

RI
134



9

Fevereiro 1958

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS

- CPRM -



PLANIFICAÇÃO DO APROVEITAMENTO
DOS RECURSOS DE ÁGUA SUBTERRANEA
DA ÁREA METROPOLITANA DO RECIFE.

199
I/2009

Metodologia e Plano de Trabalho

Recife - 1977

ÍNDICE

ÍNDICE

1.0 - INTRODUÇÃO

2.0 - METODOLOGIA E PLANO DE TRABALHO

2.1 - Uniformização, ordenação e avaliação dos dados existentes.

2.2 - Inventário Hidrogeológico detalhado.

2.3 - Medições periódicas de níveis d'água.

2.4 - Complementação da base geológica preliminar - Foto-interpretação básica e estudos geológicos.

2.5 - Estudos climatológicos e hidrológicos.

2.6 - Testes de bombeamento e interpretação dos resultados.

2.7 - Estudos Hidroquímicos.

2.8 - Estudos geofísicos e perfilagens elétricas.

2.9 - Perfuração de piezômetros - Assessoria ao programa de poços desenvolvido pela COMPESA.

2.10 - Caracterização dimensional dos sistemas aquíferos e determinação das reservas permanentes.

2.11 - Balanço Hidrometeorológico preliminar - Balanço Hidráulico da zona a partir de modelo de simulação digital.

2.12 - Cálculo das relações água doce/água salgada.

2.12.1 - Cálculo da profundidade da interface com ausência da zona de mistura - Formulas de Ghyben - Herzberg e Hubert.

- 2.12.2 - Largura da zona de mistura e efeito da oscilação das marés.
- 2.12.3 - Metodos de cálculo para limitação da intrusão marinha.
- 2.12.4 - Aspectos químicos das relações água doce / água salgada.
- 2.12.5 - Prevenção e controle da intrusão mari-nha.
- 2.13 - Planificação do aproveitamento - Utilização de modelo analítico de simulação.
 - 2.13.1 - Características do modelo SIMAQ.
 - 2.13.1.1 - Esquema Hidrogeológico
 - 2.13.1.2 - Regimes de bombeamento.
 - 2.13.1.3 - Definição de poços e baterias
 - 2.13.1.4 - Projetos de poços
 - 2.13.1.5 - Projetos de bombas
 - 2.13.1.6 - Especificações de exploração
 - 2.13.1.7 - Determinação do esquema de 'exploração.
 - 2.13.1.8 - Cálculo do projeto de explo-
ração e dos custos.
 - 2.13.2 - Detalhamento da metodologia do Modelo SIMAQ.
 - 2.13.2.1 - Tratamento do efeito de limi-
tes hidrogeológicos.

2.13.2.2 - Regime hidrodinâmico .

2.13.2.3 - Regime de bombeamento.

2.13.2.4 - Rebaixamentos unitários.

2.13.2.5 - Rebaixamentos totais e níveis dinâmicos.

2.13.2.6 - Análise de rebaixamentos.

2.13.2.7 - Cálculo do consumo de energia

2.14 - Exemplo de utilização do Modelo SIMAQ.

3.0 - CRONOGRAMAS PERT E GANTT

4.0 - ESTIMATIVA ORÇAMENTÁRIA.

1.0 - INTRODUÇÃO

A avaliação e planificação do aproveitamento dos recursos de água subterrânea, assume geralmente relevante importância em qualquer política de desenvolvimento urbano e industrial de uma região. A otimização da exploração desses recursos, requer para serem atingidos os objetivos de máxima rentabilidade e segurança, a utilização de técnicas particulares ou especiais que as pesquisas empreendidas nos últimos anos permitem utilizar segundo procedimentos e metodologias compatíveis com objetivos pre-determinados.

Nos últimos anos, e a nível mundial tem-se verificado um grande incremento no uso e aproveitamento dos recursos hídricos subterrâneos ao mesmo tempo em que tem ocorrido enorme expansão nos conhecimentos científicos e tecnologias relacionados ao estudo do movimento de água subterrânea.

Até relativamente poucos anos, a Hidrogeologia era uma disciplina que somente atraía a atenção de um grupo bastante reduzido de geólogos e engenheiros, e de um grupo ainda menor de planificadores hidráulicos. Na atualidade o número de pessoas interessadas no estudo das águas subterrâneas, nos campos científico, técnico, sócio-econômico e administrativo é já bastante importante, de modo que se está produzindo uma clara consciência do seu interesse social e econômico, tanto nos países desenvolvidos como naqueles em vias de desenvolvimento.

As águas subterrâneas estão relacionadas, com um grande número de fatores geológicos, hidrodinâmicos, físico

químicos e biológicos, associados a incertezas inerentes à natureza, de modo que para seu estudo e utilização tem-se que recorrer a tecnologias por vezes de desenvolvimento muito recente ou de conhecimento pouco comum.

Levando em conta as considerações expostas e em consequência de amadurecida reflexão sobre os problemas potenciais inerentes a uma exploração intensiva e não adequamente planejada, pretende a COMPESA empreender um estudo específico a nível de detalhe, relativo ao aproveitamento dos recursos hídricos subterrâneos da área Metropolitana do Recife, principalmente em face dos fenômenos de salinização recentemente observados nos poços construídos para reforço do abastecimento, na zona de Boa Viagem e Piedade.

Em áreas costeiras sobretudo, o estudo e o conhecimento das relações água doce - água salgada, reveste-se de importância fundamental, devido ao fato de que a redução dos volumes de água doce vertidos ao mar em consequência da exploração, modifica o equilíbrio existente, propiciando o avanço das cunhas salinas e conduzindo a processos de salinização quase irreversíveis ou de reversibilidade extremamente onerosa. Pretende-se portanto, a partir da compreensão dos mecanismos reguladores do equilíbrio, água doce - água salgada, planificar adequadamente a exploração dos aquíferos costeiros, racionalizando a distribuição espacial das captações, à luz dos volumes exploráveis e do zoneamento da demanda, e definindo-se as possibilidades de contribuição de tais recursos, dentro dos limites impostos pelo equilíbrio a ser conseguido entre volumes exploráveis e o avanço das interfaces.

O estudo das relações água doce - água salgada reveste-se de elevada complexidade, de vez que às dificuldades habituais inerentes ao estudo do movimento da água subterrânea, soma-se a existência de águas de densidade diferentes, missíveis, e apresentando as vezes diferenças de viscosidade e temperatura. A intrusão de água salina, regra geral consiste portanto no movimento permanente ou temporal da água salgada em direção ao continente, como resultado da redução do gradiente piezométrico devido a exploração.

A água captada portanto em um aquífero costeiro se saliniza, quando a parte ativa da captação se vê afetada pela zona de mistura que separa a água doce da água salgada, ou pela própria água salgada. Entretanto, este não constitui o único modo de contaminação salina, de vez que outras vezes, a salinização pode ocorrer por processos de filtração vertical através das camadas confinantes do aquífero explorado, ou mesmo por deficiências construtivas do próprio poço. Também deve se considerar a possibilidade de contaminação, através dos cursos d'água superficiais salinizados, em consequência de maior penetração da água do mar nos rios de regiões costeiras rebaixadas tal como se apresenta a planície aluvial do Recife.

À luz das considerações genéricas sobre o problema proposto, constituem objetivos gerais dos estudos em pauta, sua participação no conjunto de esforços desenvolvido pelo Governo, visando o atendimento da crescente demanda urbana e industrial, e em particular equacionar de modo conclusivo a participação da água subterrânea como fonte de suprimento hídrico da zona Metropolitana do Recife.

Representam objetivos específicos a definição de

um conjunto de medidas integradas, no sentido de promover a exploração racional dos recursos subterrâneos disponíveis, através do conhecimento dos mecanismos que regem o atual equilíbrio água doce - água salgada, bem como dos diferentes processos possíveis de salinização em curso. Em outras palavras pretende-se quantificar os volumes exploráveis levando-se em conta não somente o balanço hídrico da área de estudo, como também, o zoneamento da demanda a ser atendida, de modo a compatibilizar a evolução no tempo e no espaço dos níveis piezométricos nos poços, com o conseqüente avanço das cunhas salinas.

A avaliação destes recursos disponíveis depende do levantamento detalhado e conhecimento de numerosos aspectos de índole geológica e hidrogeológica, que mantem estreito relacionamento com os mecanismos influentes :

- Características geológicas da área : Estratigrafia, geomorfologia, litologia, estrutura.
- Parâmetros hidráulicos dos aquíferos e aquitardos : Permeabilidade, Transmissividade, Coeficientes de Armazenamento e Restituição.
- Relações hidráulicas entre as diferentes unidades hidrogeológicas. Características piezométricas e possibilidades de filtração vertical.
- Condicionamento geológico das áreas de captação : Características econômicas dos poços, profundidades de captação, profundidades dos níveis d'água, diâmetros.
- Evolução hidrodinâmica dos níveis piezométricos no tempo e no espaço, como resultado da exploração e estudo das di

ferentes alternativas relativas a espaçamento e volumes bombeados.

- Posicionamento atual das interfaces e estimativa de sua evolução como consequência das diferentes alternativas de captação estabelecidas em função da distribuição espacial da demanda.
- Balanço hídrico : Volumes infiltrados, volumes de transferência entre sistemas, volumes bombeados anualmente, volumes vertidos no mar.
- Características químicas das águas.

O conhecimento desses numerosos fatores, no espírito da concepção estabelecida, evidencia-se como objetivo dos estudos hidrogeológicos em pauta, segundo uma metodologia coerente, que compatibilize as peculiaridades do problema proposto, ao nível atual dos dados disponíveis.

As diversas etapas enumeradas a partir do item 2.0, sintetizam o procedimento metodológico que deverá nortear os estudos em tela. A sequência descritiva, não implica necessariamente em uma rígida separação do ponto de vista operacional, mas deve comportar naturais superposições, supressões e mesmo reorientações a fim de ser obtido um maior rendimento, dentro de uma objetiva sistemática de trabalho.

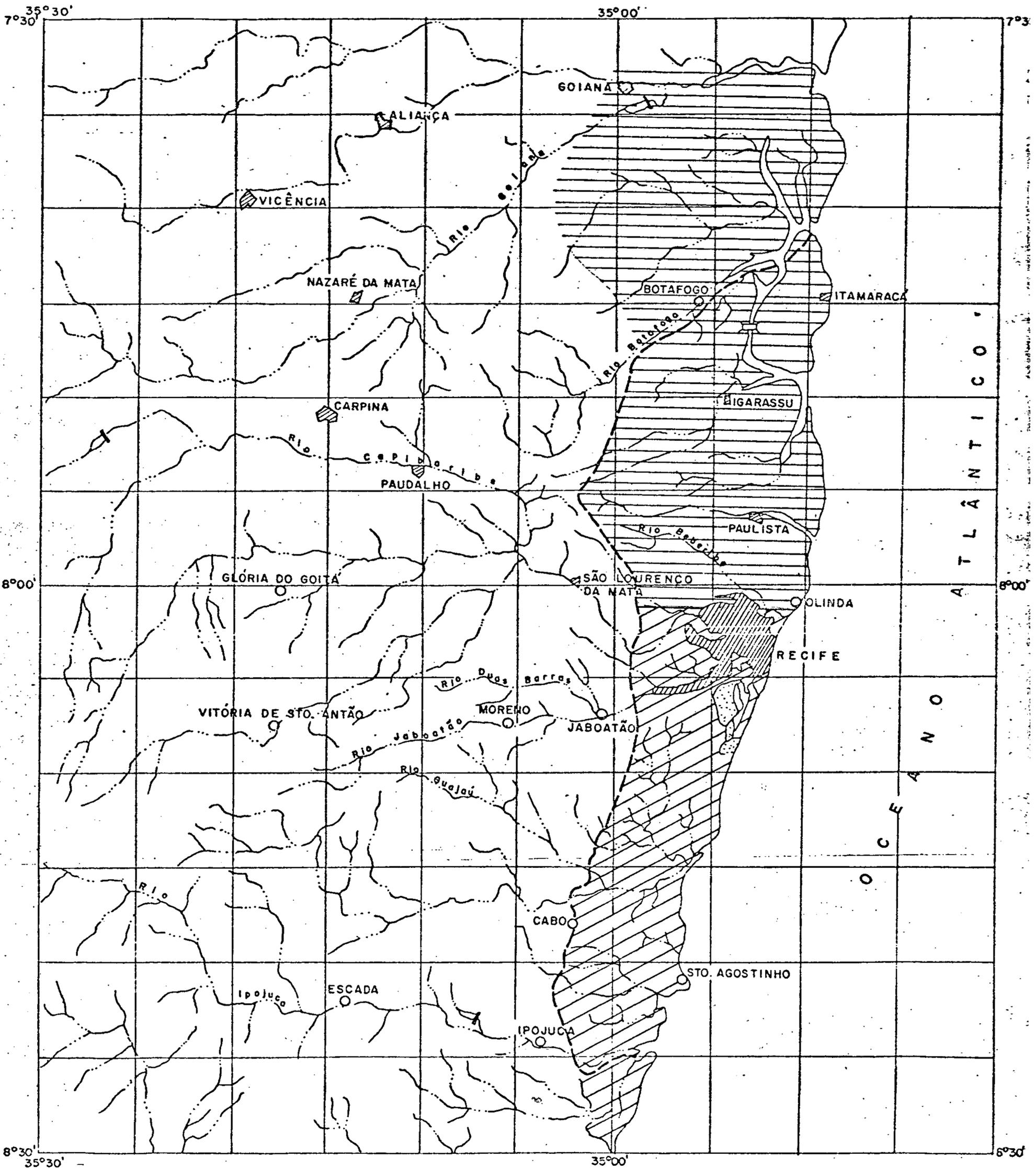
Dado que na área Metropolitana Norte do Recife (Olinda, Paulista, Itamaracá, Goiana), estudos hidrogeológicos de elevado grau de detalhamento, foram recentemente executados para a SUDENE, pela empresa Organização e Engenharia S/A, no qual toda a planificação do aproveitamento dos recursos hidrogeológicos foi efetuada, os estudos ora pro

postos deverão se deter principalmente na zona dominada pela planície do Recife e região Metropolitana Sul, visando sua integração hidrogeológica aos levantamentos efetuados no trabalho referido. Na fig. I, apresenta-se a localização da zona a ser estudada, bem como a região abrangida pelos estudos executados para a SUDENE e a área de integração dos estudos realizados e ora propostos.

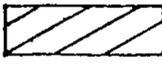
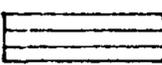
Pretende-se além disso prestar durante a execução dos estudos em pauta, permanente assessoria à COMPESA, no que tange ao acompanhamento, controle e fiscalização das obras de captação em andamento, dentro da programação de perfuração de poços da empresa visando o reforço do abastecimento urbano.

PROJETO PLANIFICAÇÃO DO APROVEITAMENTO DOS
 RECURSOS HIDROGEOLÓGICOS DA ÁREA METROPOLITANA DE RECIFE

LIMITES DA ZONA DE ESTUDO



L E G E N D A

-  Limite da área de integração dos estudos já efetuados com os estudos propostos, visando a planificação global.
-  Área correspondente a planície aluvial do Recife e zona metropolitana sul.
-  Área dos estudos efetuados pela empresa OESA S.A. para o SUDENE / CONESP.

Esc. 1: 500.000

FIG. I

2.0 - METODOLOGIA E PLANO DE TRABALHO

2.0 - METODOLOGIA E PLANO DE TRABALHO

2.1 - Uniformização, Ordenação e Avaliação dos Dados Existentes.

Inicialmente será efetivada uma uniformização e ordenação geral dos dados geológicos e hidrogeológicos disponíveis, ao mesmo tempo em que se procederá a uma análise crítica das informações e trabalho existentes, visando avaliar o grau de significância para os estudos propostos, bem como selecionar os dados passíveis de utilização confiável.

Nesta fase especial atenção será dedicada a análise do estudo efetuado pela OESA, na zona Metropolitana Norte, visando orientar e assessorar a COMPESA no que se refere a adoção das recomendações e conclusões assumidas no referido trabalho. Por outro lado, referido estudo será analisado tendo em vista verificar as necessidades de levantamento de dados complementares para a integração hidrogeológica da área (Olinda - Itamaracá) com a zona objeto dos estudos propostos, dentro do objetivo final de planificação conjunta dos recursos subterrâneos em toda a região Metropolitana. Esta primeira etapa consistirá também na sintetização dos mapas hidrogeológicos e geológicos disponíveis, que deverão constituir as bases provisórias para início dos levantamentos complementares. Tais bases provisórias deverão ser elaboradas sobre a planimetria existente à escala de 1:25.000, a partir das cartas geológicas e hidrogeológicas existentes em diferentes escalas. Sobre estas bases, será locada a rede de observação de pontos d'água já catalogados, devendo isso permitir a visualização da situação existente e a identificação daquelas zonas onde a densidade mostra-se ainda insuficiente para o delineamento da configuração pie

zométrica dos diferentes sistemas. Em princípio considera-se que uma densidade de um ponto por km², deverá satisfazer os objetivos a que se destinam os estudos a nível de detalhe.

A elaboração das bases geológicas possibilitará por outro lado, a identificação das áreas onde deverão ser intensificados os estudos de fotointerpretação e mapeamento geológico no campo, tendo em vista complementar no detalhe requerido pela escala 1:25.000, a cartografia geológica existente. As figuras II e III apresentam a cobertura hidrogeológica, topográfica e aero-fotogramétrica disponível.

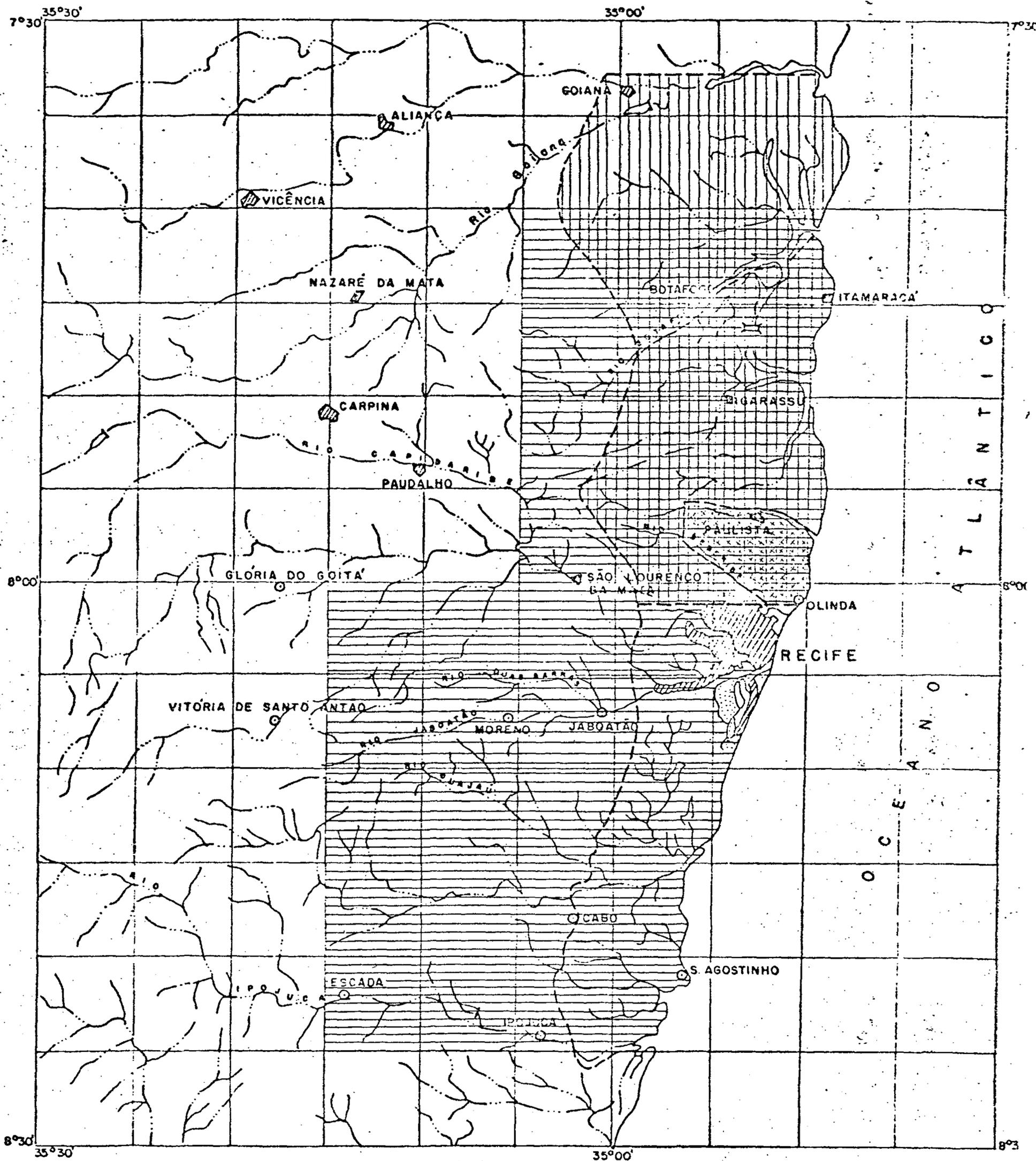
2.2 - Inventário Hidrogeológico detalhado

Visando a implantação de uma rede geral de observação dos níveis d'água, serão iniciados os trabalhos de inventário hidrogeológico no campo de forma sistemática, em função das características de cada zona. Inicialmente preparar-se-á um catálogo geral dos pontos d'água já identificados em trabalhos anteriores, segundo os modelos apresentados nas figuras IV a VI. As informações relativas aos novos pontos cadastrados serão acrescidas ao catálogo básico preliminar, visando a confecção do catálogo definitivo, o qual condensará toda a informação hidrogeológica pontual, passível de processamento e tratamento estatístico. Ao mesmo tempo, serão acrescidas ao catálogo básico preliminar as medições atualizadas que deverão ser efetuadas nos poços anteriormente inventariados.

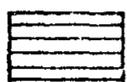
Cada ponto catalogado disporá de uma ficha de cadastramento especial, onde além de constar os dados gerais obtidos dos trabalhos anteriores, permitirá o arquivamento de informações complementares - perfil técnico de sondagem,

PROJETO PLANIFICAÇÃO DO APROVEITAMENTO DOS
RECURSOS HIDROGEOLÓGICOS DA ÁREA METROPOLITANA DE RECIFE

DOCUMENTAÇÃO HIDROGEOLÓGICA



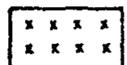
LEGENDA



RECONHECIMENTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO DO RECIFE E MUNICÍPIOS ADJACENTES - DSE/SUDENE



REGIÃO CENTRO-LESTE DA BACIA POTIGUAR E BACIAS COSTEIRAS DA PARAIBA E PERNAMBUCO - CONESP/DESA



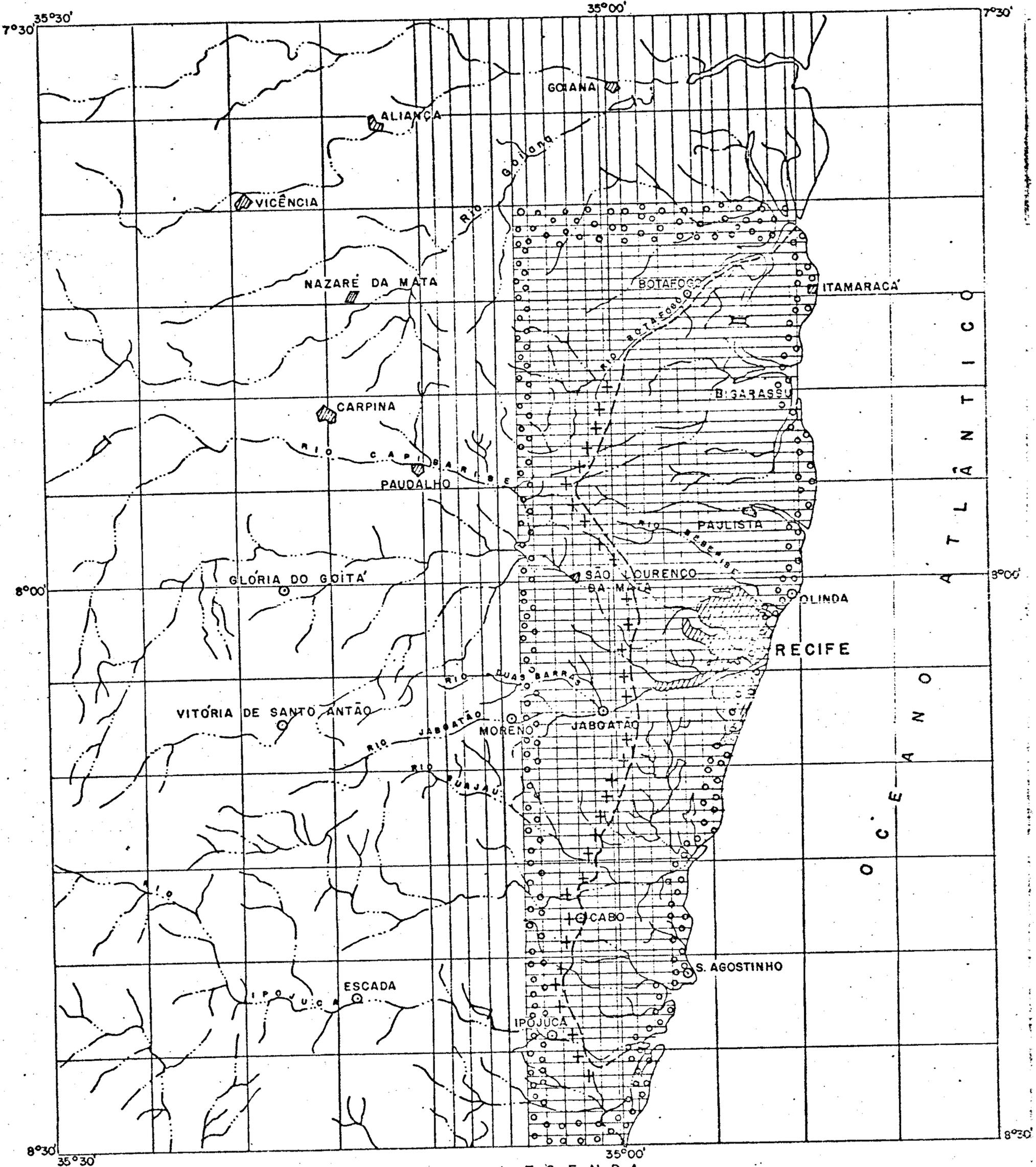
ESTUDO HIDROGEOLÓGICO DA ÁREA DE OLINDA - PLANIDRO

FIG. II

ESCALA 1:500.000

PROJETO PLANIFICAÇÃO DO APROVEITAMENTO DOS RECURSOS HIDROGEOLÓGICOS DA ÁREA METROPOLITANA DE RECIFE

— COBERTURA TOPOGRÁFICA E AERO-FOTOGRAMÉTRICA



LEGENDA

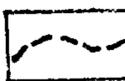
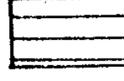
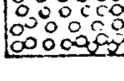
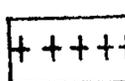
- | | | |
|---|---|---|
|  LIMITE DA ÁREA DE ESTUDO |  TOPOGRAFIA 1:25.000 |  COBERTURA AERO-FOTOGRAFAMÉTRICA Esc. 1:30.000 |
|  CONTATO DA ZONA SEDIMENTAR COM O EMBASAMENTO CRISTALINO |  TOPOGRAFIA 1:100.000 | |

FIG. II

ESCALA 1:500.000

perfil litológico, tabelas, gráficos e resultados de testes de bombeamento, análises químicas e perfis elétricos.

A análise e correlação dos perfis litológicos dos poços perfurados deverá permitir a individualização dos diferentes sistemas hidrogeológicos, bem como a compreensão das características estratigráficas e estruturais da área.

Os trabalhos de campo serão realizados mediante o uso das fichas individuais de cadastramento e constarão essencialmente da obtenção dos dados seguintes:

- Pesquisa, identificação e locação do ponto, levando-se em conta o critério de densidade ótima estabelecido. Croquis de situação na ficha de cadastramento;
- Profundidade do poço e do nível piezométrico;
- Diâmetros de perfuração, revestimento e filtros;
- Zonas de cimentação e encascalhamento;
- Nível dinâmico, rebaixamento e vazão de bombeamento;
- Equipamento instalado : unidade de bombeamento, tipo e potência do motor, tipo de bomba e volume do reservatório;
- Utilização da água : usos público , doméstico, industrial etc.
- Produção média, diária e anual;
- Análises químicas preliminares : determinação de condutividade, cloretos, pH;
- Coleta de amostra d'água para análise química completa em laboratório.

A partir dos resultados químicos parciais obtidos no campo (sais totais, cloretos), e das características

dos pontos inventariados em ordem decrescente de interesse, (poço tubular, manual, fonte, etc.), e da densidade ótima de pontos para observação da evolução geoquímica e variação da salinidade (um ponto por 10 km^2), serão selecionadas as amostras para análise química completa, as quais deverão fornecer as concentrações e informações relativas aos elementos seguintes :

- Cálcio, Magnésio, Sódio, Potássio, Sulfato, Bicarbonato , Sais Totais, Dureza e Alcalinidade de Carbonatos, de Bicarbonatos e de Hidróxido, Condutividade e pH, Nitratos e Cloretos.

Os dados coletados no inventário geral, serão submetidos a um tratamento estatístico visando delin^{ir} o quadro atual de utilização dos recursos hídricos subterrâneos.

No que se refere a determinação da cota dos poços inventariados, serão utilizados os mapas da FIDEM, as escalas de 1:2.000 e 1:5.000, respectivamente com curvas de nível de 0,5 m e 1 m, que deverão proporcionar uma aproximação satisfatória para a altimetria dos pontos da rede geral, tendo em vista o delineamento piezométrico, e a elaboração dos mapas especiais de isópacas, contorno estrutural etc.

2.3 - Medições periódicas de níveis d'água

Medições periódicas das variações piezométricas deverão ser efetuadas, em uma sub-rede de poços representativos selecionados da rede geral de observação implantada, visando determinar as variações mensais ou sazonais da superfície piezométrica, e as flutuações ritmicas causadas por influências externas, tais como variações de pressão at

mosférica e marés.

Na seleção dos poços de observação, levar-se-a em conta suas características construtivas, localização estratégica com respeito ao fenômeno a ser estudado, a existência de perfil litológico descrito e a identificação do aquífero explorado e suas relações com os demais sistemas. Estas medidas sistemáticas, a serem realizadas com frequência quinzenal ou mensal, serão utilizadas para ajuste e calibragem dos modelos na etapa final dos trabalhos bem como para permitir determinações de eficiência barométrica e das marés. Estes poços deverão também ser utilizados para coleta periódica de amostras para análise química completa, sobretudo naqueles onde se tem verificado fenômenos de progressiva salinização. Os resultados e sua evolução serão comparados com análises de águas superficiais e de outros aquíferos captados, visando a compreensão dos mecanismos locais de salinização. Não se deve descartar a utilização de técnicas isotópicas, através das determinações de trítio e carbono - 14, mediante assessoria e consultoria de isotopista da Universidade Federal de Pernambuco, visando a definição dos processos locais de salinização.

Os poços da sub-rede de observação sistemática, utilizados para estudo do comportamento e posição das interfaces, deverão ser nivelados geometricamente, tendo em vista a necessidade de elevada precisão na determinação da cota dos níveis d'água em relação a nível médio das marés. Para medições contínuas das flutuações dos níveis d'água, sobretudo em poços selecionados para estudo de eficiência barométrica, efeitos dos rios e das marés, cogitar-se-á da instalação de dois ou três linígrafos.

2.4 - Complementação da base geológica preliminar-Foto- interpretação básica e estudos geológicos.

Paralelamente ao desenvolvimento do inventário hidrogeológico no campo, as bases geológicas preliminarmente elaboradas à escala de 1:25.000 a partir dos estudos existentes serão complementadas visando o alcance do grau de detalhe e precisão inerentes à escala adotada. Serão realizados perfis geológicos de controle perpendiculares a direção geral do acamamento regional com vistas ao detalhamento litológico e estratigráfico das formações, a avaliação de espessuras mediante controle altimétrico, além da identificação de descontinuidades e falhamentos especialmente através da foto-interpretação básica, a qual possibilitaria a verificação da extensão e continuidade desses acidentes, de especial interesse no estudo hidrodinâmico dos aquíferos. Os estudos geológicos consistirão em caminhamentos e observações locais com coleta de amostras para detalhamento de contatos geológicos e correlações estratigráficas. Os estudos de foto-interpretação serão implementados, principalmente nas zonas de mapeamentos conflitantes ou duvidosos, enquanto que a análise e correlação de perfis litológicos de poços existentes e de seções de sub-superfície deverá permitir a compreensão das feições estruturais e estratigráficas da área, sobretudo no que tange a integração e correlação geológica da planície do Recife e área Metropolitana Sul, com a zona de Olinda - Paulista - Itamaracá. Assim, a partir dos dados estratigráficos, litológicos e geomorfológicos levantados, proceder-se-á a uma análise estrutural da zona, no propósito de determinar a extensão, caracterizar dimensionalmente as diferentes unidades hidrogeológicas, identifi

car as descontinuidades e falhas de modo a se estabelecer as condições limites necessárias ao estudo do comportamento hidrodinâmico dos sistemas individualizados. Nesse particular os mapas de isópacas, contorno estrutural e de isóbatas, bem como a elaboração de blocos diagramas serão de grande interesse para os objetivos dos estudos geológicos a serem efetivados.

2.5 - Estudos climatológicos e hidrológicos

Os estudos climatológicos e hidrológicos serão desenvolvidos a partir dos dados existentes, principalmente os obtidos pela SUDENE na rede hidrometeorológica e fluviométrica implantada na área. Esses estudos visarão caracterizar do ponto de vista climático e hidrológico a área estudada, especialmente no que se refere a obtenção dos dados necessários a avaliação preliminar do balanço hídrico da zona e para o ajuste e calibragem do modelo matemático de simulação digital.

Serão calculadas as isoietas de precipitações médias mensais e máximas mensais e anuais, correspondentes a diversos períodos de retorno. A fim de analisar os fenômenos térmicos, serão elaborados mapas de isoterms nos seus valores médios, mínimos e máximos médios e extremos absolutos e mapas de oscilação de cada um dos valores de temperatura. Serão elaborados mapas de isolinhas de insolação, evaporação (Piché, tanque A), nebulosidade e umidade relativa. Com base nestes dados serão feitas estimativas de evapotranspiração aplicando as fórmulas de Thornwaite, Penmann e Turc.

Os estudos hidrológicos serão desenvolvidos principalmente para a determinação dos rendimentos médios e va

zões específicas das diversas bacias, como também para definição do regime de estiagem, com o objetivo de apresentar uma estimativa das contribuições do lençol subterrâneo nas pequenas bacias incluídas na área sedimentar. Para isto serão analisadas as curvas de esgotamento obtidas nos postos fluviométricos instalados, procedendo-se através do método de Barnes, a separação do escoamento superficial e a avaliação da contribuição subterrânea.

2.6 - Testes de bombeamento e Interpretação

Grande parte dos trabalhos de campo consistirá na realização de testes de aquífero a fim de caracterizar hidráulicamente e avaliar os parâmetros hidrodinâmicos (transmissividade, permeabilidade e armazenamento) dos diferentes sistemas identificados. Os testes deverão ser divididos em duas categorias. Na primeira, correspondente a ensaios de curta duração utilizando-se moto-bombas instaladas, os parâmetros hidráulicos serão estimados a partir dos dados de capacidade específica. A outra categoria corresponde a testes de longa duração, podendo se desenvolver por um período mínimo de 8 horas até vários dias, na dependência das verificações relativas ao comportamento hidrodinâmico do horizonte testado.

a) Testes de curta duração utilizando moto-bombas instaladas.

Valores elevados de capacidade específica geralmente indicam altos valores de transmissividade, assim como valores baixos são indicadores de fracas transmissividade. Apesar dos problemas de precisão, relativos a aplicabilidade do mé

todo o mesmo afigura-se amplamente justificável, em vista da rapidez e baixo custo das determinações, de modo a possibilitar a obtenção de um grande número de valores de transmissividade. Espera-se com isso obter um melhor conhecimento da zona, no que tange as variações laterais desse parâmetro, com vista ao ajuste e calibragem dos modelos de simulação.

Durante a campanha de inventário hidrogeológico serão realizados testes de curta duração (1 a 3 horas), naqueles poços onde as perdas de carga sejam insignificantes devidos as baixas vazões bombeadas ou devido ao seu diâmetro, bem como nos poços onde não haja influência de limites hidrogeológicos e que possuam equipamento de bombeamento instalado.

Visando maior precisão os valores de capacidade específica obtidos, serão inicialmente corrigidos quando necessário dos efeitos de penetração parcial, pela utilização da equação de Kozeny. A partir dos valores corrigidos de capacidade específica, será possível a avaliação imediata da transmissividade do aquífero pelo emprego da fórmula seguinte, representada através de gráficos em escala logarítmica, para diferentes tempos de bombeamento, raio do poço, e valores de armazenamento representativos de aquíferos livres e confinados.

$$\frac{\bar{Q}}{s} = \frac{4Tt}{\ln 2,25Tt - \ln r_w^2 S} \quad \text{sendo :}$$

$$\frac{\bar{Q}}{s} = \text{capacidade específica (m}^3 \text{ / s / m)}$$

$$Q = \text{descarga (m}^3 \text{ / s)}$$

- s = rebaixamento (m)
 T = transmissividade (m²/s)
 S = coeficiente de armazenamento
 r_w = raio do poço (m)
 t = tempo de bombeamento (seg)

Dado que a capacidade específica do aquífero varia com o logaritmo de $\frac{l}{S}$, grandes erros nos valores impostos para o coeficiente de armazenamento, resultarão comparativamente em pequenos erros nas transmissividades determinadas a partir dos valores de capacidade específica.

- Método de Ogden

O método de Ogden é aplicável quando também se dispõe somente da vazão específica no poço ou o rebaixamento em um ponto de observação em um momento dado (Ogden, 1965; Hurr, 1966).

$$\text{Tem-se que : } s = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

$$u = \frac{r_w^2 S}{4Tt} \quad \dots \quad T = \frac{r_w^2 S}{4uT} \quad (1)$$

$$u \cdot W(u) = \frac{Trw^2 S \cdot s}{Q \cdot t} \quad (2)$$

Sendo :

$W(u)$ = função exponencial integral característica do poço.

A função $W(u)$ encontra-se tabulada. Pode-se portanto construir um gráfico logarítmico de $u \times W(u)$ versus u . Tendo-se o valor da vazão específica do poço, para

um determinado tempo de bombeamento, um raio r_w e um valor adotado de S em função das características geológicas do aquífero, utiliza-se a equação (2) para determinar $u.W(u)$

. Com esse valor utiliza-se o gráfico mencionado, determinando o correspondente valor de u , que será utilizado na equação (1) para determinação de transmissividade.

- Método de Skibitzke

Skibitzke (1958) desenvolveu um método para determinação rápida da transmissividade a partir de bombeamento com caçamba e medição do rebaixamento residual a a partir da fórmula :

$$\Delta' = \frac{V}{4 \pi T t \cdot e^u} \quad \text{sendo} \quad u = \frac{r_w^2 S}{4 T t}$$

Δ' = rebaixamento residual após um caçambeio (m)

V = volume do caçambeio (m^3)

t = tempo desde o caçambeio até o instante de medição do rebaixamento residual (seg)

S = coeficiente de armazenamento

r_w = raio do poço (m)

Cogitar-se-a da aplicação do referido método, tendo em vista o grande número de poços em perfuração por sondagem à percussão, destinados ao abastecimento de núcleos populacionais urbanos (edifícios de apartamentos), possibilitando a determinação rápida de um grande número de valores de transmissividade.

Sendo o raio efetivo r_w , muito pequeno em relação a extensão do aquífero o termo e^u da equação acima tende a unidade quando o tempo de bombeamento aumenta.

$$\Delta' = \frac{V}{4 \pi T t}$$

No caso do rebaixamento residual ser medido após n ciclos de caçambeiro tem-se a seguinte equação.

$$\Delta' = \frac{1}{12,57T} \left(\frac{V_1}{t_1} + \frac{V_2}{t_2} + \dots + \frac{V_n}{t_n} \right)$$

Onde V_n é o volume de caçambeiro no enésimo ciclo e t_n o tempo desde o caçambeiro de ordem n, até o instante de medição do rebaixamento residual. Admitindo-se que os volumes de cada caçambeiro sejam aproximadamente iguais

tem :

$$\Delta' = \frac{V}{12,57T} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{t_i} \right) \quad \text{ou}$$

$$T = \frac{V}{12,57\Delta'} \sum \left(\frac{1}{t_i} \right)$$

T = Transmissividade (m²/s)

B) Testes de longa duração

Nos poços não surgentes os ensaios de longa duração para determinação dos coeficientes de Transmissividade, Permeabilidade, e Armazenamento (caso se disponha de piezômetro), serão realizados mediante utilização de conjunto eletro - bomba de motor submerso, com capacidade de fornecer vazões da ordem de 100-150 m³/h, para alturas de recalque em torno de 50 metros.

A metodologia a ser desenvolvida consistirá basicamente em um bombeamento inicial com máxima vazão possível, para rebaixamento do nível d'água até as proximidades da turbina. Após o período de recuperação, será efetuado o ensaio definitivo em diferentes estágios de descargas progressivamente crescentes (máximo de três), estabelecidas de acordo com as possibilidades verificadas no bombeamento pre

liminar. Em geral a passagem de cada estágio ao subsequente efetuar-se-á ao se observar a tendência de estabilização dos níveis d'água.

Durante cada estágio, os rebaixamentos serão anotados no tempo, assim como a recuperação dos níveis que se seguem após a conclusão da última fase de bombeamento. A realização quando possível de testes com recalques sucessivos, terá por objetivo a avaliação das perdas de carga na sondagem, assim como possibilitar um múltiplo controle e comparação dos valores de transmissividade determinados em cada estágio efetivado.

Os testes serão interpretados a partir das curvas rebaixamento-tempo, rebaixamento-distância, mediante utilização dos métodos de superposição gráfica, com as curvas padrão de Theis-Wenzel (1942), Jacob-Lohman (1952), Hantush (1956, 1959, 1964) e Boulton (1963), (Figs. VII e VIII) para a solução das diferentes equações utilizadas na dependência do tipo de aquífero, relações hidráulicas existentes com outros aquíferos e aquitardos, ocorrência de filtração vertical e penetração parcial.

As soluções analíticas mais comumente usadas serão as seguintes, para as diferentes situações que se deverão encontrar :

- a) Aquífero artesiano, isotrópico, homogêneo, de extensão infinita, com penetração total, sem filtração vertical e condições de descarga constante

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad ; \quad u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

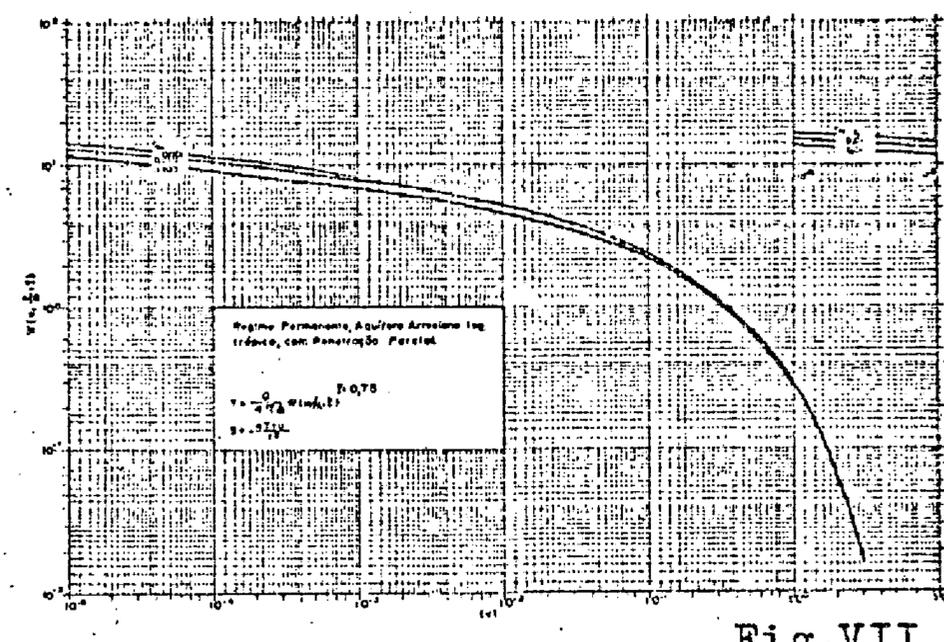
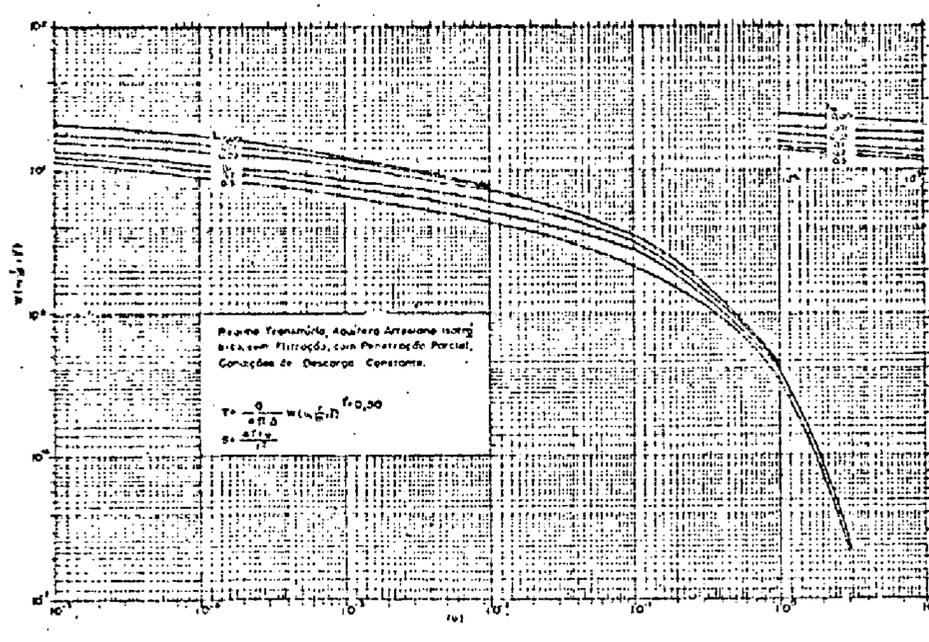
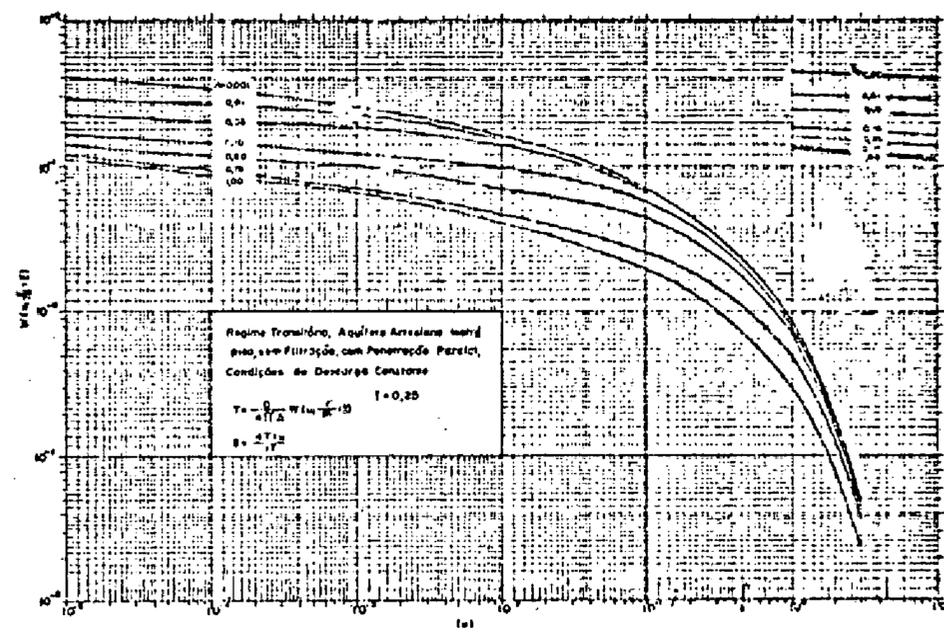
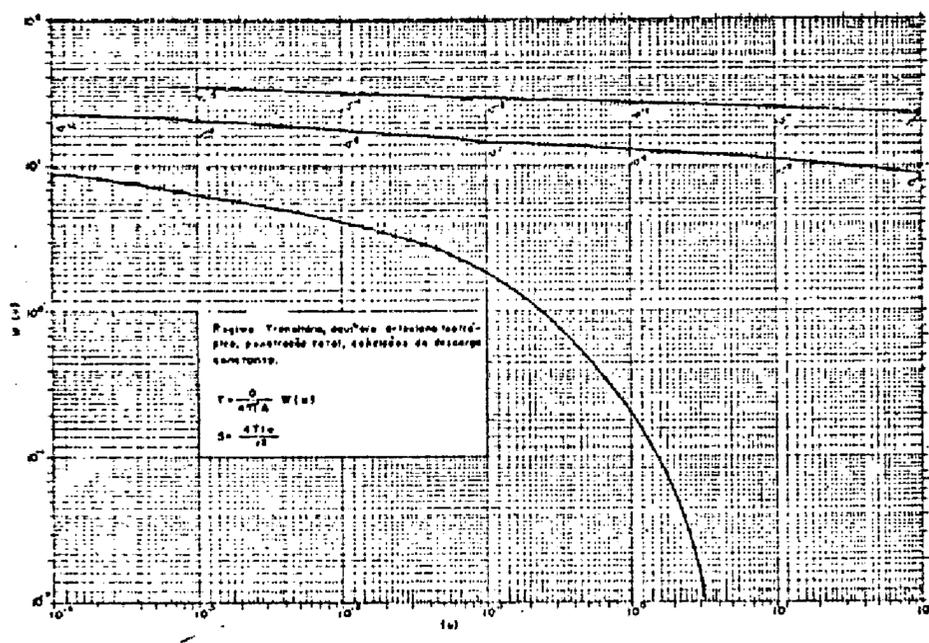


Fig.VII

b) Aquífero artesiano, isotrópico, homogêneo, de extensão infinita, fluxo radial, com penetração parcial, e condições de descarga constante.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u, r/m, \gamma) ; \quad u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

c) Aquífero artesiano, isotrópico, com filtração vertical, penetração total, com água liberada do armazenamento no aquitardo, e condições de descarga constante.

$$s = \frac{Q}{4T} W(u, \gamma)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

$$\frac{P}{s} = \frac{16 \gamma^2 T_m'}{m^2 S'}$$

d) Aquífero artesiano, isotrópico, com filtração vertical penetração total, sem água liberada ao armazenamento no aquitardo, condições de descarga constante.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u, r/B) ; \quad u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

$$P = \frac{T_m' (r/B)^2}{r^2}$$

e) Aquífero livre, com penetração total e condições de descarga constante.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u_{ay}, r/Dt)$$

$$u_a = \frac{r^2 S}{4Tt} ; \quad u_y = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

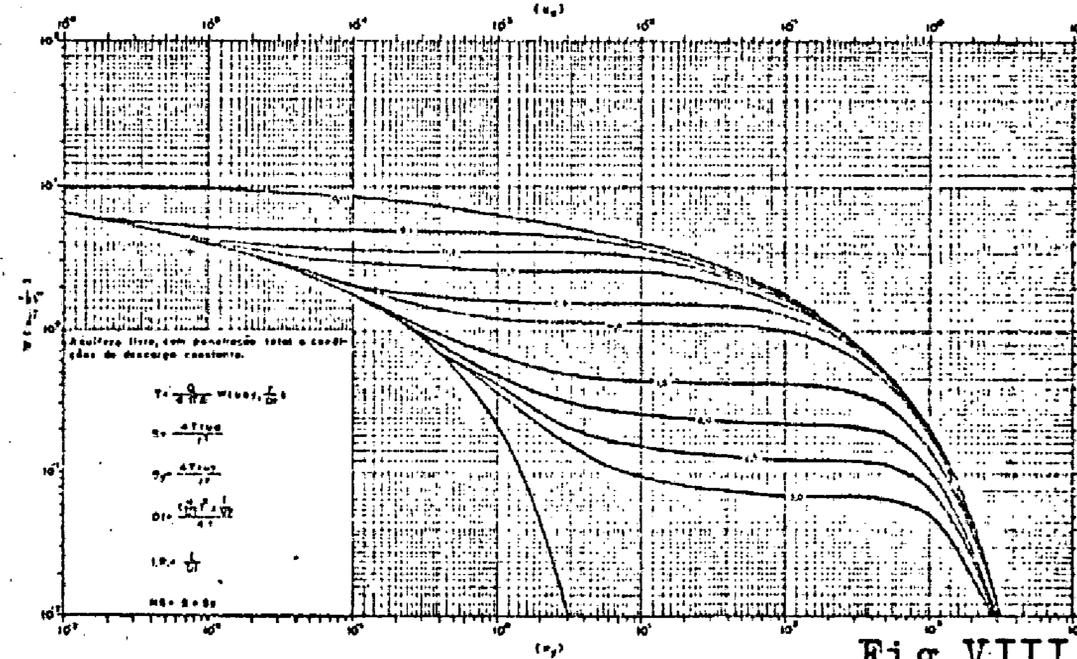
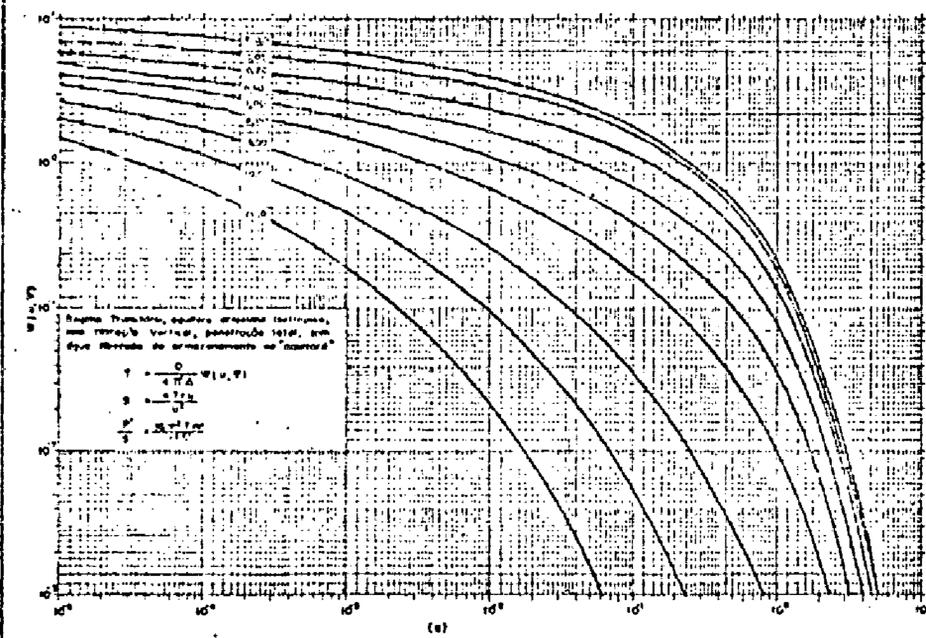
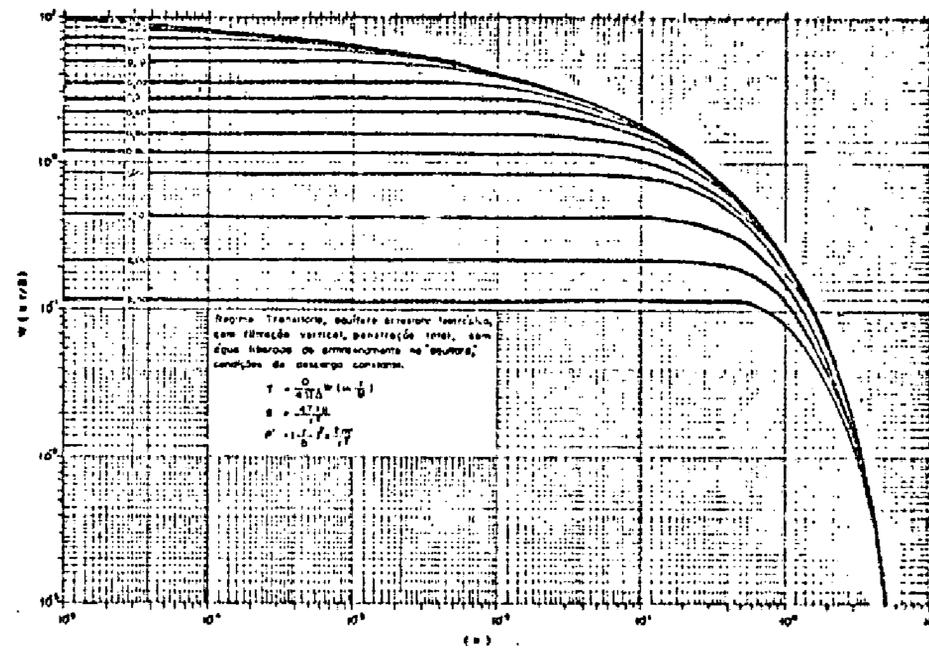
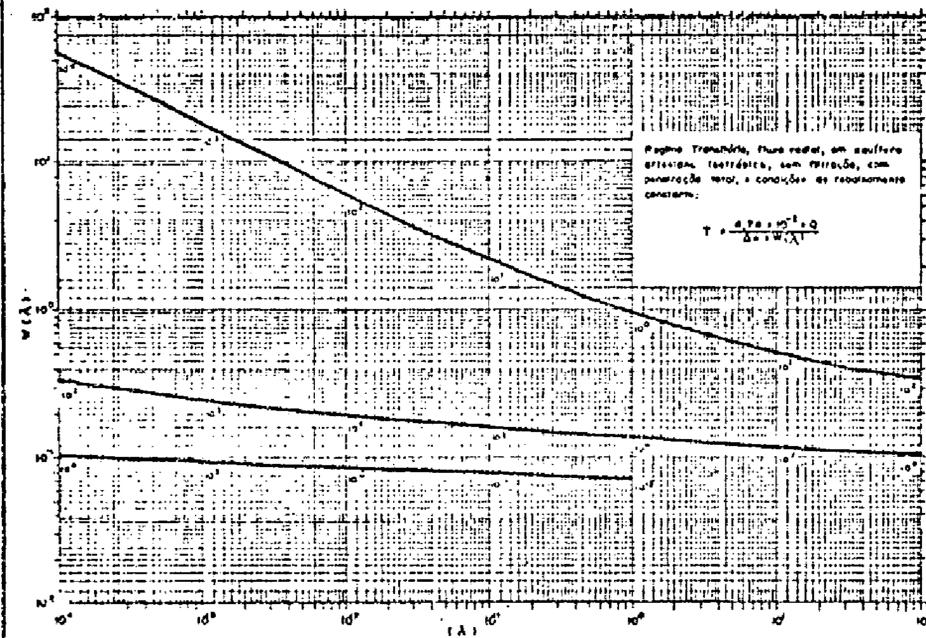


Fig.VIII

onde :

s = rebaixamento (m)

r = distância ao poço bombeado (m)

Q = descarga (m^3/s)

t = tempo de bombeamento (seg)

T = transmissividade (m^2/s)

S = coeficiente de armazenamento

P' = Permeabilidade do aquitardo (m/s)

m = espessura do aquitardo (m)

m' = espessura do aquitardo (m)

$W(u)$, $W(u, r/m)$, $W(u, r/B)$, $W(u, \gamma)$, $W(u_{ay}, r/D_t)$, --funções tabuladas características dos aquíferos nas diferentes condições citadas.

Testes em poços artesianos surgentes

Embora semelhante aos ensaios realizados com utilização de conjunto eletro-bomba, os testes com descarga livre apresentam a particularidade de utilizar manômetros de mercúrio para medição dos rebaixamentos e recuperação dos níveis d'água. Além do baixo custo apresentam sobretudo a vantagem, de se proceder com garantia a ensaios de duração muito longa, tendo em vista não dependerem de possíveis problemas mecânicos, muito frequentes quando da utilização de equipamento de bombeamento.

Inicialmente os poços surgentes selecionados para teste, deverão ser fechados por um período de tempo suficiente para a recuperação total do nível piezométrico, verificado através do manômetro de mercúrio instalado. Controle das influências da variação de pressão atmosférica sobre os

níveis d'água dos aquíferos elásticos será efetuado, mediante medição e correlação sistemática com medições altimétricas visando a determinação da eficiência barométrica.

As pressões serão aferidas com manômetro de mercúrio em U, a partir da fórmula :

$$P = \gamma (h_1 + h_2) + H_0 - h_1$$

P = Altura manométrica (m)

h_1 = Deslocamento do ramo h_1 (m)

h_2 = Deslocamento do ramo h_2 (m)

H_0 = Altura do zero do manometro em relação ao referencial de medida (m)

γ = Densidade do mercúrio

Tanto nos testes realizados com conjunto eletrobomba, como a partir de vazões livres, as descargas serão aferidas mediante tubo de Pitot, com diâmetros dos condutos de descarga e orifício, variáveis em função das vazões requeridas.

No caso de poços artesianos surgentes, além dos métodos de interpretação dos ensaios descritos precedentemente, onde as curvas experimentais constarão das observações do rebaixamento ou recuperação em função do tempo, em fase especial será dada as medições da variação da descarga no tempo, para aplicação do método de interpretação de Jacob-Lohman (1952).

A descarga em um instante determinado, é dada

por : $Q = \frac{T \cdot \Delta w}{0.0474} W(\lambda)$

sendo : $\lambda = \frac{0.0407 T t}{r_w^2 S}$

onde :

T = Transmissividade (m^2/s)

S = Coeficiente de armazenamento

Δw = rebaixamento instantâneo (m)

r_w = raio efetivo do poço (m)

t = tempo de bombeamento (seg)

A partir dos valores de $W(\lambda)$, tabulados em função de λ , por Jacob-Lohman, é possível a construção da curva padrão em coordenadas logarítmicas, utilizada pelo processo de superposição com a curva experimental vazão versus tempo, para solução das equações acima e consequente determinação dos coeficientes de transmissividade e permeabilidade horizontal.

2.7 - Estudos Hidroquímicos

Os estudos hidroquímicos se revestirão de especial importância como ferramenta indispensável a compreensão dos mecanismos hidrodinâmicos do sistema hidrogeológico a ser estudado, sobretudo no que concerne aos processos de salinização em curso.

Os pontos d'água levantados no inventário hidro

geológico permitirão o estabelecimento de uma rede geral de observação da salinidade das águas subterrâneas, a qual se rá controlada através de coletas e análises sistemáticas. Se rão incluídas nos estudos, análises químicas de águas superficiais para correlação qualitativa com as águas subterrâneas, bem como análises de água de chuva nas zonas de recarga, para utilização como instrumento complementar na elaboração do balanço hídrico dos aquíferos.

Alguns aspectos do sistema hidrogeológico podem ser estudados pela hidroquímica, de vez que regra geral a concentração de determinados constituintes químicos e sólidos totais dissolvidos, aumentam com o tempo de contato das águas com os materiais e, em profundidade, com as temperaturas crescentes dos aquíferos. Serão portanto estabelecidos diferentes perfis longitudinais de salinidade para avaliação da evolução geoquímica espacial das águas, desde as áreas de recarga até o mar, bem como estudadas as variações verticais, através de coleta de amostras em diferentes profundidades.

As análises efetuadas e aquelas já existentes se rão agrupadas por aquíferos, e estudadas estatisticamente, com respeito a variabilidade e tendência dos diferentes elementos componentes. Estudos estatísticos também serão realizados, a fim de descartar possíveis erros de coleta e de laboratório. Serão verificados os graus de confiabilidade e exatidão das análises mediante diferentes procedimentos: percentagem da razão entre a diferença e soma dos anions e cations em miliequivalentes; relação condutividade - sólidos dissolvidos.

Serão estudados os mecanismos de evolução geoquímica das águas subterrâneas a partir da infiltração nas áreas de recarga bem como a ação dos fenômenos geoquímicos modificadores nas proximidades das faixas costeiras. Neste aspecto, especial interesse será dedicado ao estudo das relações entre ions dissolvidos (relações características), de modo que através de sua variabilidade seja possível compreender os mecanismos de troca e de evolução da salinidade. Os aspectos ligados as influências da geologia, litologia e geomorfologia na qualidade química das águas subterrâneas serão abordados, utilizando-se a cartografia das variações laterais e o estudo da estratificação hidroquímica.

A partir do diagrama triangular de Piper-Hill Langelier, se procederá a interpretação e classificação das análises, identificando-se os grupos de fácies químicas.

Serão estabelecidos perfis de salinidade, para diferentes profundidades de captação e distâncias a área de alimentação. A avaliação dos dados químicos será realizada utilizando-se os métodos de apresentação, correlação e contraste de Piper-Hill, Stiff, Schoeller-Bearkaloff e Hem. Serão considerados os critérios de potabilidade da Associação Brasileira de Normas Técnicas e os propostos por Schoeller, para zonas semi-áridas. O tratamento estatístico dos dados químicos permitirá a elaboração rápida de diagramas, gráficos e mapas representativos, visando a definição dos aspectos geoquímicos e qualitativos das águas subterrâneas.

- Mapas de variabilidade das relações características :

$$\frac{r \text{ Mg}}{r \text{ Mg}} ; \frac{r \text{ K}}{r \text{ Na}} ; \frac{r \text{ Na}}{r \text{ Ca}} ; \frac{r \text{ Cl}}{r \text{ CO}_3 \text{ H}} ; \frac{r \text{ SO}_4}{r \text{ Cl}}$$

- Mapas de variação do índice de troca de bases

$$(icb) : icb = \frac{r Cl - r (Na + K)}{r Cl}$$

- Mapas de variação especial de cations e anions, pH, alcalinidades, dureza, condutividade, sólidos dissolvidos.

- Mapas de distribuição dos fácies químicos.

- Gráficos de frequência comulativa dos cations e ions principais por aquíferos.

- Diagramas de frequências dos fácies químicos por aquíferos.

2.8 - Estudos Geofísicos e Perfilagens

A aplicação de métodos de investigação geofísica (eletro-resistividade), reveste-se de grande interesse para o alcance dos objetivos do projeto, sobretudo por possibilitar a obtenção de informações geológicas nas áreas onde os dados de sub-superfície são insuficientes para a caracterização estrutural da zona e dimensional dos horizontes aquíferos. As sondagens geofísicas por eletro-resistividade serão também cogitadas naquelas zonas onde se desenvolve processos de salinização dos aquíferos costeiros, permitindo obter informações sobre a intensidade do fenômeno nos diferentes horizontes pesquisados.

Nas áreas a serem definidas, a partir da análise estrutural, estratigráfica, geomorfológica e hidrodinâmica, como as mais susceptíveis ao aproveitamento dos recursos hídricos subterrâneos, os estudos geofísicos poderão comple

permitindo diferenciar siltitos e argilas que regra geral apresentam radioatividade superior aos arenitos e conglomerados.

- Caliper

Consiste na medida da variação do diâmetro do poço, de forma mecânica, registrada eletricamente. Tem como principal finalidade detectar as condições da perfuração no que se refere a desmoronamentos, sendo as medições altamente indicativas no que se refere a alternância de camadas de folhelhos e arenitos ou arenitos e argilas.

2.9 - Perfuração de Piezômetros - Assessoria ao Programa de Perfuração de poços desenvolvido pela COMPESA.

Cogitar-se-a da perfuração de alguns piezômetros, numa etapa mais avançada dos estudos, convenientemente localizados para análise e observação dos fenômenos locais de salinização, já constatados. Os piezômetros serão projetados dentro das melhores técnicas construtivas (piezômetros múltiplos), onde as cimentações e isolamentos de sequências serão realizados para estudos de piezometria e salinidade dos horizontes de maior interesse. Esses poços serão utilizados para as medições que possibilitam configurar o posicionamento da interface água doce - água salgada através de medições de nível ambiental, de medições da estratificação salina, testificação elétrica e ensaios isotópicos com I-131.

Durante o desenvolvimento dos estudos, os consultores deverão prestar ampla assessoria à COMPESA, no que tange as perfurações em curso, de poços destinados ao refor

mentar as informações relativas as profundidades dos topos dos aquíferos, possíveis variações de transmissividade, zonas falhadas e variações de espessuras.

Em poços selecionados a partir do inventário hidrogeológico, serão realizados "logs" elétricos, visando a complementação dos dados estratigráficos e estruturais levantados, a caracterização litológica e, em profundidade, a definição de contatos e espessuras de camadas para a caracterização dimensional e individualização dos diferentes sistemas hidrogeológicos. Esses métodos poderão se revestir de grande interesse, de vez que grande parte dos poços perfurados pelo método a percussão, não dispõe de perfis descritos, não se podendo em geral delimitar as informações atravessadas. Sobretudo nos poços destinados a ensaios de bombeamento, esses estudos complementares possibilitarão uma correta interpretação dos resultados, a partir da definição prévia do perfil técnico e litológico da sondagem.

Dentre os "logs" cogitados para complementação e apoio aos estudos hidrogeológicos e hidrodinâmicos destacam-se :

- Resistividade e Potencial Espontâneo

Fornecem informações acerca do caráter elétrico das sequências e do conteúdo da água intersticial, textura, porosidade, possibilitando estabelecer correlações estruturais e estratigráficas com outros poços.

- "Logs" de Radiação Gama

Detecta as emissões de radiação gama, dos isotopos integrantes da constituição litológica das sequências,

ço do abastecimento urbano. Serão previamente estudados os projetos de construção dos poços, fiscalizados os trabalhos de perfuração, analisados e descritas as amostras de calha, para correlação estratigráfica e dimensionamento de filtros além de acompanhadas as operações de desenvolvimento visando minimizar as perdas de carga secundárias nos poços de produção. Neste sentido, atenção especial será dedicada aos testes de produtividade a fim de verificar as variações anormais de produção entre os diferentes poços. Testes em diferentes estágios de vazões progressivamente crescentes serão realizados, para determinação das perdas de carga, e da equação do rebaixamento, a fim de se poder analisar as causas da redução da produtividade, verificada em poços recentemente perfurados.

2.10 - Caracterização Dimensional dos Sistemas Aquíferos e Determinação das Reservas Permanentes.

O mapeamento geológico de superfície complementado pelas informações de subsuperfície obtidas a partir dos perfis litológicos dos poços existentes e das testificações elétricas, possibilitarão caracterizar dimensionalmente os sistemas hidrogeológicos a partir da elaboração dos mapas de contorno estrutural, isópacas e isóbatas. Com os valores das características hidrodinâmicas determinadas nos testes de bombeamento e utilizando-se mapas de espessura saturada, serão calculadas as reservas permanentes totais, a partir do dimensionamento dos volumes de saturação e de água sob pressão acumulados nos diferentes sistemas aquíferos. Serão portanto utilizados os coeficientes de restituição e armaze

Q_{se} = Vazão superficial de entrada

Q_{te} = Escoamento subterrâneo de entrada

Δs = Variação das reservas.

O balanço hidráulico de cada sistema aquífero será realizado mediante utilização de um modelo matemático de simulação digital. O modelo a ser elaborado, será bidimensional, de regime transitório, multi-aquífero e de malha variável. Deverá ser capaz de simular as condições hidrogeológicas genéricas resultantes de bombeamentos, bem como condições particulares especialmente a passagem de aquíferos confinados a livres e a filtração induzida de rios. O modelo deverá fornecer os dados piezométricos tabelados por impressora, fornecer balanços hidráulicos globais e por elementos, além de permitir através de "plotter" o desenho automático das cartas piezométricas resultantes das hipóteses simuladas.

A primeira operação em um modelo de simulação matemática consiste em defini-lo de modo que seja o mais possível representativo do sistema físico, podendo assim ser utilizado para previsões futuras de exploração.

Para atingir essa representatividade realiza-se uma série de testes que tem por objetivo caracterizar espacialmente os diferentes parâmetros do aquífero. Com as características hidrodinâmicas e dimensionais definidas, os elementos climatológicos e hidrológicos, bem como os dados de recarga e bombeamentos no aquífero, o modelo utiliza todas essas informações e simula o comportamento do sistema, no que se refere as suas variações piezométricas e as possíveis saídas ou entradas de água para os rios e volumes de transferências entre sistemas.

namento obtidos nos ensaios efetuados, para o cálculo das quantidades totais de água passíveis de liberação por gravidade ou diferença de pressão artesianas.

2.11 - Balanço Hidrometeorológico Preliminar - Balanço Hidráulico da zona a partir de modelo de simulação digital.

Os elementos obtidos no inventário hidrológico detalhado e nos testes de bombeamento realizados, permitirão a elaboração de cartas de variação de transmissividade, cartas piezométricas e conseqüente rede de fluxo dos diferentes sistemas estudados. Os estudos hidrogeológicos visando estabelecer um balanço hidrometeorológico preliminar da zona, serão assim correlacionados com os dados hidrológicos e climatológicos. A estimativa dos recursos exploráveis será realizada preliminarmente a partir do cálculo da rede equipotencial de corrente para cada sistema individualizado. Neste sentido, uma vez definidos numa primeira aproximação as características dos diferentes sistemas (extensão, limites, descontinuidades, transmissividades, escoamento natural), estar-se-á em condições de formular o balanço da zona para o intervalo de tempo de um ano a ser considerado. A equação geral do balanço será :

$$P + Q_{se} + Q_{te} - E - Q_{ss} = \Delta s$$

P = Pluviometria

E = Evapotranspiração

Q_{se} = Vazão superficial de saída

Q_{te} = Escoamento subterrâneo de saída

Os testes a serem realizados, ou fase de calibragem, consiste em verificar a validade dos dados utilizados, confrontando-se os resultados fornecidos pelo modelo, com as observações de campo. Se a piezometria e as vazões obtidas no modelo se assemelham as medições de campo, pode-se dizer que o modelo é representativo do sistema estudado. Se não for obtida essa correspondência os parâmetros iniciais deverão ser ajustados por processo tentativo, de forma a ser obtida uma maior identidade.

O modelo a ser elaborado deverá portanto se constituir uma ferramenta dinâmica, que deve ser complementada no curso do tempo a medida que novos dados sejam coletados. A elaboração do modelo, proporcionará uma orientação geral para as pesquisas futuras, de vez que indica as áreas de ocorrência de problemas potenciais, nas quais deverão ser desenvolvidos esforços para uma melhor exploração do aquífero. A calibragem do modelo será função da qualidade e quantidade dos dados a serem levantados.

Deverá se dispor de uma rede de observação tão extensa quanto possível, de modo que a campanha de medições periódicas e sistemática dos níveis d'água (item 2.3) forneça os dados necessários a uma adequada calibragem do modelo.

As características principais do modelo a ser elaborado serão as seguintes :

- a) Deverá simular em regime transitório a evolução dos níveis d'água no aquífero ao longo do tempo. Para isso, deverá calcular a partir de um incremento de tempo inicial igual a 1 dia, a piezometria no centro de cada malha, de

maneira cíclica mensal, para qualquer período total desejado.

- b) O modelo deverá admitir limites impermeáveis (neste caso não circula nenhuma água através deste limite) ou limites abertos, onde pode haver passagem de certa quantidade de água. O modelo deverá calcular estas vazões de entrada ou saída laterais sendo calculados em cada malha, mensalmente ou anualmente.
- c) Simulação de bombeamento, assim como de recarga direta através de infiltração a partir de pluviometria.
- d) Cálculo das relações rio-aquífero, computando em cada malha, mensalmente ou anualmente os volumes infiltrados do rio para o aquífero ou vice-versa.
- e) Cálculo dos níveis piezométricos mês por mês, apresentados de forma tabulada, para cada malha, assim como cálculo por malha dos volumes de transferência por filtração vertical entre os sistemas.

A compreensão do mecanismo de funcionamento hidrodinâmico dos sistemas aquíferos na área estudada, a partir da utilização do modelo matemático de simulação digital, deverá fornecer os elementos necessários ao cálculo das relações água doce/água salgada, a partir da estimativa da evolução dos níveis piezométricos para diferentes hipóteses de exploração. Os valores dos níveis piezométricos estimados e os volumes de água bombeados deverão ser utilizados para solução das equações que definem a posição da interface água doce/água salgada, introduzindo-se ao mesmo tempo as formulações que levam em conta a dispersão salina.

2.12 - Cálculo das relações água doce - água salgada.

Além da metodologia geral utilizada nos estudos hidrogeológicos continentais, o estudo de zonas costeiras apresenta o problema das relações água doce / água salgada, o que requer a aplicação de metodologia específica, tendo em vista a existência de águas de densidade diferentes, porém miscíveis, além de pequenas diferenças de viscosidade e as vezes de temperatura.

Os primeiros estudos da relação água doce / água salgada em regiões costeiras foram baseados no equilíbrio estático das colunas de água de diferente densidade, com interfaces planas de escassa largura, em relação a profundidade, sendo o movimento da água lento e horizontal. Tais estudos iniciais foram efetuados por Badon Ghyben em 1889 e Herzberg em 1901. Somente a partir de 1955 os estudos quantitativos dos problemas de intrusão marinha foram intensificados, tendo-se elaborado teorias e formulações que levam em conta o movimento da água doce e da água salgada, assim como a existência de uma zona de mistura ou de dispersão entre ambas, o que permite estudar o movimento dessa interface em diversas condições hidrogeológicas no que se refere a recargas, bombeamentos, variações do nível do mar etc.

As formulações apresentadas a seguir constituirão as ferramentas de trabalho a serem utilizadas no estudo da intrusão marinha na planície do Recife, utilizando-se os parâmetros hidrogeológicos levantados na primeira etapa dos trabalhos e concomitantemente com os resultados a serem obtidos pelo modelo de simulação digital no que se refere a evolução dos níveis piezométricos como consequência das ex

plorações.

Esta metodologia deverá nortear os estudos relativos ao equilíbrio a ser conseguido entre o avanço das cunhas salinas e os volumes exploráveis.

Os parâmetros e dados hidrogeológico que deverão ser utilizados para aplicação das formulações, visando o estudo dos problemas de intrusão marinha serão os seguintes:

- a = profundidade do topo de aquífero confinado abaixo do nível do mar.
- b = espessura de aquífero confinado (Beberibe superior e Beberibe inferior).
- b' = espessura de aquitardo (níveis argilosos entre Beberibe superior e Beberibe inferior e calcários Gramame e Maria Farinha).
- B = coeficiente de filtração vertical.
- D = coeficiente de dispersão
- Do = dispersividade intrínseca
- h = nível d'água sobre o nível do mar.
- ho = semi-amplitude de oscilação da maré.
- hs = nível d'água salgada sobre o nível do mar. Potencial pontual.
- i = gradiente piezométrico
- k = permeabilidade
- k' = permeabilidade vertical de aquitardo
- L = comprimento da cunha marinha
- m = porosidade efetiva do aquífero
- Q = vazão de bombeamento
- q = vazão natural do aquífero por unidade de comprimento de costa.

r = distâncias radiais ou expressão em [meq./l].
 S = coeficiente de armazenamento
 T = transmissividade
 t = tempo
 t_0 = período da maré
 v = velocidade da água subterrânea ou da interface
 W = recarga superficial em altura de água, por unidade de tempo.
 x = distâncias horizontais
 Z = profundidade da interface sob o nível do mar ou sob o teto de um aquífero cativo
 Z_0 = espessura saturada sob o nível do mar de um aquífero livre.
 d = peso específico da água doce
 s = peso específico da água salgada
 $\beta = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d} \approx 0,025$
 ε = percentagem de mistura água doce/água salgada

2.12.1 - Cálculo da profundidade da interface com ausência de zona de mistura.

- Fórmula de Ghyben-Herzberg

Os estudos de Ghyben-Herzberg se basearam no equilíbrio estático de colunas de água de diferentes densidades, admitindo como hipóteses:

a) o fluxo da água no aquífero perfeitamente horizontal sendo portanto o potencial constante ao longo de uma vertical

cal;

b) não existe fluxo de água salgada

c) a interface é um plano, não existindo zona de mistura.

Nestas condições em um ponto qualquer da interface, verifica-se o equilíbrio de pressões entre a água doce e a água salgada :

$$(h_d + z)\gamma_d = z\gamma_s$$

$$z = \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d} \cdot h_d$$

z = profundidade de interface

h_d = cota do nível d'água doce sobre o nível do mar.

γ_d e γ_s = densidade água doce e água salgada.

- Fórmula de Hubert

A lei de Ghyben-Herzberg descreve corretamente a posição da interface se a espessura da zona de mistura é pequena em comparação com a profundidade, e se movimento da água é praticamente horizontal.

A fórmula de Herbert leva em conta a existência de um movimento com componentes verticais, de vez que havendo um gradiente piezométrico deve haver descarga de água doce ao mar, sendo o gradiente crescente com a profundidade, ao longo de uma vertical. Supondo-se que h_d seja o potencial de água doce, em um ponto acima da interface e h_s o potencial da água salgada logo abaixo da interface, a profundidade z vem pelo equilíbrio dos líquidos de densidade dife

rentes.

$$(z+hd).\gamma_d = (z+hs).\gamma_s$$

$$z = \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d} hd - \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_d} hs$$

O cálculo da profundidade na qual começa a zona de contaminação da água doce pela água do mar, constitui um problema de extrema importância na exploração e gestão de recursos hidrogeológicos. A forma direta de estudar o problema consiste em medir a variação da salinidade com a profundidade, porém face aos custos e tempo dispendido, procura-se determinar a profundidade da interface a partir das medições piezométricas pela aplicação das fórmulas de Ghyben, Hubert e Lusczynski.

2.12.2 - Largura de zona de mistura e efeito da oscilação das marés.

De vez que a difusão e dispersão no plano que separa dois fluídos se realiza segundo uma função de erro, pode definir-se a largura da zona de mistura ou zona de dispersão, como a distância entre as superfícies que indicam misturas de ξ e $1-\xi$, por exemplo 5% e 95%.

Na realidade, a interface não é completamente simétrica quanto as concentrações, devido a circulação do fluído ao longo da mesma, que é mais intensa na zona de água doce, que na zona de água salgada. A espessura da zona de mistura medida em um piezômetro é maior que a espessura real, de vez que em geral, a sondagem é oblíqua a interface. Entretanto, dado que as dimensões horizontais são muito maiores que as verticais, esta diferença é com frequência

pequena. As flutuações periódicas da maré, originam um movimento oscilatório da interface, originando uma dispersão hidrodinâmica da água salgada na água doce. Admitindo que o coeficiente de dispersão D , é proporcional a velocidade intersticial v , tem-se que $D = D_0 v$, sendo D_0 uma constante característica do meio.

No caso de movimento provocado pela maré, pode se escrever :

$$D = \frac{4A}{t_0} D_0$$

Sendo A , a semi-amplitude da oscilação e t_0 o período da maré, de vez que em t_0 ocorre 4 vezes A .

Tem-se :

$$A = \frac{K h_0}{m} \sqrt{\frac{t_0 S}{2\pi T}} \exp\left(-x \sqrt{\frac{\pi S}{t_0 T}}\right)$$

K = permeabilidade do aquífero

m = porosidade efetiva

h_0 = semi-amplitude de oscilação da maré

t_0 = período da maré

S = armazenamento

T = transmissividade

x = distância a linha de costa ou ao afloramento do aquífero no mar.

- c) Cálculo exato da posição da interface, quando não existe zona de mistura. Fórmula de Glover

$$z^2 = \frac{2q_0x}{\beta K} + \frac{q_0^2}{K^2\beta z}$$

- d) Comprimento da zona de fluxo de água doce ao mar, em aquífero semi-confinado.

$$l = B \ln \frac{h_o - h_d}{\frac{q_{ob'}}{BK'} - (h_o - h_d)}$$

l = comprimento da zona de fluxo

B = coeficiente de filtração vertical.

- e) Linha de poços paralela a costa em aquífero livre, com recarga direta de chuva

$$h_a^2 = \frac{2(q_0 - q_p + Wl_a)L_a + Wl_a^2}{K(1 + \frac{1}{\beta})}$$

h_a = profundidade da interface-nível d'água no poço.

q_p = vazão bombeada

l_a = distância do poço ao extremo da cunha salina

L_a = distância do poço ao início da cunha salina.

- f) Linha de poços paralela a costa, em aquífero confinado.

$$(z_a - a)^2 = \frac{2(q_0 - q_p)}{\beta K} L_a$$

2.12.3 - Métodos de cálculo para limitação da intrusão marinha.

O equilíbrio água doce - água salgada desaparece ao se processar uma exploração dos aquíferos, até que a interface atinge uma nova posição correspondente a maior penetração da água salgada.

Além disso, captações de água doce, sobre massas de água salgada podem produzir cones salinás ascendentes, atingindo as captações.

Como consequência do avanço da cunha salina, um volume de água doce fica inicialmente liberado, como reserva explorável. Tal reserva pode ser aproveitada incrementando-se inicialmente a vazão explorada. Segundo Santing(1963), praticamente só uns 25% de tal reserva será verdadeiramente explorável, devido a dispersão e ao arrastro de sais.

Os cálculos hidrogeológicos nas faixas costeiras, seguem a utilização de métodos e fórmulas específicas, apresentadas a seguir para solução dos problemas relacionados à intrusão de água marinha.

a) Interface em aquífero livre, com recarga direta de chuva

$$Z^2 = \frac{2q_0x + \frac{Wx^2}{\beta}}{K\beta(1+\beta)} + Z_0^2$$

$$L = -\frac{q_0}{W} + \frac{q_0^2}{W^2} + \frac{\beta(\beta+1)K}{W} Z_0^2$$

Z = profundidade de interface

L = comprimento da cunha salina

b) Interface em aquífero confinado.

$$(Z - a)^2 = b^2 - \frac{2q_0}{\beta K}(x - x_0)$$

Z_a = profundidade da interface em relação ao topo do aquífero.

a = profundidade do topo do aquífero em relação ao nível do mar.

g) Movimento da interface no plano vertical perpendicular à costa.

$$L(t) = \sqrt{\frac{\alpha K \beta Z_0}{Z} + L_0^2}$$

L_0 = penetração inicial

$L(t)$ = penetração no tempo (t), quando a profundidade da interface é Z .

h) Velocidade de avanço de interface no pé da cunha salina.

$$v = \frac{1}{2 \sqrt{At + A^2 L_0^2}} \quad \text{Sendo :}$$

$$A = \frac{m}{K Z_0 (1 + 1/\beta)}$$

i) Tempo de deslocamento horizontal da interface

$$t \approx \frac{mb}{T_i} \left(\frac{Q}{2\pi T_i} \ln \frac{Q}{Q - 2\pi T_i x_0} - x_0 \right)$$

t = tempo total transcorrido

Q = vazão bombeada

i = gradiente piezométrico.

x_0 = distância a linha de costa

j) Cálculo da ascensão de cones salinos

$$Y(r, t) = \frac{Q}{2\pi K h d \beta} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \bar{R}^2}} - \frac{1}{\sqrt{(1 + \bar{t})^2 + \bar{R}^2}} \right)$$

$$\bar{R} = \text{distância adimensional} = \frac{r}{d} \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$$

$$\bar{t} = \text{tempo adimensional} = \frac{K_v \beta}{2md} \cdot t$$

Y = ascensão da interface inicial

r = distância radial do eixo do poço

t = tempo de bombeamento

Kv, Kh = permeabilidade vertical e horizontal

Q = vazão de bombeamento

d = distância do poço à interface.

2.12.4. - Aspectos químicos das relações água doce - água salgada.

Conforme indicado no item 2.7, estudos hidroquímicos serão efetivados com vistas a análise dos fenômenos de intrusão marinha, paralelamente aos estudos hidrodinâmicos já mencionados.

Em aquíferos costeiros não se produz mistura notável entre a água doce do aquífero e a água marinha. Existe entretanto uma zona de transição, chamada interface, cuja largura é variável dependendo das flutuações piezométricas do aquífero, as oscilações das marés e a dispersividade do aquífero.

Se a água doce circula por sedimentos inicialmente em contato com água marinha, a água doce aumenta notavelmente seu conteúdo em cloretos e em sódio por lavagem de material, e como as águas doces, tem $r \frac{(Na + K)}{(Ca + Mg)}$, geralmente menor que as águas marinhas, receberão alcalinos e cederão alcalinos terrosos, ou seja se abrandarão e seu índice de troca de bases diminuirá com relação ao inicial.

Caso se produza uma intrusão de água salgada

em aquífero que anteriormente tinha água doce, a água marinha percola em sedimentos em equilíbrio com uma água de relação $r \text{ (Na + K)} / r \text{ (Mg + Ca)}$ em geral menor. A água marinha portanto cederá alcalinos ao terreno, recebendo alcalinos terrosos de modo que sua relação se aproxime da existente na água doce. A água salgada aumentará sua dureza, e o índice de troca de bases que vale aproximadamente + 0,12 , tenderá a aumentar.

Por outro lado, a água do mar tem como característica marcante o baixo conteúdo do ion bicarbonato. A relação $r \text{ Cl} / r \text{ HCO}_3$ deverá ser empregada como um índice cuja rápida elevação pode traduzir um sinal de intrusão marinha, já que águas muito cloretadas de origem continental, são também em geral carbonatadas. O alto valor da relação $r \text{ Mg} / r \text{ Ca}$ (≈ 5) nas águas marinhas, e o baixo valor nas águas doces continentais, constitui também um índice de grande interesse nos estudos dos fenômenos de intrusão.

2.12.5 - Prevenção e controle da intrusão marinha

Existem vários métodos para prevenir e controlar a intrusão de águas salgadas, cada um deles com suas características funcionais que se adaptam a circunstâncias determinadas.

a) Diminuição da vazão de bombeamento

Sendo a exploração do aquífero superior a recarga, ou no caso em que essa exploração anula os volumes vertidos pelo aquífero ao mar, ocorre penetração da cunha

salina que poderá ser estabilizada pela redução do bombeamento para que seja atingido novo ponto de equilíbrio.

b) Re-locação dos centros de bombeamento

No caso da intrusão marinha, for devida a uma excessiva concentração dos bombeamentos em poucos lugares próximos a costa, a re-locação dos poços poderá reduzir os rebaixamentos piezométricos pela diminuição das interferências e afastamento da linha de costa, podendo conduzir a diminuição ou paralisação do avanço da intrusão marinha.

c) Recarga artificial ou barreira hidráulica de injeção

O mecanismo consiste na recarga artificial do aquífero explorado através de poços convenientemente distribuído, de modo que a injeção de água compense a superexploração efetivada em outras áreas.

d) Rebaixamento do nível por bombeamento

A limitação da penetração de água salgada também poderá ser conseguida estabelecendo-se uma linha de bombeamentos dentro da cunha salina ao longo da costa, de modo que intercepte o fluxo da água salgada para o interior.

Nas condições em que se apresenta na atualidade o quadro da exploração de recursos hidrogeológicos na área metropolitana do Recife, os métodos mencionados em a e b, deverão ser os cogitados para a prevenção do avanço de interface, a partir dos resultados dos modelos de simulação e da aplicação concomitante das formulações específicas relativas ao cálculo da posição e avanço da interface no tempo.

2.13 - Planificação do Aproveitamento - Utilização do Modelo Analítico de Simulação.

2.13.1 - Características do Modelo

O modelo SIMAQ (Simulação Analítica de Aquíferos) baseia-se na utilização de funções analíticas de rebaixamento (equações de Theis, de Hantush e similares). A vantagem essencial das soluções analíticas consiste em fornecerem o valor do rebaixamento em qualquer ponto do espaço e do tempo. Pelo contrário, as soluções numéricas (modelos de diferenças finitas) ou os modelos analógicos de malha R-C, ao discretizar o espaço e o tempo, não permitem obter a representação contínua da superfície piezométrica local nas áreas em que ocorre o bombeamento, sendo que tal representação é precisamente o que se precisa obter para se chegar ao dimensionamento das obras de captação e avaliação dos custos.

Por isso, entendemos que os métodos analíticos constituem a ferramenta adequada para os estudos e projetos a nível local, reservando-se os métodos de diferenças finitas, (item 2.11), para uma fase prévia de estudos a nível regional.

Outras vantagens dos métodos analíticos são sua simplicidade de aplicação e a rapidez e baixo custo de processamento em computador.

No entanto, as funções analíticas de rebaixamento são diretamente aplicáveis apenas em condições extremamente simplificadas : vazões constantes e aquífero infinito é homogêneo. Para contornar, pelo menos em parte, estas limitações, o modelo SIMAQ utiliza ao máximo o princípio de

superposição, no espaço de tempo, admitindo limites hidrogeológicos e regimes de bombeamento variáveis.

Alguns elementos de modelo SIMAQ não são susceptíveis de formulação geral, válida para todos os casos. No entanto, a programação do modelo foi estruturada de maneira a isolar estes elementos dentro de "Sub-programas de usuário" que possam ser facilmente modificados em função das condições de cada aplicação. Atualmente dispõe-se de duas versões operativas do modelo, ambas adaptadas ao aproveitamento para irrigação ou abastecimento urbano. Uma delas trata aquíferos confinados, enquanto que a outra trata aquíferos semi-confinados, sujeitos a filtração vertical sem efeito de armazenamento no "aquitard".

A metodologia a ser adotada portanto, consistirá inicialmente na utilização do modelo matemático de simulação digital (item 2.11), e das formulações específicas para cálculo das relações água doce/água salgada, visando o estabelecimento do balanço hidráulico da zona estudada e consequentemente, a compreensão dos mecanismos de funcionamento hidrodinâmico dos sistemas aquíferos. Em seguida, com base nos resultados obtidos pelo modelo, que deverá compatibilizar as possibilidades quantitativas de exploração das reservas, com o avanço das cunhas salinas, aplicar-se-á o modelo de simulação analítica (modelo SIMAQ), a fim de definir a nível local as alternativas viáveis de captação dos volumes exploráveis, no que se refere a número de poços, espaçamento, características construtivas, dimensionamento de bombas, através da análise econômica comparativa entre as diferentes alternativas simuladas.

A seguir descrevem-se sucintamente as principais características do modelo SIMAQ.

2.13.1.1 - Esquema Hidrogeológico

O modelo supõe um aquífero homogêneo e isotrópico, com limites hidrogeológicos retilíneos, impermeáveis ou de recarga (Fig. IX).

O efeito dos limites é tratado com o método das imagens. São especificados limites que formem entre eles ângulos compatíveis com o método das imagens (Ferris Knowles, Brown and Stallman, "Theory of Aquifer Test ", U.S.G.S, 1962)

O programa gera automaticamente os poços imagens, podendo obter um sistema compensado fechado, ou (no caso de infinitas imagens) um conjunto de imagens que se afastam da área de bombeamento, até que as imagens não compensadas, ultrapassem o raio da influência especificada no programa. Neste particular, poderão ser especificados diferentes raios, com respeito aos efeitos de bombeamentos a longo prazo, a curto prazo, ou bombeamento de caráter intermitente (ver detalhamento de método no item 2.13.2.1.)

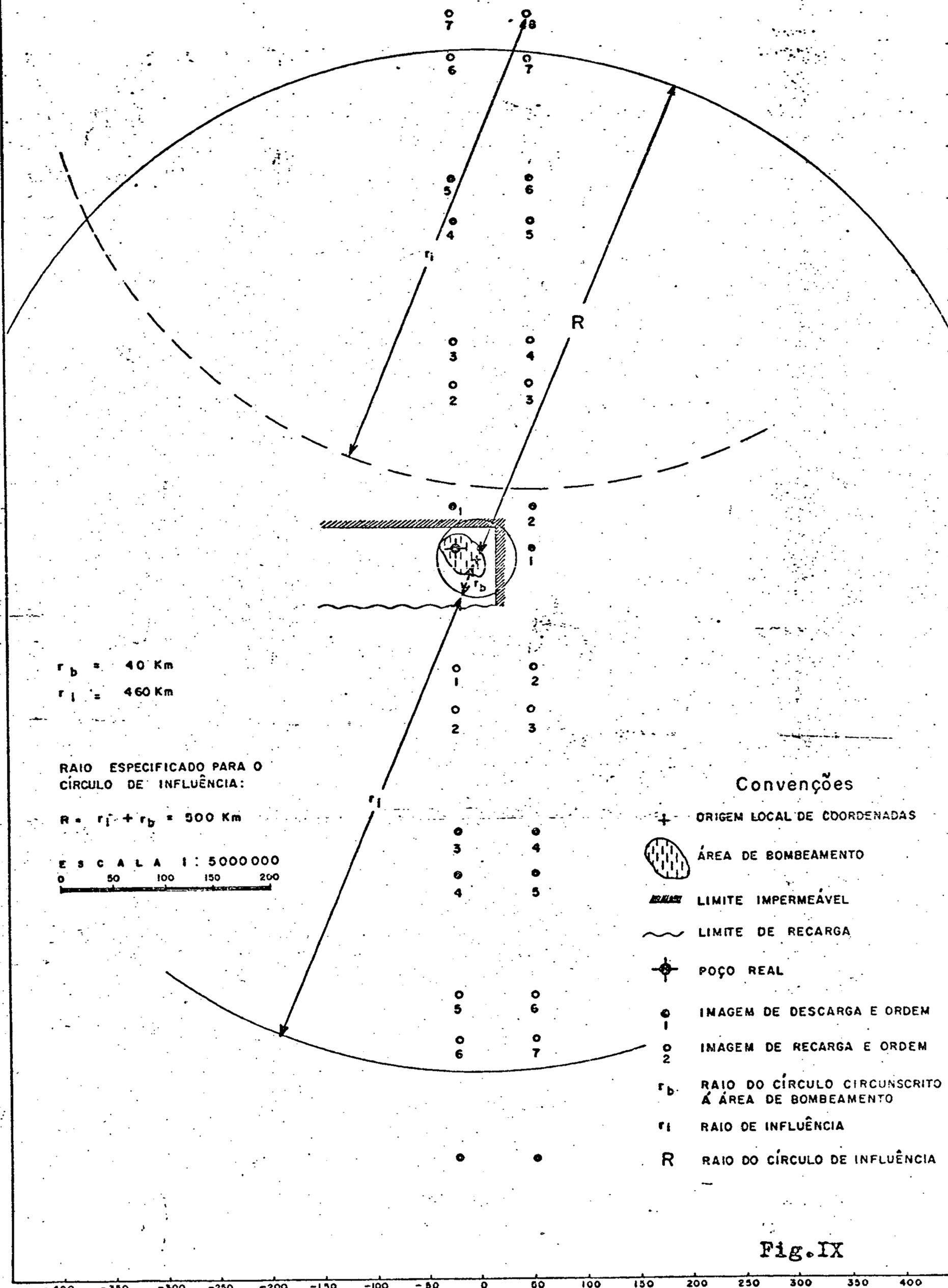
2.13.1.2 - Regime de Bombeamento

O programa admite regimes de bombeamento variável, computando os efeitos a longo prazo, ou os efeitos de bombeamento durante estação curta de máxima demanda, bem como os efeitos de descargas intermitentes, podendo diferentes poços admitir regimes de bombeamento diferentes (Fig. X).

2.13.1.3 - Definição dos poços e baterias.

O programa apresenta total flexibilidade de quanto a definição dos conjuntos de poços exploratórios. Será possível definir detalhadamente cada um dos poços, ou

Compensação dos Limites Hidrogeológicos



$r_b = 40 \text{ Km}$
 $r_i = 460 \text{ Km}$

RAIO ESPECIFICADO PARA O
 CÍRCULO DE INFLUÊNCIA:

$R = r_i + r_b = 500 \text{ Km}$

ESCALA 1 : 5000000
 0 50 100 150 200

Convenções

- ORIGEM LOCAL DE COORDENADAS
- ÁREA DE BOMBEAMENTO
- LIMITE IMPERMEÁVEL
- LIMITE DE RECARGA
- POÇO REAL
- IMAGEM DE DESCARGA E ORDEM
- IMAGEM DE RECARGA E ORDEM
- r_b RAIO DO CÍRCULO CIRCUNSCRITO À ÁREA DE BOMBEAMENTO
- r_i RAIO DE INFLUÊNCIA
- R RAIO DO CÍRCULO DE INFLUÊNCIA

Fig. IX

Regime de Bombeamento

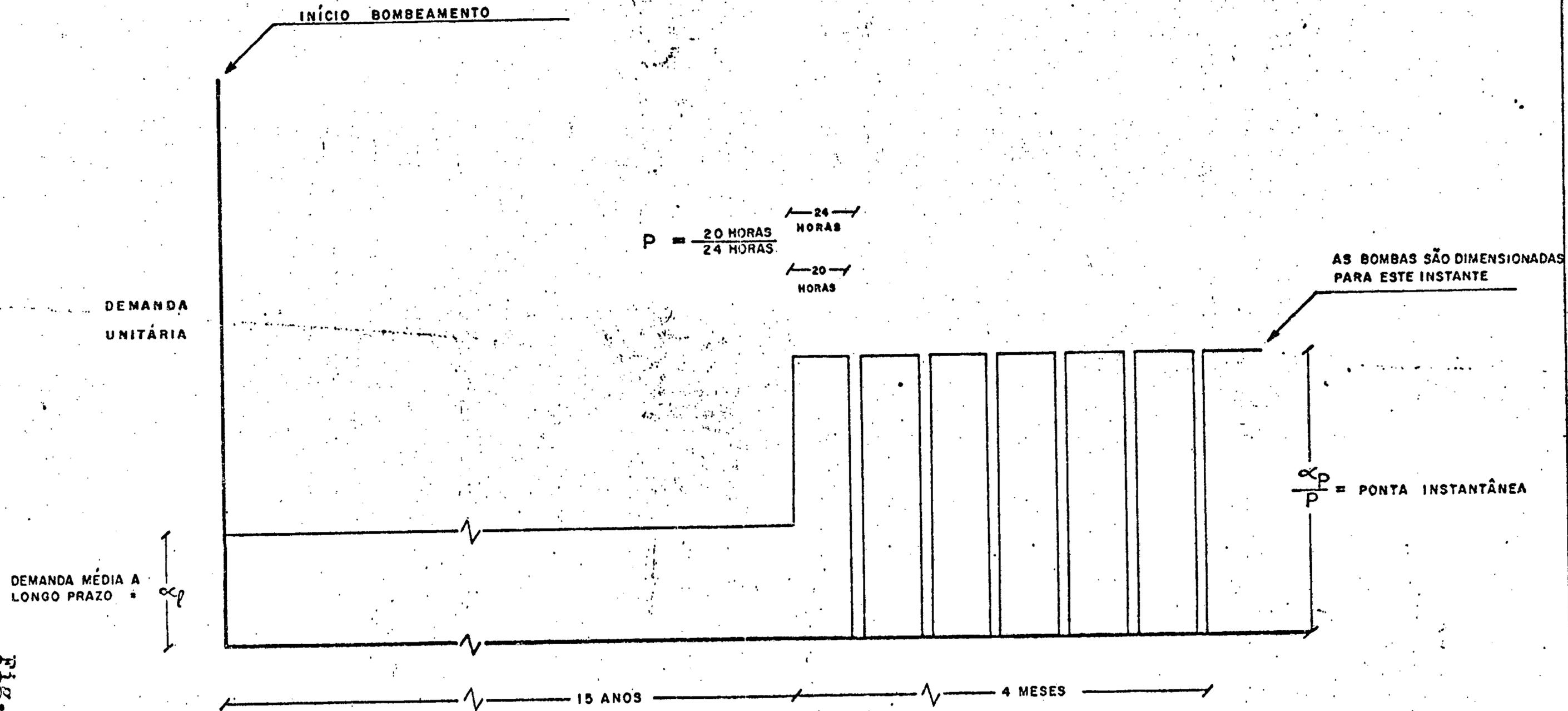


Fig. X

proceder a uma simplificação do esquema de captação, mediante baterias retilíneas, constituída por poços igualmente espaçados. (Fig.XI).

Este último procedimento mostra-se particularmente adequado para estudos à nível preliminar, enquanto que o primeiro adapta-se a análises mais detalhadas das possibilidades de exploração. Os poços definidos individualmente, poderão coexistir com as baterias. Deverão ser especificados para o programa :

- As coordenadas, inclusive cota dos poços;
- Profundidade total dos poços;
- Profundidade de secção revestida;
- Profundidade da câmara de bombeamento
- Nível piezométrico

No caso da bateria, serão especificados apenas os valores correspondentes a poços locados nos dois extremos, de vez que o programa procede as interpolações para cada um dos poços intermediários, considerando declividades uniformes entre os extremos.

2.13.1.4 - Projetos de poços

Deverão ser fornecidos vários projetos padrão de poços, especificando-se para cada um deles suas características técnicas de perfuração, um custo básico total e custos unitários adicionais. (Fig. XII).

O programa corrige o custo real total de cada poço, em função das condições topográficas locais (aumento ou diminuição das diferentes secções), e do nível dinâmico máximo obtido (aumento ou diminuição da câmara de bombeamen

Bateria de Três Poços

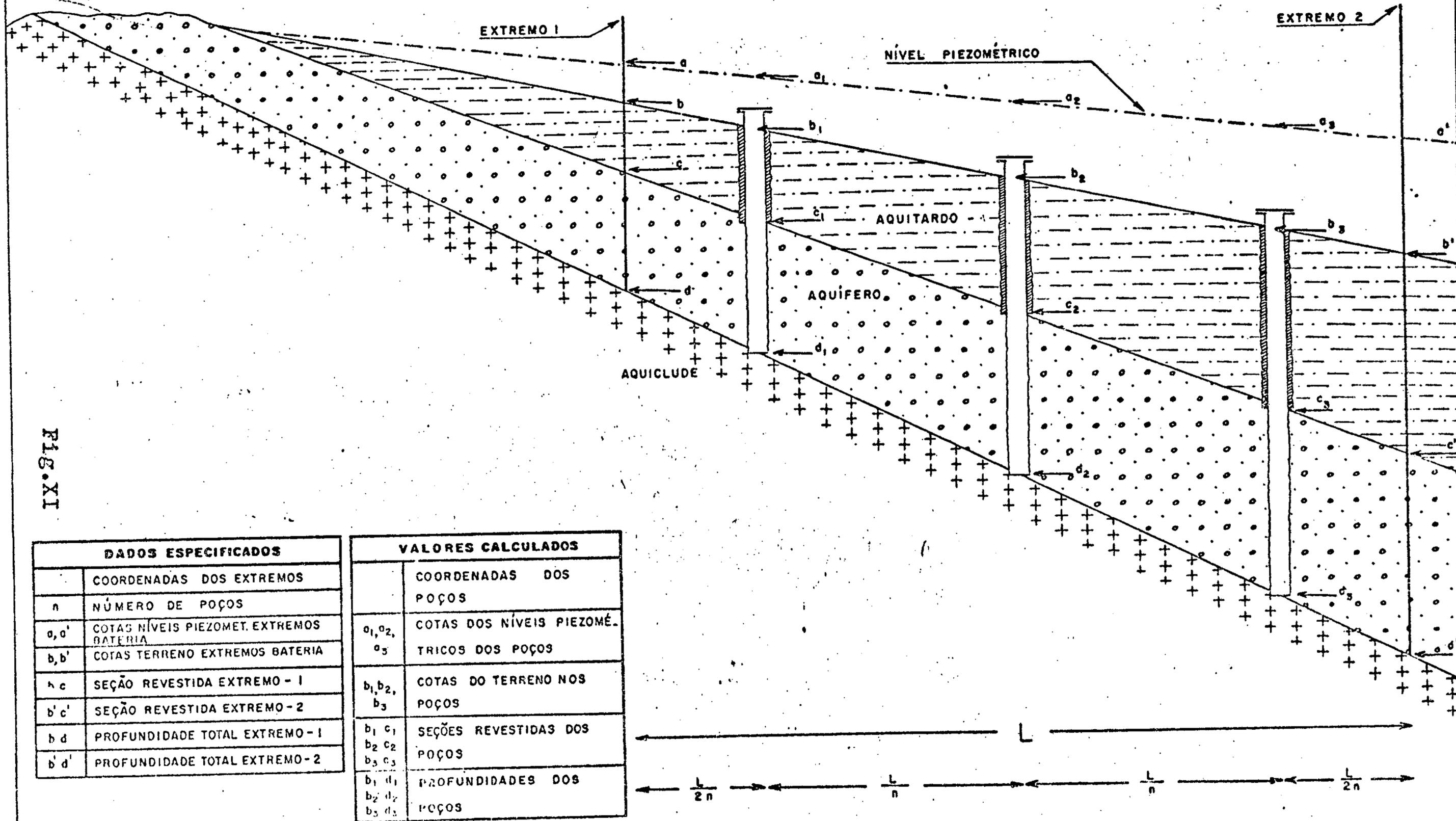


FIG. XI

DADOS ESPECIFICADOS		VALORES CALCULADOS	
	COORDENADAS DOS EXTREMOS		COORDENADAS DOS POÇOS
n	NÚMERO DE POÇOS		
a, a'	COTAS NÍVEIS PIEZOMET. EXTREMOS BATERIA	a_1, a_2, a_3	COTAS DOS NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS DOS POÇOS
b, b'	COTAS TERRENO EXTREMOS BATERIA		
b, c	SEÇÃO REVESTIDA EXTREMO - 1	b_1, b_2, b_3	COTAS DO TERRENO NOS POÇOS
b', c'	SEÇÃO REVESTIDA EXTREMO - 2		
b, d	PROFUNDIDADE TOTAL EXTREMO - 1	b_1, c_1 b_2, c_2 b_3, c_3	SEÇÕES REVESTIDAS DOS POÇOS
b', d'	PROFUNDIDADE TOTAL EXTREMO - 2	b_1, d_1 b_2, d_2 b_3, d_3	PROFUNDIDADES DOS POÇOS

Projetos de Poço e Bomba

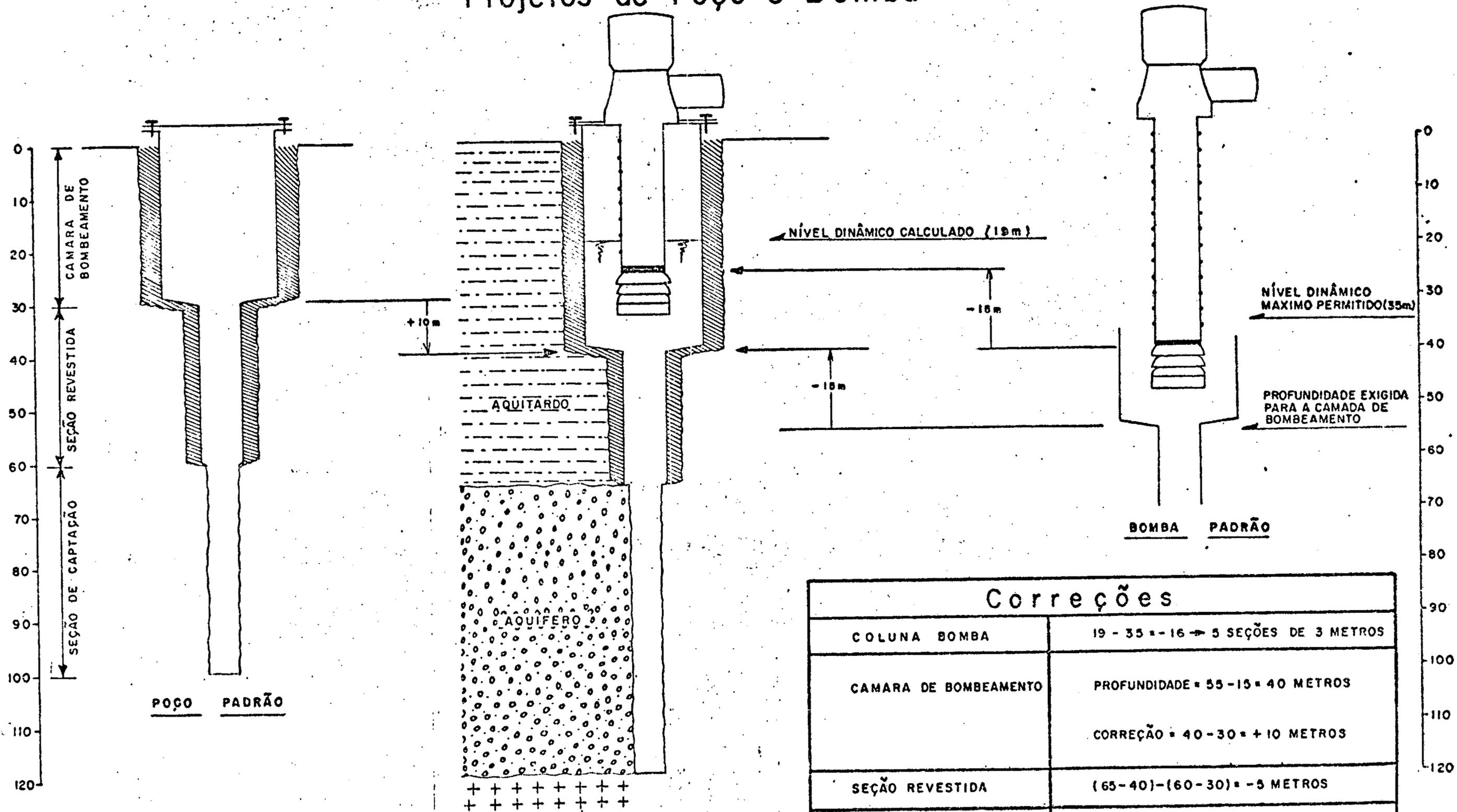


FIG. XII

to). Para cada projeto padrão é fornecido um fator constante para cálculo das perdas de carga, em função das vazões de exploração.

2.13.1.5 - Projetos de bombas

Deverão ser especificados projetos padrão de bombas, analogamente aos projetos de poços, imputando-se um custo básico correspondente ao projeto básico, e custos unitários para que o programa proceda a correção nos custos finais, relativos a acréscimos ou diminuições de potência, variações no comprimento da coluna da bomba (caso das bombas de eixo vertical, ou de motor submerso). Especifica-se também, um fator de perdas de carga na bomba (Fig. XII).

2.13.1.6 - Especificações de exploração

Deverão ser especificados para cada poço ou bateria.

- Quais os projetos padrão de poço e bomba a serem considerados na simulação.

- O recalque adicional a ser fornecido pela bomba, se existir.

- Um fator de perdas no recalque, que poderá incluir o termo $\frac{v^2}{2g}$ na saída.

Por outro lado, uma das três condições seguintes de exploração deverão ser especificadas (Fig. XIII).

- O número de unidades de demanda a serem supridas (hectares no caso de irrigação ou número de habitantes, no caso do abastecimento urbano). Código de espe

Exemplos de Especificações de Nível Dinâmico

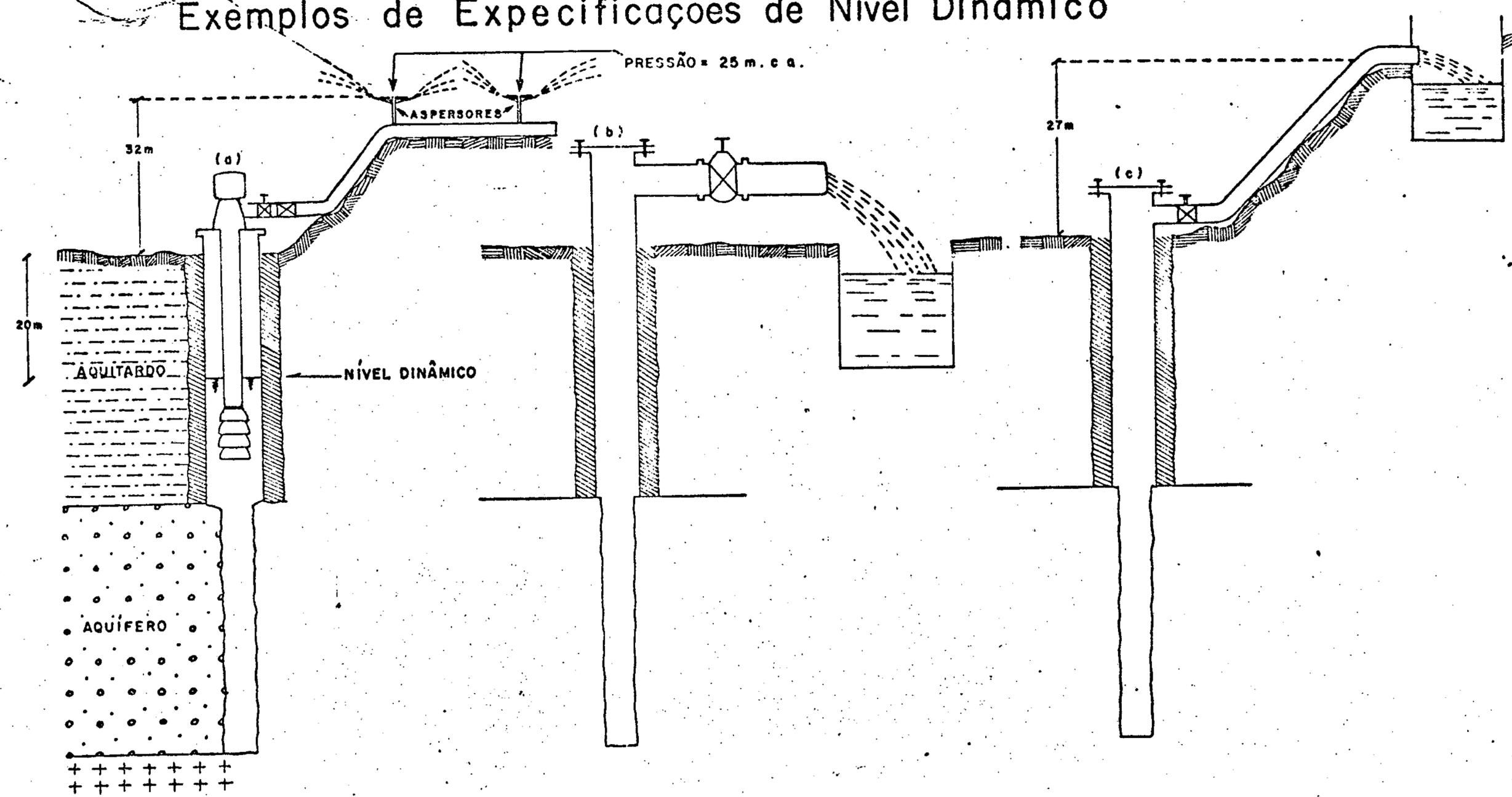


FIG. XIII

a) POÇO COM BOMBA VERTICAL b) POÇO SURGENTE SEM RECALQUE c) POÇO SURGENTE COM RECALQUE

ESPECIFICAÇÃO	TIPO	2	2	3
	VALOR	- 20m	0	0
RECALQUE ADICIONAL		32 + 25 = 57m	0	27m
OBSERVAÇÕES				A ESPECIFICAÇÃO É SATISFEITA LEVANDO EM CONTA AS PERDAS NO RECALQUE

cificações (1).

- O nível dinâmico em condições de máxima demanda, medida em relação a boca do poço. Código de especificações (2).

- O nível dinâmico, medido em relação ao fim recalque. Código de especificação (3).

2.13.1.7 - Determinação do esquema de exploração

O problema da determinação dos diferentes parâmetros envolvidos no esquema de exploração simulado, é resolvido pelo programa mediante um processo complexo segundo as diretrizes gerais seguintes :

Inicialmente é computada a interferência de todos os poços cuja demanda foi especificada (Código 1) sobre eles mesmos e sobre os demais de especificações diferentes. A seguir o programa calcula a interferência específica (por unidade de demanda), dos poços cujo nível dinâmico foi especificado (Códigos 2 e 3), sobre eles mesmos e sobre os do Código (1). Com estes elementos o programa entra em um processo iterativo, obtendo-se como resultado, as demandas dos poços de código 2 ou 3, de modo que sejam satisfeitas todas as especificações relativas a nível dinâmico, inclusive levando-se em conta as perdas de carga (ver detalhamento do método no item 2.13.2.5).

Se as especificações impostas ao programa são inviáveis dentro do esquema de exploração projetado, o programa imprime uma grande quantidade de informações analíti

cas de modo a possibilitar a revisão do projeto.

2.13.1.8 - Cálculo do projeto de exploração e dos custos.

Dimensionadas todas as demandas, o programa computa todos os rebaixamentos e perdas e imprime uma análise dos rebaixamentos para cada um dos poços, inclusive separando componentes relativos às interferências dos demais poços e influências dos limites considerados. Em seguida o programa fornece um projeto detalhado de cada poço e respectiva bomba, incluindo cálculo de energia anual de exploração. Finalmente são computados os custos totais e por unidade de demanda, discriminados entre poços, bombas e energia os custos atualizados ao início do projeto, para cada poço separadamente, e para o conjunto, bem como o custo do metro cúbico explorado, correspondente ao esquema de captação simulado.

2.13.2 - DETALHAMENTO DA METEOROLOGIA DO MODELO SIMAQA.

: 2.13.2.1 - Tratamento do efeito dos limites hidrogeológicos (Fig. IX).

O efeito dos limites hidrogeológicos é substituído pelo efeito de um conjunto de poços imagens, cuja posição e tipo (imagem de descarga ou imagem de recarga) são calculados pelo computador. Admitindo que os ângulos entre limites satisfaçam as condições requeridas para aplicação do método, podem-se apresentar duas situações ao compensar o efeito dos limites relativo a um poço.

a) É obtida uma figura compensada com respeito a to-

dos os limites com um número finito de imagens.

b) São obtidas infinitas imagens que se afastam progressivamente da área de bombeamento. Neste último caso, despreza-se o efeito dos poços imagens, situados fora de um certo círculo de influência, situado em volta da área de bombeamento, cujo raio é especificado pelo usuário.

Adota-se, portanto, um conjunto de poços imagens parcialmente descompensado, porém tal que toda imagem interior ao círculo de influência fica compensada com respeito a todos os limites.

O método utilizado para a geração das imagens de um poço, em ambos os casos acima, é detalhado a seguir :

O computador cria e preenche progressivamente na sua memória uma tabela cujos elementos definem os poços imagens que vão sendo criados. Cada posição da tabela corresponde a um poço imagem, sendo a primeira posição ocupada pelo poço real a ser compensado. Os itens contidos numa posição i da tabela são :

- X_i, Y_i : coordenadas da imagem i (relativas)
- t_i : 1 para imagem de descarga, -1 para imagem de recarga
- C_{il} : indicador que vale 1, se a imagem i já foi compensada com respeito ao limite l e zero no caso contrário.
- n_i : ordem de imagem i (imagem de ordem n , quer dizer que provém de n transformações por simetria a partir do poço real).

O processo começa com a introdução na primeira posição dos dados do poço real. A partir desse momento, repete-se iterativamente o seguinte processo: tomando-se o primeiro poço não compensado da tabela, são investigados os correspondentes valores C_{i1} . Ao se encontrar um $C_{i1} = 0$, é criada nova imagem K , simétrica da imagem i , com respeito ao limite l . As fórmulas para o cálculo de X_k, Y_k são as seguintes:

$$X_k = 2 d_l \sin \psi_l + X_i \cos 2 \psi_l - Y_i \sin 2 \psi_l$$

$$Y_k = 2 d_l \cos \psi_l - X_i \sin 2 \psi_l - Y_i \cos 2 \psi_l$$

d_l = Distância perpendicular desde a origem relativa de coordenada até o limite l .

ψ_l = Azimute geográfico (de 0° a 360°) da perpendicular baixada desde a origem até o limite l .

Uma vez determinadas X_k, Y_k , se faz:

$$C_{i1} = 1$$

$$C_{k1} = 1$$

$$n_k = n_i + 1$$

$$t_k = t_i T_l \text{ (sendo } T_l = 1 \text{ se o limite } l \text{ é impermeável e } T_l = -1 \text{ se é de recarga).}$$

Os restantes indicadores da imagem k ficam nulos.

Se a imagem ficou dentro do círculo de influência, a seguir são investigadas todas as imagens ainda não compensadas da tabela.

Se alguma imagem p coincide em posição e tipo com a imagem k, se faz $C_{pl} = 1$ (admite se a coincidência aproximada em posição, dentro de uma tolerância especificada). Finalmente, se não é encontrada nenhuma coincidência, a imagem k é introduzida na primeira posição livre da tabela, que deste fato vai crescendo ao mesmo tempo em que a lista das imagens já compensadas vai também aumentando.

A conclusão normal do processo consiste em que a lista de poços compensados "alcança" a lista de poços não compensados, obtendo-se uma tabela em que todos os $C_{il} = 1$, o que significa que todas as imagens de tabela estão compensadas entre elas ou com imagens que caíram fora do círculo de influência, sendo que estas últimas não foram introduzidas por terem um efeito desprazível.

Produz-se uma conclusão anormal do processo se duas imagens de tipo contrário coincidem em posição. Este fato indica incorreta especificação dos limites hidrogeológicos.

Se o erro se produz, ele é amplamente documentado pelo computador, facilitando a sua correção.

2.13.2.2 - Regime hidrodinâmico.

A estrutura do modelo permite tratar qualquer regime hidrodinâmico para o qual exista solução analítica (aquífero confinado, semi-confinado ou livre). No caso de aquífero confinado adota-se a equação de Theis :

$$s(r,t) = \frac{s}{Q} = \frac{1}{4\pi T} W(u) = \frac{1}{4\pi T} \int_u^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx$$

$\frac{s}{Q}$ = rebaixamento específico que resulta num aquífero infinito homogêneo e isotrópico, num ponto situado à distância r , de um poço de penetração total que é bombeado durante um tempo t com vazão constante.

$$u = \frac{r^2 S}{4 T t}$$

T = transmissividade

S = coeficiente de armazenamento

s = rebaixamento

Q = vazão

As correções por penetração parcial (que na prática afetam apenas ao efeito produzido pelo próprio poço sobre ele mesmo, e não os efeitos de outros poços ou imagens) são aplicadas mediante coeficientes fornecidos pelo usuário (podem-se calcular, por exemplo, mediante a fórmula de Kozeny).

A função de Theis é computada mediante desenvolvimento em série.

2.13.2.3 - Regime de Bombeamento :

O modelo admite regimes de bombeamento variáveis no tempo. O regime de bombeamento é comandado pela evolução da demanda de água. Para definir esta, adota-se uma "unidade de demanda" arbitrária, que pode ser o hectare irrigado ou número de habitantes, sendo o regime de demanda da unidade adotada, convenientemente caracterizado. (Fig.X).

No caso mais complexo da irrigação, a demanda de hec

tare irrigado apresenta oscilações cíclicas sazonais, com um período de demanda pique durante a estação seca. Para efeitos de dimensionamento das bombas, interessa o máximo rebaixamento produzido, o qual ocorre no final da última estação seca considerada. De outra parte, e mesmo durante o período de máxima demanda, os poços são geralmente bombeados de forma intermitente, existindo ciclos diários ou horários em que um período de bombeamento é seguido de outro de repouso. O rebaixamento máximo irá se produzir no final do último ciclo de bombeamento da última estação seca considerada.

Levando em conta as características das funções de rebaixamento, que determinam um amortecimento do efeito das variações de vazão após um certo tempo, o regime real de demanda para irrigação pode ser substituído, com muita aproximação, por um regime simplificado. Suponha-se que um poço é bombeado, durante vários anos, com variações sazonais periódicas e bombeamento intermitente, mesmo durante os períodos de demanda pique. Sejam :

$t_1 + t_p$ o tempo total considerado desde o início da exploração do poço até o instante em que se produz o máximo rebaixamento a calcular (pode-se adotar $t_1 =$ vida útil das bombas)

t_p a duração de um período de demanda pique

Δt a duração de um ciclo completo de intermitência (bombeamento + recuperação) durante o período de demanda pique.

$n = \frac{t_p}{\Delta t}$ o número de ciclos de intermitência ocorrentes durante o período de demanda pique.

- Q_1 a vazão fictícia contínua do poço durante todo o período considerado (vazão fictícia a longo prazo).
- Q_p a vazão fictícia contínua do poço durante o período de demanda pique.
- p relação de intermitência durante o período de demanda pique (= tempo de bombeamento em um ciclo/ duração total do ciclo).

Para efeitos de cômputo do rebaixamento no final do último ciclo da última estação seca, este regime pode ser substituído pelo seguinte: bombeamento com vazão constante Q_1 durante um período t_1 , seguido de bombeamento intermitente com demanda pique durante o tempo t_p .

Ora, o efeito deste bombeamento variável é equivalente ao que produziriam :

- um poço de descarga bombeando Q_1 durante $t_1 + t_p$
- um poço de recarga injetando Q_1 durante t_p
- um poço de descarga bombeando intermitentemente a vazão fictícia contínua Q_p durante o tempo t_p por ciclos de duração Δt , com períodos de bombeamento $p \Delta t$ e de repouso $(1 - p) \Delta t$.

Por seu curso, este último poço equivale a um conjunto de poços de recarga e descarga cujo efeito total, no caso de aquífero confinado e à distância não excessiva do poço, é descrito pela seguinte fórmula :

$$s_n = \frac{Q_p/p}{4\pi T} \ln \left(\frac{1+p}{1} \times \frac{2+p}{2} \times \frac{3+p}{3} \times \dots \times \frac{n+p}{n} \right) + s_B$$

s_n = rebaixamento produzido no final do n-ésimo ciclo de bombeamento.

s_B = rebaixamento devido a um ciclo de bombeamento único.

A distâncias grandes do poço a fórmula acima deixa de ser válida porém, neste caso o efeito da intermitência fica desprezível, podendo s_n ser computado sem levar em conta a intermitência, quer dizer, com vazão contínua Q_p . Na prática, a intermitência afeta apenas o efeito de um poço sobre ele mesmo, ou a distâncias pequenas.

Nestas condições pode-se aplicar a seguinte fórmula para aquífero infinito :

$$s(r) = Q_1 \sigma(r, t_1 + t_p) - Q_1 \sigma(r, t_p) + Q_p \sigma_p(r)$$

$s(r)$ = rebaixamento máximo produzido por um poço, a uma certa distância r do mesmo.

$\sigma(r, t)$ = rebaixamento específico após o tempo t , à distância r .

$$\sigma_p(r) = \frac{1}{4 \pi T p} \ln \left(\frac{1+p}{1} \times \frac{2+p}{2} \dots \frac{n+p}{n} \right) + \frac{1}{p} (r, p \Delta t) \text{ se}$$

a distância ao poço é menor do que o raio de influência da intermitência (raio especificado pelo usuário).

= $\sigma(r, t_p)$ se a distância é maior do que o raio.

2.13.2.4 - Rebaixamentos unitários.

Chamando α_1 e α_p as demandas unitárias fictícias contínuas correspondentes ao longo prazo e ao período de pique, respectivamente, se um poço serve d unidade de demanda, verifica-se :

$$Q_1 = \alpha_1 \cdot d$$

$$Q_p = \alpha_p \cdot d$$

Substituindo na fórmula acima, obtém-se :

$$s(r) = d \left[\alpha_1 \sigma(r, t_1 + t_p) - \alpha_1 \sigma(r, t_p) + \alpha_p \sigma_p(r) \right]$$

Chamando :

$$\beta(r) = \alpha_1 \sigma(r, t_1 + t_p) - \alpha_1 \sigma(r, t_p) + \alpha_p \sigma_p(r)$$

Fica :

$$s(r) = d \beta(r)$$

O valor $\beta(r)$ representa o rebaixamento em aquífero infinito à distância r de um poço por unidade de demanda servida pelo mesmo. Constitui uma generalização do rebaixamento específico para o caso de regime de bombeamento variável.

Considerando agora um poço P_j e todas as suas imagens, a interferência máxima produzida no local de outro poço P_i pelo bombeamento do poço P_j será :

$$\begin{aligned} s_{ij} &= \sum_k t_{jk} s(r_{ijk}) = \sum_k t_{jk} d_j \beta(r_{ijk}) = \\ &= d_j \sum_k t_{jk} \beta(r_{ijk}) \end{aligned}$$

d_j = demanda em unidades servidas pelo poço j

r_{ijk} = distância entre o poço i e a imagem k do poço j , adotando-se $r_{iil} =$ raio efetivo do poço i .

t_{jk} = tipo de imagem k do poço j (1 para descarga, - 1 para recarga).

O somatório é estendido a todas as imagens do poço P_j , inclusive o próprio poço real.

Chamaremos interferência unitária a_{ij} do poço j sobre o poço i a interferência que se produz no poço i por cada unidade de demanda servida pelo poço j :

$$a_{ij} = \frac{s_{ij}}{d_j} = \sum_k t_{jk} \beta(r_{ijk})$$

2.132.5 - Rebaixamentos totais e níveis dinâmicos

Se existem N poços, o rebaixamento máximo num poço P_i tem por expressão :

$$s_i = \sum_{j=1}^N s_{ij} = \sum_{j=1}^N a_{ij} d_j$$

A vazão instantânea do poço, no momento em que se produz o rebaixamento máximo, será :

$$Q_i = \frac{\alpha p}{p} d_i$$

Chamando H_i e h_i as cotas respectivas dos níveis estático e dinâmico máximo no poço i , temos :

$$h_i = H_i - \sum_{j=1}^N a_{ij} d_j - C_i \frac{\alpha p^2}{p^2} d_i^2$$

onde o último termo representa as perdas no poço ("well loss") sendo C_i uma constante característica do poço i .

Se as demandas d_i de todos os poços são conhecidas, podem-se calcular os níveis dinâmicos de todas os poços com as fórmulas acima. Porém, o modelo admite, para um poço qualquer, três tipos possíveis de especificações de exploração (Fig. XIII).

- Código 1 : é especificada a demanda d_i servida pelo poço.
- Código 2 e 3 : é especificada o nível dinâmico que o poço deve atingir, sendo a demanda d_i a determinar.

Suponha-se que os n primeiros poços são do tipo 1 e os m restantes de tipos 2 ou 3, sendo $n + m = N$. A fórmula do nível dinâmico pode-se expressar assim :

$$h_i = H_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} d_j - \sum_{j=n+1}^N a_{ij} d_j - C_i' d_i^2 ;$$

chamando

$$C_i' = \frac{\alpha p^2}{p^2} C_i$$

Daí :

$$\sum_{j=n+1}^N a_{ij} d_j + C_i' d_i^2 = H_i - h_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} d_j$$

Chamamos "rebaixamento disponível" no poço i :

$$b_i = H_i - h_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} d_j$$

($n+1 \leq i \leq N$)

Os b_i podem ser computados diretamente, dado que as demandas dos poços 1 até n são conhecidas. Fica :

$$\sum_{j=n+1}^N a_{ij} d_j + C_i' d_i^2 = b_i \quad (n \leq i \leq N)$$

Esta equação expressa que, para um poço qualquer de tipo 2 ou 3, a soma de todas as interferências dos poços de tipo 2 ou 3 (incluído ele mesmo) mais as perdas de carga, deve ser igual à disponibilidade b_i de nível dinâmico que fica após subtrair as interferências dos poços cuja demanda é conhecida (poços de tipo 1).

O problema consiste em determinar os d_i resolvendo o sistema de m equações com m incógnitas acima. Devido a presença dos termos quadráticos, o sistema não é linear, tendo 2^m soluções. Porém, apenas aquela solução em que todos os d_i são positivos tem sentido físico.

O método utilizado para a resolução do sistema é iterativo. Chamando :

$$b'_i = b_i - C'_i d_i^2$$

O sistema fica :

$$\sum_{j=n+1}^N a_{ij} d_j = b'_i$$

ou em notação matricial :

$$AD = B'$$

O vetor $D = (d_i)$ pode-se expressar assim :

$$D = A^{-1} B'$$

Sendo o vetor $B' = (b'_i)$ depende das incógnitas d_i .

O processo iterativo consiste em partir de valores iniciais nulos para os d_i , e aplicar a equação acima sucessivamente, recalculando os b'_i a partir das soluções que vão sendo obtidas para os d_i :

$$b_i^{(1)} = b_1 \quad (n+1 \leq i \leq N)$$

$$D^{(1)} = A^{-1}B^{(1)}$$

$$b_i^{(2)} = b_i - C_i(d_i^{(1)})^2 \quad (n+1 \leq i \leq N)$$

$$D^{(2)} = A^{-1}B^{(2)}$$

$$b_i^{(K+1)} = b_i - C_i(d_i^{(K)})^2 \quad (n+1 \leq i \leq N)$$

$$D^{(K+1)} = A^{-1}B^{(K+1)}$$

O processo requer uma única inversão da matriz A.

As interações terminam quando os resíduos de to das equações ficam por baixo de uma tolerância especificada, que representa o maximo erro admitido na especificação das alturas piezométricas.

Se as perdas de carga não são muito importantes, o processo converge diretamente. Caso contrário, pode-se introduzir um coeficiente W que deve ser menor e próximo da unidade, cuja função é amortecer as oscilações dos d_i. A iteração se transforma em :

$$D^{(K+1)} = WD^{(K)} + (1-W)A^{-1}B^{(K+1)}$$

Se a solução positiva existe, o processo descri leva à determinação de todas as demandas não conhecidas, o que permite finalmente computar todos os rebaixamentos e níveis dinâmicos e detalhar o projeto de todos os poços e bombas. Caso não exista solução positiva, quer dizer que as espe

cificações do projeto são inviáveis. Nestes casos, o computador imprime uma grande quantidade de informação analítica para facilitar a reformulação das especificações.

2.13.2.6 - Análise de rebaixamentos

Com as fórmulas dos itens acima, pode-se obter a seguinte expressão do rebaixamento num poço P_i :

$$s_i = \sum_{j=1}^N s_{ij} = \sum_{j=1}^N a_{ij} d_j = \sum_{j=1}^N d_j \sum_k t_{jk} \beta(r_{ijk})$$

Os somatórios podem ser decompostos da seguinte forma :

$$s_i = d_i \sum_k t_{ik} \beta(r_{iik}) + \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq i)}}^N d_j \sum_k t_{jk} \beta(r_{ijk}) =$$

$$= d_i t_{i1} \beta(r_{i11}) + d_i \sum_{k \neq 1} t_{ik} \beta(r_{iik}) +$$

$$+ \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq i)}}^N d_j \left[t_{j1} \beta(r_{ij1}) + \sum_{k \neq 1} t_{jk} \beta(r_{ijk}) \right] =$$

$$= d_i t_{i1} \beta(r_{i11}) + d_i \sum_{k \neq 1} t_{ik} \beta(r_{iik}) +$$

$$+ \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq i)}}^N d_j t_{j1} \beta(r_{ij1}) + \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq i)}}^N d_j \sum_{k \neq 1} t_{jk} \beta(r_{ijk})$$

Verifica-se :

$$r_{iil} = W_i \quad (\text{raio efetivo do poço } i)$$

$$r_{ijl} = R_{ij} \quad (\text{distancia entre os poços } P_i, P_j)$$

Substituindo :

$$s_i = d_i \beta(W_i) + d_i \sum_{k \neq i} t_{ik} \beta(r_{iik}) + \\ + \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq i)}}^N d_j \beta(R_{ij}) + \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq i)}}^N d_j \sum_{k \neq i} t_{jk} \beta(r_{ijk})$$

Esta expressão fornece uma discriminação do rebaixamento em suas componentes hidrogeológicas, a saber :

$$f_i = d_i \beta(W_i)$$

= Rebaixamento devido ao bombeamento do próprio poço, se o aquífero não tiver limites.

$$f_i' = d_i \sum_{k=1} t_{ik} \beta(r_{iik})$$

= Efeito dos limites h_i

drogeológicos sobre o bombeamento do próprio poço.

$$g_i = \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq i)}}^N d_j \beta(R_{ij})$$

= Interferência dos outros poços se o aquífero não tiver limites.

$$g'_i = \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq i)}}^N d_j \sum_{k \neq j} t_{jk} \beta(r_{ijk})$$

= Efeito dos limites sobre a interferência dos outros poços.

Sendo : $s_i = f_i + f'_i + g_i + g'_i$

O computador imprime uma listagem de análise de rebaixamento mostrando, para cada poço, o rebaixamento total e sua discriminação nos 4 componentes acima, o que permite uma análise aprofundada da incidência dos diferentes fatores que contribuem ao rebaixamento geral e local do lençol, e um estudo da sensibilidade do projeto a qualquer mudança nas hipóteses hidrogeológicas ou nas especificações de exploração.

2.13.2.7 - Cálculo do consumo de energia:

Além do rebaixamento máximo, utilizado no dimensionamento das bombas, o programa calcula um "rebaixamento médio", utilizando as mesmas fórmulas descritas acima para o re

baixamento máximo, com a exceção da utilizada para cálculo de $\beta(r)$, que fica substituída pela seguinte :

$$\beta(r) = \alpha_1 \zeta(r, t_1 + t_p)$$

O "rebaixamento médio" assim obtido, representa aproximadamente a média do rebaixamento a longo prazo.

O cálculo aproximado do consumo anual médio de energia é feito, se o usuário assim o desejar, introduzindo o recalque médio resultante deste rebaixamento médio. Porém, em casos de poços surgentes ou com determinados tipos de bombas, esse critério não pode ser realista. Para estes casos dispõe-se de uma opção : adota-se como recalque médio uma percentagem especificada do recalque máximo.

2.13 - EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DO MODELO SIMAQ.

-Nº de poços=14

-Vazão bombeada = 5.457.000 m³/ano

-Energia Anual = 965,4 MWH

-Potência instalada = 433,8 KW

-Custo do m³ = Cr\$ 0,215

-Investimento total atualizado=Cr\$18.493.000,00

D A D O S B A S I C O S

IDENTIFICACAO

VALOR

1-TRANSMISSIVIDADE (M2/SEG)	0.36000E-02
2-COEFICIENTE ARMAZENAMENTO	0.11600E-03
3-DURACAO BOMBAMENTO LONGO PRAZO (ANOS)	15.00
4-DURACAO BOMBAMENTO DEMANDA PONTA (DIAS)	120.00
5-DURACAO CICLO INTERMITENCIA (HORAS)	24.00
6-PERCENTAGEM BOMBAMENTO INTERMITENTE	100.00
7-RAIO INFLUENCIA A LONGO PRAZO (M)	20000.
8-RAIO INFLUENCIA A CURTO PRAZO (M)	5000.
9-RAIO INFLUENCIA EFEITO INTERMITENCIA (M)	500.
10-TOLERANCIA LOCALIZACAO POÇOS IMAGENS (M)	10.00
11-TOLERANCIA ALTURAS PIEZOMETRICAS (M)	0.20
12-DEMANDA CONTINUA UNITARIA MEDIA (M3/SEG)	0.40000E-03
13-DEMANDA CONTINUA UNITARIA PONTA (M3/SEG)	0.11000E-02
14-DESVIO QUADRATICO NORMALIZADO DEMANDA UNITARIA	0.27
15-CUSTO ENERGIA (CRS/MWH)	78.47
16-CUSTO ANUAL POTENCIA INSTALADA (CRS/KW)	0.0
17-TAXA ATUALIZACAO (O/O)	6.00
18-PERIDO ATUALIZACAO (ANOS)	50.
19-COORDENADA X DA ORIGEM RELATIVA (M)	823604.
20-COORDENADA Y DA ORIGEM RELATIVA (M)	128323.
21-PERCENTAGEM DE AMT MAXIMA PARA CALCULO ENERGIA	0.70000E 02

IDENTIFICACAO	DISTANCIA PERPENDICULAR A ORIGEM (M)	AZIMUT DA PERPENDICULAR (GRAUS)	TIPO
---------------	---	--	------

1-RECARGA CABECAS NORTE	70000.	0	RECARGA
2-RECARGA CABECAS OESTE	80000.	270	RECARGA
3-AFLORAMENTO SERRA GRANDE SUL	46655.	180	RECARGA
4-BARREIRA DIABASIO LESTE	16740.	90	IMPERMEAVEL

SUIAMEC S.A.
informática e tecn

MOO A-110

LITHO FORMAS

P R O J E T O	VIDA UTIL (ANOS)	VALOR RESI-DUAL (%)	P R O J E T O P A R A O			CORRECOES DE CUSTO				FATOR DE PERDAS TOTAIS EM POÇO
			PROFUNDIDADE TOTAL (M)	SECAO REVESTIDA (M)	CAMARA BOMBAMENTO (M)	CUSTO M. ADICIONAL SEC. CAPT. (CR\$)	CUSTO M. ADICIONAL SEC. REVST. (CR\$)	CUSTO M. ADICIONAL CAM. BOMB. (CR\$)		
1-POÇO PARA B. VERTICAL 8 POL	25.	0.	450.	210.	0.	441000.	480.	1809.	0.	0.132E 04
2-POÇO PARA B. VERTICAL 10 POL	25.	0.	450.	210.	113.	639000.	480.	1809.	3386.	0.104E 04
3-POÇO PARA B. VERTICAL 12 POL	25.	0.	450.	210.	110.	662000.	480.	1809.	3596.	0.997E 03
4-POÇO PARA B. VERTICAL 12 POL	25.	0.	450.	210.	110.	688000.	1200.	1809.	3596.	0.775E 03
5-P. ONCOS S. 2 (CUSTO ZERO)	15.	10.	350.	190.	0.	0.	0.	0.	0.	0.104E 04

Sulamer S.A. informática e tecn

P R O J E T O	V I D A		P O T E N - C I A	T N I V E L I D I N A - P M I C R O D - M A X .	P R O F D . C A M A R A B O M B E - A M E N T O	R E N D I M E N T O S		C O R R E C O E S D E C U S T O			F A T O R D E P E R D A S E M B O M B A	A C R . P O - T E N - C I A O / O		
	U T I L	D U A L				C U S T O	V A L O R	S E C A O	C O L U N A	V A L O R			P R I - M E N T O	V A L O R
(A N O S)	O / O	(C V)	(M)	(M)	O / O	O / O	(C R \$)	(C R \$)	(M)	(C R \$)	B O M B A	O / O		
1-VERTICAL 3 POLEGADAS	15.	10.	6.	1	8.	48.	75.	95.	70000.	1000.	3.00	7000.	0.777E 03	1.0
2-VERTICAL 10 POLEGADAS	15.	10.	21.	1	20.	60.	75.	95.	156000.	1200.	3.00	9700.	0.400E 03	2.0
3-VERTICAL 12 POLEGADAS	15.	10.	77.	1	44.	84.	75.	95.	360000.	1500.	3.00	14700.	0.185E 03	3.0

sulamco s.a. informática e tecn.

IDENTIFICACAO	COORDENADAS ABSOLUTAS			COTA NIVEL ESTATICO (M)	PROFUNDIDADE	
	X (M)	Y (M)	Z (M)		TOTAL (M)	REVESTIDA (M)
P001-POCO UNICS AREA 2 (V. PL.)	826120.	128080.	225.00	225.50	350.	190.
P101-POCO CTE SETOR 1 FID 05	824990.	129430.	222.00	224.50	435.	195.
P102-POCO CTE SETOR 2 FID 06	823550.	127850.	215.00	225.00	432.	192.
P 1-POCO FID11/75 FASE I	827210.	125060.	222.91	235.80	409.	169.
P 2-POCO FID10/75 FASE I	826020.	124440.	222.94	236.00	412.	172.
P 4-POCO FID09/75 FASE I	824120.	125510.	218.53	231.00	423.	183.
P 5-POCO FID08/75 FASE I	823240.	126100.	221.20	228.30	430.	190.
P 6-POCO FID07/75 FASE I	822660.	127280.	216.79	225.00	436.	196.
P501-POCO FID12/75 FASE II	820840.	130850.	216.61	216.10	467.	227.
P502-POCO FID13/75 FASE II	818400.	132220.	210.78	210.30	474.	234.
P503-POCO FID17/75 FASE II	822360.	130020.	221.00	219.10	455.	215.
P504-POCO FID18/75 FASE II	820200.	129440.	220.50	218.20	461.	221.
P505-POCO FID19/75 FASE II	822050.	128340.	220.00	222.20	447.	207.
P506-POCO FID20/75 FASE II	819550.	131480.	219.00	212.90	475.	235.

IDENTIFICACAO	PROJETOS		RECALQUE ADICIONAL (M)	FATOR DE PERDAS NO RECALQUE	CORRECAO ADITIVA PENETRACAO PARCIAL (0/0)	RAIO EFETIVO (M)	CONDICAO ESPECIFICADA		
	POCO	BOMBA					CO-DI-GO	UNIDADES DEMANDA	NIVEL DINAMICO (M)
P001	5	2	0.0	0.200E 03	0.	0.127	1	25.00	0.0
P101	2	2	0.0	0.200E 03	0.	0.127	1	40.00	0.0
P102	2	2	0.0	0.200E 03	0.	0.127	1	40.00	0.0
P 1	2	2	0.0	0.200E 03	0.	0.127	2	0.0	-60.00
P 2	2	2	5.00	0.200E 03	0.	0.127	2	0.0	-60.00
P 4	2	2	10.00	0.200E 03	0.	0.127	2	0.0	-60.00
P 5	2	2	5.00	0.200E 03	0.	0.127	2	0.0	-60.00
P 6	2	2	5.00	0.200E 03	0.	0.127	2	0.0	-60.00
P501	3	3	0.0	0.500E 02	0.	0.127	2	0.0	-60.00
P502	3	3	0.0	0.500E 02	0.	0.127	2	0.0	-60.00
P503	2	2	0.0	0.200E 03	0.	0.127	2	0.0	-60.00
P504	2	2	0.0	0.200E 03	0.	0.127	2	0.0	-60.00
P505	2	2	0.0	0.200E 03	0.	0.127	2	0.0	-60.00
P506	2	2	0.0	0.200E 03	0.	0.127	2	0.0	-60.00

CALCULO DAS DEMANDAS NOS POCOS COM NIVEIS DINAMICOS PRE-FIXADOS

(CODIGOS DE ESPECIFICACAO 2 OU 3)

ITERACAO	0	MAXIMO RESIDUO	61.06	METROS
ITERACAO	1	MAXIMO RESIDUO	3.13	METROS
ITERACAO	2	MAXIMO RESIDUO	2.98	METROS
ITERACAO	3	MAXIMO RESIDUO	2.66	METROS
ITERACAO	4	MAXIMO RESIDUO	2.28	METROS
ITERACAO	5	MAXIMO RESIDUO	1.90	METROS
ITERACAO	6	MAXIMO RESIDUO	1.55	METROS
ITERACAO	7	MAXIMO RESIDUO	1.25	METROS
ITERACAO	8	MAXIMO RESIDUO	0.99	METROS
ITERACAO	9	MAXIMO RESIDUO	0.79	METROS
ITERACAO	10	MAXIMO RESIDUO	0.62	METROS
ITERACAO	11	MAXIMO RESIDUO	0.48	METROS
ITERACAO	12	MAXIMO RESIDUO	0.38	METROS
ITERACAO	13	MAXIMO RESIDUO	0.29	METROS
ITERACAO	14	MAXIMO RESIDUO	0.23	METROS
ITERACAO	15	MAXIMO RESIDUO	0.18	METROS

sulamec s.a.
informática e técnica

R E B A I X A M E N T O (M E T R O S)

PÇO	UNIDADES CUBICAS	VAZAO (L/SEG)	DEVIDO AO PROPRIO POCO		INTERFERENCIAS		TOTAL
			EM AQUIFERO INFINITO	EFEITO DOS LIMITES	EM AQUIFERO INFINITO	EFEITO DOS LIMITES	
P001	25.00	27.50	15.76	-0.25	53.22	-5.25	63.48
P101	40.00	44.00	25.21	-0.49	52.88	-5.47	72.14
P102	40.00	44.00	25.21	-0.60	55.47	-5.93	74.15
P 1	46.77	51.45	29.49	-0.37	46.05	-4.84	70.32
P 2	45.44	49.98	28.64	-0.50	47.78	-5.29	73.63
P 4	38.35	42.19	24.17	-0.56	53.03	-5.89	70.75
P 5	26.42	29.06	16.65	-0.42	56.38	-6.31	66.30
P 6	27.19	29.90	17.14	-0.45	57.09	-6.42	67.36
P501	25.60	28.16	16.14	-0.47	50.00	-6.90	58.76
P502	40.01	44.02	25.22	-0.84	40.57	-7.23	57.72
P503	16.35	18.00	10.31	-0.27	54.37	-6.62	57.80
P504	21.73	23.96	13.73	-0.42	51.02	-7.17	57.16
P505	19.16	21.08	12.08	-0.33	56.74	-6.70	61.78
P506	20.53	22.58	12.94	-0.41	48.24	-7.35	53.42

sulamec s.a. informática e tecn

PUNTO	REBAI-	PERDAS	COTA	RECALQUE	PERDAS	A.M.T.	CORRECCOES			B O M B A		ENERGIA ANUAL		
	XAMENTO	FICJ	NIVEL DINAMICO	TOTAL	TOTAIS		PRJ- SECAD JETO CAP- BASE TACAO	SECAD REVES- TIDA	CAMARA BOMBFA- MENTO	PRJ- CORRE- JETO CAO	POTENCIA COLUNA			
	(M)	(MCA)	(M)	(M)	(MCA)	(MCA)	(M)	(M)	(M)	(CV)	(MWH)			
P001	63.48	1.79	161.23	63.77	1.74	64.22	5	0.	0.	0.	2	15	32.03	55.20
P101	72.14	2.01	150.35	71.65	3.18	72.81	2	0.	-19.	4.	2	18	58.10	100.14
P102	74.15	2.01	148.83	66.17	3.18	67.33	2	0.	-16.	-2.	2	16	53.72	92.60
P 1	70.32	2.75	162.73	60.18	4.34	61.77	2	0.	-33.	-8.	2	14	57.62	99.33
P 2	70.63	2.60	162.77	65.17	4.10	66.67	2	0.	-30.	-8.	2	14	60.43	104.16
P 4	70.75	1.35	158.40	70.13	2.92	71.20	2	0.	-19.	-8.	2	14	54.47	93.89
P 5	66.00	1.38	161.12	65.08	1.38	65.58	2	0.	-12.	-8.	2	14	34.56	59.57
P 6	67.36	1.73	156.71	65.08	1.47	65.61	2	0.	-6.	-8.	2	14	35.58	61.33
P501	58.76	1.79	156.54	60.07	0.98	60.25	3	0.	25.	-8.	3	6	31.07	53.56
P502	57.72	1.73	150.65	60.13	2.39	60.58	3	0.	32.	-8.	3	6	48.93	84.17
P503	57.80	1.34	160.97	60.03	0.53	60.23	2	0.	13.	-8.	2	14	19.65	33.88
P504	57.16	1.60	160.45	60.05	0.94	60.40	2	0.	19.	-8.	2	14	26.24	45.23
P505	61.78	1.46	159.96	60.04	0.73	60.31	2	0.	5.	-8.	2	14	23.05	39.74
P506	53.42	1.53	158.95	60.05	0.84	60.35	2	0.	33.	-8.	2	14	24.71	42.60

TOTAL UNIDADES SERVIDAS 432.61
 TOTAL VOLUME BOMBEADO ANUAL 5.4571 HM3
 TOTAL ENERGIA ANUAL 965.40 MWH
 TOTAL POTENCIA INSTALADA 433.89 KW

CUSTOS TOTAIS (CRS * 1000)

CUSTOS POR UNIDADE (CRS)

POCO INVEST. INICIAL ATUALIZADOS INICIO
 POCO BOMBA TOTAL POCO BOMBA ENERGIA TOTAL

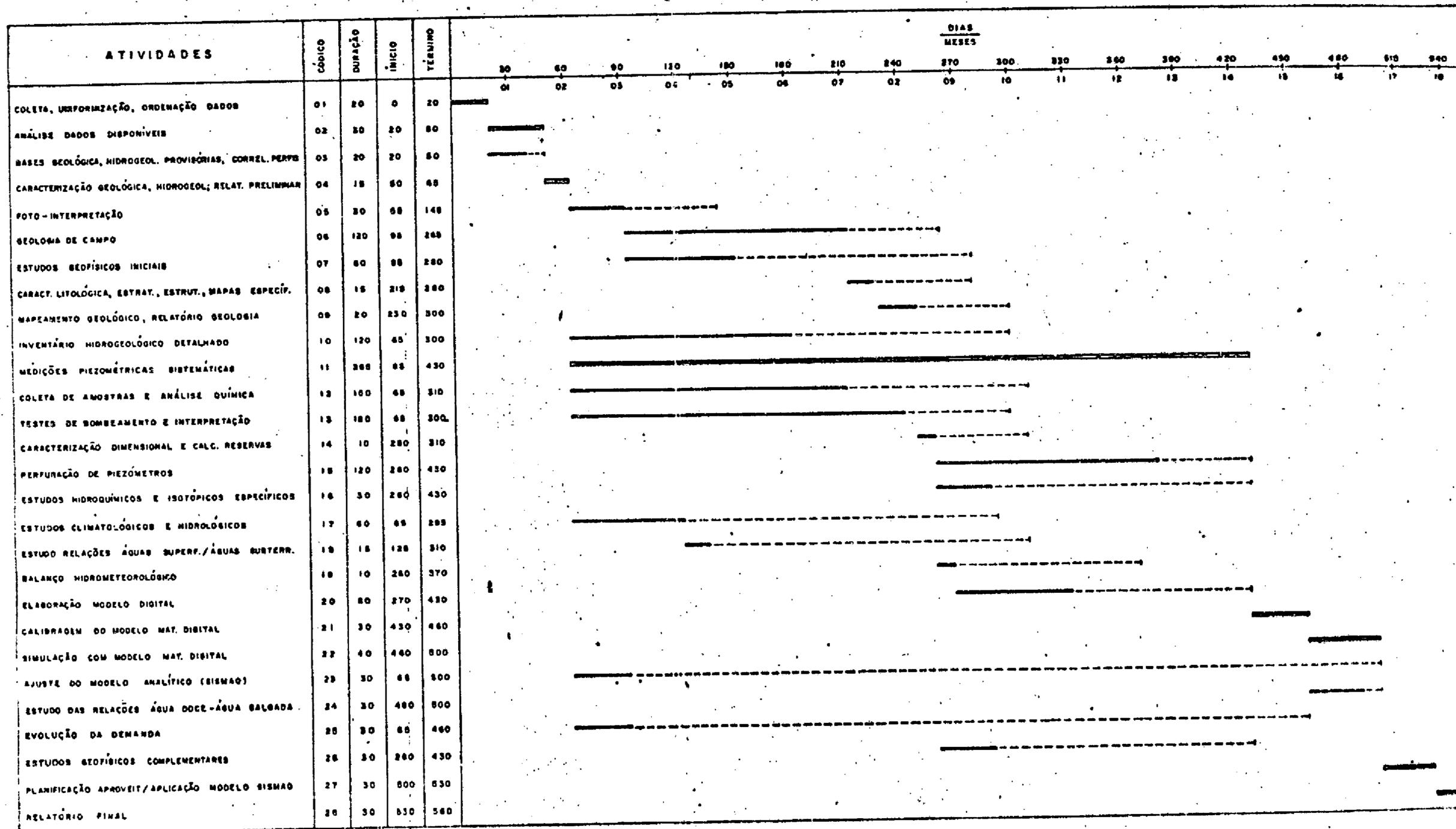
INVEST. INICIAL ATUALIZADOS INICIO CUSTO DO M3 (CRS)
 POCO BOMBA TOTAL POCO BOMBA ENERGIA TOTAL

P001	315.	315.	502.	68.	570.	0.	12589.	12589.	0.	20075.	2731.	22806.	0.1147		
P101	613.	375.	993.	762.	598.	124.	1484.	15454.	9378.	24832.	19055.	14954.	3096.	37106.	0.1866
P102	603.	350.	954.	744.	559.	115.	1417.	15082.	8762.	23844.	18596.	13971.	2863.	35431.	0.1782
P 1	552.	336.	888.	681.	535.	123.	1339.	11807.	7179.	18985.	14558.	11447.	2627.	28632.	0.1440
P 2	558.	339.	897.	688.	541.	129.	1357.	12273.	7463.	19736.	15132.	11901.	2835.	29869.	0.1502
P 4	578.	332.	910.	712.	529.	116.	1358.	15059.	8655.	23714.	18567.	13802.	3028.	35397.	0.1780
P 5	500.	313.	808.	728.	491.	74.	1293.	22341.	11661.	34002.	27546.	18595.	2789.	48930.	0.2461
P 6	601.	309.	910.	741.	493.	76.	1310.	22109.	11377.	33486.	27260.	18142.	2790.	48192.	0.2424
P501	678.	373.	1058.	837.	605.	66.	1508.	26501.	14816.	41318.	32676.	23626.	2587.	58890.	0.2962
P502	691.	416.	1097.	852.	647.	104.	1604.	17272.	10145.	27417.	21296.	16177.	2602.	40075.	0.2016
P503	635.	290.	926.	783.	463.	42.	1288.	38839.	17737.	56576.	47889.	28283.	2561.	78733.	0.3960
P504	646.	298.	944.	797.	475.	56.	1328.	29674.	13686.	43360.	36588.	21824.	2568.	60981.	0.3067
P505	621.	294.	915.	766.	469.	49.	1284.	32405.	15356.	47761.	39955.	24487.	2565.	67007.	0.3370
P506	672.	296.	968.	828.	472.	53.	1353.	32718.	14432.	47151.	40342.	23014.	2567.	65922.	0.3316

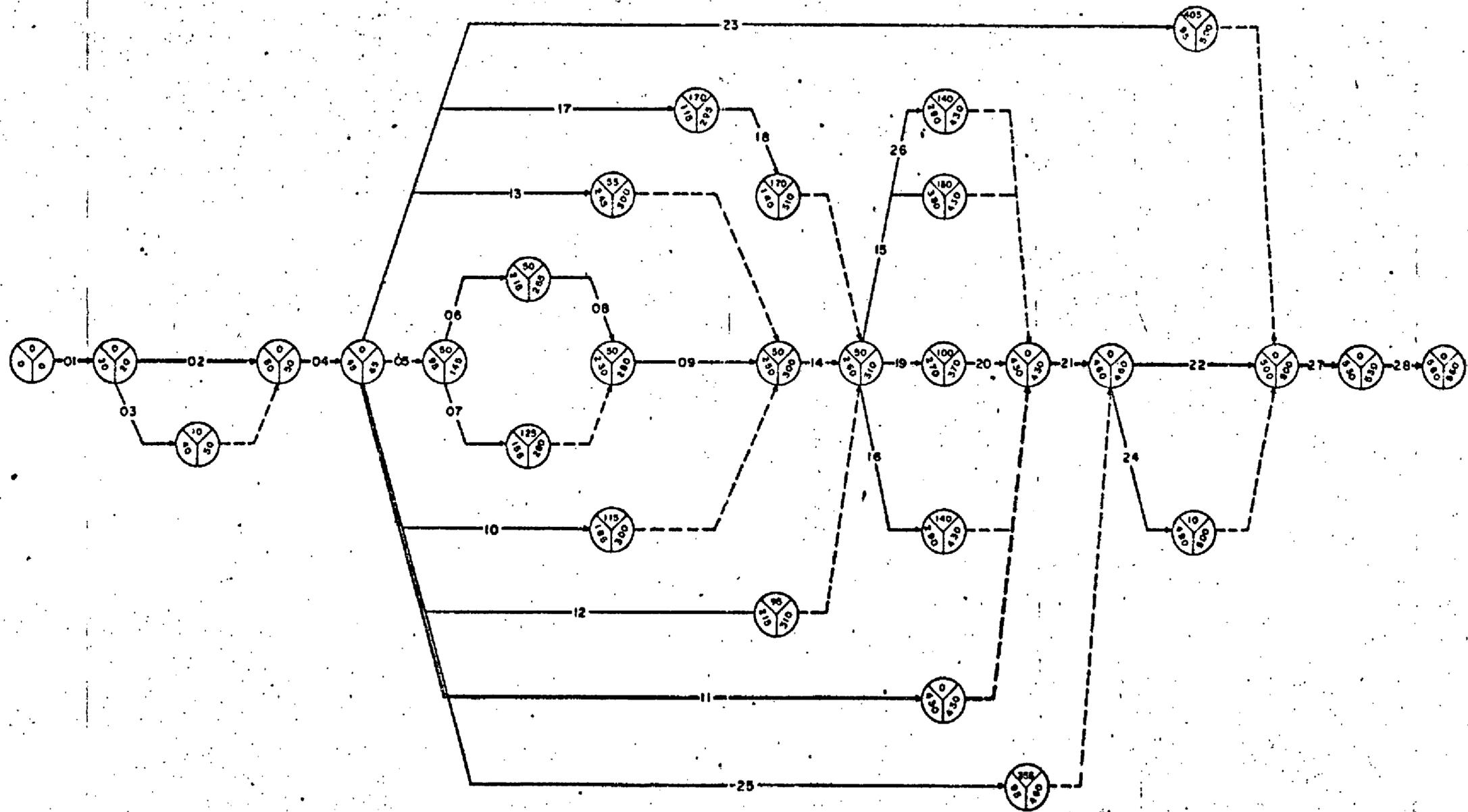
PROJETO 8064. 4529. 12672. 9918. 7381. 1194. 18493. 18594. 10699. 29293. 22927. 17061. 2760. 42747. 0.2150

3.0 - CRONOGRAMAS PERT E GANTT

CRONOGRAMA GANTT



REDE PERT



CRONOGRAMA DE PESSOAL

FUNÇÃO	TEMPO EM MESES																		
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
HIDROGEOL. CHEFE PROJ. (NÍVEL 80)	—————																		
GEÓLOGO (NÍVEL 75)	—————																		
HIDROGEÓLOGO MÉDIO (NÍVEL 70)	—————																		
HIDRÓLOGO (NÍVEL 78)	—————								—————										
ECONOMISTA (NÍVEL 78)											—————								
GEOFÍSICO (NÍVEL 78)	—————								—————										
CONSULTOR (MODELOS)	—————												—————			—————			
CONSULTOR (INTRUSÃO MARINHA)	—————									—————						—————		—————	

4.0 - ESTIMATIVA ORÇAMENTÁRIA

4.0 - ESTIMATIVA ORÇAMENTÁRIA

A presente estimativa foi estabelecida considerando-se os níveis de Preços de março de 1977, devendo-se prever o reajuste dos valores envolvidos a partir de maio de 77 de acordo com os índices da Fundação Getúlio Vargas. Não foram orçados os custos relativos a perfuração dos piezômetros, sondagens elétricas e perfilagens que venham a ser necessários durante o desenvolvimento dos estudos, bem como os custos do conjunto moto-bomba para testes de aquífero, que deverá ser fornecido pela COMPESA.

I - PESSOAL

I.1 - Pessoal Técnico

- 01 Hidrogeólogo (nível 80)	
186 meses de salário (Cr\$ 20.607,00)...	Cr\$ 383.290,00
Encargos Sociais (06%).....	Cr\$ 220.974,00
40 diárias, Cat.C, Cond. 1 (Cr\$686,90)	
durante 12 meses.....	<u>Cr\$ 27.476,00</u>
Subtotal.....	Cr\$ 640.740,00
- 01 Hidrogeólogo (nível 70)	
18,6 meses de salário (Cr\$12.651,00)...	Cr\$ 235.308,00
Encargos Sociais (60%).....	Cr\$ 141.184,00
90 diárias, Cat.C, Cond.1(Cr\$ 421,70).	
durante 12 meses.....	<u>Cr\$ 37.953,00</u>
Subtotal.....	Cr\$ 414.445,00
- Geólogo (nível 75)	
6,3 meses de salário(Cr\$ 16.146,00)...	Cr\$ 101.719,00
Encargos Sociais (60%).....	Cr\$ 61.031,00
60 diárias, Cat.C, Cond.1(Cr\$ 538,20)	
durante seis meses.....	<u>Cr\$ 32.292,00</u>
Subtotal.....	Cr\$ 195.042,00

- 01 Hidrólogo (nível 78)		
3 meses de salário (Cr\$ 18.693,00).....	Cr\$	56.079,00
Encargos Sociais (60%).....	Cr\$	<u>33.647,00</u>
	Subtotal....	Cr\$ 89.726,00
- 01 Economista (nível 78)		
01 mês de salário (Cr\$ 18.693,00).....	Cr\$	18.693,00
Encargos Sociais (60%).....	Cr\$	<u>11.215,00</u>
	Sub total....	Cr\$ 29.908,00
- Geofísico (nível 80)		
3 meses de salário(Cr\$ 20.607,00).....	Cr\$	61.821,00
Encargos Sociais (60%).....	Cr\$	37.092,00
30 diárias, Cat.C, Cond.1(Cr\$ 686,90).		
durante 3 meses.....	Cr\$	<u>20.607,00</u>
	Subtotal....	Cr\$ 119.520,00

I.2 - Pessoal de Apoio

- Técnicos de nível médio (nível 47)		
18 meses de salário (Cr\$ 4.119,00).....	Cr\$	74.142,00
Encargos Sociais (60%).....	Cr\$	44.485,00
120 diárias, Cat. A, Cond.1(Cr\$137;30)		
durante 18 meses.....	Cr\$	<u>16.476,00</u>
	Subtotal....	Cr\$ 135.103,00
- 01 Desenhista (nível 47)		
06 meses de salário(Cr\$4.119,00).....	Cr\$	24.714,00
Encargos Sociais (60%).....	Cr\$	<u>14.828,00</u>
	Subtotal....	Cr\$ 39.542,00
- 01 Datilógrafo (nível 35)		
4 meses de salário (Cr\$ 2.295,00).....	Cr\$	9.180,00
Encargos Sociais.(60%).....	Cr\$	<u>5.508,00</u>
	Subtotal....	Cr\$ 14.688,00
- Motoristas (nível 35)		
24 meses de salário(Cr\$ 2.295,00).....	Cr\$	55.080,00

Encargos sociais (60%).....	Cr\$ 33.048,00
120 diárias, Cat. A, Cond 1(Cr\$110,00) durante 18 meses.....	Cr\$ 13.200,00
Subtotal...	Cr\$ 101.328,00
Total I...	Cr\$1.780.042,00

II- MATERIAIS

Materiais de consumo.....	Cr\$ 90.000,00
Materiais e equipamentos de escritório no valor de Cr\$ 20.000,00, depreciação de 1,66% ao mês, durante 18 meses.....	Cr\$ 5.976,00
Combustível e lubrificantes.....	Cr\$ 60.000,00
Materiais diversos.....	Cr\$ 10.000,00
Fotografias aéreas, mapas topográficos.....	Cr\$ 5.000,00
Subtotal..	Cr\$ 170.976,00

III- SERVIÇOS

Serviços gráficos.....	Cr\$ 54.000,00
Passagens aéreas.....	Cr\$ 84.000,00
Outros Serviços.....	Cr\$ 36.000,00
Subtotal....	Cr\$ 174.000,00

IV- ENCARGOS (10%).....Cr\$ 17.400,00

V - DESPESAS APROPRIADAS

V.1 - Veículos

- 02 viaturas Brasília, no valor de ...
Cr\$ 100.000,00, depreciação 2,7% ao mês
durante 22 meses.....Cr\$ 60.940,00
- Caminhão Chevrolet, para transporte
do conjunto moto-bomba, no valor de
Cr\$ 150.000,00, depreciação de 2,77%
ao mês, durante 6 meses.....Cr\$ 24.930,00

V.2 - Equipamentos diversos, no valor de Cr\$ 80.000,00, depreciação de 1,66% ao mês, durante 12 meses.....	Cr\$ 15.936,00
V.3 - Serviços de Computação.....	Cr\$ 200.000,00
Subtotal..	Cr\$ 301.806,00
Total dos Itens I,II,III,IV e V.....	Cr\$2.444.224,00
VI- DESPESAS EVENTUAIS (10%).....	Cr\$ 214.422,00
VII- CUSTO DIRETO.....	Cr\$2.688.646,00
VIII-CUSTO INDIRETO (40%).....	Cr\$1.075.458,00
IX - CUSTO EXECUÇÃO.....	Cr\$3.764.104,00
X - CONSULTORIA ESTRANGEIRA.....	Cr\$ 940.000,00
XI - TOTAL PARCIAL.....	Cr\$4.704.104,00
XII- TAXA ADMINISTRAÇÃO (20%).....	Cr\$ 940.820,00
XIII-CUSTO TOTAL.....	Cr\$5.644.224,00