



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CAMPUS CAMPINA GRANDE

EVERTON JOHN CAMELO ALVES

POTENCIALIDADE E MANEJO DOS RECURSOS HÍDRICOS DO AQUÍFERO
ALUVIAL EM SUMÉ - PB

CAMPINA GRANDE – PB
AGOSTO DE 2016

EVERTON JOHN CAMELO ALVES

**POTENCIALIDADE E MANEJO DOS RECURSOS HÍDRICOS DO AQUÍFERO
ALUVIAL EM SUMÉ - PB**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil e
Ambiental (PPGECA) da Universidade
Federal de Campina Grande (UFCG),
como parte dos requisitos necessários
para obtenção do Título de Mestre.

Área de concentração:

RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL

Orientador:

PROFº. DR. CARLOS DE OLIVEIRA GALVÃO

Coorientador:

PROFº. DR. JANIRO COSTA RÊGO

CAMPINA GRANDE – PB

AGOSTO DE 2016

FICHA CATALOGRAFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

A474p Alves, Everton John Camelo.
Potencialidade e manejo dos recursos hídricos do aquífero aluvial em Sumé-PB /
Everton John Camelo Alves. – Campina Grande, 2016.
72 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade
Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2016.
*Orientação: Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão, Prof. Dr. Janiro Costa Rêgo.
Referências.

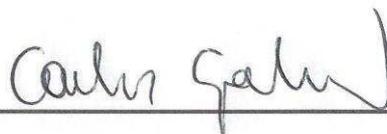
1. Águas Subterrâneas – Modelagem e Simulação. 2. Recursos Hídricos –
Manejo. I. Galvão, Carlos de Oliveira. II. Rêgo, Janiro Costa. III Universidade
Federal de Campina Grande, Campina Grande (PB). III. Título.

CDU 626.8(043)

EVERTON JOHN CAMELO ALVES

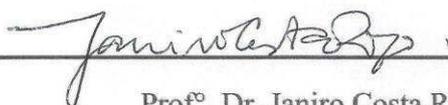
POTENCIALIDADE E MANEJO DOS RECURSOS HÍDRICOS DO AQUÍFERO
ALUVIAL EM SUMÉ – PB

Aprovada em 19 de Agosto de 2016.



Prof^o. Dr. Carlos de Oliveira Galvão

Orientador



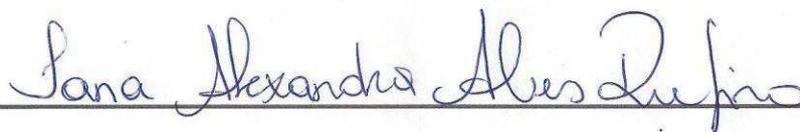
Prof^o. Dr. Janiro Costa Rêgo

Orientador



Prof^a. Dra. Soahd Arruda Rached Farias

Examinadora externa



Prof^a. Ph.D Iana Alexandra Alves Rufino

Examinadora interna

Campina Grande – PB

Agosto de 2016

Dedico a Deus, o soberano autor da vida,
e a todos, a serem mencionados em seguida, que contribuíram para este passo
tão importante.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, sou e serei eternamente grato ao Nosso Deus, Essa Força Infinita e Poderosa.

Agradeço eternamente, de coração de todo amor e com pouco reconhecimento ainda, à Sr^a. Dinalva Camelo (Minha Mãezona) e ao Sr. Edgar Cirilo (Meu Paizão) (mesmo distante fisicamente, mas perto do meu coração e minha mente). Agradeço também a Meu Segundo Pai o Sr. João de Aguiar "Peba", às Sr^{as}. Doralice Camelo e Doroti Quirino (tias e Segunda Mães), à Minha Saudosa Avó Sr^a. Helena Camelo, e todos os meus outros parentes e entes queridos e amigos.

Agradeço com muito apreço e coração a todos colegas e novos amigos com quem convivi e convivo, inclusive os que entraram no Barco do Mestrado comigo e estão nessa caminhada até agora, especialmente: José Roque, Simone, Halana, Lívia, Cibelle, Wanessa, Jaqueline, Dayvison, Laio, Dyego, Diego e Marlon.

Agradeço a todos os colegas que conviveram e têm convivido comigo nos Laboratórios de Hidráulica I e II da UFCG, proporcionando um ambiente de respeito mútuo, paz e harmonia. E mais especialmente a José Benito pela brilhante parceria firmada durante o meu trabalho e a Anderson Samuel.

Agradeço a todos os funcionários da UFCG que conheço, principalmente Josete, Maria José, Manoel, Armando, Luciano, Freire, Sr. Alves, Cristina, Alrezinha, Ismael José, Júlio César, Haroldo, Raulino, Lindimar, Ronaldo, Vera Lúcia (já aposentada), Davi (CTRN), Thiago e Bryan (técnicos do CCT) e Francisco Neto (pela amizade verdadeira e sólida desde a Graduação). Aos terceirizados, em especial a Salomé e a "Toré". Ao pessoal dos quiosques de restaurante e xerox pelo suporte. Em especial agradeço ao funcionário Valdomiro Rocha pela convivência praticamente diária.

Agradeço incansavelmente a todos os professores que contribuíram para minha formação, em especial ao Saudoso Professor Valderi Carneiro (Professor de Redação e Literatura) que, onde estiver está torcendo por mim, à Prof^a. Gledsneli, ao Prof^o. Carlos Fernandes (Carlão), ao Prof^o Pedro Luiz (UAF-CCT) e ao Prof. José Dantas Neto (UAEA-CTRN).

Agradeço ao Programa PPGECA e aos professores por proporcionarem este Mestrado de relevante e fundamental contribuição à sociedade, confiando em meu potencial e permitindo-me apresentar minha ideia. Em especial aos meus Orientadores Prof^o. Carlos

Galvão e Prof^o. Janiro Costa pelas contribuições de enorme relevância a meu trabalho e futuros trabalhos, além do exemplo de experiência de vida e pesquisa repleto de orientações de grande valor. Bem como grato a CAPES pela concessão de bolsas durante o Mestrado e o desenvolvimento de minha ideia, à Revista Agriambi, ao Projeto BRAMAR pelo meu credenciamento nesse projeto, à Acquacon e à ABRH pela organização e meu credenciamento para o XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, a todos do município de Sumé pelas informações de enorme relevância para o meu trabalho, em especial ao proprietário Lourinaldo, ou melhor, Seu Louro, e também à Jana Yres, da AESA, pela grande motivação e contribuição em meu trabalho, além da amizade sólida de longa data.

Agradecimento especial às professoras da Banca Examinadora Iana Alexandra e Soahd Arruda por compreenderem minha ideia e pelas críticas e sugestões de enorme relevância.

Grato ao Sr. Manoel do Fiteiro pela amizade verdadeira e sólida repleta de conselhos e momentos de alívio da minha mente.

E para fechar com chave de ouro, estou grato de coração e todo meu amor pelo verdadeiro amor com respeito, compromisso, confiança, muita paciência e enorme compreensão, à minha noiva Ligia, por ter me motivado cada vez mais a agregar mais sabedoria com mansidão perante os desafios.

EPÍGRAFE

“Só sabemos realmente o valor da água
quando ela está em escassez.”

Everton Camelo

RESUMO

A potencialidade hídrica do trecho do aquífero aluvial ao longo do rio Sucuru no Perímetro Irrigado em Sumé é obtida a partir de um modelo matemático de fluxo subterrâneo. O trecho selecionado apresenta a maior concentração de informações pertinentes às características hidrogeológicas do sistema aluvial e ao diagnóstico do uso atual dos recursos hídricos subterrâneos com a exploração das vazões em poços durante três meses (maio a julho) de um ano de estiagem. Nesse diagnóstico é constatado que o uso atual das águas do aluvião influi na inversão de parte do fluxo subterrâneo, comprometendo o trecho após a fronteira de jusante. São simulados cinco cenários para investigar com quais taxas de vazão as águas do trecho do aluvião em estudo podem ser exploradas, atendendo ao seguinte critério: assegurar um volume de fluxo remanescente entre 0% e 50% do volume de fluxo de entrada na fronteira de montante do trecho. Diante dos resultados, o cenário 4, com o fluxo para a jusante, é o mais adequado para o uso sustentável das águas e da preservação da potencialidade hídrica do trecho do aluvião.

Palavras-chave: água subterrânea, modelagem, simulação.

ABSTRACT

The water availability of the alluvial aquifer in Sucuru River, at the Sumé Irrigation District, is obtained through a mathematical model of groundwater flow. The selected reach presents relevant information about the hydrogeological characteristics of the alluvial system. The assessment of the current use of groundwater resources was performed considering the exploitation of the flow through wells during three months (May to July) in a dry year. It is found that the current use of the aquifer causes the inversion of part of the groundwater flow, from downstream to upstream. Five scenarios are simulated to investigate which flow rates can be exploited, according to the criterion: ensuring a downstream flow between 0% and 50% of the flow in the upstream limit of the reach. Given the results, the scenario 4, which allows flow to downstream, is the most suitable for the sustainable use of the waters and the preservation of the water potential of the alluvial aquifer.

Keywords: Groundwater, modeling, simulation.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	13
LISTA DE TABELAS.....	16
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	17
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1.GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA	20
2.1.1. Distribuição vertical de água no subsolo.....	22
2.1.2. Parâmetros que afetam o armazenamento e definem um aquífero.....	23
2.1.3. Aquíferos, aquícludos, aquíclados e aquíclugos	25
2.2. AQUÍFEROS ALUVIAIS NO SEMIÁRIDO	28
2.3. HIDRÁULICA DOS POÇOS.....	29
2.4. BARRAGEM SUBTERRÂNEA.....	31
2.5. EQUAÇÕES GERAIS DO ESCOAMENTO.....	32
2.6. MODELAGEM EM AQUÍFEROS ALUVIAIS	35
2.7. MANEJO DAS ÁGUAS DOS AQUÍFEROS ALUVIAIS	38
CAPÍTULO 3 - CASO DE ESTUDO	40
CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS	43
4.1. DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	43
4.2. CONSTRUÇÃO DO MODELO	44
4.2.1. Definição da malha.....	44
4.2.2. Condições de contorno e período de simulação	45
4.2.3. Cotas do terreno e do embasamento cristalino.....	46
4.2.4. Cargas hidráulicas	47
4.2.5. Cargas hidráulicas nas fronteiras permeáveis	51
4.2.6. Parâmetros	51
4.2.7. Cálculo das demandas	51
4.2.8. Definição de critérios e de cenários para simulação	56
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
5.1.SIMULAÇÃO.....	57
5.1.1.Diagnóstico do uso atual e fluxo natural sem bombeamento.....	57
5.1.2.Cenários.....	59
5.1.2.1. Cenário 1: Mesma distribuição dos poços do diagnóstico e redução de vazões ..	59
5.1.2.2. Cenário 2: Mudança do poço P16 com fluxo para jusante.....	61

5.1.2.3. Cenário 3: Mudança do poço P16 na ausência de fluxo para jusante	62
5.1.2.4. Cenário 4: Mudança do poço P16 e inserção de 1 (uma) barragem submersa com fluxo para jusante	63
5.1.2.5. Cenário 5: Mudança do poço P16 e inserção de 1 (uma) barragem submersa na ausência de fluxo para jusante.....	64
5.2.SÍNTESE DOS RESULTADOS E PROPOSTAS DE MANEJO.....	66
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES.....	67
CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Água subterrânea como parte do ciclo hidrológico (Feitosa et al., 2008).....	19
Figura 2.2–Tipos de aquíferos quanto à pressão (Adaptado de BOSCARDIN BORGHETTI et. al, 2004, adaptado de IGM (2001)).....	26
Figura 2.3 - Esquema de um poço artesiano ou tubular(CPRM, 1998).....	29
Figura 2.4 - Estrutura típica de um poço raso comum (Medeiros Filho, 2010).....	30
Figura 2.5 – Barragem submersa em Sumé.....	31
Figura 3.1 – Perímetro Irrigado na bacia do rio Sucuru.....	41
Figura 3.2 – Localização do trecho estudado por Vieira (2002).....	42
Figura 4.1 - Área de estudo selecionada e imagem a ser inserida no modelo.....	43
Figura 4.2 - Malha definida, status de carga e localização dos poços e da barragem submersa	44
Figura 4.3 - Condições de contorno.....	45
Figura 4.4 - Cotas do nível do terreno (Top).....	46
Figura 4.5 - Gráfico das cargas hidráulicas (h_i) no poço P11 em função do tempo em 2015..	47
Figura 4.6 - Gráfico das cargas hidráulicas (h_i) no poço P12 em função do tempo em 2015..	48
Figura 4.7 - Gráfico das cargas hidráulicas (h_i) no poço P13 em função do tempo em 2015..	48
Figura 4.8 - Gráfico das cargas hidráulicas (h_i) no poço P14 em função do tempo em 2015..	48
Figura 4.9 - Gráfico das cargas hidráulicas (h_i) no poço P15 em função do tempo em 2015..	

.....	49
Figura 4.10 - Gráfico das cargas hidráulicas (h_i) no poço P11 em função do tempo em 2015..	49
.....	49
Figura 4.11 - Gráfico das cargas hidráulicas em regime estático em cada poço (h_i) na coleta em 13/07/2015.....	50
Figura 4.12 - Perfil longitudinal do aquífero aluvial na seção mais próxima à maioria dos poços.....	50
Figura 4.13 - Definição das cargas hidráulicas constantes nas células nas fronteiras permeáveis.....	51
Figura 4.14 - Localização das áreas irrigadas em relação ao rio Sucuru e aos poços.....	53
Figura 4.15 - Evapotranspiração potencial (l) em cada mês de 2014.....	54
Figura 5.1 – Fluxo subterrâneo e captação dos poços no 6º período de simulação do diagnóstico do uso atual.....	57
Figura 5.2 - Gráfico com as cargas hidráulicas (h) (em metros) para cada poço em cada mês de simulação do diagnóstico de uso atual em 2015.....	58
Figura 5.3 - Fluxo subterrâneo na ausência de bombeamento dos poços no 6º período de simulação do diagnóstico do uso atual.....	58
Figura 5.4 - Gráfico com as cargas hidráulicas (h) (em metros) para cada poço sem bombeamento em cada mês de simulação do diagnóstico de uso atual.....	59
Figura 5.5 – Cenário 1: Fluxo para os poços e fluxo para a jusante no 6º período de simulação	60
Figura 5.6 - Gráfico com as cargas hidráulicas (h) (em metros) para cada poço em cada mês de simulação no cenário 1 em 2015.....	60
Figura 5.7 – Cenário 2: Fluxo para os poços e fluxo para a jusante no 6º período de simulação	61
Figura 5.8 - Gráfico com as cargas hidráulicas (h) (em metros) para cada poço em cada mês de simulação no cenário 2 em 2015.....	61

Figura 5.9 – Cenário 3: Fluxo para os poços e fluxo proveniente da jusante no 6º período de simulação.....	62
Figura 5.10 - Gráfico com as cargas hidráulicas (h) (em metros) em cada poço em cada mês de simulação no cenário 3 na ausência de fluxo para jusante em 2015.....	62
Figura 5.11 – Cenário 4: Fluxo para os poços e fluxo para a jusante no 6º período de simulação.....	63
Figura 5.12 - Gráfico com as cargas hidráulicas (h) (em metros) para cada poço em cada mês de simulação no cenário 4 em 2015.....	64
Figura 5.13 – Cenário 5: Fluxo para os poços e fluxo proveniente da jusante no 6º período de simulação.....	65
Figura 5.14 - Gráfico com as cargas hidráulicas (h) (em metros) para cada poço em cada mês de simulação no cenário 5 na ausência de fluxo para jusante em 2015.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores representativos do rendimento específico (Todd, 2005).....	24
Tabela 4.1 – Cargas hidráulicas em regime estático em cada poço (h_i) em 2015.....	47
Tabela 4.2 – Dados das bombas e do bombeamento coletados pelo autor em 2015.....	52
Tabela 4.3 – Volumes diários referenciais para o mês de julho.....	52
Tabela 4.4 - Evapotranspiração potencial em cada cultura (l_d) nos meses de maio a julho....	54
Tabela 4.5 - Evapotranspiração potencial de água diária em cada mês para irrigação em cada cultura e em cada poço (l_d) e a vazão para dessedentação por animal para o poço P12.....	55
Tabela 4.6 - Área irrigada e cabeças de gado atendidas e volume de água referencial diário em cada mês.....	55
Tabela 5.1 – Síntese dos resultados dos cenários.....	66

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Quanto à concentração de recursos hídricos, o Brasil é um dos mais ricos. Embora haja grande quantidade de água, há uma má distribuição devido às características climáticas e/ou geológicas. Como exemplo de desigualdade na oferta de recursos hídricos, no semiárido nordestino, em comparação com outras regiões do país, predominam terrenos cristalinos com baixa capacidade de acumulação e circulação de água, por causa dos baixos índices pluviométricos na região, em conjunto com as altas taxas de evapotranspiração e a geologia desfavorável para a exploração aquífera superficial.

Todavia, sobre esses terrenos, se formam, pela ação de erosões e transporte aluvial, camadas de terrenos sedimentares que, mesmo localmente restritas aos leitos e margens de rios, se constituem em aquíferos de fácil e favorável aproveitamento. Isto, além da insuficiência das águas superficiais em atender a demanda, tem tornado intensificado o uso (para abastecimento humano, dessedentação de animais e irrigação) desse recurso hídrico, inclusive na zona rural. Este fato tem gerado a necessidade de investigar criteriosamente a potencialidade e o uso desses aquíferos, e propor alternativas de manejo sustentável.

A captação de água para esses usos se processa, nesses aquíferos, através de poços escavados manualmente, que atravessam as variadas camadas arenosas e pedregulhosas, intercaladas por outras, menos espessas, argilosas ou arenoargilosas. Devido ao processo geológico de formação, os aquíferos aluviais do semiárido nordestino são rasos, estreitos e alongados, funcionando como condutos de água subterrânea, com direção de fluxo predominantemente axial. Isto favorece o emprego de barragens subterrâneas, construídas transversalmente à referida direção principal de fluxo, através de escavação de trincheiras que são posteriormente preenchidas com material menos permeável (argila) ou têm um dos taludes forrado com cortina impermeável de tecido sintético. Uma barragem pode abranger a seção transversal do aquífero completamente ou apenas parte dela, neste caso permitindo o fluxo para jusante, lateralmente ou por extravasamento.

A contenção ou retardamento do fluxo e a conseqüente elevação do nível freático criam condições propícias para a locação de poços no trecho a montante do barramento, onde tende a se concentrar a exploração de água subterrânea. Os volumes que podem ser retirados por bombeamento são naturalmente limitados pelo esgotamento das reservas do trecho; situação atingida quando os rebaixamentos nos poços (níveis dinâmicos) alcançarem a base do pacote sedimentar aluvial. Contudo, a determinação do potencial efetivo do trecho do

aquífero em aproveitamento deve ainda levar em consideração, além dos limites de funcionamento dos poços, tanto a afluência subterrânea proveniente dos trechos aluviais mais a montante, como o fluxo para jusante, através da barragem, cuja anulação ou diminuição tende a influenciar negativamente no atendimento das demandas de usuários situados nos trechos aluviais mais a jusante.

A interdependência entre um trecho de um aquífero aluvial e os demais trechos a montante e a jusante exige, portanto, para o seu aproveitamento racional, a análise de uma extensão considerável deste aquífero, cujos limites mais apropriados são aqueles associados à bacia hidrográfica onde ele está naturalmente contido. A necessidade da gestão integrada dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos na bacia hidrográfica se torna mais evidente no caso, pela estreita relação entre o aquífero aluvial e o curso d'água que se lhe sobrepõe, sendo este a fronteira mais importante para a recarga e a descarga daquele.

Neste trabalho, é tratado um caso real de um trecho de aquífero aluvial dotado de barragem subterrânea e poços. O objetivo geral é determinar a potencialidade e estabelecer estratégias para o manejo dos recursos hídricos desse trecho. Os objetivos específicos são:

- Investigar a influência do uso dos poços existentes e da mudança de um deles para o fluxo e o manejo das águas do aquífero;
- Investigar a influência de uma barragem submersa existente e de uma barragem submersa inserida para o fluxo e o manejo das águas do aquífero.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

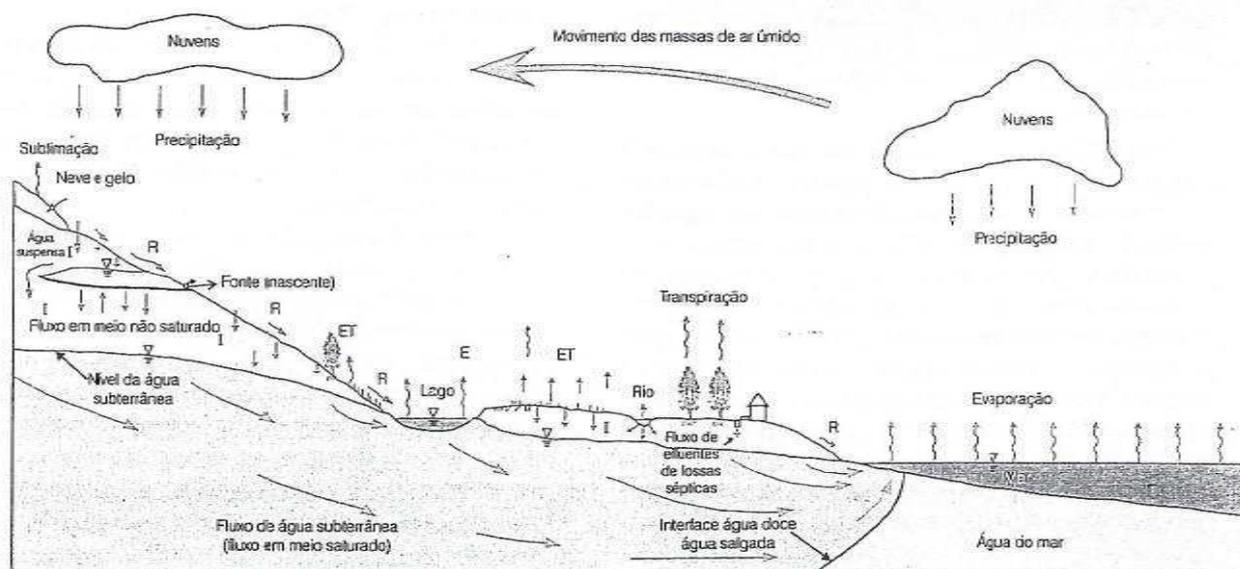
De acordo com ABAS (2014), água subterrânea é toda a água que se encontra sob a superfície da Terra preenchendo completamente vazios intergranulares de rochas sedimentares, ou fraturas, fissuras e falhas de rochas compactas e que, submetidas às forças de coesão e gravidade, é responsável pela manutenção dos lagos, brejos, da umidade do solo e do fluxo de rios.

Segundo Popp (1987), os vazios são classificados em:

- Espaços intersticiais dos grãos – ocorrentes em rochas sedimentares e no solo;
- Fraturas ou vazios divisionares – ocorrentes em rochas ígneas e metamórficas, importantes em rochas cristalinas, uma vez que constituem a única forma de acumulação e circulação de água, pois sua porosidade eventual é desprezível;
- Vazios de dissolução – ocorrentes em rochas calcárias;
- Vazios vesiculares – ocorrentes em rochas ígneas vulcânicas.

Feitosa et al. (2008) apontam que, a água que percorre invisivelmente no subsolo da Terra e deságua nos rios enquanto não chove – 13.000 km³/ano a nível mundial – se torna uma contribuição do manancial subterrâneo. Este se origina da infiltração nos terrenos onde foram esculpidas as bacias hidrográficas como parcela das águas de precipitação em forma de chuva, neblina ou neve (ver Figura 2.1).

Figura 2.1 – Água subterrânea como parte do ciclo hidrológico.



Fonte: Feitosa et al. (2008).

Os fatores determinantes para a ocorrência de águas subterrâneas são, portanto a geologia e a climatologia regionais.

2.1.GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA

De acordo com ABAS (2014), é provável que a Terra começou como uma poeira cósmica que mantinha em movimento correntes de convecção em seu interior quando, por volta dos 3.000 °C, certas substâncias se liquefizeram.

Conforme Popp (1987), primeiro o ferro liquefeito formou o núcleo, por ser o mais pesado, depois vieram o silício, os óxidos metálicos, originando ao manto. Quando foi reduzida a temperatura da água, a radiação do calor para o espaço foi reduzida. Entre 1.500 °C e 800 °C a crosta foi solidificada. A atmosfera formou-se pouco a pouco. A água dos atuais oceanos estava concentrada na atmosfera e parte ainda no interior das rochas. Logo, a Terra se constituiu exclusivamente de rochas ígneas, originárias do magma, ou seja, rochas fundidas com temperaturas entre 800 °C e 1.500 °C que sobem do interior da crosta para a superfície atual derramando-se como lavas ou solidificando-se entre as fraturas pelas quais subiu.

Em seguida, com a ação da água que caía e corria sobre as rochas ígneas reduzidas em fragmentos de tamanhos diversos transportados com lamas mais finas nas depressões preenchidas por água, surgiram as rochas sedimentares. Desde aquele momento até os dias atuais, o processo de formação dessas rochas continua pela ação da erosão, transporte, deposição e consolidação, tendo como agentes a chuva, o vento, a gravidade, os rios e o gelo.

Com a crosta solidificada e as rochas quentes no manto, surgem outros fenômenos. Em direção ao centro da Terra o manto continua esfriando, modificando o volume e o enrugamento da crosta, gerando fraturamentos e dobramentos das rochas da crosta, dando origem às rochas metamórficas.

Segundo Feitosa et al. (2008), no sistema geológico, a natureza e a distribuição dos locais de armazenamento de água subterrânea são controladas pela litologia, estratigrafia e estrutura.

Litologia – trata da composição mineral, distribuição de tamanho dos grãos e grau de compactação de rochas ou sedimentos da formação geológica.

Estratigrafia – descreve as relações geométricas e cronológicas entre os vários elementos constituintes do sistema geológico, tais como lentes, camadas, discordâncias e formações de origem sedimentar.

Estrutura – relaciona-se às características geométricas produzidas no sistema geológico por deformação, após deposição ou cristalização, como é o caso de juntas, fraturas, falhas e dobras.

Feitosa et al. (2008) afirmam que as rochas sedimentares com presença de água subterrânea mais importantes são os arenitos e as carbonáticas.

Arenitos – As formações areníticas de maior expressão hidrogeológica são originárias de vento, rio e mar; quartzo, calcita e minerais de argila são os materiais mais encontrados cimentando os grãos dos arenitos; esses minerais são formados a partir da precipitação ou alteração mineral durante a circulação da água subterrânea através da areia; a compactação é importante a grandes profundidades devido à alta pressão e à alta temperatura.

Carbonáticas – Essas rochas são de origem clástica (deposição de sedimentos transportados), orgânica ou química, sendo neste último caso formadas por precipitação, cujo componente principal é o carbonato de cálcio; essas rochas ocorrem na forma de calcário ou calcário dolomítico; quase toda a dolomita possui origem secundária e provém da alteração geoquímica da calcita; em suas fraturas a circulação de água subterrânea dissolve a calcita e a dolomita; para que a água subterrânea possa dissolver essas rochas e produzir grandes vazios em seu interior ela precisa ser subsaturada em carbonatos.

As rochas ígneas e metamórficas apresentam vazios intercrystalinos muito pequenos e não interconectados, o que dificulta o movimento de água subterrânea e conseqüentemente o aproveitamento dessa água.

Feitosa & Manoel Filho (2000) afirmam que a ocorrência de água subterrânea em sedimentos inconsolidados (formações não-compactas) apresenta as seguintes vantagens em relação ao aproveitamento.

- Esses sedimentos são fáceis de perfurar e escavar, tornando a investigação mais rápida e menos onerosa;
- São encontrados em vales e em áreas onde o nível de água subterrânea é pouco profundo, possibilitando o bombeamento a baixo recalque;
- Situam-se frequentemente em locais favoráveis à recarga de rios, riachos e lagoas e da infiltração direta da água da chuva.

Os sedimentos inconsolidados mais importantes são os aluviões e as dunas.

Aluviões – Devido à mobilidade dos leitos dos rios e à variação de velocidade de sedimentação de partículas sólidas, os aluviões possuem variedade na textura dos grãos, o que gera heterogeneidade na distribuição das propriedades hidráulicas.

Dunas – São formadas ao longo de regiões costeiras e, às vezes em áreas interiores onde as chuvas são esparsas, a partir do transporte pelo vento e deposição de materiais como areia e silte.

2.1.1. Distribuição vertical de água no subsolo

Uma parcela de água sob força de adesão ou capilaridade fica retida na superfície do solo, que é a zona não saturada; ou seja, de acordo com Tucci(1993) nessa zona os poros contêm ar e água. Outra parcela sob ação da gravidade atinge regiões mais profundas, constituindo a zona saturada; ou seja, segundo Tucci (1993) nessa zona todos os poros são preenchidos com água.

Tucci (1993) afirma que a zona de saturação é limitada superiormente pela linha piezométrica, em que a água se encontra sob pressão atmosférica, e inferiormente por uma barreira impermeável. Já a zona não saturada é limitada superiormente pela superfície do terreno e inferiormente pela linha de saturação.

Segundo ABAS (2014), na zona não saturada pequenas quantidades de água se distribuem uniformemente, sendo que suas moléculas se aderem às superfícies dos grãos do solo. Nessa zona ocorrem a transpiração das raízes das plantas, a filtração e a autodepuração da água. Ela se divide em:

- Zona de umidade do solo – Zona onde a perda d'água por adesão é intensa. Em alguns casos, é muito grande a quantidade de sais que se precipitam na superfície do solo após a evaporação dessa água, originando solos salinizados. Esta zona serve de suporte para a biomassa vegetal e da interface atmosfera/litofera.
- Zona intermediária – Zona sob a zona de umidade do solo, apresentando umidade maior que esta. Em áreas onde o nível freático se situa próximo à superfície do solo, essa zona pode não existir, pois a franja de capilaridade atinge o solo.
- Franja de capilaridade – Zona sob a zona intermediária, mais próxima ao nível d'água do lençol freático, apresentando maior umidade, situada acima da zona saturada.

2.1.2. Parâmetros que afetam o armazenamento e definem um aquífero

Os parâmetros que afetam o armazenamento e definem um aquífero são porosidade, porosidade efetiva, retenção específica, o armazenamento específico, coeficiente de armazenamento e também o rendimento específico.

De acordo com Feitosa et al. (2008), porosidade é a razão entre o volume de vazios (V_v) e o volume total (V_t) do material sólido ou rocha, e se expressa por

$$\eta = V_v/V_t \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Feitosa et al. (2008) afirmam que porosidade efetiva é a razão entre o volume de água liberado dos vazios, por gravidade, (V_g), e o volume total (V_t) do material sólido ou rocha, e se expressa por

$$\eta_e = V_g/V_t \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Segundo Feitosa et al. (2008), retenção específica é a quantidade de água retida na superfície dos grãos (V_r) a partir de forças de atração molecular entre a água e essa superfície, forças essas maiores que as de gravidade, dividida pelo volume total (V_t) do material sólido ou rocha; ou seja, é a diferença entre a porosidade (η) e a porosidade efetiva (η_e), e se expressa por

$$S_r = \eta - \eta_e \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Feitosa & Manoel Filho (2000) afirmam que o armazenamento específico (S_e) de um aquífero saturado é o volume de água liberado por um volume unitário do aquífero submetido a um decréscimo unitário de carga hidráulica.

$$S_e = \Delta V_{\text{liberado}}/(V \times \Delta h) \quad (\text{Eq. 2.4})$$

Segundo Feitosa et al. (2008), o coeficiente de armazenamento (S) é o parâmetro adimensional definido pela seguinte equação:

$$S = (\Delta V_{\text{liberado}}/(V \times \Delta h)) \times b \quad (\text{Eq. 2.5})$$

$$S = S_e \times b \quad (\text{Eq. 2.6})$$

Onde b é a espessura da camada do aquífero.

Segundo Todd (2005), o rendimento específico (r_e) é a taxa de volume de água que, após a saturação, pode ser drenada por gravidade para seu próprio volume. Portanto

$$r_e = V_d/V_t \quad (\text{Eq. 2.7})$$

Onde V_d é o volume a ser drenado e V_t é o volume total.

O valor do rendimento específico depende do tamanho e forma dos grãos, da distribuição dos poros, da compactação do extrato e do tempo de drenagem. Os valores do rendimento específico para cada tipo de solo ou rocha são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 2.1 - Valores representativos do rendimento específico.

Material	Rendimento específico (%)
Cascalho grosso	23
Cascalho médio	24
Cascalho fino	25
Areia grossa	27
Areia média	28
Areia fina	23
Silte	8
Argila	3
Arenito de grãos finos	21
Arenito de grãos médios	27
Calcário	14
Duna de areia	38
Limo calcário	18
Turfa	44
Xisto	26
Silte pedroso	12
Errático predominantemente siltoso	6
Errático predominantemente arenoso	16
Errático predominantemente de cascalho	16
Tufo calcário	21

Fonte: Todd(2005).

Os parâmetros que definem um aquífero são a permeabilidade e o coeficiente de transmissividade.

Segundo Feitosa & Manoel Filho (2000), a permeabilidade é o parâmetro referente ao movimento de água subterrânea, determinada em ensaio pelo engenheiro hidráulico francês Henry Darcy, quando pesquisava o escoamento de água em filtros de areia.

$$k = Q \times L / (A \times \Delta h) \quad (\text{Eq. 2.8})$$

Feitosa & Manoel Filho (2000) apontam que o coeficiente de transmissividade é o produto entre a permeabilidade (k) e a espessura (e) do aquífero, que é escrita:

$$T = k \times e \quad (\text{Eq. 2.9})$$

2.1.3. Aquíferos, aquíclodos, aquíclados e aquíclugos

Segundo Feitosa et al. (2008), o aquífero é uma formação geológica que contém água e permite que grandes quantidades dessa água se movimentem em seu interior em condições naturais. As formações permeáveis como areias ou arenitos são exemplos de aquíferos.

De acordo com Braga (2014), os aquíferos são geralmente definidos como formações geológicas completas com camada permeável com saturação suficiente para produzir água em quantidade significativa para poços ou fontes. Assim, eles devem possuir capacidade para armazenar e transportar água em quantidade expressiva.

De acordo com Feitosa et al. (2008), os aquíclodos são formações que podem conter água (até mesmo em grande quantidade), mas transmitem uma quantidade irrisória em condições naturais. As formações impermeáveis, tais quais camadas de argila, são exemplos de aquíclodos.

"Os aquíclados são formações semipermeáveis delimitadas no topo e/ou na base por camadas de maior permeabilidade. Eles transmitem água a uma taxa muito baixa em relação a do aquífero" (TUCCI, 1993). Eles se comportam como uma membrana semipermeável através da qual pode ocorrer uma filtração vertical ou drenança.

Segundo Feitosa & Manoel Filho (2000), os aquíclugos são formações impermeáveis que armazenam ou transmitem água em quantidade irrisória.

Segundo Feitosa & Manoel Filho (2000), os aquíferos podem ser classificados de acordo com a pressão da água nas suas superfícies limítrofes – base e topo – e também em função da capacidade de transmissão de água dessas camadas limítrofes. "Eles podem ser confinados ou não confinados, dependendo da ausência ou presença da linha d'água" (TUCCI, 1993).

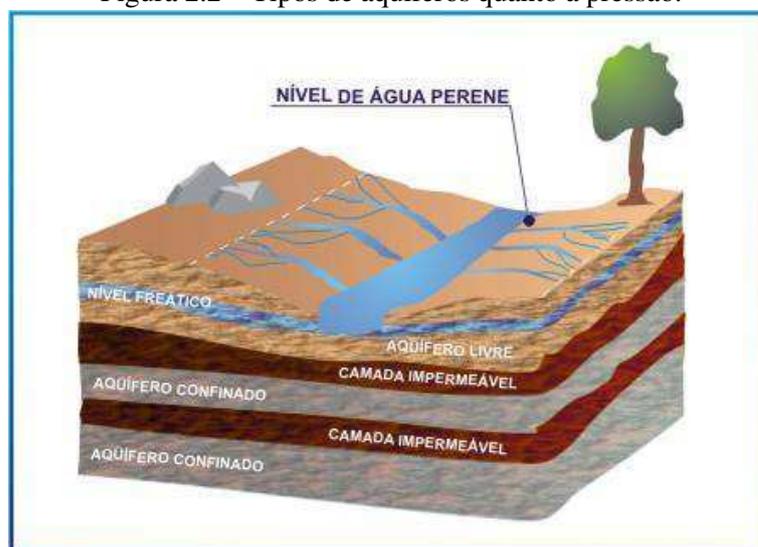
Feitosa & Manoel Filho (2000) afirmam que os aquíferos confinados são aqueles em que a pressão da água em seu topo é maior que a atmosférica, causando artesianismo nos poços onde captam sua água. São constituídos por uma formação geológica permeável confinada entre duas camadas impermeáveis ou semipermeáveis. A sua recarga através das chuvas se dá preferencialmente nas regiões onde é aflorada à superfície.

Aquíferos confinados drenantes – são aqueles onde, pelo menos, uma das camadas limítrofes é semipermeável, permitindo a entrada ou a saída de fluxos pelo topo e/ou base, através de drenança ascendente ou descendente.

Aquíferos confinados não drenantes – são aquíferos cujas camadas limítrofes são impermeáveis.

Segundo Feitosa & Manoel Filho (2000), aquíferos livres são aqueles cujo limite superior é a superfície de saturação na qual todos os pontos se encontram à pressão atmosférica. As áreas de recarga dos aquíferos confinados correspondem a aquíferos livres através dos quais os excessos de água da precipitação conseguem penetrar por infiltração. A exemplo dos aquíferos confinados, esses aquíferos podem ser classificados em drenantes (de base semipermeável) e não drenantes (de base impermeável).

Figura 2.2 – Tipos de aquíferos quanto à pressão.



Fonte: Adaptado de BOSCARDIN BORGHETTI et al.(2004) e IGM (2001).

De acordo com ABAS (2014), os aquíferos podem ser classificados em função da porosidade em: poroso, fissural e cárstico.

Poroso – É aquele formado por rochas sedimentares consolidadas, inconsolidadas ou solos arenosos, onde a circulação de água ocorre nos poros entre os grãos de areia, silte e argila de granulação variada. São os mais importantes aquíferos devido ao grande volume de água e por ocuparem grandes áreas.

Fissural – "É aquele formado por rochas ígneas, metamórficas ou cristalinas, duras e maciças, onde a circulação de água se dá nas fraturas, fendas e falhas, abertas consequentes do movimento tectônico" (ABAS, 2014). Sua capacidade de acumulação de água se refere à quantidade de fraturas, suas aberturas e intercomunicação, permitindo infiltração e fluxo de água.

Cárstico – É aquele formado em rochas calcáreas, onde a circulação de água se faz nas fraturas de rochas carbonáticas e outras discontinuidades resultantes da dissolução do carbonato pela água. Essas aberturas podem atingir grandes aberturas, chegando a formar rios subterrâneos.

De acordo com Scheidegger(1961)e Vieira (2002), as formações geológicas aluviais são depósitos de origem recente (ou quaternária), que estão relacionadas com o desenvolvimento de rios ou riachos, e são originadas dos processos ocorridos na superfície da bacia hidrográfica. Os aquíferos aluviais podem ser definidos como “pacotes” de sedimentos detríticos, formados de cascalho, areia, silte e argila. Também conhecidos como aluviões, iniciam-se com a erosão de rochas provocada por variações de temperatura e ação de agentes químicos e biológicos, seguida do transporte pela água e, finalmente, da sedimentação ou deposição desse material no próprio leito, sendo mais abaixo das fontes de erosão.

Conforme Todd (2005), os aluviões formam córregos bem como planícies de inundação.

“Um depósito aluvial pode ser constituído das mais variáveis frações granulométricas, com predomínio, na maioria das vezes, da fração arenosa. O tipo de fração dominante irá depender fundamentalmente da capacidade de transporte de sedimento do rio ou riacho e do material rochoso sobre o qual o rio percorre.” (VIEIRA, 2002)

Com respeito à importância, um aquífero aluvial, segundo Burte et al. (2011), pode ser uma alternativa para a irrigação e o desenvolvimento da região semiárida brasileira. Porém, de acordo com Kirby et al. (2015), a queda dos níveis de águas subterrâneas tem causado

preocupações relacionadas ao uso insustentável dessas águas, como por exemplo em Bangladesh.

Segundo Vieira (2002), a recarga de um aquífero aluvial é feita através das chuvas que caem diretamente sobre o leito aluvial, como também do escoamento superficial oriunda da sua bacia de captação.

Martínez-Santos et al. (2010) afirmam que a infiltração de rios, lagos pode ser uma significativa fonte de recarga de aquíferos.

De acordo com Latinopoulos (1986), a recarga do aquífero é fator predominante para o desenvolvimento dos recursos hídricos subterrâneos em uma bacia. Do ponto de vista da engenharia é mais importante avaliar o impacto da resposta do aquífero local, que é função de suas características.

2.2. AQUÍFEROS ALUVIAIS NO SEMIÁRIDO

Segundo Santos et al. (2009), o semiárido brasileiro é formado por aquíferos cristalinos de baixa potencialidade hidrogeológica, comprometendo a quantidade e a qualidade dessas águas. Outra formação aquífera na região são os aquíferos aluviais, que apresentam inexpressiva profundidade (podendo encontrar formações de 2 (dois) a 6 (seis) metros de espessura). Além disso, os aluviões têm alta capacidade de infiltração, baixo escoamento superficial e boa drenagem natural, o que possibilita a existência de um grande suprimento de água no lençol freático, o qual, a partir da sua profundidade, está protegido da evaporação. Logo, os aluviões tornam mais acessível o abastecimento à comunidade.

Santos et al. (2009) afirmam que, a importância dos aluviões no semiárido para suprimento da água das populações é indiscutível, principalmente a partir das alternativas de uso para minimizar os efeitos da seca. Isso faz com que os aluviões sejam uma importante fonte de estudos. Quanto às reservas disponíveis, os aquíferos aluviais são considerados uma das mais importantes formações para o semiárido no contexto hídrico.

Albuquerque et al. (2015) afirmam que, no semiárido nordestino brasileiro, os aquíferos aluviais são usualmente explorados para abastecer as comunidades difusas e na irrigação para agricultura familiar ou de pequena escala. Já de acordo com Rêgo (2012), a exploração dos aluviões nessa região têm tido uma importância socioeconômica cada vez maior.

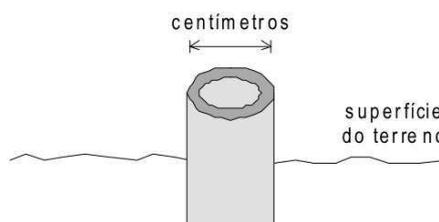
2.3. HIDRÁULICA DOS POÇOS

Poço é uma obra de engenharia regida por norma técnica destinada à captação de água do aquífero.

Quanto ao aquífero, os poços são classificados em freáticos e artesianos.

- Artesiano – Segundo De Smedt (2009), o poço artesiano ou tubular é aquele construído em aquíferos confinados, em que o nível d'água chega a ser maior que o nível desses aquíferos, não necessariamente maior que o nível do terreno; a designação artesiano é datada do Século XII, derivada do nome da cidade de Artois, na França, onde em 1126 foi perfurado o primeiro poço dessa natureza. De acordo com a CPRM (1998), o poço artesiano ou tubular é aquele em que a perfuração é feita por máquinas perfuratrizes à percussão, rotativas e rotopneumáticas. Possui diâmetro interno chegando até 50 cm e é revestido por canos de ferro ou de plástico.

Figura 2.3 - Esquema de um poço artesiano ou tubular.



Fonte: CPRM(1998).

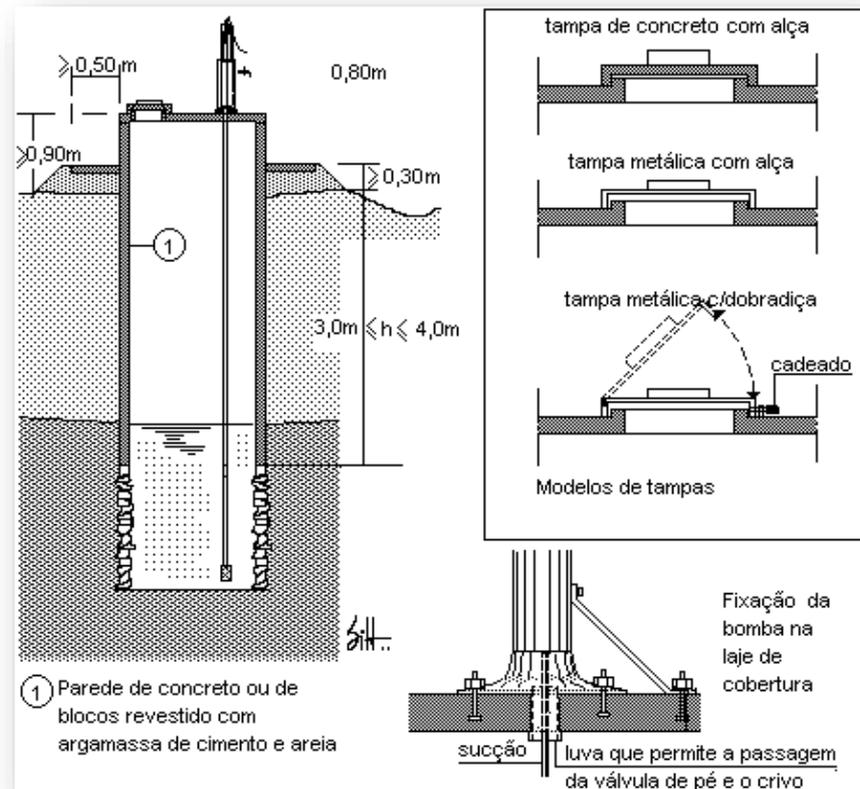
- Freático - Segundo De Smedt (2009), o poço freático é aquele construído em aquíferos não-confinados, em que o nível d'água indica o nível do lençol freático.

Os tipos de poços empregados para captação de água em aquífero freático são: cacimba e amazonas.

- Cacimba - Segundo Medeiros Filho (2010), chamado também de raso comum ou cacimbão, esse poço é construído, escavando-se o terreno, de forma cilíndrica, com revestimento de alvenaria ou de peças pré-moldadas (ou tubulões), com diâmetro de um a quatro metros por cinco a vinte metros de profundidade em média, dependendo da posição do lençol freático; a parte inferior, em contato com o lençol, deve ser feita de pedra arrumada, de alvenaria furada ou de peças cilíndricas pré-moldadas furadas; dependendo da estabilidade do terreno, para o fundo desse poço pode ser ou não exigido esse revestimento; a retirada de água do seu interior deve ser feita a partir do

bombeamento por medidas de segurança sanitária, mas para simples abastecimentos podem ser usadas bombas manuais.

Figura 2.4 – Estrutura típica de um poço raso comum.



Fonte: Medeiros Filho (2010).

- Amazonas – Segundo Medeiros Filho (2010), é um poço escavado em áreas onde o terreno é muito instável por excesso de água no solo; o método construtivo o caracteriza, pois sua construção tem que ser feita por pessoal especializado, empregando peças pré-fabricada à medida que o solo vai sendo escavado; sua denominação deve-se ao fato desse tipo de poço ser muito comum na região Amazônica em função de que os terrenos apresentam esse comportamento, principalmente durante a época de enchentes; é um poço para pequenas vazões, destinado a abastecer pequenas comunidades.

Dependendo da vazão de demanda e da capacidade do lençol abastecedor, os poços freáticos podem ser:

- Quanto à modalidade de construção: escavados, perfurados e cravados;
- Quanto ao tipo de lençol: rasos e profundos.

2.4.BARRAGEM SUBTERRÂNEA

A barragem subterrânea é a obra hidráulica e ambiental construída para acumular e armazenar água em diferentes zonas do solo. De acordo com Lima et al. (2013) é uma das tecnologias alternativas de baixo custo de construção e manutenção utilizadas na região semiárida para aproveitar a água proveniente da chuva, viabilizando seu uso para abastecimento humano, animal e agrícola, garantindo a segurança alimentar das famílias. Muitas características geram a viabilidade e a funcionalidade dessa alternativa, podendo ser: a capacidade de adaptação a diferentes ambientes, baixo custo de construção e manutenção e a facilidade de apropriação pelos beneficiários.

Há dois tipos de barragens subterrâneas: submersa e submersível. Esta por sua vez, além de represar a água subterrânea, contém uma parede aflorante ao nível do terreno que favorece o armazenamento de água superficial.

Lima et al. (2013) afirmam que uma barragem subterrânea submersa ou barragem submersa é a obra hidráulica ambiental construída em um aquífero para barrar totalmente ou parcialmente o fluxo de água, dependendo do seu comprimento (ocupando ou não toda a largura ou seção do aluvião) e do material de que é construída. Ela ocupa toda a profundidade do aluvião, não possuindo acumulação superficial, e permanece em contato com o embasamento cristalino. Ela causa o aumento no nível da água subterrânea à sua montante que, de acordo com Moreira et al. (2007), pode viabilizar a exploração aquífera, inclusive para a agropecuária.

Essa barragem pode ser construída em areia, ou argila, ou pedras ou até mesmo em pedras revestida em lona. A barragem feita com este último material apresenta a menor permeabilidade à água, ocasionando maior perturbação ao fluxo. A Figura 2.5 mostra um exemplo de uma barragem submersa.

Figura 2.5 – Barragem submersa em Sumé.



Segundo Vieira (2002), as barragens submersas consistem de um septo construído no depósito aluvial de rios e riachos com finalidade de impedir que a água infiltrada no depósito aluvial continue escoando durante a estiagem até se exaurir. A barragem retém o fluxo facilitando a captação e beneficiando comunidades próximas. Esta forma de armazenamento também objetiva reduzir os efeitos da evaporação.

Vieira (2002) afirma que, apesar da simplicidade em sua construção, há algumas condicionantes que, quando não obedecidas, são ocasionados insucessos, inviabilizando a captação de água suficiente. Algumas dessas condicionantes são:

- Deve haver um depósito aluvial arenoso de pelo menos 2 m de espessura; a predominância de material siltico-argiloso implica na retenção de grande volume de água e baixa condutividade hidráulica, com irrisória vazão nos poços e riscos de salinização com o tempo.
- A água existente no depósito aluvial não deve apresentar elevado teor de sal, pois, mesmo com intenso bombeamento, ela não vai melhorar sua qualidade; e tenderá à salinização dos solos a serem eventualmente irrigados.
- É necessária uma grande extensão do depósito aluvial à montante da seção a ser barrada, pois uma barragem na cabeceira de um riacho, por exemplo, não tem utilidade devido à deficiência na drenagem superficial.
- A calha menor deve guardar relações de largura e desnível com a calha maior que viabilize sua construção; é desaconselhável uma calha profunda e estreita, pois os volumes a serem armazenados serão muito reduzidos.

2.5. EQUAÇÕES GERAIS DO ESCOAMENTO

Segundo Todd (1959), de forma geral, a Lei de Darcy pode ser escrita pela fórmula:

$$v = K_x \frac{\partial h}{\partial l} \quad (\text{Eq. 2.10})$$

Todd (1959) afirma que um meio poroso pode ter permeabilidade variável conforme a direção do fluxo, permeabilidade essa denominada de anisotrópica. As componentes da velocidade podem ser dadas por

$$v_x = K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, \quad v_y = K_{yx} \frac{\partial h}{\partial y} \quad \text{e} \quad v_z = K_{zx} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (\text{Eq. 2.11})$$

onde K_x , K_y e K_z são os coeficientes de permeabilidade nas direções x , y e z , respectivamente. A velocidade em qualquer ponto do aquífero pode ser tomada como a soma vetorial dos vetores-velocidade componentes. Simplificando o tratamento matemático, os aquíferos são considerados homogêneos com permeabilidade isotrópica. Daí:

$$v_x = K_x \frac{\partial h}{\partial x}, \quad v_y = K_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad e \quad v_z = K_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (\text{Eq. 2.12})$$

Segundo Todd (1959), a existência de um potencial de velocidade ($\alpha = k \times h$) implica que o fluxo seja irrotacional, tal que a derivada negativa desse potencial em relação a qualquer direção é a velocidade no fluido naquela direção. Assim:

$$v_x = - \frac{\partial \alpha}{\partial x}, \quad v_y = - \frac{\partial \alpha}{\partial y} \quad e \quad v_z = - \frac{\partial \alpha}{\partial z} \quad (\text{Eq. 2.13})$$

Se considerarmos o fluxo for permanente, todos os escoamentos de água subterrânea devem satisfazer à equação da continuidade, que, de forma geral, pode ser apresentada como

$$- [\frac{\partial(\rho_x v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_y v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_z v_z)}{\partial z}] = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (\text{Eq. 2.14})$$

Onde ρ é a massa específica do fluido. No fluxo permanente não há variação de condições em relação ao tempo, e, considerando a água como fluido incompressível, ρ é uma constante. Logo:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (\text{Eq. 2.15})$$

Levando em consideração o fluxo irrotacional, resulta a equação de Laplace:

$$\frac{\partial^2 \alpha}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \alpha}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \alpha}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{Eq. 2.16})$$

Substituindo α por $-K_x h$, temos:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{Eq. 2.17})$$

Equação essa geral para derivadas parciais para escoamento permanente em meio isotrópico e homogêneo.

De acordo com Todd (1959), se o fluxo não for permanente, considera-se o coeficiente de armazenamento S . Ele é uma medida da compressibilidade β do aquífero.

$$\beta = -\partial V/V/\partial P \quad (\text{Eq. 2.18})$$

Onde V é o volume e P é a pressão, podendo ser avaliada a partir da variação dentro da coluna de área unitária da seção transversal, estendendo-se para cima através de um aquífero confinado. Admite-se uma força compressiva na vertical sobre uma vasta área, de forma que as variações na direção horizontal sejam desprezíveis. Quando a superfície piezométrica cai de uma distância unitária, a quantidade de água aliviada da coluna pela variação da pressão é S ; logo, $S = \partial V$. O volume da coluna de aquífero é $V = 1 \times b = b$, sendo b a espessura do aquífero. A variação da pressão é $\partial P = -\gamma \times 1 = -\gamma$, onde γ é o peso específico do aquífero.

$$\beta = S/(\gamma \times b) \quad (\text{Eq. 2.19})$$

Para um material elástico,

$$\partial V/V = -\partial r_o/r_o \quad (\text{Eq. 2.20})$$

que, quando combinada com a equação 2.18, fornece

$$\partial r_o = r_o \beta \times \partial P \quad (\text{Eq. 2.21})$$

e substituindo-se β pelo seu valor equivalente na equação 2.19, temos

$$\partial r_o = r_o S \times \partial P/(\gamma \times b) \quad (\text{Eq. 2.22})$$

Introduzindo esta expressão na equação 2.14, temos

$$- [\partial(r_o v_x)/\partial x + \partial(r_o v_y)/\partial y + \partial(r_o v_z)/\partial z] = r_o S \times \partial P/(\gamma \times b \times \partial t) \quad (\text{Eq. 2.23})$$

Sendo ρ constante, temos

$$K_x (\partial^2 h / \partial x^2 + \partial^2 h / \partial y^2 + \partial^2 h / \partial z^2) = S_x \partial P / (\gamma_x b_x \partial t) \quad (\text{Eq. 2.24})$$

Substituindo $P = \gamma_x h$, temos

$$\partial^2 h / \partial x^2 + \partial^2 h / \partial y^2 + \partial^2 h / \partial z^2 = (S_x / (K_x b_x)) (\partial h / \partial t) \quad (\text{Eq. 2.25})$$

Esta equação é a que governa o fluxo não permanente de água em um aquífero confinado compressível de espessura b . A equação correspondente para um aquífero não confinado tem uma forma não linear, que torna impossível uma solução direta. No entanto, a equação 2.25, por aproximação, pode ser aplicada a aquíferos não confinados onde as variações na espessura saturada b sejam relativamente pequenas.

2.6. MODELAGEM EM AQUÍFEROS ALUVIAIS

Segundo Vieira (2002), o planejamento e o gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos dependem da quantificação do fluxo d'água nos aquíferos.

Cleary (1989) e Vieira (2002) dizem que, essa quantificação pode ser feita de várias maneiras, incluindo-se em campo e modelação matemática. A abordagem em campo é mais direta e mais acurada. Porém, ela é raramente utilizada devido aos altos custos ou à sua inaplicabilidade quando, por exemplo, um projeto ainda não foi executado e não pode fornecer dados. Já a abordagem matemática é a mais utilizada, com o aumento na disponibilidade de computadores, sendo a modelação matemática uma ferramenta altamente atualizada de avaliação. Como o próprio nome indica, modelo é uma representação de uma realidade física. Os primeiros modelos de águas subterrâneas apareceram nos anos 1950 em pequenas caixas de areia ou placas paralelas de vidro, entre as quais o fluido viscoso simulava o fluxo subterrâneo.

De acordo com Zhou & Li (2011), os modelos de sistemas de águas subterrâneas desempenham um papel importante na gestão e no desenvolvimento dos recursos hídricos subterrâneos e na previsão de efeitos das medidas de gestão. Com o avanço na computação e aumento na disponibilidade de computadores e softwares, a modelagem tem se tornado a ferramenta padrão para os hidrogeólogos realizarem de maneira eficaz a maioria das tarefas.

Os modelos de fluxo subterrâneo têm sido utilizados para: a) investigar a dinâmica do sistema de águas subterrâneas e o padrão de fluxo, b) analisar as respostas do fluxo a partir das interferências no sistema, como a exploração realizada por poços, c) avaliar o armazenamento, a descarga e a recarga, e quantificar a produção sustentável, d) prever impactos e condições das atividades humanas, e) dar suporte durante a coleta de dados e projetar soluções práticas, f) avaliar os cenários do desenvolvimento das águas subterrâneas, g) avaliar alternativas políticas, e h) comunicar os resultados ao público e aos tomadores de decisão.

Burte et al. (2009) enfatizam a importância da modelagem computacional, principalmente em aquíferos no semiárido nordestino, especialmente em prol do uso da água para irrigação e abastecimento doméstico.

Um sistema de modelos computacionais utilizados (ou modelo) para simular o fluxo de água subterrânea em meios porosos é o Modflow, que é o modelador do sistema PMWIN – *Processing Modflow for Windows* (sistema esse formado por diversos programas para modelamento de fluxo de água subterrânea e processos de transporte que utiliza o Método das Diferenças Finitas). O Modflow tem como base o código numérico MODFLOW, desenvolvido por MacDonald&Harbaugh (1984) do USGS (Serviço Geológico dos Estados Unidos). De acordo com Chiang (2005), muitos códigos, que são muitas vezes chamados de pacotes, modelos ou às vezes programas, têm sido desenvolvidos para serem usados com o MODFLOW. Cada pacote, que é integrado com esse código, lida com uma característica específica do sistema hidrológico a ser simulado. Dentre os pacotes, o *Time-Variant Specified Head* é desenvolvido para permitir que as células de carga hidráulica constante assumem valores diferentes a cada período de tempo. Um modelo ou programa não está incorporado no MODFLOW, mas se comunica com o mesmo a partir de arquivos de dados. Dentre os modelos, o *PMPATH* é o modelo de transporte para o cálculo e geração das linhas de fluxo subterrâneo. Esse programa utiliza o rastreamento de partículas em regime semi-analítico para calcular os caminhos das águas e os tempos de viagem.

Segundo Zhou& Li (2011) e Braga (2014), o Modflow, por sua estrutura computacional flexível e sendo a mais completa cobertura dos fenômenos hidrogeológicos e de uso livre, torna-se o modelo padrão sendo largamente utilizado até hoje, devida às progressivas atualizações. Para Braga (2014), as aplicações do Modflow buscam subsidiar para a melhoria da gestão dos recursos hídricos.

Como os aluviões são mais acessíveis para a exploração de suas águas, têm sido realizadas modelagens nesses aquíferos, como nos trabalhos a seguir.

Martinez-Santos et al. (2010) geram o modelo em Modflow, avaliando a distribuição espacial das taxas de recarga pluvial, baseando-se em campanhas de campo (incluindo testes de bombeamento e piezometria) abrangentes no aluvião em Langreo, na Espanha.

Burte et al. (2011) analisam a contribuição das características físicas (piezometria), geoquímicas e de modelos (balanço hidrológico e de massa) numa microbacia no centro da área cristalina no semiárido cearense para avaliar a disponibilidade de água para irrigação.

Zume&Tarhule (2011) realizam a modelagem em Modflow em 3D para simular em 4 (quatro) cenários as interferências do bombeamento de 131 (cento e trinta e um) poços e da recarga pluvial no aquífero aluvial no noroeste de Oklahoma.

Rêgo (2012) investiga, com o uso do Modflow, a reação do sistema aquífero aluvial ao longo do trecho do rio Piranhas-Açu no município de Catolé do Rocha – PB às várias medidas de gestão dos recursos hídricos já adotadas na região.

Yang (2012) desenvolve o modelo em Modflow para simular o fluxo de água subterrânea no aluvião ao longo do rio Arkansas de 1959 a 2005.

Kirby et al. (2015) investigam o impacto das atividades de irrigação em um aluvião em Bangladesh, utilizando o modelo de balanço hídrico.

De acordo com MacDonald&Harbaugh (1984), o movimento tridimensional da água subterrânea de densidade constante em meio poroso pode ser expresso por

$$((\partial/\partial x) \times (K_{xx} \times \partial h/\partial x)) + ((\partial/\partial y) \times (K_{yy} \times \partial h/\partial y)) + ((\partial/\partial z) \times (K_{zz} \times \partial h/\partial z)) - W = S_e \times \partial h/\partial t$$

(Eq. 2.26)

onde:

- x, y e z são coordenadas cartesianas alinhadas pertencentes aos eixos das condutividades hidráulicas K_{xx} , K_{yy} e K_{zz} ;
- h é a carga potencial (L);
- W é o fluxo volumétrico por unidade de volume (t^{-1});
- S_e é o armazenamento específico do material poroso (L^{-1});
- t é o intervalo de tempo (t).

Esta equação é válida para a condição de não equilíbrio em meio heterogêneo e anisotrópico, constituindo um modelo matemático de fluxo subterrâneo.

A solução desta equação é uma expressão algébrica $h(x,y,x,t)$; quando as derivadas de h em função do espaço e do tempo são substituídas nesta equação, as condições iniciais e as

de contorno são satisfeitas. A distribuição de carga caracteriza o sistema de fluxo, que mede a energia de fluxo e o volume de água armazenado e pode-se calcular as taxas de circulação e determinar as direções de fluxo.

Já para sistemas muito simples, são necessários vários métodos de aproximação, sendo que um deles é o método das diferenças finitas. Esse método substitui o sistema representado na equação diferencial por um conjunto finito de pontos discretos no tempo e no espaço, e as derivadas parciais são substituídas por diferenças entre os valores funcionais desses pontos. Ou seja, segundo Kinzelbach (1986) e Vieira (2002) esse método substitui a equação diferencial parcial do fluxo por um conjunto de equações diferenciais discretizadas no tempo e no espaço.

Conforme MacDonald&Harbaugh (1984), o análogo das diferenças finitas da equação 2.26 pode ser utilizado para simplificar o tratamento matemático e explicar o procedimento computacional em termos de conceitos físicos em relação ao sistema de fluxo.

2.7. MANEJO DAS ÁGUAS DOS AQUÍFEROS ALUVIAIS

Para preservar a potencialidade hídrica do aluvião em estudo, deve-se propor e aplicar as estratégias de manejo de seus recursos hídricos de modo a não prejudicar nem os próprios usuários nem os do trecho à jusante.

Alguns trabalhos realizados nos últimos dez anos apresentam alternativas de manejo sustentável das águas subterrâneas, especificamente dos aquíferos aluviais.

Yang et al. (2006) concluíram, a partir de testes de irrigação e aplicação de um software de modelagem matemática, que a solução para minimizar o esgotamento de água subterrânea é economizar água, sem reduzir a área a ser irrigada, isto é, cada proprietário realizar uma irrigação planejada com manejo adequado.

Ambast et al. (2006) propõem, a partir de experimentos em campo, a recarga artificial e as práticas adequadas de gestão de água e terra para estabilizar o nível do lençol freático.

Ashraf et al. (2007) estudam o impacto de três pequenas barragens submersas na agricultura e no desenvolvimento das águas subterrâneas e fornece orientações para o uso eficaz e sustentável das pequenas barragens no Paquistão, para que a quantidade de água armazenada seja suficiente para alimentar todas as terras de cultivo na área a ser irrigada. Observa-se que, com a construção das barragens, a profundidade do nível do lençol freático é

reduzida, tornando a água subterrânea mais acessível, intensificando a instalação de poços e o cultivo. A área só poderá ser expandida se as técnicas de irrigação e práticas agronômicas inovadoras minimizando desperdícios forem adotadas.

Burte et al. (2011) propõem o manejo integrado das águas superficiais e subterrâneas, para controlar a qualidade da água para irrigação, especialmente se a água é recuperada de poços rasos perto do leito do rio, racionalizando o uso do reservatório e minimizando as perdas por evaporação.

Rêgo (2012), a partir dos resultados da investigação da reação do aquífero aluvial realizada pelo Modflow, estabelece três medidas de gestão sustentável de importância primordial, tais quais: o armazenamento de águas superficiais acima dos aluviões, para aumentar e controlar a entrada dessas águas, a construção e a operação de barragens submersas para retardar as saídas de água subterrânea, e uma adequada distribuição espacial de poços.

Devido ao conhecimento insuficiente da disponibilidade hídrica subterrânea e da sustentabilidade do uso, Kirby et al. (2015) desenvolvem saldos mensais de água para as principais regiões de Bangladesh para investigar as tendências históricas no uso da água e na disponibilidade e possíveis tendências futuras para reduzir o uso das águas subterrâneas na irrigação e utilizar mais as águas superficiais. Os resultados mostram que, em muitas áreas, a queda dos níveis de água subterrânea resulta da retirada de grandes volumes para o uso e do aumento área a irrigar. Se não houvesse o aumento da área a irrigar, o declínio dos níveis d'água sofreria uma queda e os níveis estariam em regime de equilíbrio. Logo, as taxas de bombeamento poderiam ser mantidas. Os níveis das águas subterrâneas são dependentes da variação da precipitação anual. Assim, a utilização das águas subterrâneas em algumas áreas pode não ser tão insustentável e as políticas para redução do seu uso pode não ser tão urgente.

CAPÍTULO 3 - CASO DE ESTUDO

O município de Sumé é localizado no Semiárido Brasileiro, na região semiárida no Cariri Paraibano, microrregião do Cariri Ocidental, na bacia hidrográfica do rio Sucuru. Sua altitude média em relação ao nível do mar é de 533 m, com a seguinte posição geográfica: 7°40'13" de latitude sul e 36°52'58" de longitude oeste, de acordo com Serpec-Expocaatinga (2015).

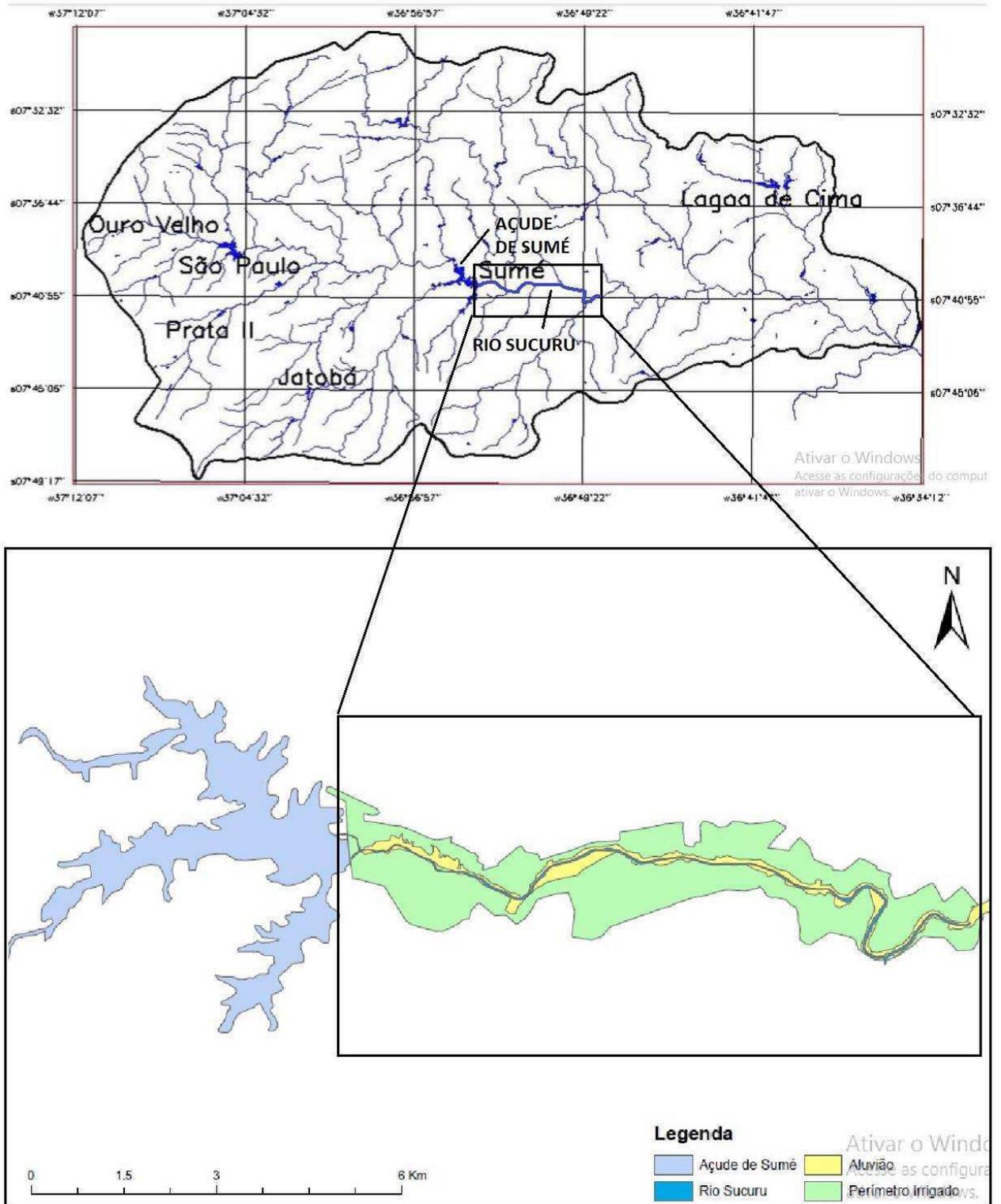
De acordo com Dantas Neto et al. (2013), no trecho da bacia do rio Sucuru, ao longo desse rio, a leste do Açude de Sumé, foi implantado pelo Departamento Nacional de Obras Contra a Seca (DNOCS) o Perímetro Irrigado, em 1976, em solos predominantemente Aluvial Eutrófico e Bruno não Cálcico, havendo em alguns pontos afloramentos rochosos e típicos e solos Litólicos.

Segundo Pontes et al. (2013), o que justifica a implantação desse Perímetro assim como outros é a estratégia geopolítica de expansão seletiva das fronteiras agrícolas, na perspectiva da indução do desenvolvimento social e econômico. De acordo com os mesmos autores, esse Perímetro Irrigado assim como outros foram delimitados pelo Estado para implantação de projetos públicos de agricultura irrigada que, em geral, possuem grande potencial agriculturável, com solos férteis, presença hídrica, clima favorável e abundante força de trabalho. Esses elementos unidos com a infraestrutura implementada (canais, por exemplo) favorecem ampla produtividade agrícola.

No início, o Perímetro era abastecido pelo açude de Sumé. No entanto, de acordo com Alencar et al. (2013), devido às baixas pluviosidades, aliadas ao regime irregular de chuvas e altas taxas de evaporação, por falta de vegetação ciliar ao reservatório de Sumé, assim como em outros na bacia do rio Sucuru, o açude de Sumé foi esvaziando. Outra causa significativa desse esvaziamento, de acordo com Vieira (2002), foi a gestão sem um manejo e controle adequado e insustentável das águas desse açude.

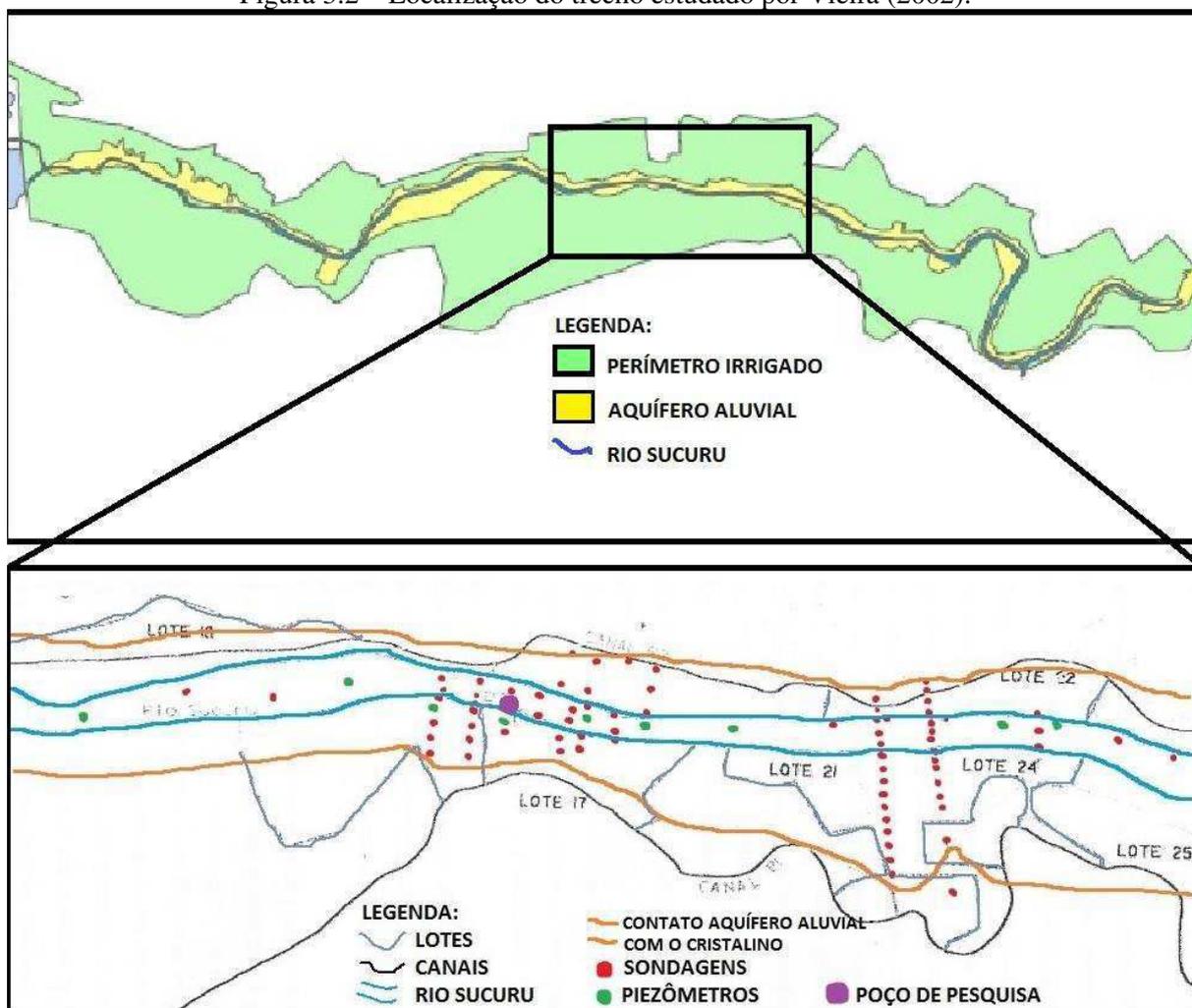
Com esse esvaziamento, o Perímetro foi desativado, fragilizando a economia local. Para reativar pelo menos parte do Perímetro, restou aos irrigantes o abastecimento a partir da captação da água subterrânea do aquífero aluvial existente ao longo do trecho do rio Sucuru. (ver Figura 3.1).

Figura 3.1 – Perímetro Irrigado na bacia do rio Sucuru.



Diante disso, Vieira (2002) estudou o aquífero e aplicou um modelo matemático como base para exploração das águas desse aquífero, no trecho escolhido (após estudos em campo).(ver Figura 3.2)

Figura 3.2 – Localização do trecho estudado por Vieira (2002).



Esse trecho foi selecionado, pois apresenta: maior profundidade do pacote aluvial, ausência de afloramento cristalino na área interna do aluvião e maior número de dados disponíveis a partir de sondagens realizadas, medições de nível d'água e determinação dos parâmetros hidráulicos com o poço de pesquisa.

A partir desse modelo, Vieira (2002) realizou a simulação, a partir do software Modflow, do fluxo subterrâneo para definir alternativas para exploração das águas desse aquífero.

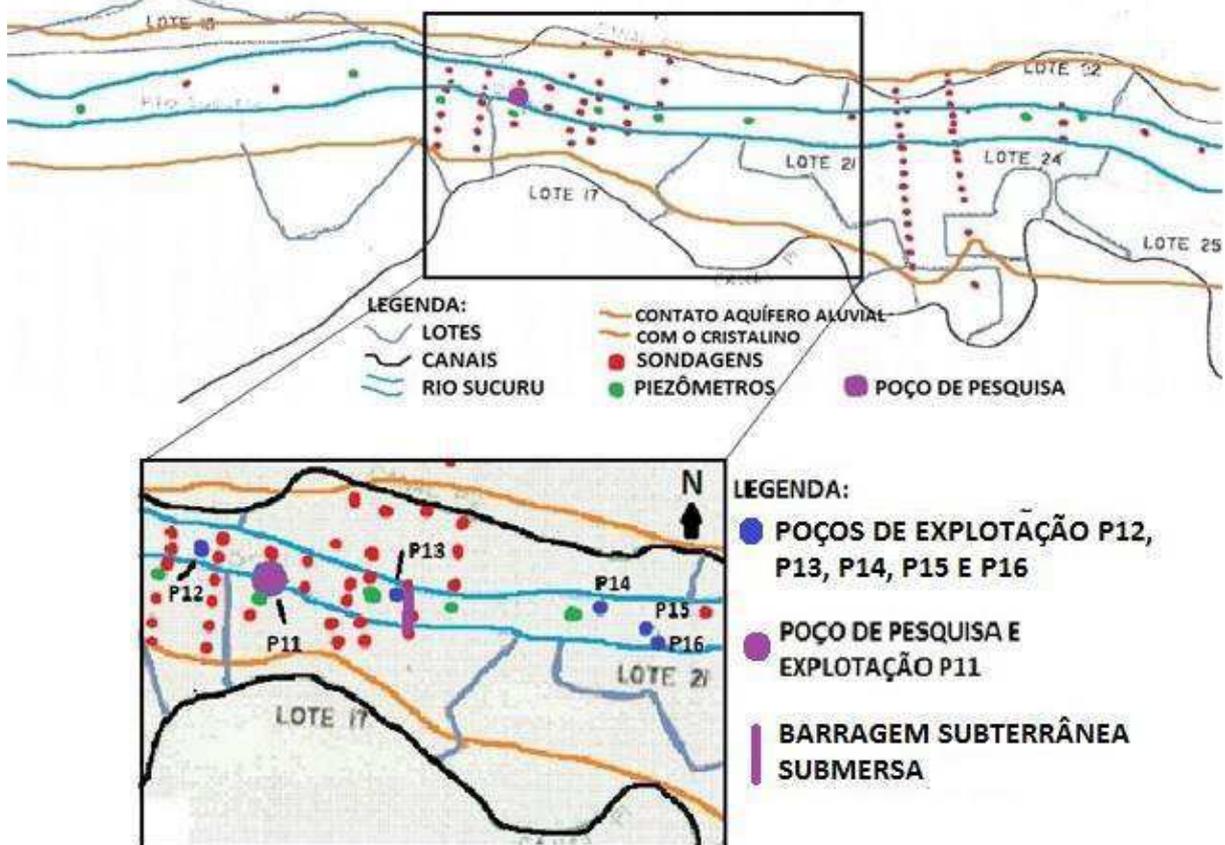
Diante disso, o desenvolvimento desta dissertação ressalta a importância de obter as informações do aquífero aluvial e do uso das águas desse aquífero em um trecho específico selecionado por Vieira (2002). Uma vez que, segundo Dantas Neto et al. (2013), o Perímetro Irrigado foi reativado e atualmente ocupa 700 (setecentos) hectares.

CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Após visitas em campo e análises do mapa do trecho do Perímetro Irrigado, a área de estudo selecionada para a modelagem correspondeu a uma zona retangular com 720 (setecentos e vinte) m na horizontal e 480 (quatrocentos e oitenta) m na vertical, mostrando o trecho do Perímetro Irrigado às margens do rio Sucuru, os pontos das sondagens realizadas por Vieira (2002), o contorno do aluvião, os seis poços amazonas nele contidos, além de uma barragem subterrânea submersa, construída depois de 2002. Nessa área há um maior número de informações coletadas em trabalhos de sondagem e coleta dos dados - incluindo o comprimento da barragem submersa (33 m) - que ocupa toda a espessura aluvial, atingindo o embasamento cristalino. (ver Figura 4.1)

Figura 4.1 – Área de estudo selecionada e imagem a ser inserida no modelo.



4.2. CONSTRUÇÃO DO MODELO

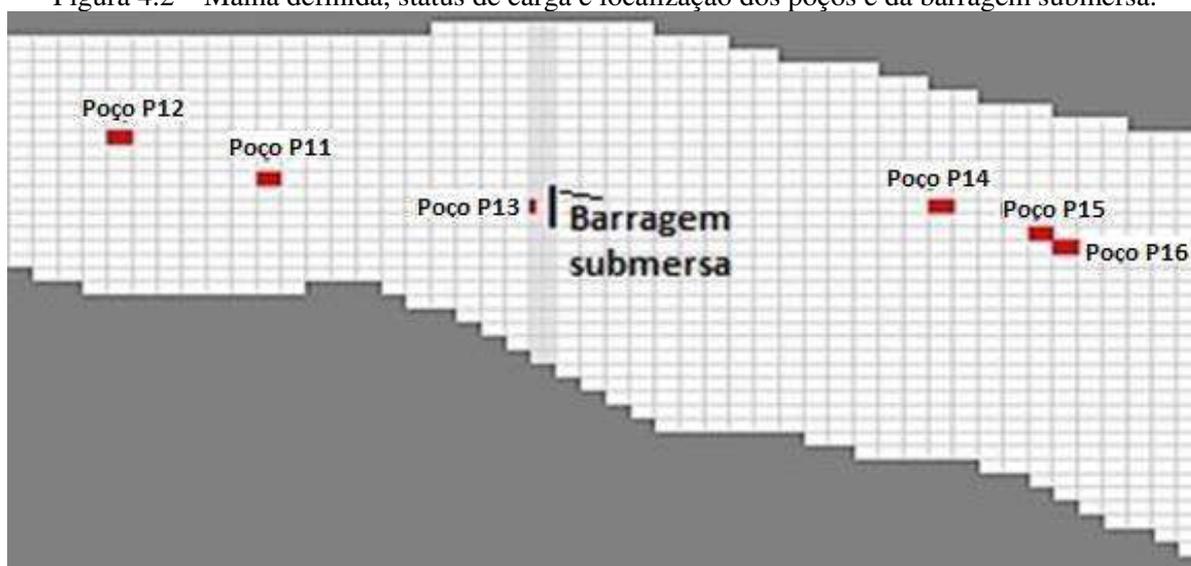
A partir dessa área definida e das características apresentadas e informações coletadas em campo, é realizada a modelagem matemática em todo o trecho com o uso do software PMWIN 7.0.31 – *ProcessingModflow for Windows* - Modflow PM5, com o modelador Modflow. Escolhe-se o pacote BlockCenteredFlow (BCF), com o método de célula a célula, para melhor visualização e percepção mais precisa e próxima da realidade.

4.2.1. Definição da malha

Define-se uma malha com apenas uma camada, apresentando 48 linhas com 48 células retangulares de dimensões de 15 m na horizontal por 10 m na vertical, pois a espessura do trecho aluvial é, em média 4,25 m, de acordo com Vieira (2002), não sendo relevante em relação à sua extensão.

Define-se que a malha ocupe todo o espaço da janela em branco do programa, para melhor visualização da área. Com a imagem inserida, localiza-se a barragem submersa, selecionando a coluna onde se encontra. Divide-se essa coluna em cinco colunas de células ao longo dessa barragem para sua melhor visualização, com dimensões de três metros na horizontal por 10 m na vertical (ver Figura 4.2).

Figura 4.2 – Malha definida, status de carga e localização dos poços e da barragem submersa.



4.2.2. Condições de contorno e período de simulação

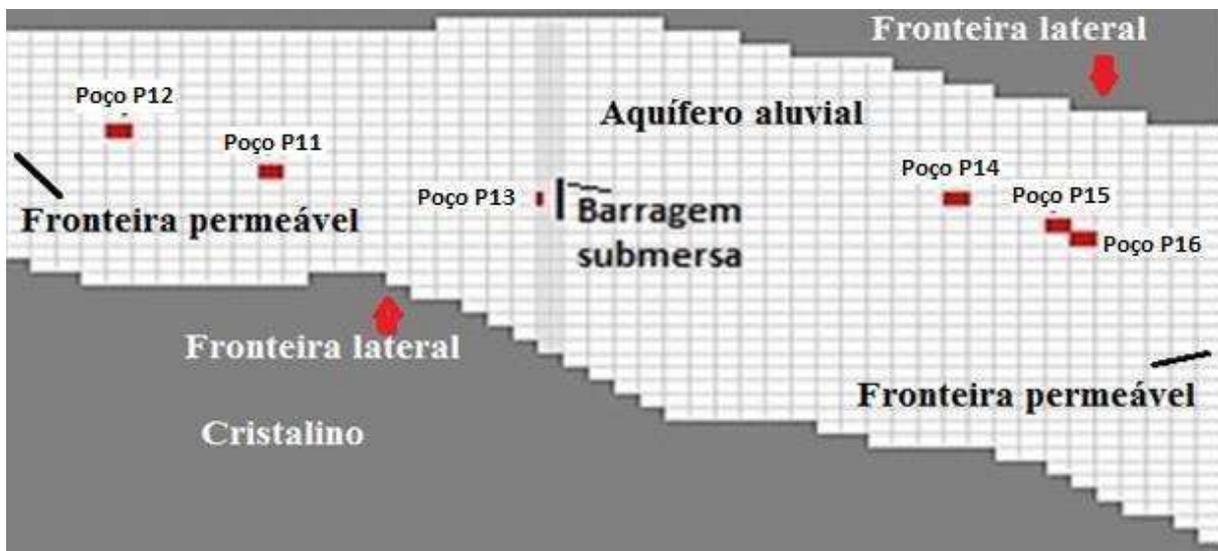
Assegura-se que, o aquífero aluvial é:

- livre, por sua superfície superior ser permeável à penetração de água proveniente da precipitação;
- homogêneo, por ser predominantemente Aluvial Eutrófico e Bruno não Cálxico;
- isotrópico, pois o fluxo tem mesma velocidade nas duas direções em projeção sobre o terreno.

De acordo com a classificação de Neumann que, as fronteiras laterais são definidas pelo contato aquífero aluvial -cristalino, onde as células situadas no cristalino recebem o status de inativas, pois não há fluxo. Enquanto que as situadas no aquífero aluvial recebem o status de ativas, já que há fluxo.

A recarga proveniente de uma das fronteiras permeáveis é considerada, assim como a ocorrência de fluxo atravessando a outra fronteira(ver Figura 4.3).

Figura 4.3 – Condições de contorno.

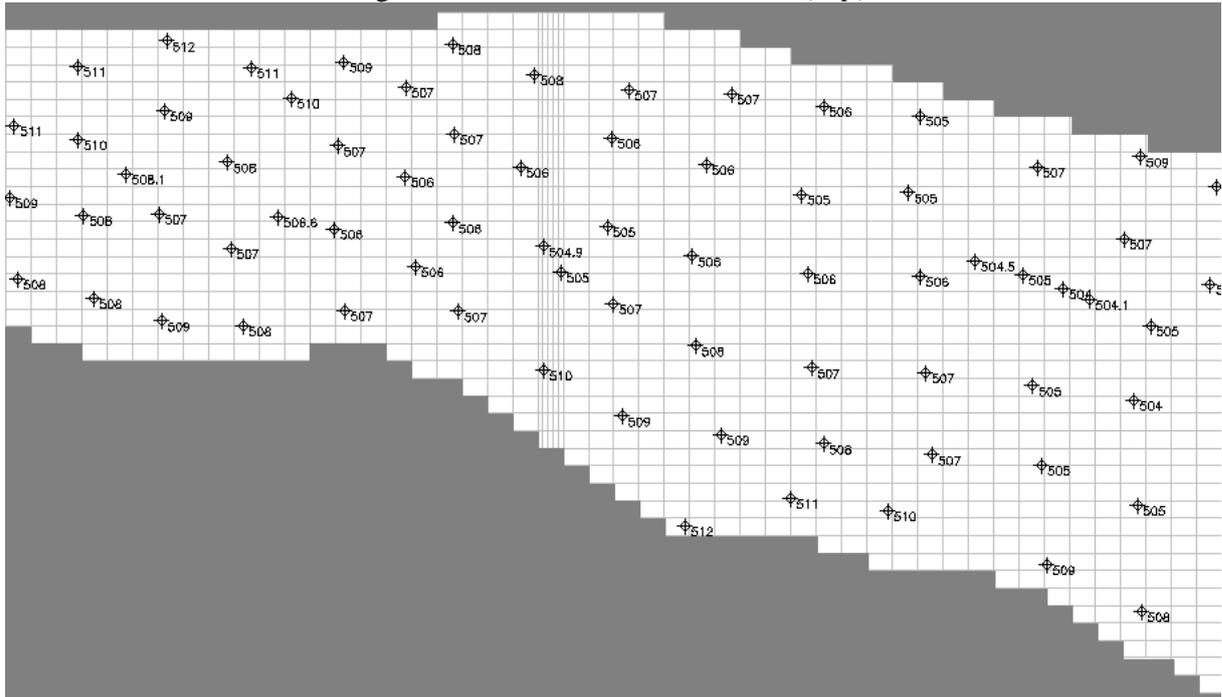


Define-se o tempo de simulação no regime de fluxo transiente com seis períodos de estresse ou de simulação de 15 dias, durante três meses de um período crítico ou de estiagem no ano de 2015. Foi decidido adotar esse intervalo de três meses, pois é a duração aproximada de um ciclo agrícola. Esse tempo de 15 dias é o intervalo entre as coletas dos níveis d'água nos poços realizadas em campo.

4.2.3. Cotas do terreno e do embasamento cristalino

São definidas as cotas do nível do terreno a partir da interpolação com os dados provenientes do Google Earth em malha de pontos enfileirados distantes entre si aproximadamente a 30 m em toda a área ocupada pelo aluvião (ver Figura 4.4).

Figura 4.4 - Cotas do nível do terreno (*Top*).



As cotas do embasamento cristalino são definidas a partir de dados de sondagens realizadas, inclusive nos poços P12 e P13, que são totalmente penetrantes, cuja profundidade é igual à diferença entre a cota do terreno e a cota do embasamento cristalino. Além disso, considera-se que os poços P11, P14, P15 e P16, onde não foram realizadas as sondagens, são também totalmente penetrantes. São realizados ajustes em alguns dados de forma a representar melhor a seção transversal do aluvião, cujo perfil, formado a partir da deposição de sedimentos carregados pelo curso d'água, apresenta profundidade maior próximo à projeção leito do rio e a mesma vai diminuindo à medida que aumenta a distância em relação à mesma. As cotas do embasamento cristalino referentes aos poços e às sondagens são interpoladas juntamente com os pontos estabelecidos para o ajuste do formato da seção transversal do modelo.

4.2.4. Cargas hidráulicas

As cargas hidráulicas em regime estático (h_i) ao longo do aluvião são definidas a partir da interpolação com as cargas hidráulicas dos poços existentes (quando não estão sendo bombeados) obtidas como a diferença entre a cota do terreno em cada poço (c_{ti}) e a profundidade do nível d'água em cada poço (n_{oi}) (ver equação 4.1).

$$h_i = c_{ti} - n_{oi} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Essas leituras foram realizadas a cada quinze dias, de 22/04/2015 a 13/07/2015, com o uso de medidor manual de nível d'água em poços, com exceção do período entre a 3ª (terceira) coleta (realizada em 20/05/2015) e a 4ª (quarta) coleta (realizada em 13/06/2015) (ver Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Cargas hidráulicas em regime estático em cada poço (h_i) em 2015.

Poços	Data da coleta					
	22/04/15	07/05/15	20/05/15	15/06/15	29/06/15	13/07/15
11	501,97 m	501,85 m	502,09 m	501,58 m	501,42 m	501,35 m
12	504,91 m	504,77 m	504,70 m	504,56 m	504,51 m	504,53 m
13	502,61 m	502,23 m	--	502,91 m	501,70 m	501,36 m
14	502,88 m	502,33 m	502,48 m	502,33 m	502,19 m	501,81 m*
15	--	500,99 m	502,17 m	499,81 m*	500,91 m	501,58 m
16	501,09 m	--	500,85 m	500,28 m	500,42 m	500,46 m

* Cargas hidráulicas logo após o bombeamento.

As Figuras 4.5 a 4.10 mostram o gráfico das cargas hidráulicas (h_i) em cada poço em função do tempo.

Figura 4.5 – Gráfico das cargas hidráulicas (h_i) no poço P11 em função do tempo em 2015.

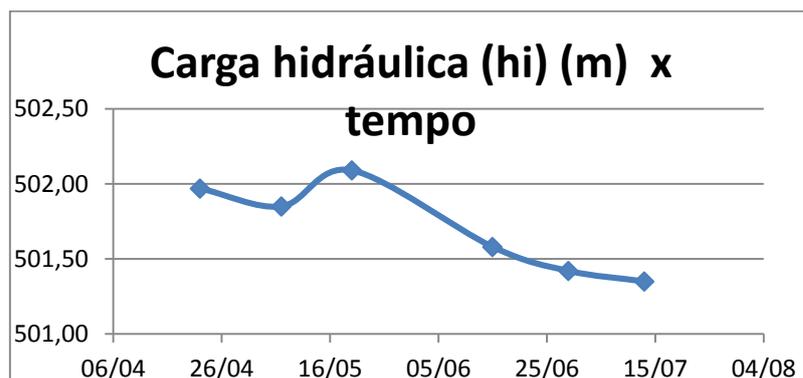


Figura 4.6 – Gráfico das cargas hidráulicas (h_i) no poço P12 em função do tempo em 2015.

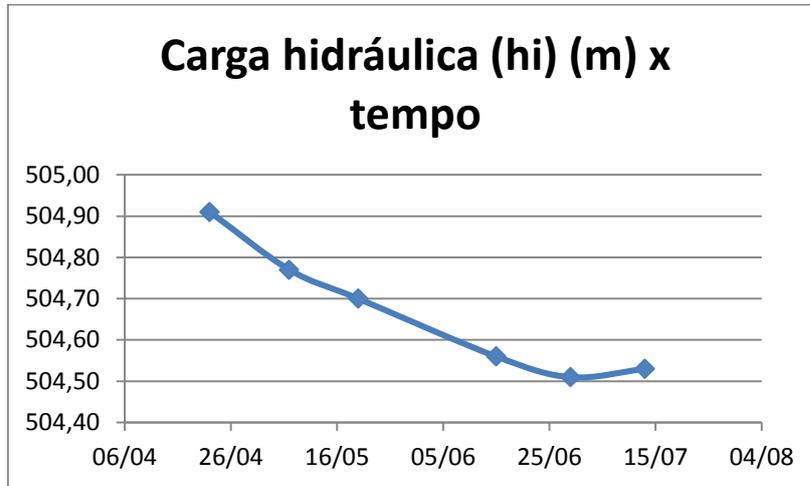


Figura 4.7 – Gráfico das cargas hidráulicas (h_i) no poço P13 em função do tempo em 2015.

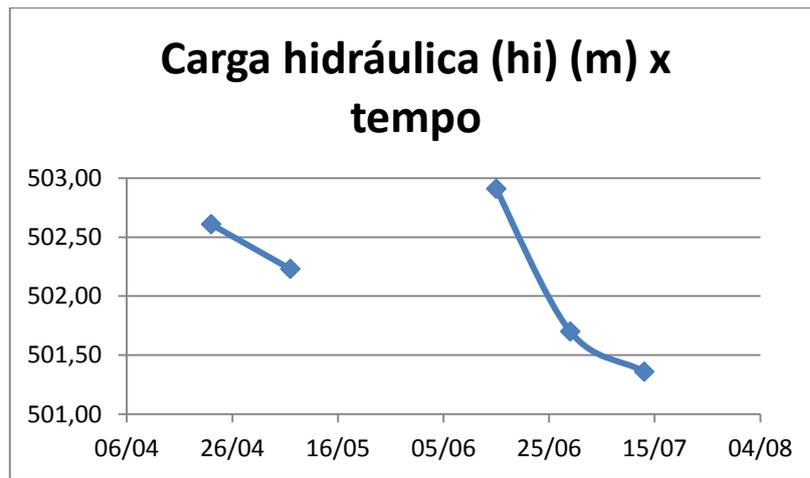


Figura 4.8 – Gráfico das cargas hidráulicas (h_i) no poço P14 em função do tempo em 2015.

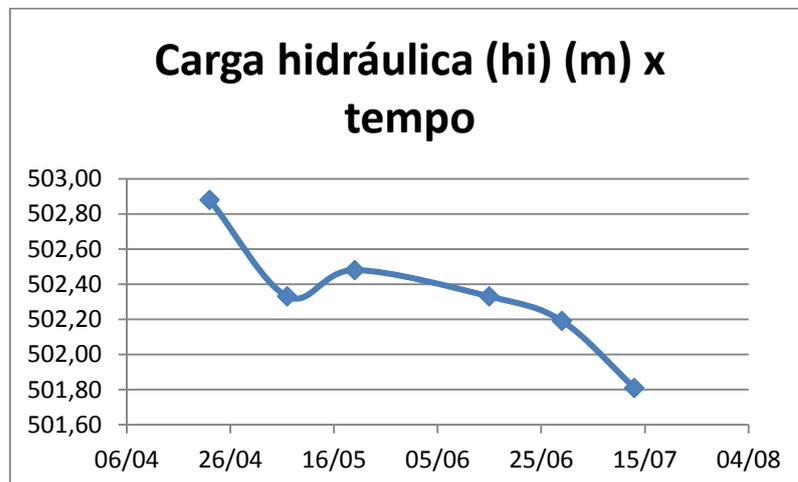


Figura 4.9 – Gráfico das cargas hidráulicas (h_i) no poço P15 em função do tempo em 2015.

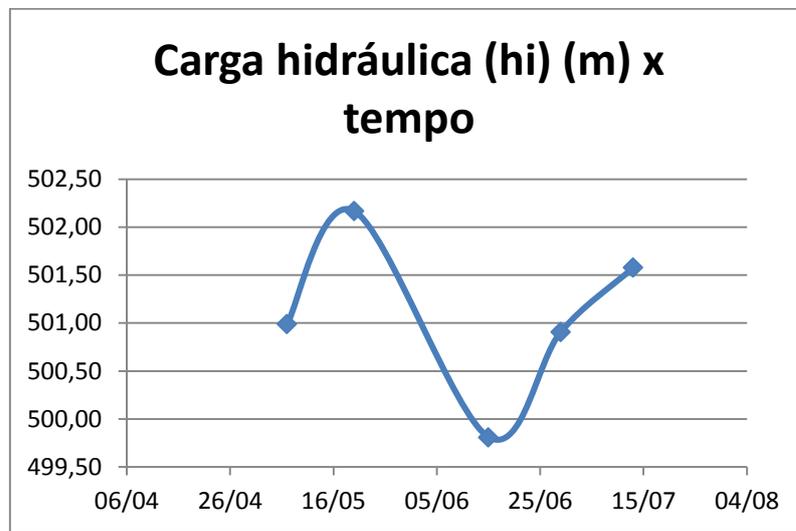
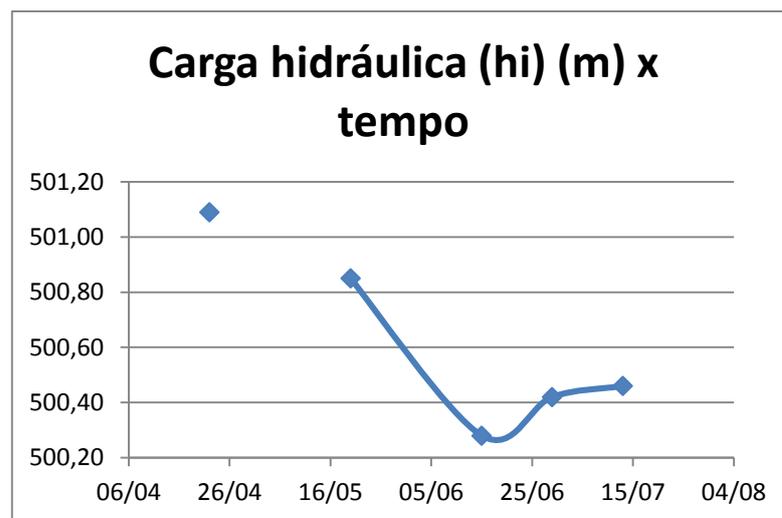


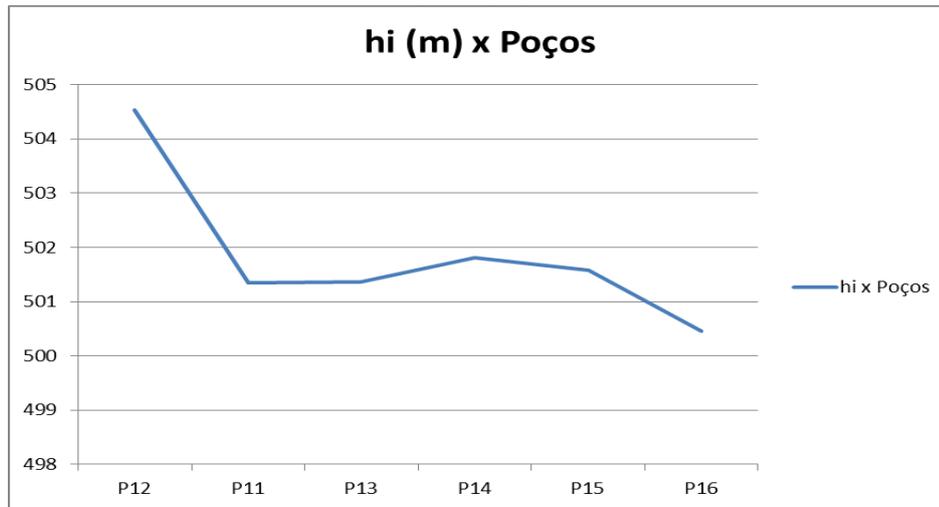
Figura 4.10 – Gráfico das cargas hidráulicas (h_i) no poço P16 em função do tempo 2015.



Observa-se uma redução do valor da carga hidráulica em cada poço ao longo do tempo, pois os períodos de ausência de bombeamento são muito curtos em relação aos de bombeamento. O que explica a descontinuidade nos gráficos das Figuras 4.7 e 4.10 é a ausência de valor da carga hidráulica, pois o nível d'água do poço P13 em 20/05/2015 não estava em regime estático.

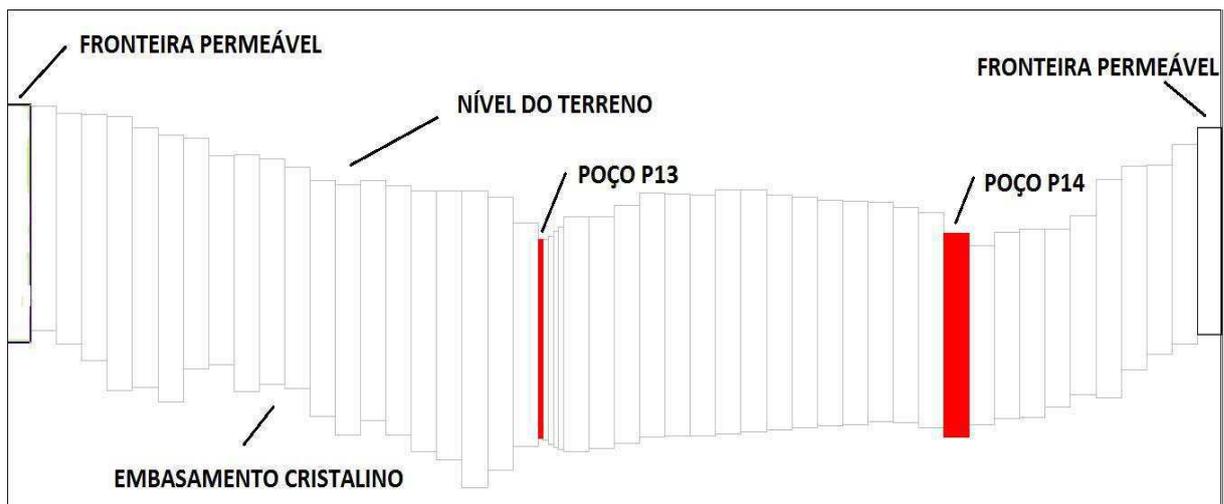
A Figura 4.11, a seguir, apresenta o gráfico das cargas hidráulicas em cada poço em uma das coletas realizadas.

Figura 4.11 – Gráfico das cargas hidráulicas em regime estático em cada poço (h_i) na coleta em 13/07/2015.



Observa-se que nos poços P11 e P13 a carga hidráulica é inferior à dos poços P14 e P15, pois, em alguns minutos antes da coleta, o bombeamento nos poços P11 e P13 foi encerrado e, conseqüentemente, no momento da coleta os níveis d'água estavam em regime dinâmico, ou seja, em transição recuperando o nível estático. Além disso, é observado o fluxo esperado para o modelo a ser construído, que é do poço P12 ao P16, devido ao perfil longitudinal na seção mais próxima à maioria dos poços, apresentado na Figura 4.12 a seguir.

Figura 4.12 – Perfil longitudinal do aquífero aluvial na seção mais próxima à maioria dos poços.

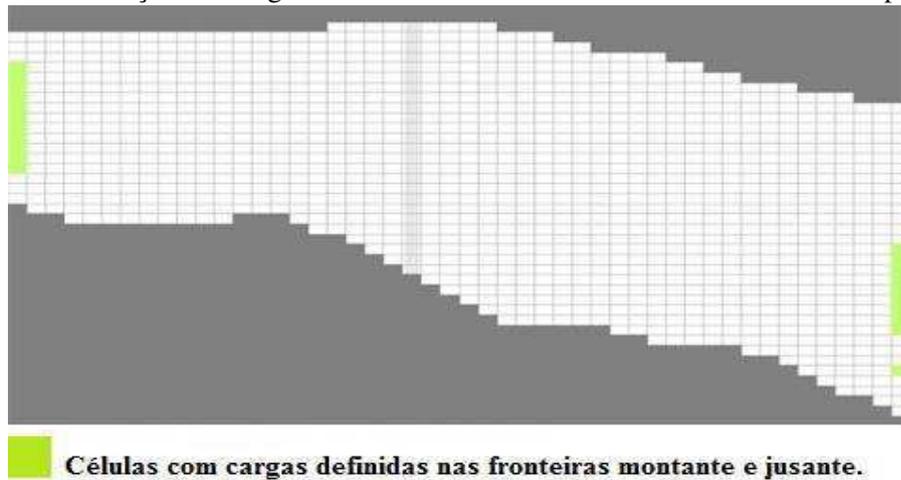


A maioria das cotas mais altas do embasamento cristalino se encontra a montante do poço P13.

4.2.5. Cargas hidráulicas nas fronteiras permeáveis

Nas fronteiras montante e jusante nas células ativadas são definidas as cargas hidráulicas constantes durante 1 (um) período de simulação e que mudam de um período a outro. Antes de defini-las, é verificado se a carga hidráulica na célula é maior que a cota do embasamento cristalino. Caso contrário, essa carga não é considerada, dando a entender que a célula está seca. (ver Figura 4.13).

Figura 4.13 – Definição das cargas hidráulicas constantes nas células nas fronteiras permeáveis.



4.2.6. Parâmetros

Estabelece-se o valor da condutividade hidráulica horizontal (K_h), com valor de $7,87 \times 10^{-4}$ m/s determinado durante teste de produção no poço de pesquisa realizado por Vieira (2002) após a calibração nesse teste no mesmo poço (P11). Decidiu-se estabelecer o valor da condutividade hidráulica horizontal (K_h), diferente do valor atribuído por Vieira (2002), apenas ao longo da barragem submersa em três células. Esse valor foi atribuído pelo autor deste trabalho e é de $2,31 \times 10^{-6}$ m/s, pois a barragem foi construída em lona. Em seguida, esses valores são convertidos em m/dia (69 m/dia e 0,2 m/dia).

Também são estabelecidos: o valor da porosidade eficaz (η_e), com valor de 0,10 determinado por Vieira (2002) após a calibração, e o valor do rendimento específico (r_e), que é o mesmo da porosidade eficaz, visto que o aquífero é freático.

4.2.7. Cálculo das demandas

Ao realizar-se o diagnóstico do atual uso da água subterrânea nos meses de maio a julho – meses com menor precipitação – são coletados os valores das vazões de trabalho de

cada bomba em cada poço (Q_i) (em metros cúbicos por hora) durante o mês de julho. As vazões de trabalho em cada bomba e em cada poço definidas no modelo são as médias das vazões estipuladas pelo fabricante. Nas bombas sem vazão definida na tabela, devido à ausência dos proprietários para dar informações, estabelece-se a vazão mais comumente encontrada nas bombas. E também quando não há tempo de funcionamento definido, devido às mesmas causas para a falta de informações para as bombas, estabelece-se o mesmo tempo para os poços mais próximos (ver Tabela 4.2).

Tabela 4.2 – Dados das bombas e do bombeamento coletados pelo autor em 2015.

Poços	Lote	Vazão estipulada pelo fabricante	Altura Manométrica	Potência	Tempo de funcionamento	Uso da água
11	17	24,8 – 6,6 m ³ h	36 – 48 m	5,0 cv	5 h/dia	Irrigação de milho verde e gramíneas
12	19		17 m	5,0 cv	30 min/dia	Dessedentação de animais
13	17	11,4 – 7,1 m ³ h	46 m	3,0 cv	3 h/dia	Irrigação de milho verde e gramíneas
14	20		46 m	3,7 cv	1 h 30 min/dia	Irrigação de milho verde e gramíneas
15	21	11,4 – 7,1 m ³ h	46 m	3,0 – 3,7 cv		Irrigação de milho verde e gramíneas
16	21	11,4 – 7,1 m ³ h	46 m	3,0 – 3,7 cv		Irrigação de milho verde e gramíneas

Daí, essas vazões são multiplicadas pelo período de uso (t_i) diário (em horas), que é dito pelos proprietários entrevistados, obtendo-se o volume de água diário referencial no mês (V_{di}) (ver Equação 4.2 e Tabela 4.3). Assim:

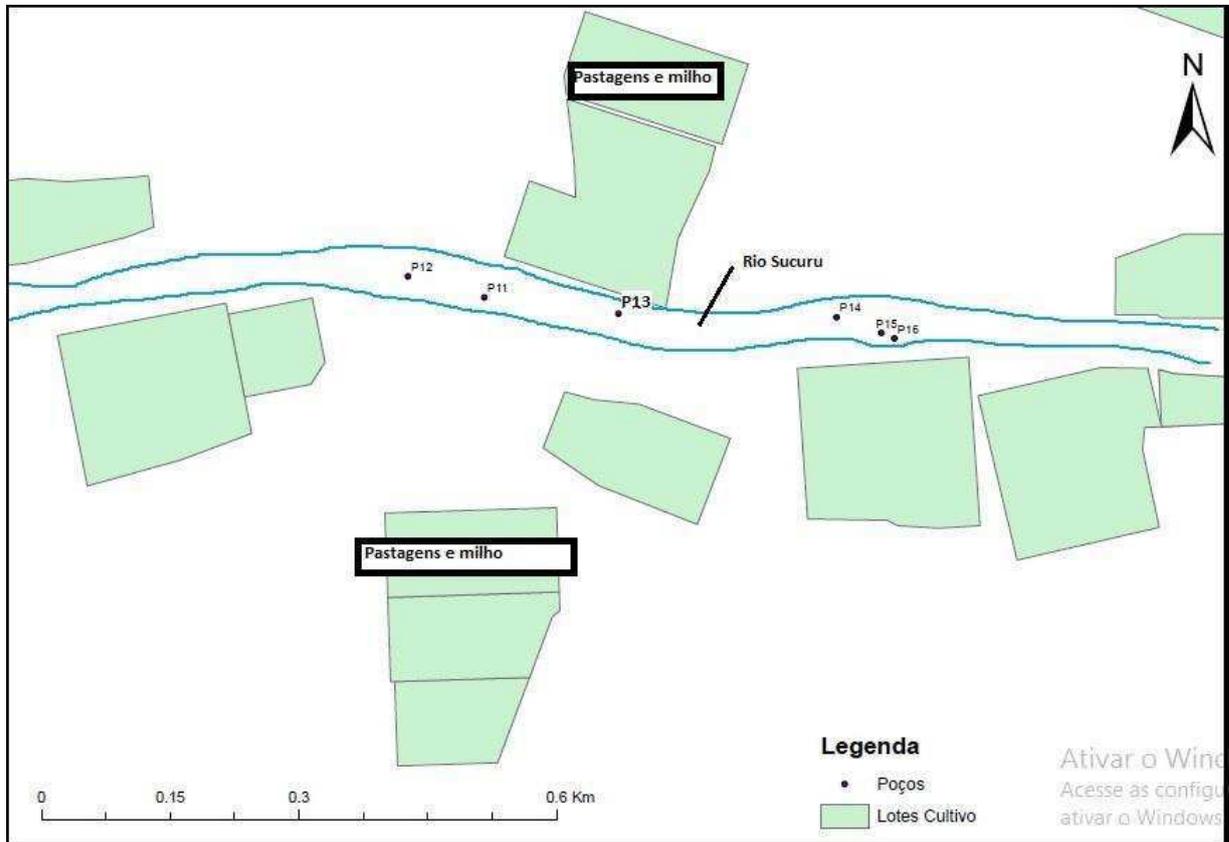
$$V_{di} = Q_{ix} t_i \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Tabela 4.3 – Volumes diários referenciais para o mês de julho.

Poço	Vazão média por hora estimada (m ³ /h)	Tempo de funcionamento estimado (h)	Volume diário referencial no mês (m ³ /dia)
P11	15,7	5	78,500
P12	9,25	0,5	4,625
P13	9,25	3	27,750
P14	9,25	1,5	13,875
P15	9,25	1,5	13,875
P16	9,25	1,5	13,875

Conforme os proprietários, as culturas predominantes na região são o milho verde e as pastagens ou gramíneas. A Figura 4.14, a seguir, apresenta a localização das áreas irrigadas em relação ao rio Sucuru e aos poços.

Figura 4.14 – Localização das áreas irrigadas em relação ao rio Sucuru e aos poços.

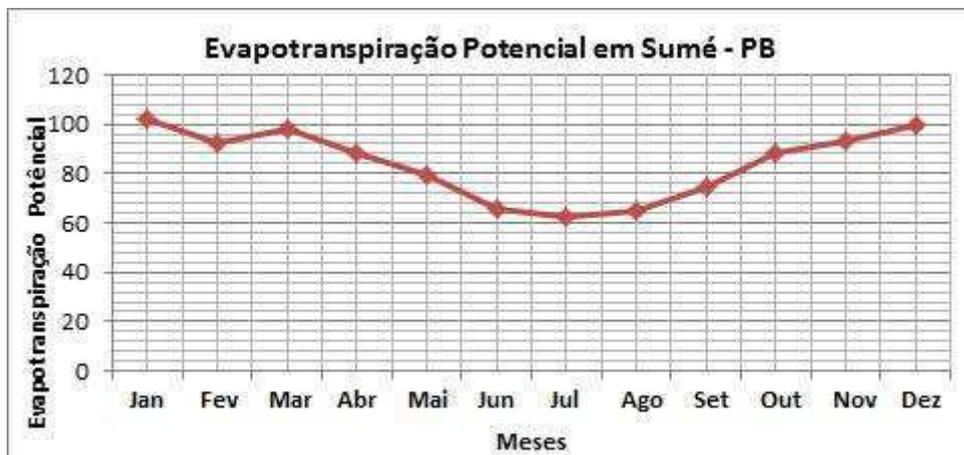


Os tipos de irrigação utilizada são por aspersão nas gramíneas e gotejamento no milho verde. E a dessedentação de animais do gado na região, que tem massa menor que 566 kg, é a atividade para a qual o poço P12 é utilizado.

Nesta região, a agricultura irrigada é praticada de forma intensa nos períodos de estiagem, quando a demanda de água é mais elevada e as chuvas não são suficientes para suprir água nos cultivos, de acordo com Fontes Júnior et al. (2012) ao afirmar sobre as regiões semiáridas. Diante disso, a demanda de água em cada cultura por mês por metro quadrado de área a ser irrigada é a evapotranspiração potencial (I), calculada a partir do método de Thornthwaite, utilizando as médias de temperaturas registradas na série histórica de janeiro de 2014 a dezembro de 2014, apresentada por Climate-Data (2015). A seguir é apresentado o

gráfico com os valores da evapotranspiração potencial calculados pelo autor desta dissertação em cada mês de 2014, já que tal ano é de estiagem.

Figura 4.15 – Evapotranspiração potencial (I_d) em cada mês de 2014.



A evapotranspiração potencial para a cultura do milho verde e pastagens (I_d), que é corrigida pelo coeficiente de cultura K_c é apresentada na tabela a seguir. Esse coeficiente é 0,775 para o milho, sendo o médio dos obtidos por FAO (1977) em cada fase de seu crescimento, e 0,773 para as pastagens, sendo o médio dos obtidos por FAO (1977) em cada fase de seu crescimento. Por fim, visto que em cada mês as duas culturas são irrigadas, esse coeficiente é 0,774, que é o valor médio entre as duas culturas, calculado pelo autor desta dissertação (ver Tabela 4.4).

Tabela 4.4 – Evapotranspiração potencial em cada cultura (I_d) nos meses de maio a julho.

I_d nas culturas (mm/mês)		
Mai	Junho	Julho
61,32	50,83	48,20

Já a demanda de água para dessedentar animais do gado é de 46 L/animal/dia para animais de corte de até 566 kg, de acordo com a EMBRAPA (2005). E é a mesma nos meses de simulação. Como não houve êxito para a entrevista ao proprietário do poço P12, estima-se que há 50 animais e que são dessedentados com o dobro do volume de água de demanda estabelecido pela EMBRAPA (2005).

A Tabela 4.5, a seguir, apresenta a finalidade de uso de cada poço, e a evapotranspiração potencial de água diária em cada mês para irrigação em cada cultura e em

cada poço (I_d) e a vazão para dessedentação por animal para o poço P12, calculadas e/ou convertidas pelo autor desta dissertação.

Tabela 4.5 – Evapotranspiração potencial de água diária em cada mês para irrigação em cada cultura e em cada poço (I_d) e a vazão para dessedentação por animal para o poço P12.

Poço	Uso da água	Evapotranspiração potencial de água diária em cada mês para irrigação em cada cultura (I_d) (mm/dia) e vazão para dessedentação por animal para o poço P12		
		Maio	Junho	Julho
11	Irrigação de milho verde e gramíneas	2,04 mm/dia	1,69 mm/dia	1,61 mm/dia
12	Dessedentação de animais	0,046 m ³ /dia	0,046 m ³ /dia	0,046 m ³ /dia
13	Irrigação de milho verde e gramíneas	2,04 mm/dia	1,69 mm/dia	1,61 mm/dia
14	Irrigação de milho verde e gramíneas	2,04 mm/dia	1,69 mm/dia	1,61 mm/dia
15	Irrigação de milho verde e gramíneas	2,04mm/dia	1,69 mm/dia	1,61 mm/dia
16	Irrigação de milho verde e gramíneas	2,04 mm/dia	1,69 mm/dia	1,61 mm/dia

A área a ser irrigada (A_i) é a divisão entre o volume de água referencial explotado durante o dia (V_{di}) e a evapotranspiração potencial de água diária em cada cultura (I_d).

$$A_i = V_{di}/I_d \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Como de acordo com os proprietários, uma mesma cultura é irrigada durante três meses (maio a julho), a área irrigada (A_i) é a mesma nesses meses. O volume de água referencial explotado durante o dia nos outros meses é a área irrigada (A_i) multiplicada pela evapotranspiração potencial de água diária em cada cultura (I_d) (ver Tabela 4.6).

Tabela 4.6 – Área irrigada e cabeças de gado atendidas e volume de água referencial diário em cada mês.

Poço	Área irrigada (hectares)	Cabeças de gado atendidas	Volume de água referencial diário em cada mês (m ³ /dia)		
			Maio	Junho	Julho
P11	5,00	0	99,89	82,78	78,50
P12	0	50	4,62	4,62	4,62
P13	1,73	0	35,31	29,26	27,75
P14	0,87	0	17,65	14,63	13,87
P15	0,87	0	17,65	14,63	13,87
P16	0,87	0	17,65	14,63	13,87
Total	9,34	50			

4.2.8. Definição de critérios e de cenários para simulação

Estabelece-se o valor da vazão diária em cada poço, que é o volume de água referencial explotado durante o dia V_{di} para cada período de simulação. É realizada a simulação referencial com base no diagnóstico atual do uso da água no trecho do aluvião em estudo, bem como é simulado o fluxo na ausência de bombeamento. Ambos os casos são comparados tendo em vista a influência dos poços e de sua distribuição no trecho e a intervenção da barragem submersa no fluxo subterrâneo.

Para investigar com quais taxas de aumento ou redução de vazões em relação às vazões do diagnóstico as águas do trecho aluvial podem ser explotadas, são definidos dois critérios. Tais quais: um volume de fluxo para o trecho à jusante de aproximadamente 50 % do volume de fluxo na entrada da fronteira montante do trecho em estudo e um volume nulo de fluxo para a jusante. São simulados cinco cenários distintos com diferentes intervenções. São eles: cenário 1 – mesma distribuição dos poços do diagnóstico e redução de vazões, cenário 2 – mudança do poço P16 com fluxo para jusante, cenário 3 – mudança do poço P16 na ausência de fluxo para jusante, cenário 4 – mudança do poço P16 e inserção de 1 (uma) barragem submersa com fluxo para jusante e cenário 5 - mudança do poço P16 e inserção de 1 (uma) barragem submersa na ausência de fluxo para jusante. A barragem inserida apresenta condutividade hidráulica horizontal (K_h) de 0,01 m/dia, sendo esse valor estabelecido pelo autor desta dissertação. O primeiro critério justifica que o trecho à jusante com outros usuários não seja prejudicado. O segundo critério comprova que não é viável explotar quando não há fluxo para a jusante, ou seja, o trecho não é isolado.

Com o modelo simulado em cada cenário, tendo em vista o período de simulação mais crítico e esses critérios, é calculado a partir do balanço hídrico, o volume de fluxo de saída do trecho do aluvião para a jusante. Justifica-se que, à medida que esse volume de saída supera 50 % do valor do volume de entrada na fronteira montante, as vazões de exploração são cada vez menores, impactando negativamente no atendimento à demanda dos usuários. Após cada simulação, visualizam-se as linhas de fluxo (direção e sentido) no período de simulação mais crítico e um gráfico com os valores das cargas hidráulicas (h) no final de cada período de simulação (ou em cada mês) em função de cada poço em bombeamento.

A partir dos resultados do cenário mais favorável, são apresentadas propostas para o manejo comunitário e sustentável das águas do trecho do aluvião em estudo.

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

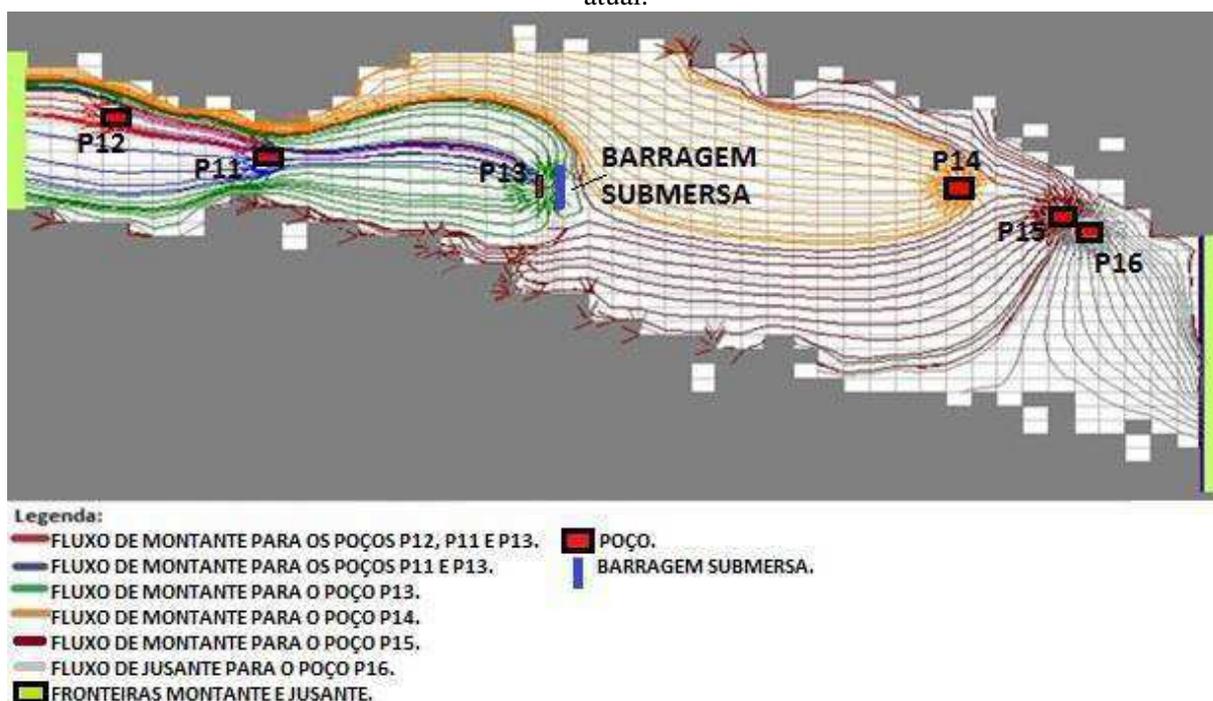
5.1.SIMULAÇÃO

Todas as simulações a seguir são analisadas no 6º período de simulação, que é o mais crítico.

5.1.1.Diagnóstico do uso atual e fluxo natural sem bombeamento

O objetivo desta simulação é observar o comportamento do fluxo mediante a intervenção dos seis poços em bombeamento e na ausência de bombeamento e a influência da barragem submersa existente.

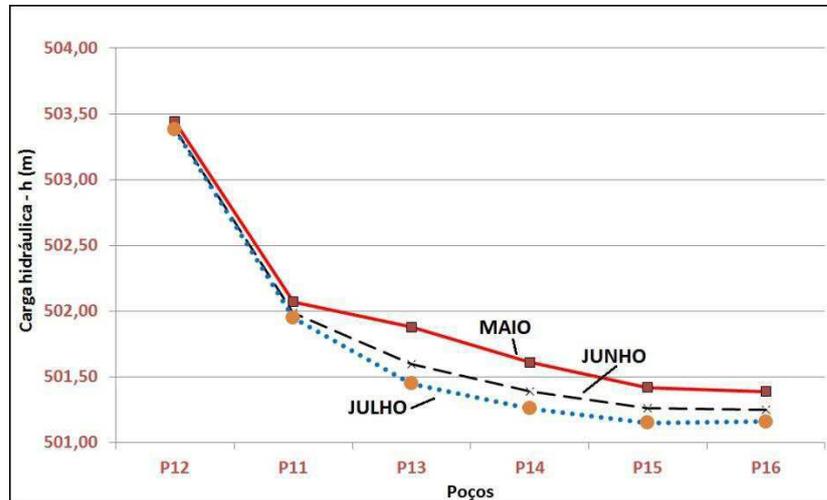
Figura 5.1 – Fluxo subterrâneo e captação dos poços no 6º período de simulação do diagnóstico do uso atual.



Na Figura 5.1, na ausência de recarga de precipitação no trecho aluvial, é observado o esvaziamento em algumas células próximas aos poços. Observa-se também que não há fluxo para o trecho à jusante e grande parte da água explotada pelo poço P16 é proveniente desse trecho. É constatado que o uso no diagnóstico atual é inadequado quanto à influência no fluxo, pois o poço P16, conforme sua posição, gera um fluxo inverso ao esperado no modelo, aumentando o risco de o trecho à jusante secar. Além disso, os outros poços consomem o volume de água do fluxo na entrada da fronteira montante e o volume armazenado. Também é observado que, ao longo da barragem as linhas de fluxo são desviadas, pois o material com o

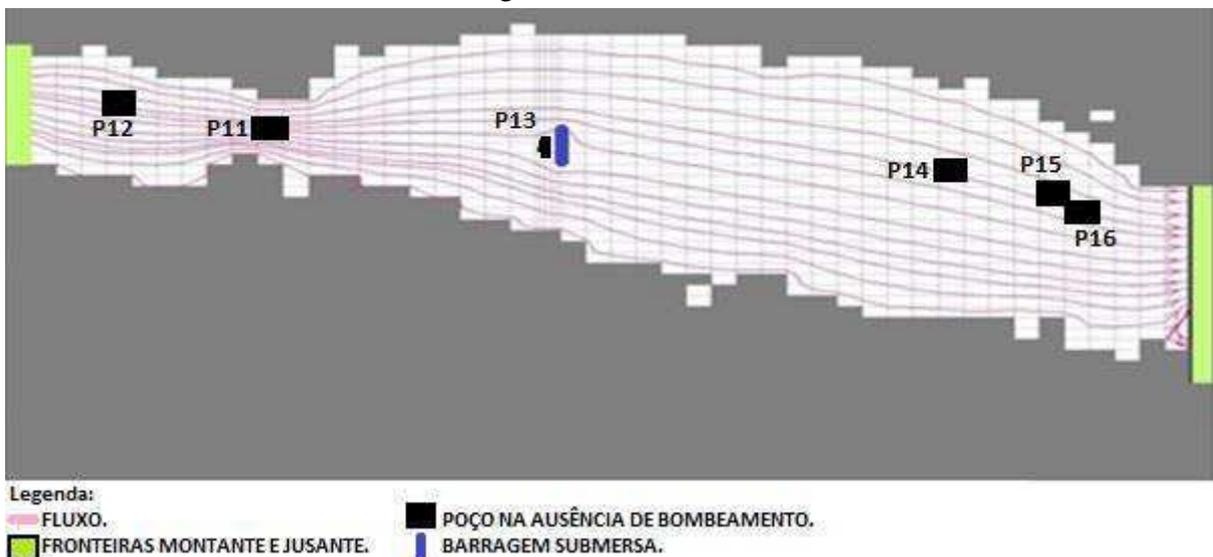
qual a barragem foi construída é impermeável. A barragem não ocupa linearmente toda a seção do aluvião, fato esse que não influencia significativamente no fluxo.

Figura 5.2 - Gráfico com as cargas hidráulicas (h) (em metros) para cada poço em cada mês de simulação do diagnóstico de uso atual em 2015.



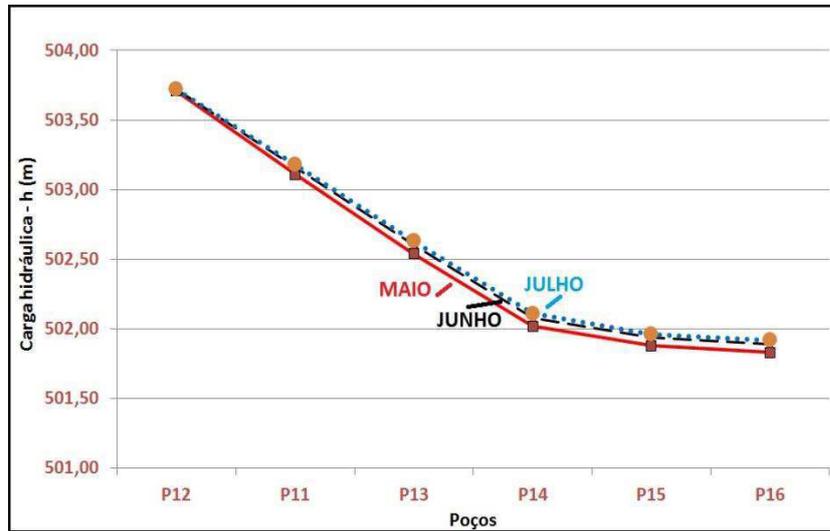
Na Figura 5.2, é observada uma redução brusca na carga hidráulica entre os poços P12 e P11, visto que a vazão explotada neste é extremamente maior que naquele, e com a retirada de água de algumas células estas podem secar. É observado que, mesmo que a vazão de retirada de água no poço P13 seja maior que nos poços P14, P15 e P16, as cargas hidráulicas nesse poço são maiores; fato esse explicado pela influência da barragem submersa ao represar a água em fluxo proveniente da fronteira montante.

Figura 5.3 - Fluxo subterrâneo na ausência de bombeamento dos poços no 6º período de simulação do diagnóstico do uso atual.



No fluxo natural sem bombeamento (Figura 5.3) é observado que, não há indução no fluxo e há armazenamento de água em algumas células no contato do aquífero aluvial com o cristalino.

Figura 5.4 -Gráfico com as cargas hidráulicas (h) (em metros) para cada poço sem bombeamento em cada mês de simulação do diagnóstico de uso atual em 2015.



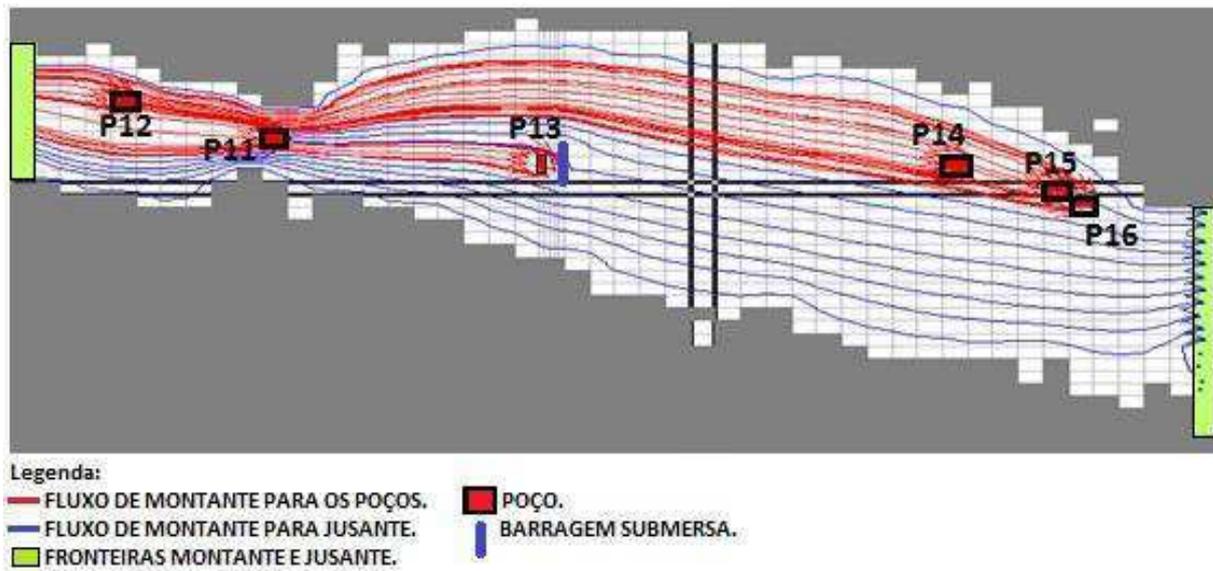
Na Figura 5.4, as cargas hidráulicas são decrescentes de montante a jusante, com redução menos acentuada entre os poços P14 e P16, gerando um fluxo nesse sentido. O fluxo para a jusante e a proximidade entre os poços P14, P15 e P16 favorecem essa baixa queda de carga hidráulica. Além disso, é observado que as cargas hidráulicas em cada poço são aproximadamente constantes, uma vez que em todo o período de simulação de 3 (três) meses foi estabelecido que não haveria bombeamento em nenhum momento. Esse gráfico que, além de apresentar o fluxo sem interferência da exploração, difere do gráfico apresentado na Figura 4.5, o qual traduz que os períodos de ausência de bombeamento são curtos, e os de bombeamento são longos, interferindo no gráfico dessa figura.

5.1.2. Cenários

5.1.2.1. Cenário 1: Mesma distribuição dos poços do diagnóstico e redução de vazões

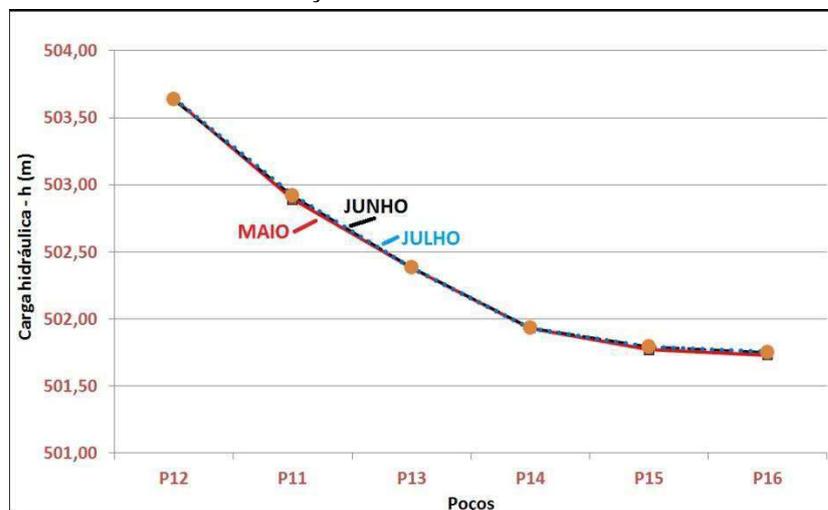
O objetivo deste cenário é investigar qual a taxa de redução de vazão de exploração que deve ser estabelecida para que haja volume de fluxo para a jusante com valor de aproximadamente 50 % do volume de fluxo de entrada na fronteira montante.

Figura 5.5 – Cenário 1: Fluxo para os poços e fluxo para a jusante no 6º período de simulação.



Após várias tentativas, a taxa de redução de vazões em todos os poços é 75 %, pois com essa taxa e partir do balanço hídrico, 48,2 % do fluxo de entrada na fronteira montante escoou para o trecho à jusante, o que é comprovado na Figura 5.5.

Figura 5.6 - Gráfico com as cargas hidráulicas (h) (em metros) para cada poço em cada mês de simulação no cenário 1 em 2015.



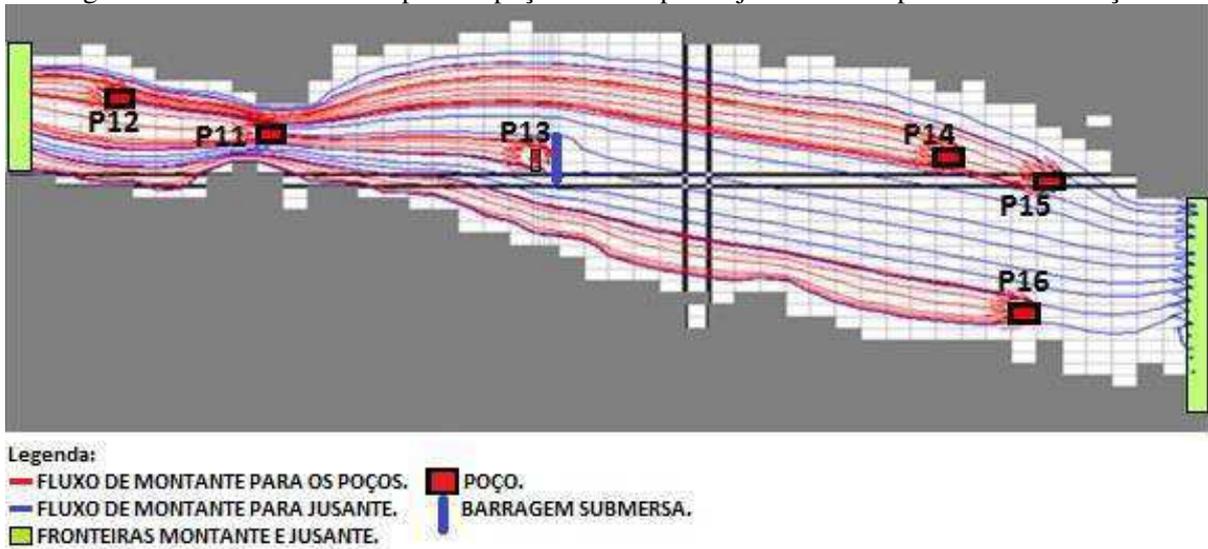
Na Figura 5.6, mesmo com a exploração, as cargas hidráulicas em cada poço são quase as mesmas de mês a mês, devido ao escoamento significativo do fluxo para a jusante.

Com essa taxa estabelecida, o proprietário do poço P11 deve alterar o método de irrigação de aspersão para microaspersão nas gramíneas. Esta gera uma economia de água de aproximadamente 40 %. Além disso, será necessária uma redução de aproximadamente 35 % na área a ser irrigada.

5.1.2.2. Cenário 2: Mudança do poço P16 com fluxo para jusante

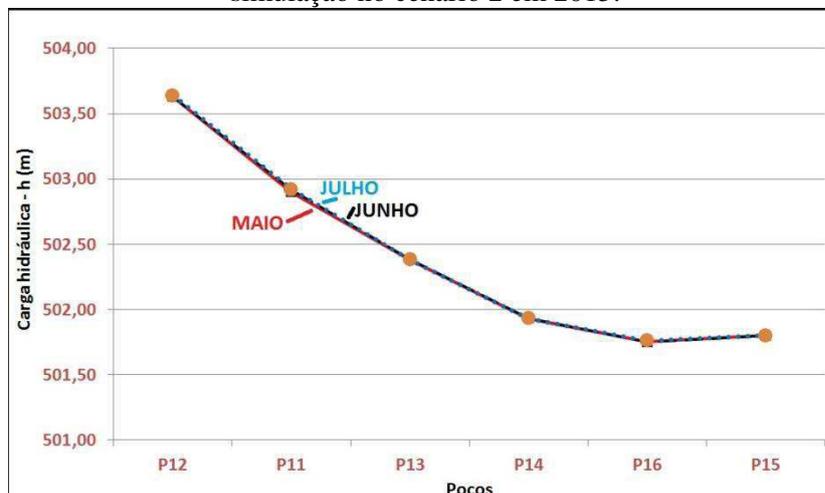
O objetivo deste cenário é, com a mudança de posição do poço P16 para uma posição mais favorável para não interferir significativamente na captação do poço P15 nem no fluxo para a jusante, investigar qual a taxa de redução ou aumento de vazão deve ser estabelecida para que haja volume de fluxo para a jusante com valor de aproximadamente 50 % do volume de fluxo de entrada na fronteira montante.

Figura 5.7–Cenário 2: Fluxo para os poços e fluxo para a jusante no 6º período de simulação.



Após tentativas, a taxa de redução de vazões em todos os poços é 75 %, pois com essa taxa e partir do balanço hídrico, 48,2 % do fluxo de entrada na fronteira montante escoou para o trecho à jusante, o que é comprovado na Figura 5.7.

Figura 5.8 - Gráfico com as cargas hidráulicas (h) (em metros) para cada poço em cada mês de simulação no cenário 2 em 2015.

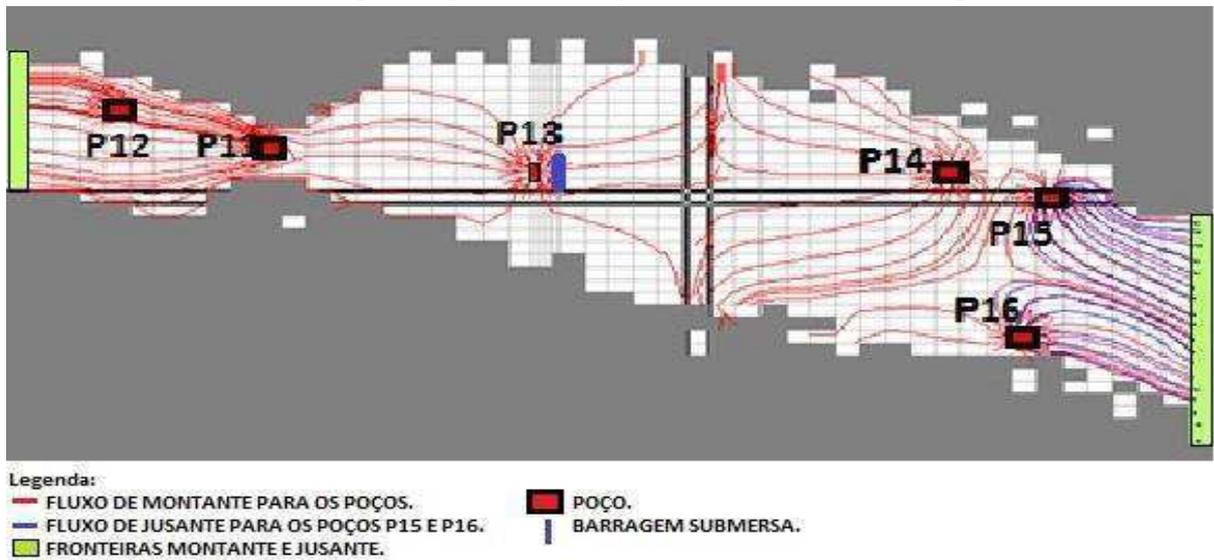


Mesmo com o bombeamento (Figura 5.8), as cargas hidráulicas em cada poço são irrisoriamente diferentes entre si de um mês a outro, devido ao escoamento significativo do fluxo para a jusante.

5.1.2.3. Cenário 3: Mudança do poço P16 na ausência de fluxo para jusante

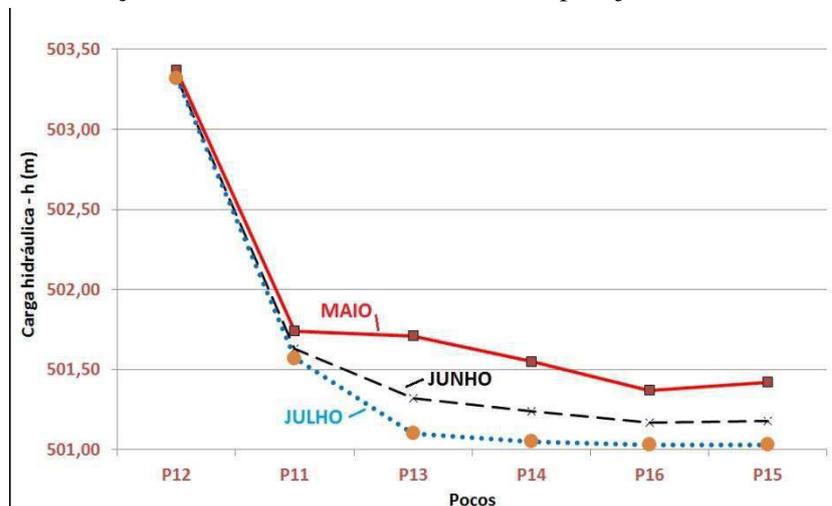
O objetivo deste cenário é, com a mudança no poço P16, obter qual a taxa de redução ou aumento de vazão necessária para que não haja fluxo para jusante.

Figura 5.9 – Cenário3: Fluxo para os poços e fluxo proveniente da jusante no 6º período de simulação.



Para a ausência de fluxo para a jusante, deve-se aumentar em torno de 20 % as vazões de exploração. Nota-se (Figura 5.9) que, os poços P15 e P16 induzem o fluxo inverso do natural, o que comprova que esse aumento não é viável.

Figura 5.10 - Gráfico com as cargas hidráulicas (h) (em metros) para cada poço em cada mês de simulação no cenário 3 na ausência de fluxo para jusante em 2015.

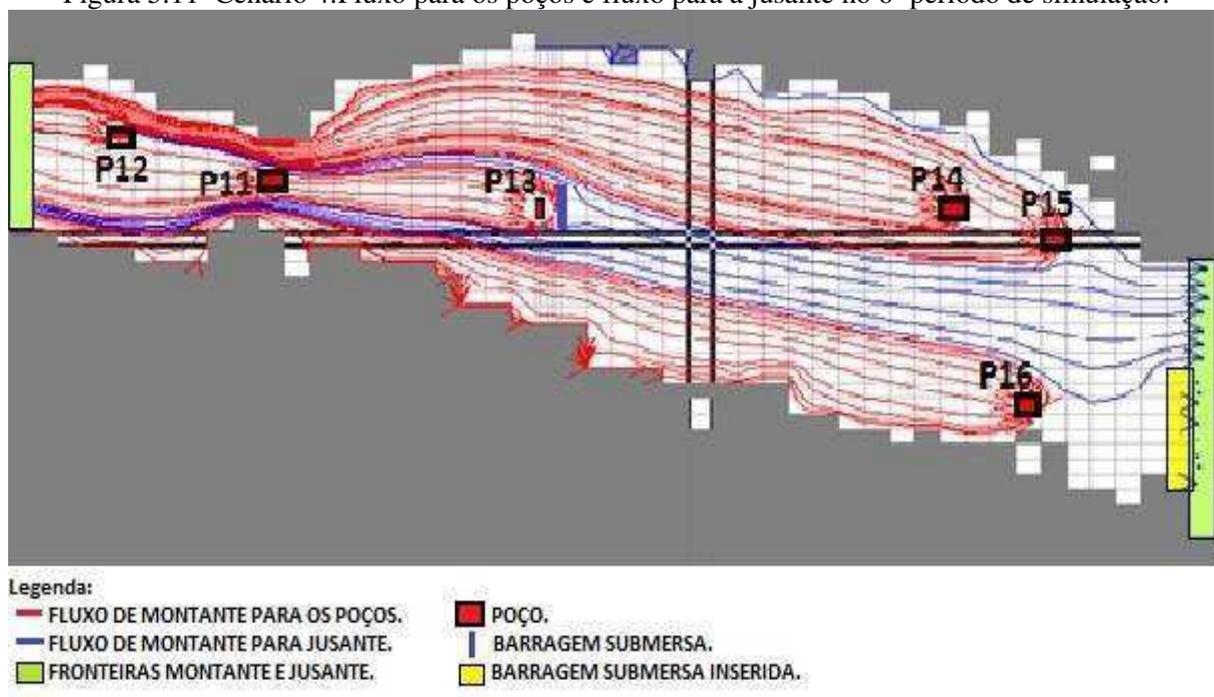


Na Figura 5.10, é observado um grande decaimento na carga hidráulica do poço P12 para o P11 e para o P13, com maior intensidade no mês de Julho, pois o rebaixamento no poço P13 é maior do que nos outros poços.

5.1.2.4. Cenário 4: Mudança do poço P16 e inserção de 1 (uma) barragem submersa com fluxo para jusante

Neste cenário, além da mesma mudança no poço P16 sugerida no cenário anterior, propõe-se inserir 1 (uma) barragem submersa em uma posição mais favorável (das células 1 29 51 a 1 35 51), pois mesmo com a mudança no poço P16 as taxas de redução de vazões estabelecidas são as mesmas. Essa intervenção objetiva impedir parcialmente o fluxo inverso e permitir parcialmente o fluxo para jusante, determinando uma taxa menor de redução ou de aumento necessário de vazão. Deve-se investigar qual a taxa de redução ou aumento de vazão deve ser definida para que haja volume de fluxo para a jusante com valor de aproximadamente 50 % do volume de fluxo de entrada na fronteira montante. Essa barragem é construída em pedras revestidas em lona, com condutividade hidráulica horizontal (K_h) de 0,01 m/dia e comprimento de 80 (oitenta) m, ocupando toda a profundidade do aluvião e boa parte da seção.

Figura 5.11–Cenário 4: Fluxo para os poços e fluxo para a jusante no 6º período de simulação.

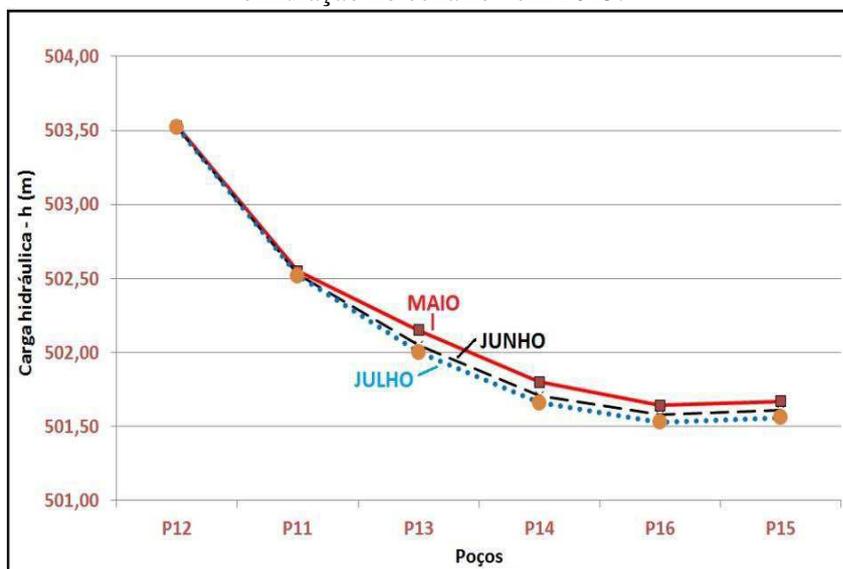


Após várias tentativas, a taxa de redução de vazões para todos os poços é 40 %, pois com essa taxa e após o cálculo do balanço hídrico, 53,6 % do fluxo de entrada na fronteira

montante escoar para o trecho à jusante. Com isso, o proprietário do poço P11 não necessitará reduzir a área irrigada.

É descoberto que, existe um fluxo natural proveniente da fronteira jusante, pois as cargas hidráulicas são maiores que as da coluna onde é inserida a barragem (ver Figura 5.11). Como esta é impermeável, o fluxo acaba retornando à jusante. O fluxo atravessa todo o trecho ao lado da barragem inserida. O posicionamento do poço P16 e da barragem favorecem esse fluxo e o trecho à jusante.

Figura 5.12 - Gráfico com as cargas hidráulicas (h) (em metros) para cada poço em cada mês de simulação no cenário4 em 2015.

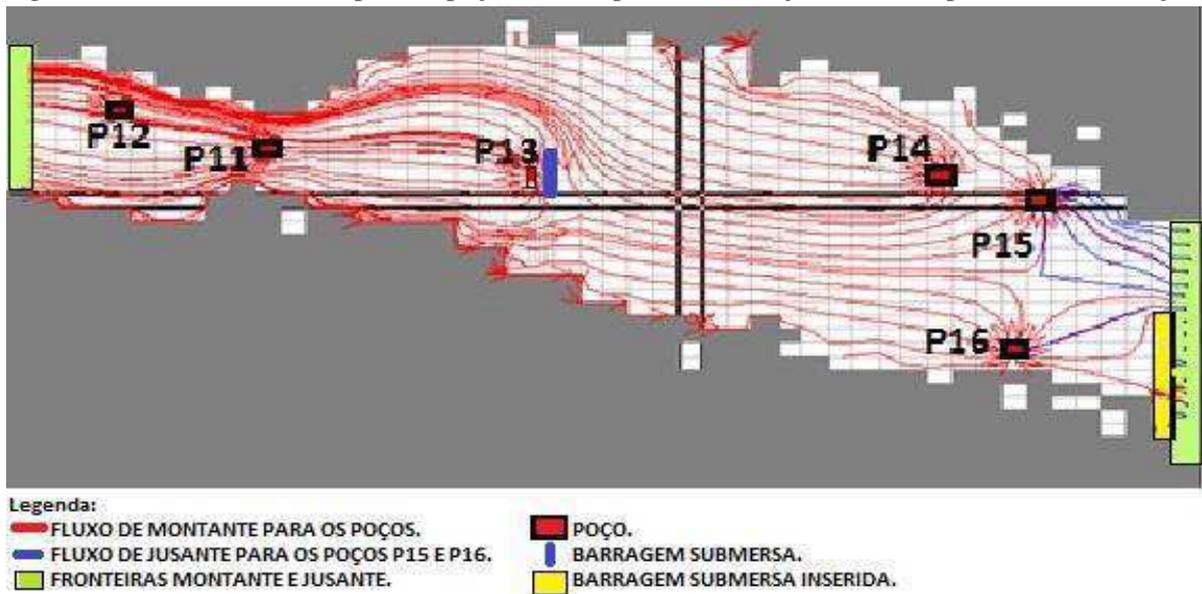


Observando o gráfico (Figura 5.12), as cargas hidráulicas são decrescentes de montante a jusante, e permanecem as mesmas em cada poço de um mês a outro, sendo menores que as cargas no cenário anterior, pois o volume de fluxo que atravessa a fronteira jusante nesse caso é maior e as vazões de exploração são maiores que no cenário anterior.

5.1.2.5. Cenário 5: Mudança do poço P16 e inserção de 1 (uma) barragem submersa na ausência de fluxo para jusante

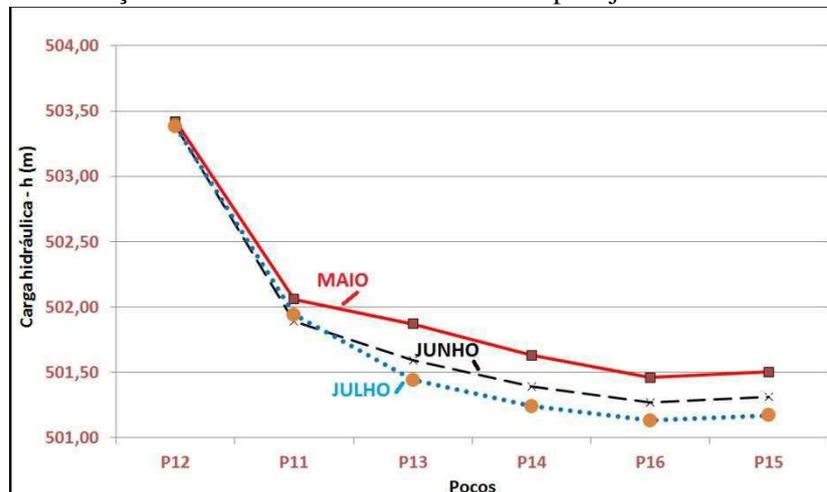
Neste cenário, o objetivo é determinar a taxa necessária de redução ou de aumento de vazão de forma a não haver fluxo para jusante.

Figura 5.13–Cenário5: Fluxo para os poços e fluxo proveniente da jusante no 6º período de simulação.



Considerando o fluxo nulo para a jusante, não é necessário reduzir nem aumentar as vazões. É notado (Figura 5.13) que, parte do fluxo que entra na fronteira jusante retorna à mesma, em virtude da barragem estar posicionada próximo a essa fronteira e os poços P15 e P16 induzem o fluxo inverso.

Figura 5.14 - Gráfico com as cargas hidráulicas (h) (em metros) para cada poço em cada mês de simulação no cenário 5 na ausência de fluxo para jusante em 2015.



No gráfico da Figura 5.14, observa-se o aumento no decaimento das cargas hidráulicas do poço P12 ao P13 e o decaimento sendo constante entre os poços P13 e P16, em decorrência da influência da barragem submersa existente e a razoável proximidade entre os poços P14 e P16. Nota-se que as diferenças entre as cargas hidráulicas de mês a mês chegam a 0,45 m. Tudo isso comprova que esse cenário com fluxo nulo não é favorável.

5.2.SÍNTESE DOS RESULTADOS E PROPOSTAS DE MANEJO

A Tabela 5.1, a seguir, apresenta a síntese de todos os resultados dos cenários.

Tabela 5.1 – Síntese dos resultados dos cenários.

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Fluxo para jusante	48,2 % do fluxo de montante	48,2 % do fluxo de montante	Nulo	53,6 % do fluxo de montante	Nulo
Taxa de redução ou aumento de vazão	Redução de 75%	Redução de 75%	Aumento de 20 %	Redução de 40 %	0%

Diante dos resultados, o cenário mais favorável é o cenário 4, que leva em conta o fluxo para jusante, pois o valor desse fluxo é superior a 50 % e a taxa de redução de vazão calculada mediante esse fluxo é de 40 %. Portanto, propõe-se que as vazões de todos os poços devem ser reduzidas em 40 %; valor esse que não impacta significativamente de maneira negativa no atendimento à demanda dos usuários dos poços e na potencialidade do aquífero aluvial.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES

Este trabalho ressalta os seguintes pontos relevantes:

- Os recursos hídricos subterrâneos sãoa alternativa de grande viabilidade para a escassez hídrica superficial, desde que utilizados com racionalidade em prol da preservação da sua potencialidade.
- Os aluviões são aquíferos mais acessíveis em que o custo para construção de poços e instalação de bombas é menos oneroso, pois são aquíferos que apresentam camada(s) não confinante(s) e são permeáveis.
- Devido à grande acessibilidade apresentada pelos aluviões, têm sido realizadas modelagens nesses aquíferos para investigar as possibilidades de uso das águas e propor alternativas para o seu uso sustentável.
- A modelagem computacional é utilizada para avaliar de maneira precisa o fluxo no aquífero ou trecho do aquífero em estudo e as vazões afluentes, efluentes e bombeadas e estabelecer melhores alternativas para o manejo das águas de aluviões.

As contribuições desta dissertação são:

- Os resultados apontam para limitações ao atendimento das demandas, diante da necessidade de garantir fluxo de água subterrânea para jusante. Tais limitações, contudo, podem ser minimizadas utilizando medidas variadas, como por exemplo, a adequada distribuição dos poços, o regime de exploração, a inserção de barragens subterrâneas. Outra importante conclusão é que a definição destas medidas gerenciais somente se torna possível com a aplicação criteriosa da simulação computacional, por flexibilizar as alternativas e fornecer avaliações precisas de trajetórias de fluxo da água subterrânea e vazões afluentes, efluentes e bombeadas.

Como principal contribuição a dissertação traz a influência da barragem submersa existente e da barragem submersa inserida no fluxo e no manejo que, por não ocuparem toda a largura do trecho do aquífero aluvial, retardam parte do fluxo e desviam outra parte do mesmo para outros trechos, além de viabilizarem a captação de água por poços localizados a sua montante, com o rebaixamento não significativo. Além disso, a barragem submersa inserida retarda ou impede o fluxo inverso ao proveniente da fronteira montante. Tudo isso contribuiu para que os objetivos fossem alcançados, tais quais um manejo balanceado que preservasse a

potencialidade do trecho do aquífero e os outros trechos a jusante e não impactasse significativamente na demanda dos usuários.

A impossibilidade de investigar todo o aquífero aluvial e um número insuficiente de informações (inclusive de sondagens e levantamentos topográficos) são limitações na metodologia. O modelo é apenas parametrizado, pois não há informações suficientes para a devida calibração, o que aumentaria sua precisão ou aproximaria cada vez mais o modelo à realidade do trecho aluvial em estudo.

As recomendações futuras para continuidade de um trabalho como este são:

- Atualização, melhor distribuição e boa proximidade das sondagens e entre si ao longo do trecho em estudo;
- Levantamento topográfico ora em campo, ora com o uso do banco de dados geomorfométricos do Brasil – TOPODATA;
- Calibração do modelo;
- Simulação de outros cenários e em outros períodos, inclusive chuvosos;
- Investigação e avaliação criteriosa dos trechos montante e jusante e os respectivos usos como o trecho em estudo, para que se proponha uma gestão pactuada entre essa área e os outros trechos para o manejo sustentável das águas do aquífero.

CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAS – Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. (2014).

ALBUQUERQUE, C. G. de; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. de A.; FONTES JÚNIOR, R. V. de P. (2015). Recarga de Aquífero Aluvial Sob Uso Agrícola. *Águas Subterrâneas*. Volume 29. P. 60-71.

ALENCAR, M. L. S. de; BARBOSA, M. P.; SILVA, V. B. S. (2013). Mapeamento dos Sistemas Hídricos da Bacia do Rio Sucuru. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul.

AMBAST, S. K.; TYAGI, N. K.; RAUL, S. K. (2006). Management of Declining Groundwater in the Trans Indo-Gangetic Plain (India): Some Options. *Agricultural Water Management*. Volume 82. P. 279-286.

ASHRAF, M.; KAHLOWN, M. A.; ASHFAQ, A. (2007). Impact of small dams on agriculture and groundwater development: A case study from Pakistan. *Agricultural Water Management*. Volume 92. P. 90-98.

BOSCARDIN BORGHETTI, N. R.; BORGHETTI, J. R.; ROSA FILHO, E. R. Aquífero Guarani: A verdadeira Integração dos Países do Mercosul. Fundação Roberto Marinho, 2004.

BRAGA, A. C. R. (2014) Avaliação da Potencialidade Hídrica Subterrânea e Proposta para Metodologia de Outorga em uma Região da Bacia Sedimentar Costeira do Baixo Curso do Rio Paraíba. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, 112 p.

BURTE, J. D. P.; JAMIM, J. Y; COUDRAIN, A.; FRISCHKORN, H.; MARTINS, E. S. (2009). Simulations of Multipurpose Water Availability in a Semiarid Catchment Under Different Management Strategies. *Agricultural Water Management*. Volume 96. P. 1181-1190.

BURTE, J. D. P.; COUDRAIN, A.; MARLET, S. (2011). Use of Water from Small Alluvial Aquifers for Irrigation in Semi-arid Regions. *Revista Ciência Agronômica*. V. 42. N. 3. P. 635-643.

CHIANG, W. H. 3D-Groundwater Modeling with PMWIN, Second Edition: A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Transport Processes. Berlim, Heidelberg, Nova Iorque, Hong Kong, Londres, Milan, Paris e Tóquio. Springer, 2005, 411 p.

CLEARY, R. W. Águas Subterrâneas. In: Engenharia Hidrológica. Fábio Ramos et al. Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH, cap. 5, volume 2, p. 293-404. Editora da UFRJ, Rio de Janeiro, 1989.

CLIMATE-DATA.ORG. Disponível em: <http://pt.climate-data.org/location/42573>. Acesso em: 05/07/2015.

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Ações Emergenciais de Combate aos Efeitos das Secas. Noções Básicas Sobre Poços Tubulares. Cartilha Informativa. 1998.

DANTAS NETO, J.; LIMA, V. L. A. de; SILVA, P. F. da; SANTOS, C. S. dos; SILVA, L. F. D. da. (2013). Unidades Produtivas da Agricultura Familiar no Perímetro Irrigado de Sumé, PB. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer. Volume 9. N. 16. P. 2060-2070.

DE SMEDT, F. GroundwaterHydrology. VrijeUniversiteit Brussel. 2009. Notas de aula.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Estimando o Consumo de Água de Suínos, Aves e Bovinos em uma Propriedade. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Concórdia, Santa Catarina, 2005.

FAO. FoodandAgricultureOrganizationofthe United Nations. 1977.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. In: Feitosa, F. A. C. et al. (2ª Ed.). Rio de Janeiro: CPRM – LABHID, 2000. 391 p.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. In: Feitosa, F. A. C. et al. (3ª Ed.). Rio de Janeiro: CPRM – LABHID, 2008. 812 p.

FONTES JÚNIOR, R. V. de P.; MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, T. E. M. dos. (2012). Estabilidade Temporal da Potenciometria e da Salinidade em Vale Aluvial no Semiárido de Pernambuco. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Volume 16. N. 11. P. 1188-1197.

IGM – InstitutoGeológico e Mineiro.(2001).

KINZELBACH, W. (1986) Groundwater Modelling: An Introduction with Simple Programs in Basic. Developments in Water Science. Volume 25. Amsterdam – Holland, 333 p.

KIRBY, J. M.; AHMAD, M. D.; MAINUDDIN, M.; PALASH, W.; QUADIR, M. E.; SHAH-NEWAZ, S. M.; HOSSAIN, M.M. (2015). The Impact of Irrigation Development on Regional Groundwater Resources in Bangladesh. Agricultural Water Management. Volume 159. P. 264-276.

LATINOPOULOS, P. (1986). Analytical Solutions for Strip Basin Recharge to Aquifers with Cauchy Boudary Conditions. Journal Hydrology. V. 83. P. 197-206.

LIMA, A. de O.; DIAS, N. de S.; FERREIRA NETO, M.; SANTOS, J. E. J. dos; REGO, P. R. de A.; LIMA-FILHO, F. P. (2013). Barragens Subterrâneas no Semiárido Brasileiro: Análise Histórica e Metodologias de Construção. Irriga, Botucatu. Volume 18. Número 2. P. 200-211.

MACDONALD, M. G.; HARBAUGH, A. W. A Modular Three- dimensional Finite-difference Ground Water Flow Model, U.S. Geological Survey, Open File Report p.83-875. 1984.

MARTÍNEZ-SANTOS, P.; MARTÍNEZ-ALFARO, P. E.; SANZ, E.; GALINDO, A. (2010). Daily Scale Modelling of Aquifer-River Connectivity in the Urban Alluvial Aquifer in Langreo, Spain. Hydrogeology Journal. Volume 18. P. 1525-1537.

MEDEIROS FILHO, C. F de. Abastecimento de Água. Campina Grande. Universidade Federal de Campina Grande, 2010. 156 p. Notas de aula.

MOREIRA, M. M.; SANTOS, M. H. L. C.; ROCHA, J. C. da; FERREIRA, G. B.; SILVA, M. S. L. da; ANJOS, J. B. dos. (2007). Avaliação dos Impactos da Barragem Subterrânea em Duas Propriedades de Agricultura Familiar Agroecológica no Sertão da Paraíba. Revista Brasileira de Agroecologia. Volume 2. N. 2. P. 1611-1619.

PONTES, A. G. V.; GADELHA, D.; FREITAS, B. M. C.; RIGOTTO, R. M.; FERREIRA, M. J. M. (2013). Os Perímetros Irrigados Como Estratégia Geopolítica Para o Desenvolvimento do Semiárido e Suas Implicações à Saúde, ao Trabalho e ao Ambiente. Ciência & Saúde Coletiva. Volume 18. N. 11. P. 3213-3222.

POPP, J. H. Geologia Geral/ José Henrique Popp. 4ª Edição. Rio de Janeiro e São Paulo. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1987.

RÊGO, J. C. (2012). Bewirtschaftung Kleiner Alluvialer Grundwasservorkommen im Semiariden Nordosten Brasiliens . Tese (Doutorado em Recursos Hídricos, Hidrologia e Hidráulica) – Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Alemanha, 178 p.

SANTOS, M. V. C. dos; FREIRE, C. C.; BORGES, V. C. B. (2009). Comportamento do Fluxo Subterrâneo em um Aquífero Aluvial no Semiárido Alagoano. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande, Mato Grosso do Sul.

SCHEIDEGGER, A. E. Theoretical Geomorphology. Springer-Verlag. Berlin, Göttingen. Heidelberg, 1961.

SERPEC-EXPOCAATINGA. Disponível em: http://www.serpec-expocaatinga.com/home/?page_id=289. Acesso em: 12/05/2015.

TODD, D. K. Groundwater Hydrology. 1ª Edição. Nova York. Wiley & Sons, 1959.

TODD, D. K.; MAYS, L. W. Groundwater Hydrology. 3ª Edição. Califórnia e Arizona. Wiley, 2005.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação/ Organizado por Carlos E. M. Tucci. Porto Alegre. Ed. da Universidade: ABRH. EDUSP, 1993.

VIEIRA, L. J. dos S. (2002). Emprego de um Modelo Matemático de Simulação do Fluxo Subterrâneo para Definição de Alternativas de Exploração de um Aquífero Aluvial. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 133 p.

YANG, Y.; WATANABE, M.; ZHANG, X.; ZHANG, J.; WANG, Q.; HAYASHI, S. (2006). Optimizing Irrigation Management for Wheat to Reduce Groundwater Depletion in the Piedmont Region of the Taihang Mountains in the North China Plain. Agricultural Water Management. Volume 82. P. 25-44.

YANG, X. (2012). Application of the Conceptualization Groundwater Data Model to Study the Upper Arkansas River Corridor, Western Kansas. *Journal of Earth Science*. Volume 23. N 1. P. 77-87.

ZHOU, Y. LI, W. (2011). A Review of Regional Groundwater Modeling. *Geoscience Frontiers*. Volume 2. Número 2. P. 205-214.

ZUME, J. T.; TARHULE, A. A. (2011). Modelling the Response of an Alluvial Aquifer to Anthropogenic and Recharge Stresses in the United States Southern Great Plains. *Journal Earth Syst. Sci*. Volume 120. N. 4. P. 557-572.