

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

Uriel Duarte¹, Victoriano R. A. Campos²

RESUMO

O presente trabalho mostra em seu conteúdo a potencialidade dos recursos hídricos subterrâneos nos depósitos lacustres da Formação Azângaro, localizada no Departamento de Puno - Peru. Regionalmente está inserida na Bacia do Lago Titicaca, situado a 3840 m de altitude. A pesquisa desenvolvida abrange uma extensão de 180 km², cujo padrão geológico local caracteriza-se por apresentar uma superfície plana suavemente ondulada, contrastada por um conjunto de morros de formas alongadas, desenvolvida sobre formações sedimentares e vulcânicas - Cretácias a Terciárias, de grande complexidade estrutural, relacionadas à evolução tectônica dos Andes peruanos. Hidrogeologicamente foram investigados os depósitos não consolidados da Formação Azângaro, que formam o sistema aquífero, utilizando dados litológicos de 25 poços perfurados e 37 sondagens elétrica verticais, além de testes hidrodinâmicos realizados. O espaço físico do reservatório, está constituído por três unidades faciológicas muito bem diferenciadas nos perfis geológicos. A camada intermediária constitui o aquífero de interesse por sua geometria, definida nos SEV e espessura de 30 a 60 m, formada por areias e cascalhos. Esta camada possui um bom comportamento hidrodinâmico, cuja vazão específica apresenta-se entre 10 a 20 m³/h.m. As reservas permanentes de água subterrânea foram estimadas aproximadamente 5,00.10⁶ m³ e uma reserva reguladora de 3,34.10⁶ m³/ano.

ABSTRACT

This works presents the assessment of groundwater resources of the Azângaro Formation dominantly composed of lacustrine deposits, located in the Peruvian territory, Department of Puno. The area of interest is part of the Titicaca Lake Basin, which is about 3840 m a.s.l., and covers 180 km². The local morphology of the area is characterized by a soft waved plain surface contrasting with a set of elongated hills or isolated slopes. This geomorphological pattern was developed over volcanic and sedimentary formations from Cretaceous to Tertiary. These rock sequences exhibit great structural complexity and are related to the tectonic evolution of the Peruvian Andean Cordillera. The unconsolidated deposits of the Azângaro Formation, which represent the aquifer system, were hidrogeologically investigated using lithological data from 25 wells and 37 vertical electrical soundings besides hydrodynamic tests.

¹ Instituto de Geociências - USP E-mail: urduarte@usp.br

² Universidade Nacional Del Altiplano Puno - Peru E-Mail: rapaza@unap.edu.pe

The physical space of the reservoir comprises three distinct facies units recognized within the local stratigraphic column and geological profiles. The middle layer unit, makes the bulk of the aquifer of interest mainly due to its morphology as defined by the vertical electrical soundings. The thickness of the aquifer is variable from 30 to 60 m, composed of sands and gravels. The specific yields are of the order of 10 to 20 m³/h.m

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 de 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 Ilave existem grandes extensões de terras aptas para agricultura, cuja demanda de água segundo

o Ministério de Agricultura do Peru, atinge a 2 m³/s.

A expectativa é beneficiar á população rural com projetos de irrigação, utilizando a disponi-

bilidade das águas subterrâneas e promover o desenvolvimento do setor agropecuário que permitiria melhorar os níveis de produção agrícola atual.

Localização da área pesquisada

O distrito de Ilave localiza-se ao SE do território peruano (Fig. 1). Jurisdição do departamento de Puno, província de Collao. Regionalmente pertence a bacia do Lago Titicaca, situada a 3840 m de altitude, esta bacia encontra-se limitada pelas divisórias das Cordilheiras Ocidental e Oriental dos Andes. A área avaliada abrange uma superfície de 180 km², dentro das coordenadas 16° 04' 21" a 15° 58' 55" Latitude Sul e 69° 39' 00" a 69° 29' 12" Longitude Oeste.

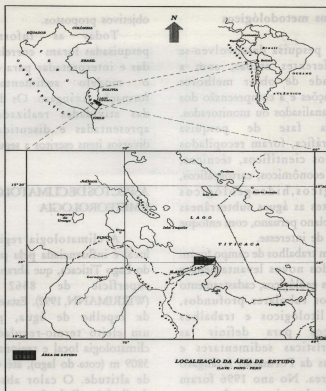


Figura 01: Localização da área de estudo.

Objetivo e problemática da água na região

A pesquisa foi desenvolvida com o propósito de avaliar o potencial hídrico subterrâneo do Aquífero Sedimentar da Formação Azángaro, na área do distrito de Ilave, e determinar as características geométricas e hidrodinâmicas do aquífero.

Na região Altiplânica do Peru, o desenvolvimento da agricultura é limitado devido a influências climáticas e regime pluviométrico irregular, apresentando-se anos de baixas pluviosidades acompanhadas de 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 e também contribuir com os elementos necessários para estabelecer as bases para um gerenciamento adequado.

Aspectos metodológicos

A pesquisa desenvolveu-se em diferentes etapas, com a finalidade de obter melhores informações e a compreensão dos fatores analisados ou monitorados.

Na fase de pesquisa bibliográfica, foram recopilados trabalhos científicos, técnicos, sociais, econômicos, cartográficos, geológicos, hidrogeológicos referentes às águas subterrâneas no Altiplano peruano, com enfoque na área de interesse.

Em trabalhos de campo foram realizados novos levantamentos de dados geológicos, cadastramento de poços tubulares profundos, perfis litológicos e trabalhos geofísicos para definir as características sedimentares e aquíferas da Formação Azángaro nesta área. No ano 1996 foram monitorados vinte e três poços para determinar as variações do aquífero freático, e assim obter informações sobre a dinâmica das águas subterrâneas; estas foram complementadas com testes hidrodinâmicos realizados no poço P-52, com observação no poço P-59. Para fins de avaliação da qualidade das águas, foram coletadas treze amostras de água de poços, de profundidades de 25 a 30 m. Estas foram analisadas no "Laboratório de Hidroquímica do Centro de Pesquisa de Águas Subterrâneas CEPAS IG-USP São Paulo". Alguns parâmetros foram medidos no local de amostragem, com instrumentos portáteis de campo. Em cada trabalho específico utilizou-se métodos diretos e indiretos em concordância com os

objetivos propostos.

Todas as informações pesquisadas foram correlacionadas e interpretadas para definir o modelo sedimentar da formação Azángaro. Os detalhes das atividades realizadas são apresentadas e discutidas nos diversos itens escritos a seguir.

ASPECTOS DE CLIMATOLOGIA E METEOROLOGIA

A climatologia regional e local é influenciada pela presença do Lago Titicaca, que abrange uma superfície de 8562 km² (WIRRMANN, 1992). Esta extensão de espelho de água, produz 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 série histórica de dados meteorológicos do período 1964 a 1993 de cinco estações do "Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología" SENAMHI (Fig. 2). A amplitude

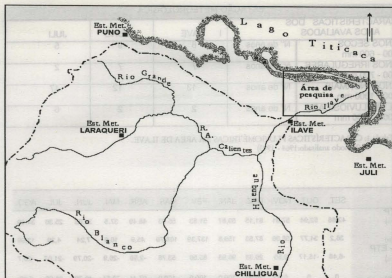


Figura 2: Localização das estações meteorológicas.

utilizada permite ter maior consistência e homogeneidade na interpretação das diferentes variáveis consideradas.

Por sua localização geográfica, esta região caracteriza-se por apresentar um tipo climático chuvoso e frio, com períodos extremamente secos durante a primavera, outono e inverno.

Dentro do panorama descrito, o regime pluviométrico desta área foi interpretado a partir da análise estatística de dados de frequências de precipitação dos últimos trinta anos de três estações meteorológicas vizinhas. Na tabela 1 ilustra-se os resultados encontrados desta variável, observando-se predomínio de anos secos e irregulares de escassa precipitação, inferior a 700 mm, que não chega a satisfazer a demanda de água para a agricultura. Segundo

os dados interpretados, a ocorrência de anos secos é de caracter cíclico, que se apresenta a cada três anos aproximadamente. A precipitação média anual para trinta anos é de 701,14 mm, valor que é importante considerar, na análise da recarga dos aquíferos.

Balanço hídrico

Visando entender o comportamento dos recursos hídricos em função de aportes e perdas no ciclo hidrológico, 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, para uma capacidade de campo de 100 mm. A tabela 2 e figura 3 apresenta o comportamento

ESTAÇÃO METEOROLÓGICA				
CARACTERÍSTICAS DOS ANOS AVALIADOS		I LAVE	PUNO	JULI
ANOS SECOS 200 - 600 mm	Nº de anos	8	9	5
ANOS IRREGULARES 600 - 700 mm	Nº de anos	7	7	2
ANOS NORMAIS 700 - 1000 mm	Nº de anos	13	12	17
ALTA PLUVIOSIDADE 1000 - 1200 mm	Nº de anos	2	2	6

Tabela 1: CARACTERÍSTICAS PLUVIOMÉTRICAS NA ÁREA DE ILAVE.
(Período analisado: 1964 - 1993)

	SET.	OUT.	NOV.	DEZ.	JAN.	FEV.	MAR.	ABR.	MAI.	JUN.	JUL.	AGO.
ETP (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
P (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
P - ETP (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
Ar (mm)	0	0	0,55	26,93	100,0	100,0	100,0	97,41	70,51	49,72	28,65	7,95
ETR (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
Excedente (mm)	0	0	0	0	23,86	85,56	53,76	0	0	0	0	0
Déficit (mm)	6,46	18,17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Esc. (mm)	0	0	0	0	11,93	48,75	51,26	25,63	12,82	6,41	3,2	1,6
C. M.U	-0,15	-0,34	0,01	0,43	1,51	1,55	0,97	-0,05	-0,72	-0,74	-0,83	-0,6

ETP : Evapotranspiração Potencial

Ar : Cap. De armazenamento

P : Precipitação

ETR : Evapotranspiração real

P - ETP : variação de reservas

C.M.U : Coeficiente mensal de unidade

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

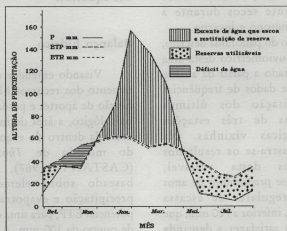


Figura 3: GRÁFICO DO BALANÇO HÍDRICO - MÉTODO DE THORNTHWAITE

mensal do balanço realizado. Observa-se que nos meses de Janeiro a Abril se produz excedentes de água de precipitação que escoam. Durante este período o aquífero recebe as maiores recargas. 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. As poucas precipitações isoladas nesta época não restituem as perdas.

CONSIDERAÇÕES GEOMORFOLÓGICAS E GEOLÓGICAS

O relevo regional do sul do Peru apresenta uma superfície acidentada, devido à presença da Cordilheira dos Andes. As estruturas dominantes da região, desenvolveram diversas configurações morfoestruturais, de características peculiares nas diversas localidades, todas elas desenvolvidas 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 está 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 o 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 da formação calcáreo Ayavacas e arenitos vermelhos do Grupo Puno. (Fig.4.) É de interesse destacar a presença do rio Ilave, 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.

Estratigrafia

Na área afloram quatro unidades estratigráficas (Fig. 4): Formação Calcários Ayavacas do Cretáceo superior. Arenitos

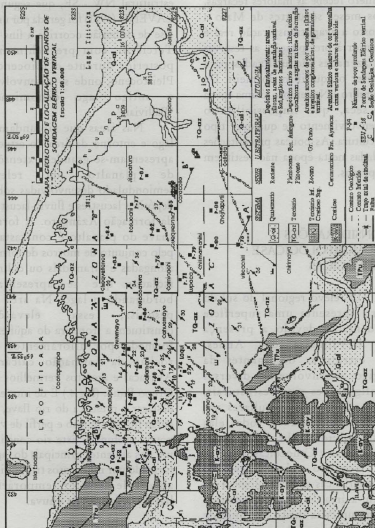


Figura 4 - Mapa Geológico e localização de pontos de sondagem elétrica vertical.

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 descrita por NEWELL, (1949). 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 análise de registros litológicos de poços, detalham a geometria e natureza das camadas. Esta informação é apresentada nos itens a seguir.

Depósitos Quaternários recentes, apresentam-se caoticamente distribuídos nas margens do córrego do rio Ilave, formando aquíferos importantes por sua boa permeabilidade, com recarga contínua ligados a antigos paleovales. 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.

Elementos Estruturais

Os elementos estruturais influem direta ou indiretamente na dinâmica das águas subterrâneas; assim 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 STEINMAN (1929). A seqüência evolutiva teve seu início 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). Neste processo evolutivo chegou a se desenvolver 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 Altiplânica 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 secundarias. Esta disposição dos elementos lineares favorece no aporte de recargas para o reservatório da área de pesquisa.

PROSPECÇÃO 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.

Procedimento aplicado

O método de elétrorresistividade foi aplicado para levantamento de dados, utilizando-se um resistímetro 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 Km². 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).

Interpretação

Os dados de campo foram interpretados com ajuda de softwares, utilizando-se o programa RESIST desenvolvido para 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, foram elaborados 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 isópacas e mapas de morfologia da base e topo da camada aquífera.

Perfis Geológico - Geofísicos

As seções longitudinais e transversais (Fig. 4, 5, 6), mostram uma adequada visualização da variação lateral e vertical das diferentes camadas, expondo a morfologia e geometria do aquífero

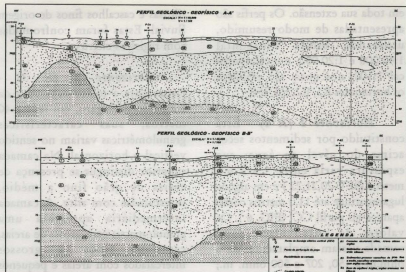


Figura 5 - Perfil Geológico - Geofísico AA', BB'.

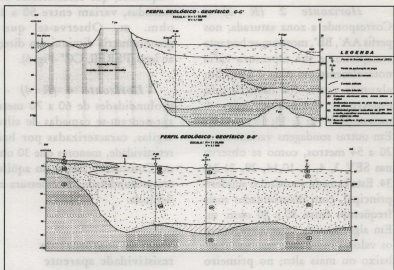


Figura 6 - Perfil Geológico - Geofísico CC', DD'.

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 ohm.m a 150, 207 e 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. Em algumas zonas foi identificado espessuras menores que 8 metros.(SEV 2; 7; 13; 15; 17e 19). Em outras sondagens variam 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, estas 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 origem fluvial. Estas foram confrontadas com registros elétricos.

Horizonte 3 (R 3) - Representa a maior espessura da formação Azângaro, em média 40 metros, suas características granulométricas variam no sentido vertical e horizontal. Na camada superior distingue-se presença de areias de grão fino a médio, intercaladas com silte. A 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 nas camadas. 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.

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 FIGURA. 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 isorresistividades diminuem para menos que 50 ohm. m na zona "A" e parte da zona "B", que correspondem a sedimentos finos (siltes, areias siltosas e argilas), como se observa 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 FIGURA 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).

Mapa de Isópacas do aquífero

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

Mapa da morfologia da base do aquífero

Na figura 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". A menor cota de 3760 e 3750 m apresenta-se contornando a área central da figura, correspondendo a um paleo vale.

Mapa da morfologia do topo da camada aquífera

A figura 10 ilustra a morfologia do topo da camada aquífera. Seu relevo é menos acidentado com uma diferença de nível entre 3816 e 3800 m que gera uma pendente suave no sentido do Lago Titicaca.

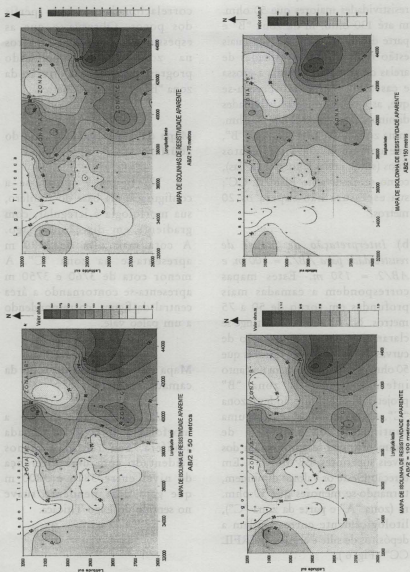


Figura 7: MAPA DE CONTORNOS DE RESISTIVIDADE APARENTE AB/2 50, 70, 100 Y 150 m.

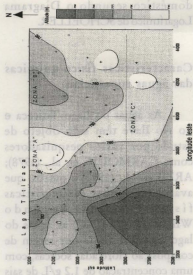


Figura 8 - Mapa de Isopacas do aquífero.

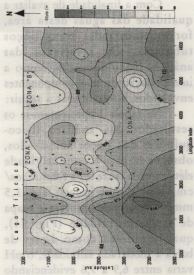


Figura 9 - Morfologia da base do aquífero.

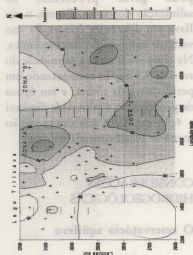


Figura 10 - Morfologia do topo da camada aquífera.

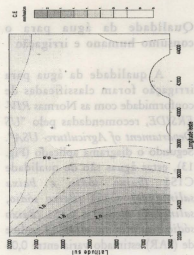


Figura 11 - Mapa de isocondutividade elétrica ano de 1996.

HIDROQUÍMICA

Com a finalidade de avaliar a qualidade das águas desta área, foram amostradas treze poços tubulares. Os resultados das análises físico-químicas, como a interpretação de seus componentes envolvidos, apresentados a seguir:

Na tabela 3 apresentam-se os resultados das análises físico-químicas dos poços amostrados, observa-se que 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), qualificando-as como águas de baixa a moderada salinidade, o pH varia entre 6,9 a 9,6 evidenciando o caracter alcalino, sua 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.

Qualidade da água para o consumo humano e irrigação

A qualidade da água para irrigação foram classificadas de conformidade com as Normas *RIVERSIDE*, recomendadas pelo "US Department of Agriculture- USA". Segundo o diagrama aplicado (Fig. 13), estas águas são de qualidade C1S1 (*baixo sódio e baixa salinidade*), C2S1 (*Baixo sódio, salinidade media*) e C3S1 (*Baixo sódio e salinidade alta*). O índice de (SAR) estimado varia entre 0,05 a 4,10 e um valor máximo de 8,96 no P-80. Os resultados indicam águas apropriadas para irrigação

sem perigo de alcalinização dos solos e de boa qualidade para uso doméstico segundo o Diagrama Logarítmico de SCHOELLER.

Características físico-químicas das águas superficiais

As águas do Lago Titicaca e do rio Ilave têm sido objeto de estudo por vários pesquisadores como CARMOUSE et. al., (1978); ARZE et. al., (1992) e outros, que avaliaram as suas características físico-químicas. Segundo WIRRMANN (1987) as águas do lago caracterizam-se por serem de composição cloretadas sódicas, com uma concentração de 1,2 g/L de sais dissolvidos, o pH varia de 8,7 a 7,8, condutividade 1.343 mS.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. Porém o rio Ilave 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.

CONSIDERAÇÕES HIDROGEOLÓGICAS

O reservatório aquífero

A Formação Azángaro constitui a unidade estratigráfica de interesse hidrogeológico na área de

Poço	C.E. mmhos /cm	T °C	pH	CATIONS (meq/L)			ANIONS (meq/L)				SAR	STD. ppm	Dureza Total ppm	CLASSIFICAÇÃO	
				Ca	Mg	Na	K	CO ₃	HCO ₃	NO ₃				Geoquímica	Potabi- lidade
54	1,5	16,8	7,68	3,90	2,041	5,870	0,389	0,007	0,0030	0,028	0,340	5,980	3,40	Clorurada Cálcica	Boa
59	1,0	16,7	7,43	4,36	1,216	0,652	1,794	0,005	0,0020	0,009	0,985	2,800	0,39	Clorurada Cálcica	Boa
63	0,4	13,3	7,80	1,61	0,945	0,739	0,230	0,004	0,0020	0,000	0,037	0,307	0,65	Clorurada Cálcica	Boa
64	0,1	12,8	7,24	0,59	0,445	0,034	0,161	0,002	0,0001	0,000	0,113	1,410	0,05	Clorurada Cálcica	Boa
65	0,5	12,2	9,60	3,05	1,116	2,390	0,364	0,006	0,0030	0,000	0,443	0,459	0,43	Clorurada Cálcica	Boa
66	0,9	16,4	7,11	3,27	2,816	1,040	0,256	0,004	0,0020	0,004	1,646	2,232	0,59	Clorurada Cálcica	Boa
68	0,8	11,6	7,79	2,91	1,891	1,690	0,282	0,008	0,0043	0,000	0,104	0,538	1,09	Clorurada Cálcica	Boa
75	0,3	14,2	7,86	0,94	0,475	0,608	0,264	0,090	0,0009	0,004	0,003	0,036	0,72	Bicarbonat. Cálcica	Boa
77	0,4	13,2	7,60	1,29	0,966	0,478	0,153	0,004	0,0020	0,000	0,081	10,563	0,45	Clorurada Cálcica	Boa
79	0,1	12,7	7,70	0,41	0,375	0,369	0,128	0,001	0,0006	0,000	0,117	0,087	0,59	Clorurada Cálcica	Boa
80	0,1	12,8	7,93	0,46	0,275	5,414	0,461	0,002	0,0010	0,000	0,023	0,044	8,96	Clorurada Sódica	Boa
82	0,2	11,8	8,60	0,58	0,766	3,369	0,333	0,005	0,0028	0,003	0,017	0,138	4,10	Clorurada Sódica	Boa
86	0,2	12,2	7,78	0,86	0,500	0,391	0,179	1,930	0,0010	0,000	0,001	0,093	0,47	Bicarbonat. Cálcica	Boa

Tabela 3.- Resultados de Análises Físico-Químicas das Águas - Ano 1996

Análises realizadas no Laboratório de Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas - Instituto de Geociências - USP
As amostras foram coletadas no mês de Agosto de 1996 (Período de estiagem)

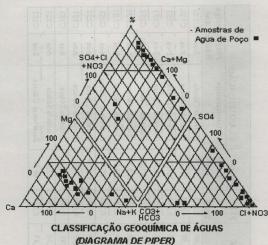


Figura 12 - Classificação Geoquímica de Águas (Diagrama de Piper)

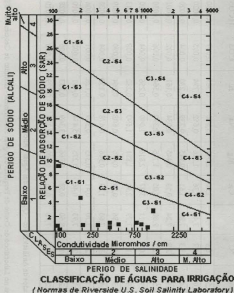


Figura 13 - Classificação de Águas para Irrigação. (Normas de Riverside U.S. Soil Salinity Laboratory).

estudo, cuja extensão é superior a 96 km². 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.

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

Mostra as características do reservatório nas proximidades do lago (orientação NW - SE). Na FIGURA. 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 argilosos, com uma espessura de 6,5 a 11,0 metros, de ampla distribuição em toda a área.

Unidade 2 - Na parte média do perfil mostra-se uma sequência conspicua 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.

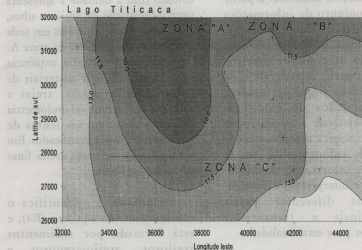
Na parte central a sequência está constituída por materiais de granulometria grossa: areias e cascalho de diferente granulometria presença de pequenas lentes de argilas e siltes interestratificados. Em profundidade, ocorrem areias finas siltosas e argilosas.

Unidade 3 - Identifica o embasamento do aquífero (R4), e está formada por sedimentos argilosos, argilo-arenosos e argilo-siltosos, 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.

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 específica dos poços desta área é de 13 m³/h.m.

varia entre trinta metros no setor oeste (Zona "A") e sessenta metros no setor leste (Zona "B"). Em contato com a unidade 1 apresentam



argilo-silicosos, argilo-arenosos e argilo-silicosos. Nas sondagens apresentam resistividades menores que 30 ohm.m, não sendo delimitada 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.

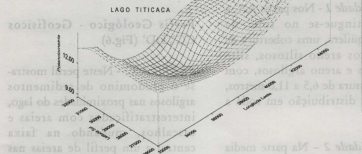


Figura 14 - Mapa Potenciométrico - Fevereiro de 1996

estudo, cuja extensão é superior a 98 km. As características sedimentares e hidrogeológicas desta formação, analisadas a partir

de um conjunto de informações geomorfológicas, correções de posto, vinte e quatro, e outros, mesmo, pelo menos, palcos, do modo de estudo.

analisadas, cada uma delas, longitudinalmente e levantados, em

Perfil Geológico - Geofísico A-A' e BB' (Fig. 2)

Mostra as características do reservatório nas proximidades do lago (seção NW - SE). Na FIG. 2, 5 distinguem-se três

camadas de argila, com espessuras de 5 a 11 metros, e areia média, com espessuras de 5 a 11 metros, e areia média, com espessuras de 5 a 11 metros, e areia média, com espessuras de 5 a 11 metros.

Unidade 2 - Na parte média do perfil mostra-se uma sequência consolidada de materiais de granulometria grossa, com resistividades no intervalo de 10 a 30 ohm.m, podendo ser classificadas no sentido vertical, sua espessura

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 específica dos poços é de 20 m³/h.m (P-66) e 17 m³/h.m (P-62).

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.

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 figura 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 %.

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 de 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 possibilidade de recarga induzida por águas provenientes do Lago. Porem comparando a composição química das águas, não foi evidenciado a recarga induzida. As águas do lago, são do tipo cloretada

sódica (CARMOUSE et. al., In: WIRRIMAN, 1987) e de alta salinidade; as águas dos poços são do tipo cloretada cálcica.

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 início 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 figura 15.

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

Rebaixamento	Recuperação
T = 777 m ² /dia	T = 826 m ² /dia
K = 20 m/dia	K = 21 m/dia

POÇO DE OBSERVAÇÃO P-59

Rebaixamento	Recuperação
T = 758 m ² /dia	T = 764 m ² /dia
K = 19 m/dia	K = 20 m/dia

Raio de influência fictício R = 1220m

Os dados quantificados evidenciam uma característica muito singular destes aquíferos, que estão relacionadas a poços de alta transmissividade e permeabilidade (VILLANUEVA et. al., 1984)

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 de 36 m³/h até 360 m³/h. A vazão média é de 178 m³/h., e 45 % dos poços destacam-se por sua alta vazão específica superiores a 16 m³/h.m (Fig. 16). Em dois poços (P-64 e P-74) esta relação atinge 80 m³/h.m , para vazões de 360 m³/h e rebaixamento de 4,50 m. O mapa da figura 17 mostra isovalores de vazão específica e sua distribuição, diferenciando áreas de boa e de baixa produtiva.

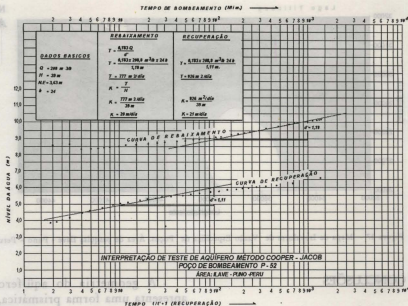


Figura 15 - Curva Representativa de Teste de Aquífero Poço P-52

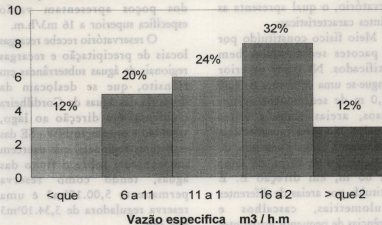


Figura 16 - Histograma de Vazão Específica de Poços Cadastrados

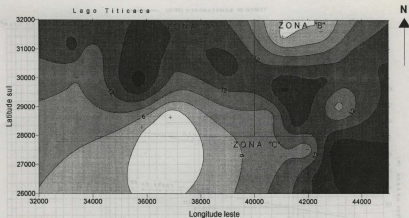


Figura 17 - Mapa de Isovalores de Vazão Específica de Poços. Área de pesquisa Ilave - Puno - Peru

CONCLUSÕES

A interação dos componentes envolvidos, que definem de algum modo as características hidrogeológicas da formação Azángaro, nos permitiram visualizar e obter um modelo conceitual do reservatório, o qual apresenta as seguintes características:

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 produtividade. Observa-se que 45% dos poços apresentam vazão específica superior a 16 m³/h.m.

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 5,00.10⁶m³ e uma reserva reguladora de 3,34.10⁶m³ 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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

CARMOUSE, J. P ; ARZE, C ; QUINTANILLA, A J; MIRANDA, G. (1978) Estudio de la Regulación Hidroquímica del Sistema Fluvio Lacustre del Altiplano. Revista Boliviana de Química, v. 2, n. 1, p. 2-22.

CASTANY, G. (1967) *Traité Pratique Des Eaux Souterraines*. Paris. Editora Dunod. 661 p.

ILTIS, A ; CARMOUSE, J. P ; LEMOALLE, J. (1992) Características Físico-químicas del Agua. In: DEJOUX, C. ; ILTIS, A. (eds) El Lago Titicaca Síntesis del Conocimiento Limnológico Actual. Bolivia, ORSTOM. p. 107 - 113
INSTITUTO GEOLOGICO MINERO METALURGICO. (1993) Geología de la Cordillera Occidental y Altiplano al Oeste del Lago Titicaca - Sur del Perú. (Proyecto Integrado del Sur) Lima, INGEMMET. 257 p (Boletín 42 Serie A)

INSTITUTO GEOLOGICO MINERO METALURGICO. (1995) Geología del Perú. Lima, Editora Firmat. 177p (Boletín 55, Serie A)

LA VENU, A. (1981) *Origene et Évolution Neotectonique*

du lac Titicaca. La Paz Revue d'Hydrobiologie Tropicale, v.14, n. 4, p. 289-297.

NEWELL, N. D. (1949) Geology of the lake Titicaca Region Puno and Bolivia. Geological mer. Men, n. 36, p. 3 -111.

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

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

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

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

VEJA, C. L. (1968) Estudio de Niveles del Lago Titicaca. In:

SEMINARIOLATINOAMERICANO
DE IRRIGACIÓN CARACAS, 5.,
Caracas, 1968. 75 p. (Boletín de
SENAMHI Lima)

VILLANUEVA, M. M.; IGLESIAS, L.
A (1984) Poços y Acuíferos,
Técnicas de Evaluación Mediante
Ensayos de Bombeo. Madrid.
Editora Iberguesa. 425p

WIRRMANN, D. (1992) Morfología
y Batimetría. In: DEJOUX,
C.; ILTIS, A. (eds) El Lago
Titicaca : Síntesis de Conocimiento
Limnológico Actual. La Paz,
ORSTOM/HISBOL. p.1-37.

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

ROCHE, M.; BOURGES, J.; COR-
TES, J.; MATTOS, R. (1993)
Climatología e Hidrología de
la Cuenca del Lago Titicaca
In: CLAUDE, D.; ILTIS, A. (eds)
El Lago Titicaca Síntesis del
Conocimiento Limnológico Actual.
La Paz, ORSTOM/HISBOL. p.81-
103.

STEINMAN, G. (1970) Geología del
Perú. Lima, Sociedad Geológica del
Perú. 458p.

VEJA, C. L. (1968) Estudio de Nive-
les del Lago Titicaca. In:

REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS

ARZE, C.; QUINTANILLA, J. (1993)
La Regulación Hidráulica del
Lago y la Hidrología de sus
Tributarios. In: DEJOUX, C.; ILTIS,
A. (eds) El Lago Titicaca Síntesis del
Conocimiento Limnológico Actual.
Bolívia, ORSTOM. p. 113 - 126

CARMOUSE, J. P.; ARZE, C.;
QUINTANILLA, J.; MIRANDA,
G. (1978) Estudio de la Regulación
Hidrográfica del Sistema Fluvio
Lacustre del Altiplano. Revista
Boliviana de Química, v. 2, n. 1, p.
2-22.

CASTANY, G. (1967) Traité Pratique
Des Eaux souterraines. Paris.
Edition Dunod 661 p.

ILTIS, A.; CARMOUSE, J. P.;
LEMOALLE, J. (1993) Características
Físico-químicas del Agua. In:
DEJOUX, C.; ILTIS, A. (eds) El
Lago Titicaca Síntesis del
Conocimiento Limnológico Actual.
Bolívia, ORSTOM. p. 107 - 117.

METALURGICO. (1993) Geología
de la Cordillera Occidental y
Altiplano al Oeste del Lago Titicaca
- Sur del Perú. (Proyecto Integrado
del Sur) Lima, INGENMET. 257
p. (Boletín 42 Serie A)

INSTITUTO GEOLOGICO MINERO
METALURGICO. (1995) Geología
del Perú. Lima, Editora Pirma.
177p. (Boletín 55, Serie A)

LAVENU, A. (1981) Orígenes
et Evolución Neotectónica