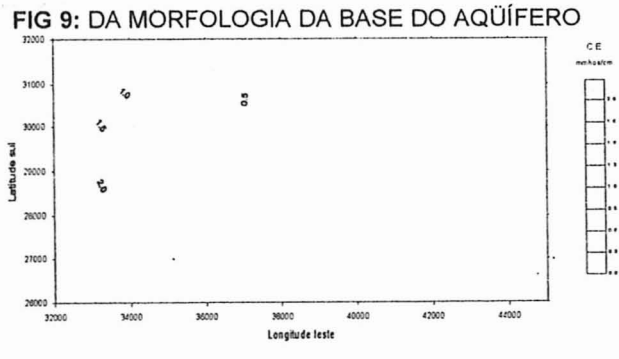
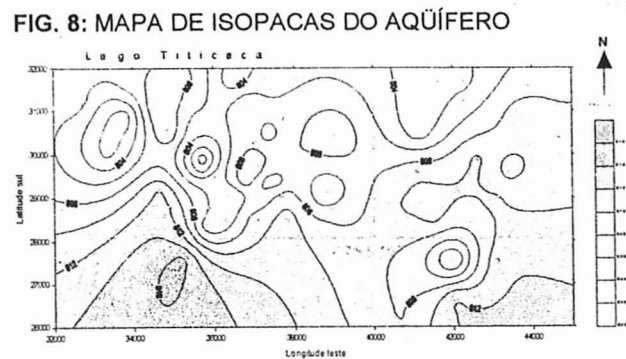
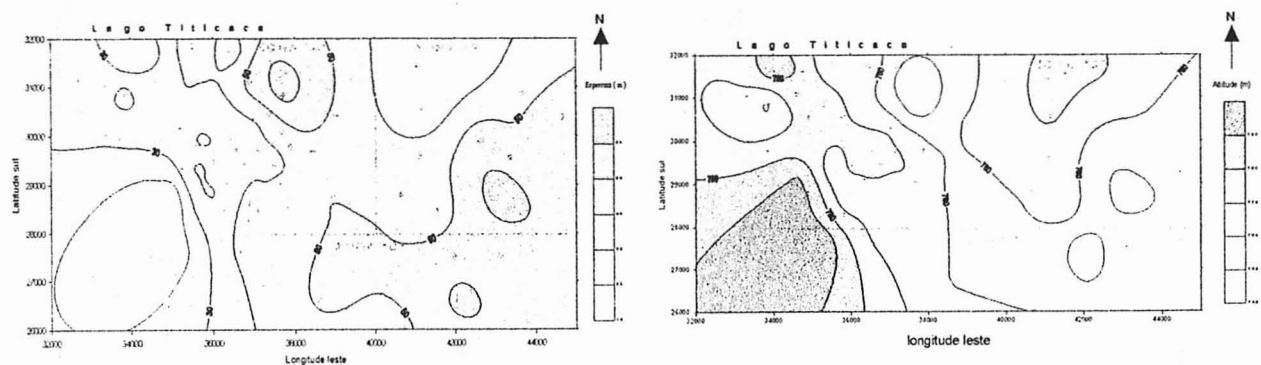


FIGURA 7: MAPA DE CONTORNOS DE RESISTIVIDADE APARENTE AB/2 50, 70, 100 Y 150 m.





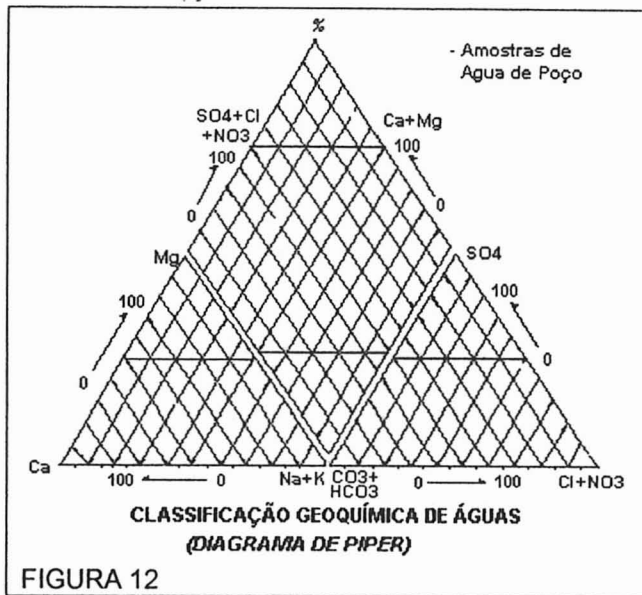


FIGURA 12

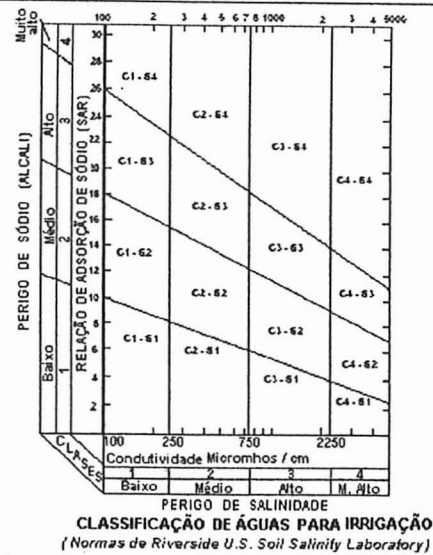


FIGURA 13

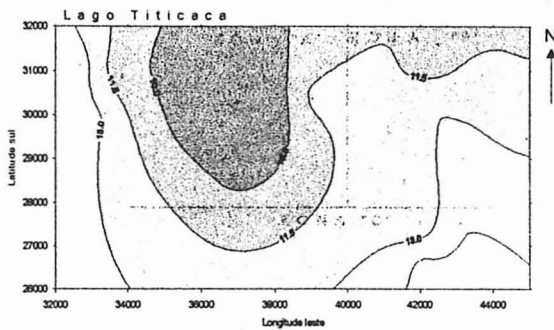


FIGURA 14: MAPA POTENCIOMÉTRICO - FEVEREIRO DE 1996

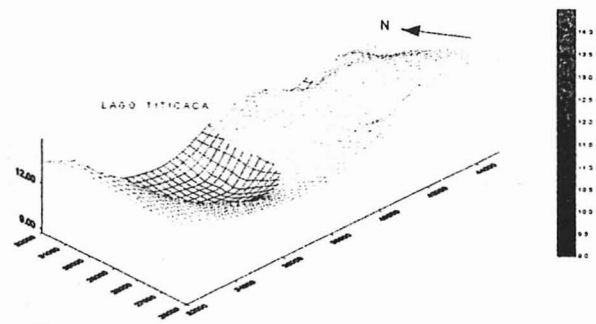
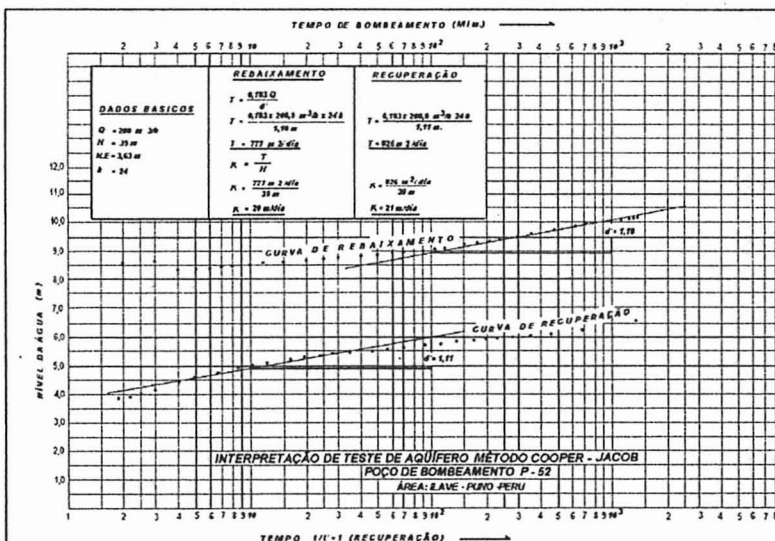


FIGURA 15.- CURVA REPRESENTATIVA DE TESTE DE AQUIFERO POÇO P-52



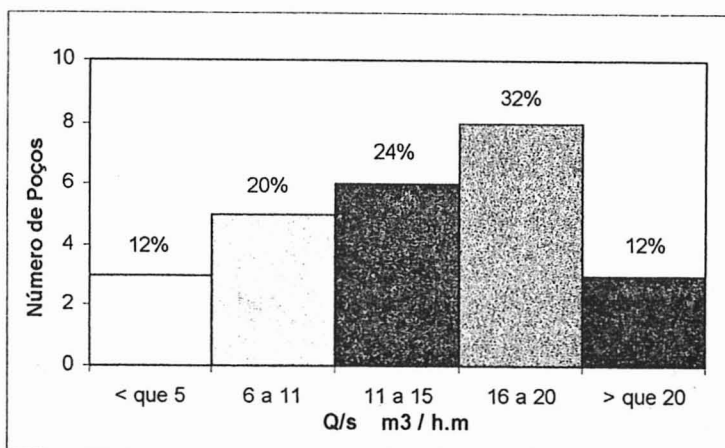
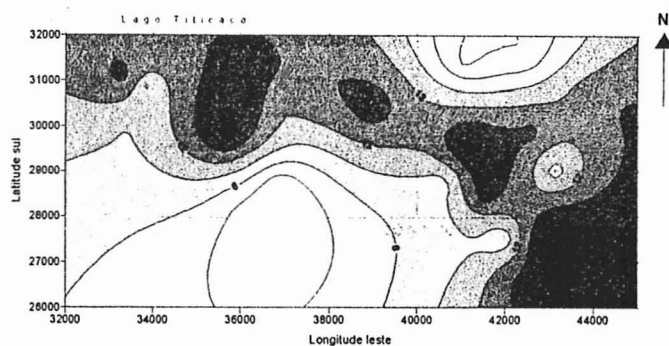


FIGURA 16: HISTOGRAMA DE CAPACIDADE ESPECÍFICA DE POÇOS CADASTRADOS

FIGURA 17: MAPA DE ISOVALORES DE CAPACIDADE ESPECÍFICA DE POÇOS.  
Área de pesquisa Ilave - Puno - PeruTABELA 1: CARACTERÍSTICAS PLUVIOMÉTRICAS NA ÁREA DE ILAVE.  
(Período analisado: 1964 - 1993)

ESTAÇÃO METEOROLÓGICA				
CARACTERÍSTICAS DOS ANOS AVALIADOS		I LAVE	PUNO	JULI
ANOS SECOS 200 - 600 mm	Nº de anos	8	9	5
	Incidência	27 %	30 %	17 %
ANOS IRREGULARES 600 - 700 mm	Nº de anos	7	7	2
	Incidência	23 %	23 %	7 %
ANOS NORMAIS 700 - 1000 mm	Nº de anos	13	12	17
	Incidência	43 %	40 %	56 %
ALTA PLUVIOSIDADE 1000 - 1200 mm	Nº de anos	2	2	6
	Incidência	7 %	7 %	20 %

**TABELA 2: BALANÇO HÍDRICO DA ÁREA DE ILAVE - MÉTODO DE THORNTHWAITE**  
(Capacidade de armazenamento do solo: 100 mm)

	SET.	OUT.	NOV.	DEZ.	JAN.	FEV.	MAR.	ABR.	MAI.	JUN.	JUL.	AGO.
<b>ETP</b> (mm)	42,66	52,94	57,81	61,15	59,87	51,83	55,03	48,49	37,5	28,03	25,36	34,69
<b>P</b> (mm)	36,2	34,77	58,36	87,53	156,8	137,39	108,79	45,9	10,6	7,24	4,29	13,99
<b>P - ETP</b> (mm)	-6,46	-18,17	0,55	26,38	96,93	85,56	53,76	-2,59	-26,9	-20,79	-21,07	-20,7
<b>Ar</b> (mm)	0	0	0,55	26,93	100,0	100,0	100,0	97,41	70,51	49,72	28,65	7,95
<b>ETR</b> (mm)	36,2	34,77	57,81	61,15	59,87	51,83	55,03	48,49	37,5	28,03	25,36	34,69
<b>Excedente</b> (mm)	0	0	0	0	23,86	85,56	53,76	0	0	0	0	0
<b>Déficit</b> (mm)	6,46	18,17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Esc.</b> (mm)	0	0	0	0	11,93	48,75	51,26	25,63	12,82	6,41	3,2	1,6
<b>C. M.U</b>	-0,15	-0,34	0,01	0,43	1,61	1,65	0,97	-0,05	-0,72	-0,74	-0,83	-0,6

ETP : Evapotranspiração Potencial

P : Precipitação

P - ETP : variação de reserva

Ar : Cap. De armazenamento

ETR : Evapotranspiração real

C.M.U : Coeficiente mensal de umidade