

“SIMULAÇÃO DA ASCENSÃO DO NÍVEL DO FREÁTICO SOB EFEITO DE UMA RECARGA ARTIFICIAL PROVOCADA PELA IRRIGAÇÃO”

Waldir Duarte Costa

CODEVASF — PROTECS

ABSTRACT

In a area of 400,000 ha, located in the far MW of Bahia State, on calcereous rocks, a study has been made on the rising on the phreatic water level by an artificial recharging through irrigation, by simulation in a bidimensional mathematic model.

Besides geological mapping of the area, well drilling and tests have been made, with the purpose of characterizing the hydrodinamical parameters and the geometry of the aquifer, to be able to make the proposed simulation by FORTRAN IV programme.

As a result of the programmation, maps have been drawn on the water level rise with time, and through certain irrigation methods, of gravity and sprinkling.

2. APRESENTAÇÃO

No início da década de 60, a então Comissão do Vale do São Francisco contratou estudos para determinar as possibilidades de aproveitamento agrícola e hidroagrícola das bacias dos rios Verde e Jacaré. Como resultado desses estudos, foi selecionada uma área potencialmente irrigável, na parte inferior daquelas bacias.

Nesta área a PROTECS executou para a CODEVAS em 1978/89 os trabalhos de Reconhecimento de Solos e Classes de Terras para Irrigação, em 386.643 ha, no já denominado "Projeto Baixio de Irecê". Ao final, foi elaborado o mapa semidetalhado de solos na escala 1:25.000, segundo normas do SNLCS.

A partir dessas informações, técnicos da PROTECS E CODEVASF, selecionaram 252.390 ha de solos irrigáveis (classes 2 e 3), 58.725 ha a depender de estudos complementares (classe 5) e 77.527 ha de solos não irrigáveis (classe 6).

A definição dessa grande área irrigável implicava, entre tanto, no estudo da sua drenabilidade, pois além da topografia semi-plana, os solos apresentavam, em sua maior parte, profundidades entre 1,0 e 2,5m; assentos em rocha calcária muito pouco conhecida sob o aspecto de drenabilidade. Assim sendo, a água de irrigação que percolaria para as camadas inferiores poderia formar e/ou elevar rapidamente o lençol freático, com possibilidades inclusive de salinização.

A CODEVASF atenta a esse problema, contratou (através de concorrência) a PROTECS, o estudo das condições de drenabilidade subterrânea da área do Baixio de Irecê.

Sendo este um trabalho pioneiro, pelas dimensões da área a estudar, características dos solos, geologia e da topografia e sem estudo similar para servir de parâmetro, a metodologia proposta inicialmente sofreu modificações e ajustes, para atingir os objetivos propostos.

Os trabalhos foram desenvolvidos no período de 8 meses e constaram de 3 fases: trabalhos preliminares, trabalhos de campo e laboratório e trabalhos complementares (interpretativos).

3. INTRODUÇÃO

3.1. OBJETIVO DA PESQUISA

A pesquisa levada a efeito, objetivou avaliar as condições de drenabilidade natural do aquífero, face às novas condições de excessiva infiltração de água, decorrente da irrigação a ser implantada na área.

Levando em consideração as condições físicas do aquífero e da zona de aeração, dever-se-ia avaliar se a percolação da água infiltrada poderia ser escoada na sub-superfície ou se, com o decorrer do tempo, não iria haver um levantamento dos níveis freáticos, até atingir a superfície do terreno.

No caso de ser configurada a segunda alternativa, deveria ser previsto o tempo em que chegaria em cada ponto da superfície, esse nível do freático e quais as medidas que se deveriam tomar a fim de ser procedida a drenagem superficial (ou sub-superficial rasa) dos excessos não drenados naturalmente pelo aquífero.

O produto final da pesquisa deveria pois, serem os mapas de ascensão de níveis d'água na superfície para determinados tempos considerados, no caso da não drenagem natural pelo aquífero. As medidas a serem tomadas para procedimento da drenagem artificial, seriam objeto de estudo por uma equipe especializada em drenagem.

3.2. A ÁREA ESTUDADA

A área estudada, denominada de "Baixio de Irecê", localiza-se no extremo noroeste do Estado da Bahia, em parte dos municípios de Xique-Xique e Sento Sé, estando compreendida entre as coordenadas geográficas $41^{\circ}50'$ a $42^{\circ}30'$ Long.W.Gr. e $10^{\circ}20'$ a $11^{\circ}00'$ de Lat.Sul. É representada por uma superfície suavemente ondulada, no baixo curso dos rios Verde e Jacaré, possuindo um total de aproximadamente 400.000 Ha

4. CARACTERÍSTICAS FISIOGRAFICAS

4.1. CLIMA

O clima é do tipo BSw'h' (classificação de Köppen), que se caracteriza por ser quente e semi-árido, tipo estepe, com temperatura do mês mais frio superior a 18°C, forte evaporação e temperaturas elevadas. A temperatura média anual na região é de 26°C enquanto a umidade relativa do ar varia em média anual entre 55 e 60% a evaporação anual é superior a 2.000mm, enquanto a evapotranspiração potencial foi calculada em 1.461 mm/ano. A precipitação pluviométrica média mensal (no posto de Xique-Xique) para um período que vai de 1917/1977, foi de 626 mm; o período mais chuvoso vai de novembro a março, com média mensal de 100 mm, enquanto a média total do período entre junho a setembro, chega apenas a 6,3mm.

4.2. RELEVO

A morfologia local é marcada por um amplo e extenso pediplano apresentando declividade tanto para norte quanto para leste, cujas cotas estão situadas entre 392m e 490m, caracterizando um relevo semi-plano a ondulado suave em mais de 90% da área; suas maiores altitudes ocorrem em sua porção mais ocidental, nas cercanias da Serra do Rumo, situada fora da área. Funcionando como "ilhas", ocorrem pequenos morrotes, bem representados pelos morros da Cutia e Formosa, relíquias de uma superfície pré-existente mais elevada.

4.3. VEGETAÇÃO

A vegetação é caracterizada pelo tipo caatinga densa, com árvores de tronco fino e alturas de até 10m. Na maior parte a vegetação é densa, de difícil acesso, com presença inclusive de matas de cipós, com abundância de jurema e favela e raras cactáceas.

5. GEOLOGIA DA ÁREA

5.1. LITOESTRATIGRAFIA

A sequência litoestratigráfica ocorrente na região apresenta uma grande lacuna das eras Paleozóica e Mesozóica, de vez que sobre o substrato Pré-Cambriano superior, se assentam sedimentos de idade Cenozóica.

Em termos superficiais, predominam extensivamente, os sedimentos cenozóicos, restringindo-se o Pré-Cambriano a superfícies limitadas, sob forma de "janelas" de erosão ou morros residuais em forma de "inselbergs".

5.1.1. Super-Grupo Espinhaço Superior - Grupo Chapada Diamantina

As rochas pertencentes a esta sequência litoestratigráfica, ocorrem de maneira muito restrita na área, relacionadas a pequenos morrotes interiores mais resistentes à erosão e às elevações que margeiam ao longo de seu limite ocidental.

No Morro da Cutia a nordeste da área, é representado por quartzitos a ortoquartzitos finos a médios, maciços e venulados, de coloração esbranquiçada, que são orientadas segundo WNW. Em suas exposições a oeste, há predominância de ortoquartzitos finos, maciços ou finamente laminados, de diagênese média a forte, apresentando plano-parallelismo, igualmente relacionado a bandas milimétricas sub-paralelas de óxido de ferro, de coloração variegada avermelhada a arroxeada. No extremo norte da Serra do Rumo foram observados conglomerados oligomíctos com seixos de quartzo e matriz quartzítica fina ferruginosa.

Estruturalmente, os mergulhos são sub-horizontais (29a39) para NW no Morro da Cutia, e para NE na Serra do Rumo, que apresenta, em aero-foto, marcante lineação NNE-SSW. Estas feições estruturais concordam com os "trends" regionais. Há também evidências de falha de gravidade no Morro da Cutia.

Considerando-se as feições supra-citadas, estas litologias correlacionam-se com a Formação Morro do Chapéu, face as similaridades litológicas e estruturais com as rochas dos blocos do Morro do Chapéu (Serra da Babilônia) e do Mimoso (Serra de São Maurício).

5.1.2. Super-Grupo São Francisco - Formação Salitre e Litofácies

O Grupo Una é dividido em duas formações: SALITRE (Braner, 1911) no topo, subdividida em quatro membros (Bs_4 , Bs_3 , Bs_2 , Bs_1) e BEBEDOURO (Oliveira & Leonardos, 1940) na base.

Na área em estudo foram distinguidas litologias aproximadamente correspondentes aos membros acima citados, descritos por Misi, onde anteriormente, devido as escalas de âmbito regional utilizadas em mapeamentos, reconhecia-se apenas o Grupo Una não dividido (Bs).

Estas unidades, consideradas litofácies no presente mapeamento, gradam lateralmente entre si, sendo lenticulares, principalmente Bs_2 e Bs_3 onde, a partir de perfis de sondagens, observa-se seu predomínio. A litofácies Bs_4 , predominante em superfície é constituída por calcário maciço, por vezes laminado, microcristalino, recristalizado, fracamente odoroso em fratura fresca, cinza-escuro, recortado por vênulos irregulares de calcita neo-formada hialina e marron-amarelada.. A litofácies Bs_3 é constituída de metassiltitos, por vezes micáceo (muscovita) de coloração róseo-escuro, cortados por delgadas vênulas de calcita recristalizada e quartzo com intercalações de calcários cinza e ardósias finamente laminados, exibindo estratificação com mergulhos fortes. A litofácies Bs_2 é representada na área por calcários dolomitizados cinza claro, com níveis de sílex e quartzo.

5.1.3. Depósitos Cenozóicos

5.1.3.1. Formação Caatinga

Designada como "Calcário Caatinga", esta formação foi pri

meiramente descrita por Branner(1911) que assim chamou os sedimentos calcíferos ocorrentes no vale do rio Salitre e considerou-os como resultado de alteração dos calcários da "Formação Salitre", datando-os como do Mioceno na base e Recente no topo.

A base da Formação Caatinga apresenta-se brechóide a conglomerática (litofácies Riacho do Tourão - Leal,1971) oligomicta a polimicta, dependendo da fonte fornecedora do material. O nível superior apresenta uma textura maciça ou fragmentária, de coloração esbranquiçada por vezes amarelada, com os fragmentos calcíferos de cor branca a creme, centimétricos; a tonalidade, às vezes escura, deve-se à intensa pigmentação em manganês.

A rocha apresenta como característica marcante uma intensa erosão cárstica alveolar ou lapiás, além de sumidouros, cavernas e dolinas. São distribuídas em cerca de 20% da área (em superfície) mapeada, ocupando os baixios topográficos e/ou estruturais, principalmente as superfícies de inundação dos rios.

5.1.3.2. Coberturas diversas

Foram distinguidas e mapeadas três tipos de coberturas, em função da origem e constituição:

- a) coberturas colúvio-eluvionares arenosas
- b) coberturas aluvionares argilosas
- c) coberturas elúvio-coluvionares silte-arenosas e areno argilosas

As primeiras correspondem a depósitos arenosos predominantemente coluvionares, relacionados a desagregação das rochas existentes nas elevações circundantes e dos morrotes quartzíticos da área, sendo constituídas por areias predominantemente média com bom grau de selecionamento, bastante lixiviadas, com eventuais faixas finas e com cores claras, predominantemente amareladas.

As segundas dizem respeito às alterações "in situ" dos calcários tanto da Formação Caatinga, como, eventualmente, da Formação Salitre, ocorrendo como espesso manto argiloso a argilo-siltoso de coloração amarronzada a avermelhada, contendo ainda concreções ferro-manganíferas relacionadas ao movimento vertical de hidró

dos.

Finalmente o terceiro tipo, que cobre cerca de 35% da área mapeada, trata-se de uma cobertura bastante homogênea de granulação fina (areia, silte e argila), amarelada a alaranjada, associadas a areiais com concreções ferríferas a ferro-manganíferas de formação supergênica (petrocanga) de coloração preta a amarronzada.

5.1.3.3. Aluviões

Ocorrem sem grande possança, merecendo registro os depósitos ao longo dos rios Verde e Jacaré e dos riachos do Ferreira, dos Bois, Vereda das Lajes e Vereda das Duas Barras. Apresentam-se argilosos a arenosos de grã predominantemente média, dominando os tons cinza-esbranquiçados e avermelhados; são sedimentos inconsolidados ou apresentando grau de diagênese muito fraco.

5.2. COMPORTAMENTO ESTRUTURAL

5.2.1. Dobramentos

O Grupo Chapada Diamantina, em sua exposição no limite oeste da superfície mapeada, apresenta deformação E-W gerando alinhamentos N-S a NNE-SSW, segundo anticlinais e sinclinais regionais de grande comprimento de onda.

A Formação Salitre, de gênese relacionada a invasão por um mar epicontinental dos baixos estruturais (sinclinais, grabens, blocos basculados, etc) e topográficos do Super-Grupo Espinhaço, teve suas estruturas deformacionais condicionadas a uma compressão centrípeta, em relação ao Cráton de São Francisco. Esse empuxo dobrou-a na direção E-W a ENE-WSW, direção essa observada ao longo do "baixio" e de suas laterais. À medida que se afasta desse eixo, encontram-se dobras N-S a NW-SE com "plunges" para NW, reflexo das estruturas do embasamento Espinhaço. Quanto à Formação Caatinga, de forte diagênese, não foi afetada por dobramentos holomórficos por ser de idade em que o Cráton vivenciava o caráter ortoplateformal.

5.2.2. Deformação Ruptural

Os estereogramas e rosáceas elaborados para as fraturas medidas nas formações Caatinga e Salitre, mostram bem definidas, principalmente nesta última, orientações preferenciais segundo os planos bc e ac, reflexo das orientações de fraturas originadas de esforços tracionais, relacionados com dobramentos.

Embora não tenha sido elaborado o diagrama de fraturas para as rochas do Grupo Chapada Diamantina, em razão dos poucos afloramentos existentes, tem-se como direções preferenciais N 20°E e N 80°-85° W, que são, provavelmente, do tipo bc nessas litologias. A primeira corresponde a afloramentos da Serra do Rumo e a segunda aos morrotes a NE da área.

O comportamento estrutural da Formação Salitre pode ser facilmente observado no estereograma e rosácea de suas fraturas. A compressão N-S por ela sofrida, dobrou-a E-W e, conseqüentemente, cisalhou-a NW e NE, sendo a direção NW a mais desenvolvida. Há também concentrações de fraturas de tração dos tipos ac (segundo N-S) e bc (segundo E-W).

A Formação Caatinga teve seu quadro tectônico estrutural do a partir de empuxos verticais, acompanhando a epirogênese, que também favoreceu o encaixe da rede de drenagem (fenômeno de sobreimposição), ou seja, uma tectônica induzida a partir do quebramento pré-existente em seu substrato. As principais direções de fratura são NNW e WNW, provavelmente de descompressão durante a epirogênese.

Devem ser destacadas ainda, as fraturas de alívio de pressão - "sheet structure" - que se desenvolvem paralelamente à superfície topográfica e, por coincidirem em grande parte com planos de estratificação, oferecem boas condições para desenvolvimento de sumidouros, cavernas e outras formas de dissolução cárstica.

Algumas falhas são detectadas, provavelmente, reflexo de outras antigas, direcionais, reativadas na vertical. As falhas de gravidade mais destacadas na área são as do Morro da Cutia com direção S65°W e a do Morro da Formosa, constituindo um "horst" de direção N 75° W.

5.2.3. Relação das Estruturas com a Hidrogeologia

A simples observação dos cursos dos rios Verde e Jacaré, assim como do riacho Vereda das Lajes, permite constatar a rettilinidade de alguns trechos, que coincidem com direções de fraturamento mais destacados do maciço rochoso, principalmente aquelas de WNW-ESE e NNW-SSE; também ocorrem alguns trechos de direção NE-SW a NNE-SSW.

Os trechos de drenagem superficial que coincidem com fraturas, sobretudo no calcário da Formação Salitre, constituem excelentes áreas de recarga para os reservatórios subterrâneos.

O tipo de fraturamento que ocorre no maciço rochoso condiciona diretamente a relação K_v/K_h (permeabilidade vertical/permeabilidade horizontal). Na Formação Caatinga, desenvolvem-se predominantemente as fraturas de alívio de pressão ao longo dos planos de estratificação, que por serem semi-horizontais, concordam na maior parte, com a superfície topográfica; nesse caso, tem-se que a relação acima, será $K_v/K_h < 1$.

No complexo Una/Bambui, predominam as fraturas sub-verticais, em direções variadas como foi visto no ítem anterior, o que propicia condições de percolação vertical mais favoráveis do que na horizontal; nesse caso, a relação torna-se $K_v/K_h > 1$.

Nos meios anisotrópicos, predomina na maioria dos casos a relação $K_v/K_h < 1$, constituindo-se os eventos em que essa relação é maior do que 1, em casos particulares, mais adequados para os meios fraturados em geral.

Quanto ao relacionamento entre os dobramentos e respectivas formas de estruturas dobradas e a hidrogeologia, não foi constatada na área, qualquer afinidade. Conforme já citado, a Formação Caatinga, que predomina superficialmente, não foi afetada pelos dobramentos e assim, não transmitiu para a drenagem subterrânea essa influência.

Apenas as estruturas atectônicas, provocadas pela dissolução cárstica, principalmente os smidouros e dolinas, vêm a representar papel significativo para a hidrogeologia, tendo em vista a permeabilidade diferencial propiciada por essas formas de dissolução.

6. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

6.1. UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

Duas são as principais unidades hidrogeológicas existentes na região, ambas de constituição calcífera: a Formação Caatinga de idade cenozóica e o Grupo Una (correlato do Bambuí), de idade Pré-Cambriana.

A Formação Caatinga depositou-se sub-horizontalmente sobre a superfície ondulada e erodida do Grupo Una/Bambuí, de maneira discordante. As características geológicas e estruturais dessas duas formações são bem distintas, conforme já explanado. Na primeira, em função das estruturas de alívio de pressão que favorecem a formação de sumidouros, ocorre maior fluxo horizontal. A erosão desenvolvida nesses calcários vai se dissipando a medida que aumenta a profundidade, pois o CO_2 livre contido na água (sobretudo das precipitações pluviométricas) vai se dissipando a medida em que a água vai se enriquecendo de CO_3 do calcário dissolvido.

Apesar da diversificação nas características hidrogeológicas, sobretudo de condutividade hidráulica, não se pode a rigor, estabelecer dois aquíferos independentes para a região. Não parece existir, pelo menos a nível regional, uma separação através de um "horizonte impermeável" entre os aquíferos Caatinga e Una/Bambuí, tudo indicando haver uma franca intercomunicação entre as duas unidades estratigráficas que constituem uma única unidade hidrogeológica que será denominada de "sistema aquífero Caatinga/Bambuí".

6.2. ALIMENTAÇÃO, ESCOAMENTO E EXUTÓRIOS

O sistema aquífero Caatinga/Bambuí é caracterizado por ser um meio descontínuo, heterogêneo e anisótropo em grande escala, à nível de afloramento; analisando todavia à nível regional, o sistema pode ser considerado como homogêneo e anisótropo, devido a intensidade de fraturamento e fenômenos de carstificação presentes.

A alimentação do sistema aquífero é realizada quase que unicamente através da infiltração direta das águas de chuvas.

A taxa de infiltração não pôde ser determinada através de observações diretas, devido a ausência de infiltrômetros instalados na região. Entretanto, esse valor foi calculado a partir das observações da flutuação dos níveis d'água dentro dos poços, o que permitiu a avaliação da vazão de escoamento natural do aquífero - VEN, que será utilizado para o cálculo dos recursos renováveis. A fórmula utilizada para o cálculo da infiltração foi:

$$I = \frac{\Delta s.S.100}{P}$$

em que:

I - infiltração (em %)

Δs - variação sazonal dos níveis de água subterrânea (em m)

S - coeficiente de armazenamento (ou de restituição)

P - precipitação média anual (= 620 mm)

Para uma variação sazonal do nível d'água subterrânea em torno de 1,8m e o coeficiente de armazenamento variando entre 0,03 e 0,05, pode-se admitir com uma boa aproximação, o valor da infiltração como 10% .

A contribuição advinda da drenagem superficial para o sistema aquífero é pequena e até inexistente em alguns locais, pois o maior contribuinte que seria o Rio Verde, possui parte do seu curso com regime efluente e a parte influente (porção média setentrional da área) não representa uma efetiva contribuição, visto estarem os poços localizados nas suas proximidades com níveis de 30m abaixo do nível do rio; esses níveis apresentam oscilações de até 25m no período invernososo o que atesta a contribuição das águas pluviais.

O Escoamento das águas subterrâneas tem o sentido geral de sul para norte como indicam as setas de fluxo do mapa piezométrico. O referido mapa revela situações de fluxo radial centrípeto bem característico de regiões ricas em sumidouros, como nas regiões de Formosa ao norte e Lajes-Guaxinim ao sudeste.

A vazão de escoamento natural do sistema aquífero, foi avaliada para a área total, tendo em vista as particularidades e anomalias que caracterizam a região, tendo sido calculada através da expressão seguinte:

$$VEN = Q = \Delta s \cdot A \cdot S$$

Utilizando os seguintes valores médios:

$$\Delta s = 1,6 \text{ m}$$

$$A = 4.10^9 \text{ m}^2$$

$$S = 4.10^{-2}$$

Foi encontrado o valor do VEN como sendo de 256 milhões de m³/ano, correspondendo a uma lâmina d'água de 64 mm/ano, ou seja, 0,71 mm/dia, considerando a precipitação concentrada em 3 meses do ano.

Como exutórios artificiais, devem ser considerados os poços da região, que exploram atualmente cerca de 320 mil m³/ano, correspondendo pois a apenas 0,12% da vazão de escoamento natural.

6.3. PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS DO SISTEMA AQUÍFERO

Considerando que as rochas calcárias representadas pelas formações Caatinga e Una/Bambui representam um aquífero cárstico-fissural, onde toda a permeabilidade e capacidade de armazenamento estão condicionados à presença de fraturas e/ou formas de dissolução, deverá ser considerado um limite de profundidade a partir do qual as condições supra-citadas não mais existam.

A experiência a partir da perfuração de poços para exploração do aquífero, bem como as sondagens de estudo da barragem de Sobradinho, tem mostrado que, entre 80 e 100m de profundidade, as condições hidrogeológicas são muito precárias, tendo em vista a pouca abertura das fraturas e quase total ausência de carstificação. Considerou-se então, como profundidade média, os 100m a partir da superfície.

Assim, o volume de rocha, incluindo a zona de decomposição e coberturas de naturezas variadas, abstraindo as variações de relevo, alcançaria o total aproximado de:

$$V_t = 4.10^9 \text{ m}^2 \times 100\text{m} = 4.10^{11} \text{ m}^3 \quad (\text{quatrocentos bilhões de metros cúbicos})$$

Os parâmetros hidrodinâmicos mais representativos do sistema

tema aquífero são: coeficiente de permeabilidade, coeficiente de transmissividade e coeficiente de armazenamento (ou restituição para aquíferos livres).

O cálculo do coeficiente de permeabilidade foi efetuado a partir de métodos diretos e indiretos. Os primeiros foram resultados de ensaios realizados em sondagens e compreenderam dois métodos distintos: infiltração e perda d'água. Quanto ao método indireto, foi realizada a interpretação de ensaios de bombeamento executados em poços tubulares da região, por ocasião da perfuração; a partir das curvas de rebaixamento e recuperação, foram calculados os coeficientes de transmissividade e dividindo esses valores pelas respectivas espessuras, encontrou-se as permeabilidades.

A profundidade média desses poços (em número de 25) chegou a cerca de 80m, com 20m de profundidade (média) de Nível Estático, o que representa uma espessura média saturada da ordem de 60m.

O coeficiente de transmissividade apresentou uma variação entre $2,2 \cdot 10^{-3}$ a $9,3 \cdot 10^{-6}$ m²/s com média de $3,96 \cdot 10^{-4}$ m²/s (34,21 m²/dia); enquanto isso, a permeabilidade variou desde $5,3 \cdot 10^{-5}$ até $1,5 \cdot 10^{-7}$ m/s, com uma média de $8,34 \cdot 10^{-6}$ m/s (0,72 m/dia).

Os resultados de K (coeficiente de permeabilidade) obtidos através dos vários métodos foram agrupados para cada uma das 5 (cinco) áreas em que foi dividida a região em estudo, sendo a variação entre as mesmas áreas, de $1,1 \cdot 10^{-5}$ a $1,8 \cdot 10^{-5}$ m/s, com uma média de $1,5 \cdot 10^{-5}$ m/s, ou 1,29 m/dia. Igualmente a transmissividade acusou uma variação nas cinco áreas, entre $6,6 \cdot 10^{-4}$ a $1,1 \cdot 10^{-3}$ m²/s, com uma média de $8,6 \cdot 10^{-4}$ m²/s, ou 74,30 m²/dia.

Não foram determinados na área, valores de coeficiente de armazenamento (ou restituição), devido a inexistência de poços piezômetros no raio de influência dos poços bombeados. Durante a fase de modelização do aquífero, várias tentativas foram executadas, testando-se os valores de infiltração de águas de precipitações pluviométricas e os valores correspondentes à flutuação dos níveis d'água, concluindo-se que o valor de S mais coerente, seria de 0,05; deve-se ressaltar que, no Inventário Hidrogeológico Básico do Nordeste, da SUDENE, havia sido admitido uma variação de S, entre 0,01 e 0,05, nos estudos realizados na área de Irecê-BA.

6.4. RESERVAS

6.4.1. Reservas Permanentes

Conhecida a superfície da zona de saturação e os limites da área, e avaliada a profundidade média de porosidade (fissural), foi facilmente avaliado o volume do maciço rochoso passível de armazenar água na área, como sendo da ordem de 4.10^{11} m^3 . Considerando a porosidade eficaz de 5% (ou 0,05), o volume de água armazenada nesse pacote de maciço rochoso, com uma espessura média saturada de 80m, será pois:

$$V_p = 4.10^{11} \times 0,05 \times 0,80$$

$$V_p = 16.10^9 \text{ m}^3 \quad (\text{dezesseis bilhões de metros cúbicos})$$

6.4.2. Reservas Renováveis

Anualmente o nível das águas sobe e desce no poço em função da infiltração das águas das chuvas (subida) e vazão de escoamento natural do aquífero ou VEN (descida).

Os recursos anualmente renováveis correspondem pois à vazão de escoamento natural - VEN - já calculado, cujo valor foi da ordem de 250 milhões de metros cúbicos ao ano.

Considerando a imprecisão do método utilizado, devido ao desconhecimento com precisão do valor médio da variação dos níveis d'água (o período de observações não correspondeu a um ciclo hidrológico completo), convém aplicar um outro método de avaliação desses recursos, que é o método de G.N.Kamenski, através da simulação de condições de fluxo radial convergente (modelo tridimensional).

Utilizando o método de Kamenski, foi encontrado o valor de 224 milhões de metros cúbicos anuais, para as reservas renováveis da área. Considerando uma média entre os valores encontrados pelos dois diferentes métodos, chega-se a $240.10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$.

6.5. RECARGA ARTIFICIAL ATRAVÉS DA IRRIGAÇÃO

O excesso de água infiltrada através da irrigação, constituirá uma recarga artificial de grande eficiência devido ao seu caráter perene ao contrário das recargas naturais anuais, representadas pelas precipitações pluviométricas, que são intermitentes e concentradas em apenas dois a três meses do ano.

O problema fundamental é definir se o meio aquífero possui condições de drenabilidade natural, escoando subterraneamente, todo o volume da recarga artificial, infiltrada continuamente.

Caso não haja condições de percolação natural, ocorrerá a elevação do nível piezométrico e com a continuidade do processo, a tendência natural é chegar até a superfície, com graves problemas de encharcamento das culturas existentes.

Caso fosse o meio em estudo, homogêneo e isotrópico, seria mais fácil a previsão das condições de drenabilidade natural, de vez que o simples cálculo da velocidade real efetiva do meio aquífero, já poderia configurar as perspectivas de fluxo natural.

Nesse caso, o cálculo da velocidade real efetiva, seria representado pela expressão seguinte:

$$V_e = \frac{k \cdot i}{m_e}$$

sendo:

V_e - velocidade real efetiva do meio, em m/dia

k - permeabilidade do meio, em m/dia

i - gradiente hidráulico médio (adimensional)

m_e - porosidade efetiva (corresponde para aquífero confinado ao coeficiente de armazenamento)

Considerando os valores médios da área, vem:

$$k = 1,3 \text{ m/dia}$$

$$i = 0,05\% = 0,0005$$

$$m_e = 5\% = 0,05$$

Substituindo na equação, resulta:

$$V_e = 13 \text{ mm/dia}$$

O valor da lâmina d'água que deveria chegar ao aquífero, em função da irrigação por gravidade, segundo cálculos efetuados, seria de 2,1 mm/dia, considerando a eficiência do sistema. Consta-se assim, que a velocidade real efetiva média do meio aquífero é seis vezes maior do que a da chegada da lâmina d'água ao aquífero, o que, aparentemente, seria suficiente para produzir a drenagem natural do aquífero.

Entretanto, deve ser enfatizado, que as características hidrodinâmicas, sobretudo a permeabilidade, variam muito de um ponto a outro do aquífero, mesmo na zona de saturação, com valores extremos acusando uma variação de 350 vezes.

Além disso, vários outros fatores atuam no sentido de produzirem a elevação do nível, como sejam:

a) coeficientes de armazenamento e transmissividade - o coeficiente de armazenamento (ou de restituição, ou ainda porosidade eficaz) é o fator que exerce a maior influência dentre todos os que serão analisados; o coeficiente de transmissividade apesar de também acarretar uma variação inversa da elevação dos níveis, não guarda uma proporcionalidade acentuada, somente se fazendo sentir a sua variação para tempos muito prolongados;

b) gradiente hidráulico - as pequenas diferenças de carga hidráulica entre os pontos do meio aquífero, tenderão a acarretar reduzidos gradientes, dificultando ou retardando o escoamento natural do aquífero;

c) relevo - nas depressões topográficas ocorre uma maior aproximação dos níveis d'água da superfície do terreno;

d) proximidade de fronteiras permeáveis ou impermeáveis - no caso da presença de uma fronteira permeável (um rio influente) os níveis tenderão a subir mais rapidamente, ocorrendo o inverso nas cercanias de uma fronteira permeável representado por um rio efluente; na fronteira impermeável também haverá retardamento de escoamento com a conseqüente ascensão dos níveis;

Outros fatores também atuam, como a presença de horizontes aquíferos suspensos, a posição da área relativa ao início da recarga e a posição da área relativa ao exutório principal do aquífero.

7. SIMULAÇÃO DA ASCENSÃO DOS NÍVEIS DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

7.1. METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO

A fim de se poder definir o movimento da água no aquífero, necessário se faz:

- a) a descrição da sua geometria
- b) a descrição de determinadas propriedades físicas do meio em cada ponto do domínio, quais sejam: permeabilidade, transmissividade, coeficiente de armazenamento, etc.
- c) as leis que regem o movimento da água: Lei de Darcy, Teorema da Continuidade, etc.
- d) as condições no limite do sistema
- e) as condições no tempo $t = 0$
- f) a descrição das ações exteriores ao sistema

De posse desses elementos se aplica a equação diferencial parcial que descreve o movimento da água em um meio aquífero, no estado de não equilíbrio, heterogêneo e isotrópico, com fluxo tri-dimensional ou bi-dimensional (em função do modelo a utilizar).

7.2 O MODELO EMPREGADO

Foi utilizado para simular as condições de recarga do sistema aquífero Caatinga-Bambui na região de Baixio de Irecê, o modelo matemático de fluxo bi-dimensional, de autoria de T.A.Prickett e C.G.Lonnquist. Uma aproximação de diferenças finitas é usada para formular as equações de fluxo subterrâneo. Os programas incluídos são escritos em FORTRAN IV e serão operados em qualquer grupo consistente de unidades.

Algumas alterações foram introduzidas no programa, visando a transformação das unidades americanas ao sistema métrico, alterações de "format" e condições de entrada e saída, além de instruções visando a impressão de dados lidos nos cartões de nós.

7.3. PARÂMETROS UTILIZADOS. - CONDIÇÕES E ARTIFÍCIOS DE SIMULAÇÃO

Os parâmetros físicos de entrada no programa, são as transmissividades segundo duas direções perpendiculares entre si, no plano horizontal, o fator de armazenamento e as recargas artificiais ao aquífero, representadas pela irrigação.

Para simplificação do problema e por falta de elementos confiáveis, no que tange às influências externas, deixaram de ser consideradas as possíveis influências que poderiam vir a desempenhar como fronteiras impermeáveis, as descontinuidades laterais representadas pela discordância litológica e estrutural dos quartzitos pré-Bambuí, localizados nas serras que circundam a área, a leste e a oeste. Em compensação, não foram também consideradas as influências que poderiam ter, como fronteiras permeáveis, os cursos d'água superficiais que correm dentro da área.

Visando simular as condições de continuidade lateral do aquífero em todas as direções, foi definida uma malha quadrangular regular com área cinco vezes maior que a área estudada. A malha ficou constituída por 14 linhas segundo a direção norte-sul e 14 colunas segundo a direção leste-oeste, com afastamento entre duas linhas ou duas colunas sucessivas, de 10 Km; o total de nós da malha foi portanto de 196, dos quais apenas 40 ficaram dentro da área de estudo. Cada nó da malha abrange pois uma área de 100 Km^2 o que aparentemente é exageradamente grande; entretanto o dimensionamento do espaçamento da malha levou em consideração a heterogeneidade de dados apresentada na região, bem como a grande variação nos limites de valores dos ensaios de permeabilidade do meio aquífero.

Para cada nó da malha foram admitidos os seguintes critérios básicos de simulação:

1º) para os nós situados além do limite da área, foram considerados os valores médios de transmissividade (iguais nas duas direções) e do fator de armazenamento, com valores nulos de recarga (a recarga natural já é considerada no balanço);

2º) a transmissividade dentro da área segundo a direção N-S foi considerada cinco vezes maior que a transmissividade segundo a direção E-W;

3º) o fator de armazenamento é calculado multiplicando-se a área pelo coeficiente de armazenamento, que foi considerado constante e igual a 0,05

4º) para cálculo dos volumes de recarga em cada nó, foi discretizada a área em função do tipo de irrigação, do tipo de solo e de acidentes naturais, tais como a existência de rios, o contorno irregular do limite da área, etc. Foram consideradas como áreas não irrigáveis aquelas manchas de solos muito rasos e/ou pedregosos e ainda considerados para efeito de recarga do aquífero, os vertissolos como áreas de recarga nula.

7.4. ANÁLISE SOBRE A EVOLUÇÃO DOS NÍVEIS D'ÁGUA

7.4.1 Irrigação por gravidade

Considerando a lâmina d'água que chegará ao aquífero, de 2,1 mm/dia, o volume de água que penetrará em toda a área a ser irrigada, será de $0,0021 \text{ m} \times 2.387,5 \cdot 10^6 \text{ m}^2 = 5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, ou seja, cinco milhões de metros cúbicos por dia, ou $1,82 \cdot 10^9 \text{ m}^3/\text{ano}$.

Processados os dados no programa de computador conforme a metodologia convencional, resultaram várias tabelas de valores de níveis d'água para cada nó, dentro e fora da área, através do tempo (a partir de 20 dias, até 64 anos).

Foram então elaborados dois mapas, o primeiro mostrando a situação após 5 anos de implantação integral do projeto (note-se que a simulação foi efetuada admitindo toda a área irrigável sendo tratada simultaneamente) e outro após 10 anos. O mapa de profundidade dos níveis d'água subterrânea após 5 anos de irrigação por gravidade, revela que o problema irá se iniciar na área sudoeste, na região de Lajes-Guaxinim-Planaltina, onde os solos são muito permeáveis e a profundidade da água é muito rasa.

A partir daí o processo irá evoluir segundo a direção a proximada N-S e com 10 anos, caso não fosse a área drenada, haveria encharcamento total em quase 50% da região, englobando quase toda a área a oeste do Rio Verde.

7.4.2. Irrigação por Aspersão

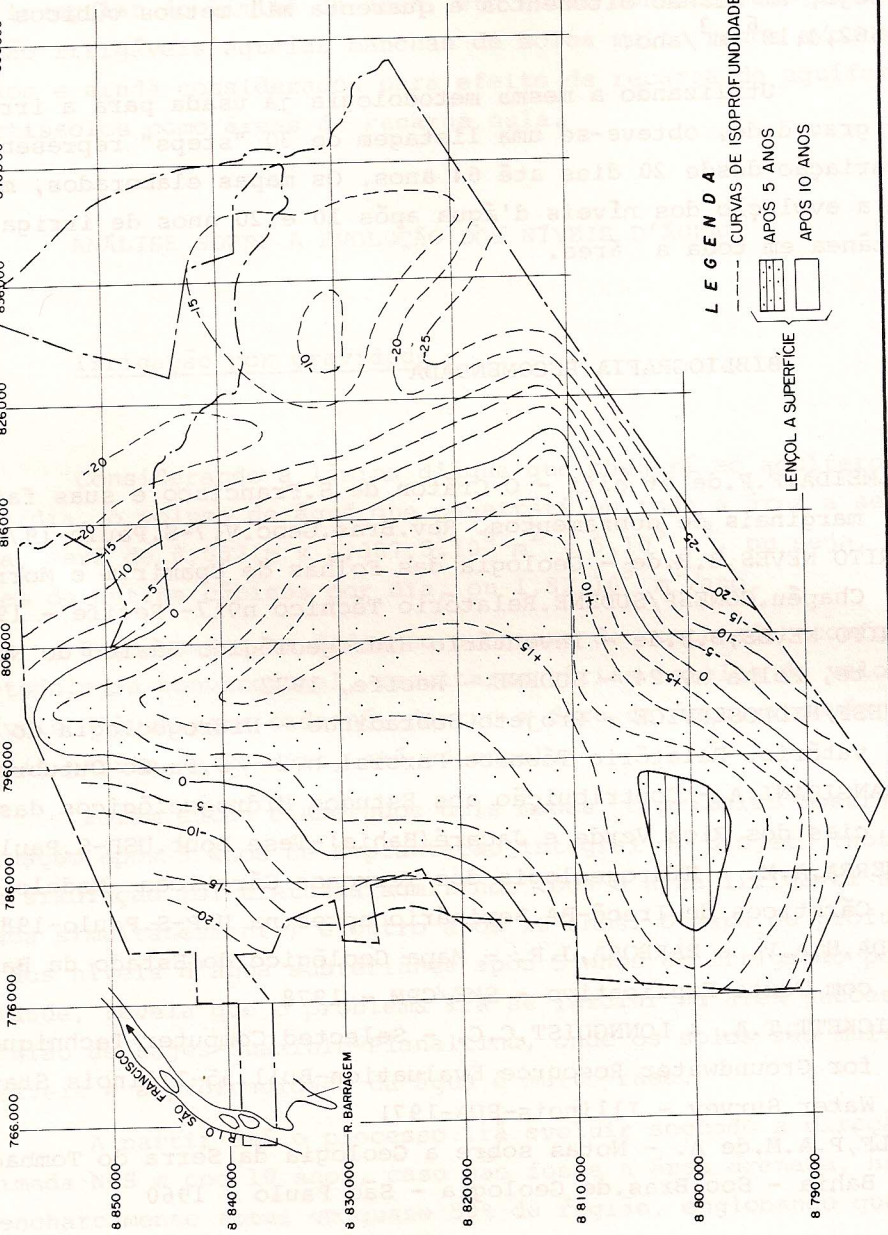
Tomando por base o valor da lâmina d'água que deverá chegar diariamente ao aquífero, calculado em 0,77mm, deverá se ter um volume de água infiltrada de $0,00077 \times 2.387,5.10^6 \text{ m}^2 = 1,84.10^6 \text{ m}^3$, ou seja, um milhão oitocentos e quarenta mil metros cúbicos por dia ou $662,4.10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$.

Utilizando a mesma metodologia já usada para a irrigação por gravidade, obteve-se uma listagem de 30 "steps" representando a variação desde 20 dias até 64 anos. Os mapas elaborados, mostraram a evolução dos níveis d'água após 10 e 20 anos de irrigação simultânea em toda a área.

8. BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

- ALMEIDA, F.F. de et alii - O Cráton de S. Francisco e suas faixas marginais de dobramentos. Rev. Bras. Geoc. V.7-S. Paulo-1976
- BRITO NEVES, B.B. de - Geologia das Folhas de Upimirim e Morro do Chapéu. CONESP/SUDENE. Relatório Técnico nº17- Recife - 1967
- BRITO NEVES, B.B. de - Inventário Hidrogeológico Básico do Nordeste, Folha nº 24 - SUDENE - Recife, 1972
- CHESF/HIDROSERVICE - Projeto Sobradinho - Hidrogeologia do Reservatório. Relatório Técnico Parcial nº2 - S. Paulo-Outubro/73
- FRANGIPANI, A - Contribuição aos Estudos Hidrogeológicos das Bacias dos Rios Verde e Jacaré (Bahia)-Tese Dout. USP-S. Paulo/72
- GUERRA, A.M. - Hidrogeologia dos Terrenos Cársticos- Modelo dos Cársticos de Irecê-BA. Seminário apres. na USP-S. Paulo-1980
- INDA, H.A.V. e BARBOSA, J.R. - Mapa Geológico do Estado da Bahia com Texto Explicativo - SME/CPM - 1978
- PRICKETT, T.A. & LONNGUIST, C.G. - Selected Computer Techniques for Groundwater Resource Evaluation-Bull. 55-Illinois State Water Survey - Illinois-EUA-1971
- ROLF, P.A.M. de A. - Notas sobre a Geologia da Serra do Tombador-Bahia - Soc. Bras. de Geologia - São Paulo - 1960

PROJETO BAIXIO DE IREÇÊ
MAPA DE PROFUNDIDADE DOS NÍVEIS D'ÁGUA
IRRIGAÇÃO POR GRAVIDADE



LEGENDA
 --- CURVAS DE ISOPROFUNDIDADE
 - - - - - APOS 5 ANOS
 - - - - - APOS 10 ANOS
 [Hatched Box] LENÇOL A SUPERFÍCIE

