

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA HIDRÁULICA

MODELAGEM DO FLUXO SUBTERRÂNEO NA BACIA
SEDIMENTAR COSTEIRA DO BAIXO CURSO DO RIO PARAÍBA

Dissertação de Mestrado

Marcondes Loureiro de Carvalho Batista

Campina Grande – PB

Março de 2010

Marcondes Loureiro de Carvalho Batista

**MODELAGEM DO FLUXO SUBTERRÂNEO NA BACIA SEDIMENTAR
COSTEIRA DO BAIXO CURSO DO RIO PARAÍBA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Márcia Maria Rios Ribeiro

Campina Grande – PB

Março de 2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

B333m

2010 Batista, Marcondes Loureiro de Carvalho.

Modelagem do fluxo subterrâneo na Bacia Sedimentar Costeira do baixo curso do Rio Paraíba / Marcondes Loureiro de Carvalho Batista. — Campina Grande, 2010.

114 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Referências.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Márcia Maria Rios Ribeiro.

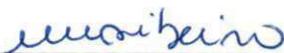
1. Águas Subterrâneas. 2. Gestão de Recursos Hídricos. 3. Modelagem Matemática. I. Título.

CDU – 556.34(043)

MARCONDES LOUREIRO DE CARVALHO BATISTA

MODELAGEM DO FLUXO SUBTERRÂNEO NA BACIA SEDIMENTAR
COSTEIRA DO BAIXO CURSO DO RIO PARAÍBA

Aprovada em 29 de Março de 2010



Prof^a. Dr^a. Márcia Maria Rios Ribeiro (UFCG)

Orientadora



Dr^a. Cybelle Frazão Costa Braga (AESA)

Examinadora externa



Prof^a. Dr^a. Iana Alexandra Alves Rufino (UFCG)

Examinadora interna

Campina Grande – PB

Março de 2010

DEDICATÓRIA

*Dedico à minha mãe, e à minha
amada Jordana por tudo que representam
na minha vida. Amo vocês !!!*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela minha vida, por guiar os meus caminhos, pela força nas horas mais difíceis, pelas inúmeras conversas sempre me trazendo paz e tranquilidade nessa nossa conquista. Sem dúvida, Senhor se cheguei aqui foi por sua vontade.

Agradeço a minha mãe, mesmo com suas dificuldades me proporcionou sempre condições para os meus estudos, agradeço também por fazer minha vida cada dia mais feliz.

Agradeço à minha amada Jordana, pela compreensão, pelo apoio infinito e por proporcionar momentos alegres na minha vida. Eu te amo Jó !!!

Agradeço às minhas irmãs Herciliana, Mônica e Fernanda e aos meus sobrinhos Rennan e Izabella pelos incentivos, pelas conversas e por me educar na ausência do meu pai. Obrigado!

Agradeço ao meu pai (in memorian), que mesmo na sua ausência, tenho certeza que esteve sempre torcendo pelas minhas conquistas. Obrigado!

Agradeço à minha professora, Márcia, pela orientação e compreensão no desenvolvimento da pesquisa. Obrigado por ter me acolhido como orientando.

Agradeço ao professor Janiro Costa Rêgo, pelos ensinamentos, pelas reuniões e pela ajuda e paciência durante todos os encontros.

Agradeço ao professor José do Patrocínio Tomaz Albuquerque pelos ensinamentos, pelas dúvidas esclarecidas durante a pesquisa.

Aos professores do curso de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Área de Engenharia Hidráulica da UFCG: Vajapeyam S. Srinivasan, Carlos de Oliveira Galvão, Eduardo Enéas de Figueiredo, Iana Alexandra Alves Rufino, Annemarie Konig, Rosires Catão Curi e Wilson Fadlo Curi pelos conhecimentos prestados e esclarecimentos concedidos durante o curso.

A todos da minha turma de mestrado: Heber de Andrade Melo, José Augusto de Souza, Renato de Oliveira Fernandes, Rodolfo Luiz da Nóbrega, Sâmea Valensca e Wendel Silva Cabral pelo coleguismo, companheirismo, amizade, cumplicidade durante todo o curso.

À secretária do curso de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UFCG, Josete de Sousa Ramos, pelo apoio e ajuda nos assuntos burocráticos durante o período do curso.

Aos funcionários do Laboratório de Hidráulica da UFCG: Alrezinha, Haroldo, Ismael, Lindimar, Raulino, Ronaldo e Vera pela atenção e compartilhamento de bons momentos de descontração durante muitos anos de convivência.

A todos da AESA (Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba) que colaboraram de forma gloriosa para a concretização desse trabalho.

Ao Engenheiro José Carlos, do setor de manutenção da CAGEPA, pelo apoio nas medições de campo.

Aos examinadores pelo reforço que forneceram para a melhoria dessa dissertação.

À UFCG (Universidade Federal de Campina Grande - PB), pelo oferecimento do programa de mestrado.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo suporte financeiro, através da bolsa de estudos concedida para a realização desse trabalho.

Ao Projeto “Integração dos instrumentos de outorga, cobrança e enquadramento das águas subterrâneas” (ASUB) – MCT/FINEP/CT-HIDRO – pela oportunidade de ganhar conhecimento e de trabalhar em equipe. A todos que fazem parte desse projeto e em especial à Prof.^a Márcia Maria, Prof. Patrocínio Tomaz, Prof. Janiro Costa Rêgo, Prof.^a. Iana Alexandra, Dayse Luna Barbosa, Paulo da Costa Medeiros, Mirella Leôncio da Costa, Danniel Araújo, José Augusto de Souza, Jonh Elton, Marília Dantas, Maria Adriana de Freitas, Camila Macêdo Medeiros, Renata Travassos, Bárbara Barbosa, Samilly Jaciara, Douglas Almeida e Ubirajara Duarte pelo companheirismo, compreensão, paciência e momentos de descontração.

Finalmente, agradeço a todos, que de alguma forma, colaboraram para a realização e conclusão dessa dissertação.

*"Todas as coisas são possíveis
àqueles que creem." (S. Marcos 11:23)*

**MODELAGEM DO FLUXO SUBTERRÂNEO NA BACIA SEDIMENTAR COSTEIRA
DO BAIXO CURSO DO RIO PARAÍBA**

A utilização crescente dos recursos hídricos subterrâneos, para atendimento da população nas várias atividades, contribui para escassez do mesmo, provocando crises no abastecimento das grandes cidades, conflitos de usos e deteriorização da qualidade e quantidade da água. Essa exploração tem ocorrido de forma desordenada e descontrolada provocando em algumas regiões o desaparecimento de mananciais subterrâneos e superficiais, subsidências de terreno, perda da capacidade do aquífero e intrusão salina em aquíferos costeiros. Como forma de gerir as águas subterrâneas adequadamente, evitando os problemas supracitados, tem-se utilizado aplicativos que através da modelagem matemática, proporcionam aos tomadores de decisão maior confiabilidade com respeito aos aspectos qualitativos e quantitativos desses recursos. O objetivo geral dessa pesquisa é estabelecer um modelo matemático que represente o comportamento hidrogeológico em parte da Bacia Sedimentar Costeira do Baixo curso do Rio Paraíba, no estado da Paraíba, para subsidiar a Gestão de Águas Subterrâneas. Através do aplicativo matemático foi estabelecido o comportamento hidrogeológico do aquífero e simulado critérios de outorga de direito de uso dos recursos hídricos. Como resultado obteve-se o diagnóstico atual do aquífero confinado, o volume (explotável) da descarga natural do subsistema, a vazão de exploração pelos poços, a interferência provocada por poços e a intrusão salina para o subsistema hidrogeológico em estudo. Esses resultados mostram que o aquífero modelado, encontra-se com uma intensa exploração, e que medidas de Gestão de Recursos Hídricos devem ser tomadas para evitar comprometimento dos aspectos qualitativos e quantitativos das águas subterrâneas.

Palavras-chave: gestão de recursos hídricos, águas subterrâneas, modelagem matemática.

ABSTRACT

**MODELING OF UNDERGROUND FLOW IN SEDIMENTARY BASIN WATERS
DOWN THE RIVER COURSE PARAÍBA**

The increased use of groundwater resources to meet the population on various activities, contributes to lack of it, causing crises in the supply of large cities, conflicts of use and deterioration of quality and quantity of water. This exploration has occurred disorderly and uncontrolled in some areas causing the disappearance of groundwater and surface water sources, land subsidence, loss of the ability of the aquifer and seawater intrusion in coastal aquifers. In order to manage the groundwater properly, avoiding the problems described above, it has been used applications through mathematical modeling, providing decision makers with greater reliability with respect to qualitative and quantitative aspects of these resources. The overall objective of this research is to establish a mathematical model to represent the hydrogeological behavior in part of the Sedimentary Coast of the Lower course of Paraíba River, State of Paraíba, in order to support Groundwater Management. Through application of mathematical behavior was established and simulated aquifer hydrogeological criteria for granting right of use of water resources. As a result we obtained the current diagnosis of the confined aquifer, the volume (exploitable) of the natural discharge of the subsystem, the flow rate of exploitation by wells, the interference caused by wells and saltwater intrusion into the hydrogeological subsystem under study. These results show that the modeled aquifer, is in an intense exploitation, and that measures of Water Resources must be taken to avoid compromising quality and quantitative aspects of groundwater.

Key-words: water resources management, groundwater, modeling.

SUMÁRIO

	Páginas
RESUMO	VIII
ABSTRACT	IX
LISTAS DE FIGURAS	XIII
LISTAS DE TABELAS	XVI
LISTAS DE SIGLAS	XVII
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	2
1.1.1 Objetivo Geral	2
1.1.2 Objetivos Específicos	2
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Gestão de Recursos Hídricos Subterrâneos	3
2.1.1 Conceitos.....	3
2.1.2 Âmbito Nacional	4
2.1.3 Âmbito Estadual.....	6
2.2 Fluxo de Águas Subterrâneas	7
2.2.1 Equações que regem o fluxo subterrâneo.....	7
2.2.2 Modelos Matemáticos para Águas Subterrâneas.....	12
2.2.3 Classificação dos Modelos Matemáticos de Águas Subterrâneas.....	13
2.2.4 Elementos da Modelagem	15
2.2.5 Exemplos de Aplicações de Modelos Matemáticos para Águas Subterrâneas	18
CAPÍTULO III – ÁREA DE ESTUDO	21
3.1 Localização.....	21
3.1.1 Fatores Socioeconômicos	22
3.1.2 Aspectos Hidro-Climatológicos	23

3.1.3	Morfologia.....	26
3.1.4	Hidrografia	27
3.1.5	Geologia	28
3.1.6	Hidrogeologia.....	29
3.1.7	Utilização das águas subterrâneas na área.....	30
CAPÍTULO IV – MODELAGEM DA ÁREA DE ESTUDO		32
4.1	Coleta, Tratamento e Interpretação dos Dados Básicos.....	32
4.1.1	Mapa Geológico	32
4.1.2	Cortes Geológicos	33
4.1.3	Perfis Lito-estratigráficos de poços.....	37
4.1.4	Configuração Topográfica	37
4.1.5	Cadastro de poços.....	38
4.1.6	Visitas de Campo.....	38
4.2	Etapas Metodológicas da Modelagem.....	39
4.2.1	Modelo Conceitual.....	39
4.2.2	Escolha da Plataforma Computacional	41
4.2.3	Discretização da Área Modelada	42
4.2.4	Condições de Contorno	42
4.2.5	Atribuição dos dados no aplicativo matemático	45
4.3	Calibração do Modelo	47
4.3.1	Calibração da Condutividade Hidráulica (K)	47
4.3.2	Calibração do Armazenamento Específico (Ss).....	54
4.4	Verificação da Condutividade Hidráulica (K).....	63
CAPÍTULO V – APLICAÇÕES DO MODELO E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS.....		67
5.1	Modelo Conceitual	67
5.2	Calibração do Modelo	68

5.3	Interferência entre poços.....	68
5.4	Diagnóstico Atual do Subsistema Confinado	69
5.5	Simulação do Modelo para o Estado Natural	73
5.6	Intrusão Salina	78
CAPITULO VI - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES		81
6.1	Conclusões.....	81
6.2	Recomendações	82
6.2.1	Recomendações para pesquisas futuras	82
6.2.2	Recomendações para a Gestão de Recursos Hídricos na Área de Estudo	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		84
ANEXOS		90

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1-Esboço esquemático de dispositivo utilizado por Darcy (FEITOSA et al, 2008). 8	8
Figura 2 – Classificação dos Modelos Matemáticos de Águas Subterrâneas.....	13
Figura 3- Aquífero, parte não confinada e parte confinada: (a) geologia – corte vertical e (b) modelo horizontal	14
Figura 4-(a) Modelo vertical para análise de drenagem agrícola e (b) Modelo vertical para análise de intrusão marinha.....	14
Figura 5- Vista esquemática de um Modelo Quase Tridimensional. As propriedades de drenança das camadas confinantes são utilizadas para conectar os aquíferos	15
Figura 6-Bacia Sedimentar Costeira inserida na sub-bacia do Baixo Curso do rio Paraíba.	21
Figura 7- Área de Estudo.	22
Figura 8 – Modelo Digital de Elevação da Área Modelada.	26
Figura 9- Mapa de distribuição superficial das Formações Geológicas da área.	28
Figura 10-Corte Geológico da Bacia Sedimentar Costeira PE-PB (Projeto ASUB, 2009).30	30
Figura 11 - Poços da Cagepa (a) Bairro de Cruz das Armas – João Pessoa e (b) Bairro do Centro – Cabedelo.	31
Figura 12 – Usos das águas subterrâneas na área de estudo.	31
Figura 13 – Fluxograma da modelagem da área de estudo.	32
Figura 14 – Mapa Geológico Parcial da Bacia Sedimentar Costeira do Baixo Curso do Rio Paraíba.....	34
Figura 15 – Corte Geológico AB (Bacia Sedimentar Costeira do Baixo Curso de Rio Paraíba).....	35
Figura 16 – Corte Geológico EF (Bacia Sedimentar Costeira do Baixo Curso de Rio Paraíba).....	36
Figura 17 – Cotas Topográficas da área estudada.....	37
Figura 18 - (a) Captação a fio d’água no Parque Arruda Câmara (Bica) em João Pessoa e (b) medição do nível estático do Poço da Cagepa no Bairro do Centro em Cabedelo. .	38
Figura 19 – Distribuição vertical dos sistemas hidrogeológicos da área de estudo.....	39
Figura 20 – Mapa de Distribuição Superficial das Formações Geológicas e fluxo horizontal (→) no aquífero Beberibe.....	40

Figura 21 – Modelo conceitual do aquífero confinado a ser implementado no aplicativo matemático.....	41
Figura 22 – Condições de Contorno estabelecidas para o modelo matemático.	43
Figura 23 – Esboço da determinação da condição de contorno (A).	44
Figura 24 - Condições de limite de fluxo atribuído ao modelo. Na cor cinza claro estão indicadas as células que foram atribuídas sem fluxo, e em cinza média (parte interna da área estudada) e azul, dentro dos contornos, são células com fluxo ativo.	46
Figura 25 – Distribuição dos poços com medições de níveis estáticos (NE) utilizados na calibração da condutividade hidráulica.....	47
Figura 26 – Método da (a) Iso – condutividades e (b) áreas de condutividade hidráulicas, com respectivos intervalos de condutividade hidráulica.	49
Figura 27 – Áreas de condutividade.	50
Figura 28 – Mapa potenciométrico (a) valores de carga hidráulica calculados (5 em 5 m) e (b) valores de carga hidráulica observados (5 em 5 m) em julho de 2009.	52
Figura 29 - Diagrama de dispersão obtido na calibração estacionária (permanente) para 16 poços usados nesta calibração.	53
Figura 30 - Distribuição dos poços com medições de níveis estáticos (NE) utilizados na calibração do armazenamento específico.....	54
Figura 31- Distribuição dos poços de bombeamento da CAGEPA.	57
Figura 32 – Mapa potenciométrico (a) valores de carga hidráulica observados (5 em 5 m) e (b) valores de carga hidráulica calculados (5 em 5 m) em outubro de 2009.....	59
Figura 33 – Áreas com valores do armazenamento específico calibrados.	60
Figura 34 – Mapa potenciométrico (a) valores de carga hidráulica observados (5 em 5 m) e (b) valores de carga hidráulica calculados (5 em 5 m) em outubro de 2009.....	60
Figura 35 - Diagrama de dispersão obtido na calibração transiente para 11 poços usados nesta calibração.	61
Figura 36 – Localização dos poços com taxas de bombeamentos calibradas.	62
Figura 37 – Localização dos poços utilizados na verificação da condutividade hidráulica.	64
Figura 38 - Mapa potenciométrico (a) valores de carga hidráulica calculados (3 em 3 m) e (b) valores de cargas observados (3 em 3 m) em 2007.....	65

Figura 39 - Diagrama de dispersão obtido na verificação estacionária para 11 poços usados nesta verificação.	65
Figura 40 – Perfil AB– Cargas calculadas pelo modelo matemático para os meses de julho e outubro de 2009.	71
Figura 41 – Esquema do possível comportamento do fluxo na entrada sudoeste da área de estudo.	71
Figura 42 – Perfil CD – Cargas calculadas pelo modelo matemático para os meses de julho e outubro de 2009.	72
Figura 43 – Cargas hidráulicas calculadas pelo modelo matemático, em destaque a localização das cargas correspondente aos resquícios do sistema natural.	74
Figura 44 – Esquema para obtenção das cargas hidráulicas no estado natural do subsistema.	74
Figura 45 – Células de cor azul, cargas especificadas (fixas), para o regime permanente.	76
Figura 46 – Perfil EF – Cargas calculadas pelo modelo matemático para os meses de .	76
Figura 47 – Perfil GH – Cargas calculadas pelo modelo matemático para os meses de julho e outubro de 2009 (estado natural).	77
Figura 48 – Esboço da intrusão salina para o aquífero modelado.	79
Figura 49 – Esquema da intrusão salina com a continuidade da exploração do subsistema confinado.	80

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1-Estação climatológica localizada em João Pessoa	23
Tabela 2 – Distribuição temporal das médias das temperaturas mínimas mensais e anuais – Estação climatológica de João Pessoa (°C).....	24
Tabela 3 – Distribuição temporal das médias das temperaturas médias mensais e anuais – Estação climatológica de João Pessoa (°C).....	24
Tabela 4 – Distribuição temporal das médias das temperaturas máximas mensais e anuais – Estação climatológica de João Pessoa (°C).....	24
Tabela 5- Distribuição mensal da umidade relativa do ar – Estação climatológica de João Pessoa (em %)	24
Tabela 6 - Distribuição mensal da insolação global – Estação climatológica de João Pessoa (em horas).	24
Tabela 7- Precipitações mensais(mm) para o Ano de 2009.....	25
Tabela 8- Distribuição mensal da evaporação – Estação climatológica de João Pessoa (em mm)	25
Tabela 9 – Dados de níveis estáticos (1ª campanha ASUB – PB)	48
Tabela 10 – Condutividade Hidráulica obtida através de ensaio de Bombeamento.....	49
Tabela 11 – Cargas Hidráulicas calculadas e observadas para julho de 2009.....	51
Tabela 12 – Condutividade Hidráulica para a área de estudo	51
Tabela 13 - Dados de níveis estáticos (1ª e 2ª campanha ASUB – PB).....	55
Tabela 14 – Poços de bombeamento	57
Tabela 15 – Valores iniciais de armazenamento específicos para as áreas.....	58
Tabela 16 – Poços de bombeamento com vazões calibradas para área de estudo	62
Tabela 17 – Parâmetros Hidrodinâmicos calibrados para a área de estudo	63
Tabela 18 - Dados de níveis estáticos (Costa et al.,2007)	63
Tabela 19 – Raio de influência de poços para regime de bombeamento de 8, 12 e 24 horas.....	69
Tabela 20 – Taxas de Bombeamento por áreas	70
Tabela 21 – Diagnóstico das vazões de bombeamento	73

LISTAS DE SIGLAS

CAGEPA – Companhia de Água e Esgoto da Paraíba

IAP – Índice da Ativação do Potencial

PERH – Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba

AESA – Agencia Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

PIB – Produto Interno Bruto

ASUB – Águas Subterrâneas

UTM – Universal Transversa de Mercator

DEM – Digital Elevation Model

PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

IDH – Índice de Desenvolvimento Humano

DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra a Seca

NASA - National Aeronautics and Space Administration

CDRM – Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais do Estado da Paraíba

SIAGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas

A crescente demanda pelos recursos hídricos, para atendimento da população nas várias atividades, contribui para escassez do mesmo, provocando crises no abastecimento das grandes cidades, conflitos de usos e deteriorização da qualidade e quantidade da água. Além da utilização dos recursos hídricos superficiais, observa-se o constante uso da água subterrânea, em cidades como Recife (PE), Maceió (AL) e cidades de São Paulo que são abastecidos por poços.

A utilização acentuada dos recursos hídricos subterrâneos ocorre devido a vários fatores, tais como: degradações das águas superficiais e processos tecnológicos que viabilizam a captação a aquíferos profundos por possuírem, naturalmente, boa qualidade e serem economicamente viáveis. Assim sendo, o uso desordenado e descontrolado desses recursos tem provocado o desaparecimento de mananciais subterrâneos e superficiais, subsidências de terreno, perda da capacidade do aquífero e intrusão salina em aquíferos costeiros.

Como forma de gerir as águas subterrâneas adequadamente, evitando os problemas supracitados, necessitam-se de estudos que considerem as peculiaridades dessas águas para que não comprometam o seu uso em relação aos aspectos quantitativos e qualitativos.

Esses estudos podem ser realizados através da modelagem matemática, um procedimento essencial para a fase do planejamento contido em um processo de gestão das águas. Os resultados dessa modelagem numérica podem fornecer subsídios para a análise de projetos e tomadas de decisões. Portanto, os modelos matemáticos tornam-se importantes ferramentas para a compreensão do sistema real, permitindo a previsão e comparação de alternativas ou cenários futuros.

Essa pesquisa desenvolver-se-á na Bacia Hidrográfica do rio Paraíba, na Região do Baixo Curso, na Paraíba, compreendendo a porção sedimentar que apresenta um significativo potencial de água subterrânea.

Essa região apresenta atualmente um alto valor do Índice de Ativação do Potencial- IAP (relação entre o potencial ativado e o potencial subterrâneo), fator esse que pode ser explicado pela ineficiência da gestão de recursos hídricos subterrâneos.

Conforme o PERH-PB – Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba (AESA, 2006), a Região do Baixo Curso do rio Paraíba apresenta um Índice de Ativação do Potencial (IAP) das águas subterrâneas de 0,827, significando a ativação de 82,7% do potencial subterrâneo da região.

Estudos recentes sobre a potenciometria da bacia indicaram a existência de poços com níveis estáticos negativos, em relação ao nível do mar, na orla marítima, e de áreas com rebaixamentos excessivos nas áreas dos distritos industriais das cidades de João Pessoa e Bayeux (UFCEG/UFAL/UFMS, 2007).

Mediante o exposto, verifica-se a necessidade de uma gestão mais eficiente dos Recursos Hídricos subterrâneos da Região do Baixo Curso do rio Paraíba. Esta pesquisa tenta contribuir nessa temática, modelando o fluxo subterrâneo daquela região e fornecendo subsídios para a gestão de recursos hídricos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Aplicar um modelo matemático que represente o comportamento hidrogeológico em parte da Bacia Sedimentar Costeira do Baixo Curso do rio Paraíba, na Paraíba, para subsidiar a Gestão de Águas Subterrâneas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- ✓ Elaborar um modelo conceitual para uma área da Bacia Sedimentar do Baixo Curso do rio Paraíba,
- ✓ Aplicar um modelo matemático para o fluxo subterrâneo em uma área da Bacia Sedimentar do Baixo Curso do rio Paraíba,
- ✓ Aplicar o modelo matemático para subsidiar a gestão de águas subterrâneas.

2.1 Gestão de Recursos Hídricos Subterrâneos

A exploração inadequada da água pode conduzir a impactos catastróficos sobre os recursos hídricos, em particular os subterrâneos – no caso de contaminação de um aquífero, a despoluição é onerosa e, além disso, na maioria dos casos não se consegue estabelecer os aspectos qualitativos necessários para os usos a que se destinam. Uma maneira para evitar a má utilização dos recursos hídricos, tanto superficiais quanto subterrâneos, é a implementação de uma eficiente gestão. Alguns conceitos e aspectos relacionados com a Gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos são apresentados a seguir.

2.1.1 Conceitos

- *Potencial (reserva reguladora) de Água Subterrânea*

Para Costa et al (2007) o potencial é a vazão média do escoamento subterrâneo de longo período que sai à rede hidrográfica (vazão de base) sobreposta ao sistema, sub-sistema e seus aquíferos constituintes e, no caso de sistemas costeiros como o Pernambuco-Paraíba, acrescidos do fluxo subterrâneo que atinge o oceano.

Conforme Feitosa et al (2008), as reservas reguladoras (reservas renováveis) representam o comportamento mediano secular das variações sazonais do nível da água subterrânea, produzidas por entradas supostas iguais a saída, ou seja, traduz um estado de equilíbrio dinâmico entre a recarga e a descarga (vazão de escoamento natural) do sistema de aquífero.

O potencial ou reserva reguladora pode ser estimado pela entrada natural do sistema (*recarga*) – componente difícil de se determinar, devido à necessidade do conhecimento do regime da bacia em suas condições naturais – ou pela descarga de base dos rios, através das medições registradas nos hidrogramas.

- *Disponibilidade*

A disponibilidade hídrica refere-se à água efetivamente disponível em quantidade e qualidade segura e adequada. Essa por sua vez, é obtida através da ativação do potencial com a construção de várias obras hidráulicas. Porém, a potencialidade de um sistema não é convertida completamente em disponibilidade, pois deve ser considerado o atendimento da demanda ecológica natural.

Costa et al (2007) consideraram dois tipos de disponibilidades: A *instalada*, que corresponde à descarga anual explorada pelos poços em operação existentes na bacia, em regime de bombeamento de 24/24 horas; e a *disponibilidade efetiva*, que é a descarga anual efetivamente bombeada, conforme o regime de bombeamento praticado, levando-se em consideração eventuais paralisações, que podem ser de curtos e longos prazos, planejadas ou não.

- *Reservas*

A reserva de água subterrânea não é, em sua totalidade, anualmente renovável. Ela se acha acumulada nos espaços vazios entre os grãos dos minerais formadores das rochas, formando um volume que, embora interaja com o potencial, se mantém constante através dos tempos. “Formada em tempos geológicos pretéritos, a reserva não apresenta idade cronológica coincidente com a idade das formações que a contêm. Mas, por sua interação com o potencial, é rejuvenescida com a recarga e circulação do potencial em seu interior” (COSTA et al, 2007).

Albuquerque e Rêgo (1999) afirmam que “as reservas não devem ser exploradas, visto que a exploração significaria exaurir o potencial e, com isso, gerar problemas hidrológicos, ecológicos, geotécnicos, às vezes catastróficos e irreversíveis”.

2.1.2 Âmbito Nacional

A Constituição Federal (CF) de 1988 (BRASIL, 1988) provocou algumas modificações, tais como a extinção do conceito de bem natural privado que era dado às águas subterrâneas no art. 96 do Código de Águas de 1934, sendo *as águas superficiais ou subterrâneas, fluentes, emergentes e em depósito, ressalvadas, neste caso, na forma da lei, as decorrentes de obras da União*, consideradas como bens dos estados, conforme cita o art. 26, inciso I, da CF/88 (COSTA et al., 2008).

Em 8 de janeiro de 1997 foi promulgada a Lei Federal nº. 9.433 (Lei das Águas) que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e regulamentou o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal (BRASIL, 1997). Essa lei, em seus fundamentos (art. 1º), reconhece a água como um recurso natural, limitado, dotado de valor econômico, cujo domínio é público. Determina, também, que sua gestão deve ser descentralizada e participativa, devendo sempre proporcionar o uso múltiplo dos recursos hídricos.

Os objetivos da Lei nº 9.433/97 estão apresentados no art. 2º, entre eles, o de promover a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, com vistas ao desenvolvimento sustentável. Para a realização de uma gestão integrada, através da implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, foram estabelecido no art. 5º, da referida lei, os instrumentos de gestão, considerando a associação das águas, ou seja, considerando tanto as águas superficiais quanto as subterrâneas.

Conforme fundamento da Lei 9.433/97 (BRASIL, 1997), a água ao ser considerada de domínio apenas público ocasionou a necessidade da utilização de uma forma de autorização do Estado para uso desses recursos hídricos por terceiros. Essa forma de autorização é apresentada na referida lei por meio do instrumento de outorga de direito de uso de recursos hídricos.

Para o instrumento da Outorga de direito de uso da água, a Resolução do CNRH (Conselho Nacional de Recursos Hídricos) nº. 16/01 afirma que a extração de água de aquífero subterrâneo para consumo final ou insumo de processo produtivo deve ser outorgada. Para outorgar, o órgão gestor de recursos hídricos estadual necessita ter conhecimento a respeito do comportamento hidrogeológico dos aquíferos e um banco de dados, com o cadastro de todos os poços existentes, abandonados ou em funcionamento, para viabilizar a outorga.

Tratando-se de águas subterrâneas, a Constituição, determina que são responsabilidades dos Estados e do Distrito Federal, a dominialidade das águas subterrâneas e as emissões dos atos de outorga de direito de uso de recursos hídricos.

A Resolução do CNRH nº 92/08 estabelece critérios e procedimentos gerais para proteção e conservação das águas subterrâneas no território brasileiro. Essa resolução em seu 2º art. resolve que os órgãos gestores deverão promover estudos

hidrogeológicos para a compreensão do comportamento do aquífero, com verificação das áreas de recarga e definição de zonas de proteção do aquífero. Identificação das potencialidades, disponibilidades e vulnerabilidade dos aquíferos para a exploração das águas subterrâneas, em especial nas áreas com indícios de superexploração.

Ainda sobre essa resolução, em seu art. 6º é estabelecido que as captações de águas subterrâneas deverão ser dotadas de dispositivos que permitam a coleta de água, medição de nível, vazão e volume captado com visão no monitoramento quantitativo e qualitativo .

2.1.3 Âmbito Estadual

No âmbito estadual, a política de recursos hídricos da Paraíba foi instituída pela Lei Estadual nº. 6.308/96 (PARAÍBA, 1996) e recentemente alterada pela Lei Estadual nº. 8.446/07 (PARAÍBA, 2007).

Vieira e Ribeiro (2007), afirmam que “os princípios e diretrizes da política estadual, conforme estabelecidos pela Lei nº. 6.308/96 estão de acordo com os fundamentos e as diretrizes gerais de ação determinados pela Lei nº. 9.433/97 (BRASIL, 1997) para a Política Nacional de Recursos Hídricos”.

Em relação à outorga de direito de uso dos recursos hídricos, o Decreto nº. 19.260/97 (PARAÍBA, 1997) regulamenta a outorga do direito de uso dos recursos hídricos no estado da Paraíba. Nele há o estabelecimento do critério de inexigibilidade de outorga para captações não superiores ao valor de 2m³/h para captação direta na fonte, superficial ou subterrânea. Assegura, ainda, que não se concederá outorga para lançamento na água de resíduos sólidos, radioativos, metais pesados e outros resíduos tóxicos perigosos e lançamento de poluentes nas águas subterrâneas.

No art. 9, o decreto estabelece que o pedido de outorga do direito de uso de águas será processado perante a Secretaria Extraordinária do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e Minerais. Nesse enfoque, cabe a Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESAs) a concessão da outorga de direito do uso de Recursos Hídricos.

Em seu art. 14, o Decreto sujeita a outorga às condições de disponibilidade hídrica, observância das prioridades de uso e comprovação de que o uso de água não cause poluição ou desperdício dos recursos hídricos. Em se tratando de água

subterrânea, a disponibilidade hídrica será entendida em função das características hidrogeológicas do local ou da bacia sobre a qual incide a outorga, observando ainda a vazão nominal de teste do poço, ou a capacidade de recarga do aquífero.

Segundo a AESA (2008), o que se utiliza como critério de outorga para água subterrânea é a vazão de teste de poço, advinda do projeto de poço, assinado por profissional devidamente capacitado, que o requerente apresenta ao solicitar a outorga. O critério de capacidade de recarga do aquífero, não é utilizado, visto que é uma informação bastante difícil de ser conhecida, sendo necessária a modelagem detalhada dos aquíferos, com suas áreas de recarga, descarga e coeficientes hidrodinâmicos, para a sua correta determinação.

Nobre e Nobre (2001), cometam que:

A gestão dos recursos hídricos subterrâneos deve sempre ser estabelecida com base na avaliação de condições hidrogeológicas específicas bem como de possíveis impactos ambientais associados ao desenvolvimento e implantação de equipamento de extração para satisfazer demandas múltiplas e usos cada vez mais competitivos.

Essas condições podem ser avaliadas, através da aplicação de modelos matemáticos que entendam fisicamente o sistema hídrico em questão.

2.2 Fluxo de Águas Subterrâneas

2.2.1 Equações que regem o fluxo subterrâneo

Segundo Albuquerque (2008), entende-se por água subterrânea:

Aquela que ocorre e que circula em profundidade preenchendo poros de naturezas diversas (vazios entre os grãos, fraturas, falhas e fissuras abertas, cavidades cársticas, juntas entre camadas ou entre colunas de rochas vulcânicas, etc.) e/ou que aflora e circula em superfície formando lagos ou constituindo o fluxo de base da rede hidrográfica superficial.

O fluxo de água subterrânea varia de intensidade em função das características do meio poroso (solo) encontrado em seu caminho. Algumas formações geológicas apresentam vazios relativamente permeáveis e contínuos facilitando o fluxo. Entretanto, se encontrar camadas menos permeáveis, a água será retida e, eventualmente, preencherá todos os interstícios da região sobrejacente, formando zonas saturadas.

Em 1856, o engenheiro Hidráulico francês Henry Darcy, investigava o fluxo de água em um filtro de areia (Figura 1), e concluiu que “a vazão do escoamento era proporcional à seção transversal do filtro (A), proporcional à perda da carga hidráulica – diferença de altura de água e Inversamente proporcional à distância L entre os dois piezômetros” (FEITOSA et al, 2008).

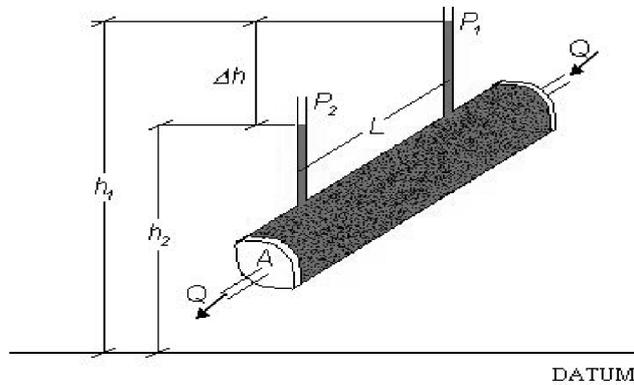


Figura 1-Esboço esquemático de dispositivo utilizado por Darcy (FEITOSA et al, 2008).

Onde:

h_1 = carga hidráulica no piezômetro 1 (P1) [L];

h_2 = carga hidráulica no piezômetro 2 (P2) [L];

Δh = variação da carga entre os piezômetros [L];

Q = vazão constante [L^3/T];

A = área da seção transversal do cilindro [L^2];

L = distância entre os piezômetros [L]

Introduzindo uma constante de proporcionalidade K , Darcy chegou à equação:

$$Q = -KA \frac{dh}{dl} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

Q = vazão de escoamento [L^3/T];

K = condutividade hidráulica ou permeabilidade de Darcy na direção do fluxo [L/T];

A = área transversal ao fluxo [L^2];

$\frac{dh}{dl}$ = gradiente hidráulico [adm].

O processo de escoamento só se estabelece quando existe uma diferença ou gradiente de potencial entre pontos de um sistema de fluxo. Conseqüentemente, cada ponto de um sistema de escoamento de água subterrânea em meios porosos é dotado de um potencial de fluxo.

Para Rêgo e Albuquerque (2004), o “potencial de fluxo” para meios porosos é a “energia mecânica por unidade de massa de fluido”; e a carga hidráulica “h” é a energia por unidade de peso. Esses autores citam que, na experiência de Darcy, o potencial e a carga hidráulica satisfazem essas condições em que:

$$H = z + \rho g \quad \text{Equação 2}$$

Sendo a carga hidráulica, a soma das duas componentes: a carga de elevação ou cota de posição (z) e a carga de pressão (ρg). Em linhas gerais, a carga hidráulica é a diferença entre a cota topográfica do ponto de medição e a profundidade do nível estático desse ponto.

Dividindo a Equação 1 pela área, tem-se:

$$q = -K \frac{dh}{dl} \quad \text{Equação 3}$$

Onde: q é a vazão específica (velocidade de Darcy).

O princípio básico do fluxo é a lei da continuidade (ou conservação da massa), que é expressa através da vazão de entrada e saída em um volume representativo (ANDERSON E WOESSNER, 1992).

$$Q_{saída} - Q_{entrada} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$Q_{saída}$ = vazão que sai do sistema;

$Q_{entrada}$ = vazão que entra no sistema;

ΔV = o volume de água retirado ou adicionado;

Δt : intervalo de tempo.

A vazão é definida como:

$$Q = qA = KAi = K \frac{dh}{dl} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

q = vazão específica;

i = gradiente hidráulico;

A = área da seção.

Inseridas as vazões específicas q_x , q_y e q_z para as três dimensões na equação 1 tem-se:

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad \text{Equação 6}$$

Deste modo, o armazenamento específico será:

$$S_s = \frac{\Delta V}{\Delta h \Delta x \Delta y \Delta z} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

$\Delta x, \Delta y$ e Δz = três dimensões do volume representativo;

Δh = variação de carga hidráulica [L];

S_s = Armazenamento específico [1/L].

Então, a equação da continuidade escreve-se agora:

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) = -S_s \frac{\partial}{\partial t} \pm W \quad \text{Equação 8}$$

Onde: W representa os diversos termos de fonte, tais como recarga, evaporação e bombeamento.

Apesar da lei de Darcy ter sido desenvolvida inicialmente, apenas, para o escoamento unidimensional, ela pode ser utilizada para fluxo tridimensional, é o que na prática ocorre com o fluxo de água subterrânea nos aquíferos. Portanto aplicando-a nas três dimensões tem-se:

$$q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}, q_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y}, q_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad \text{Equação 9}$$

Onde: K_x, K_y e K_z são os componentes principais do tensor simétrico da condutividade hidráulica, \vec{K} , nas direções x, y, z e $\frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y}$ e $\frac{\partial h}{\partial z}$ os gradientes hidráulicos nas três dimensões.

Finalmente, obtém-se a equação geral para o fluxo subterrâneo no meio poroso anisotrópico e não-homogêneo:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \pm W \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

h = carga hidráulica [L];

K_x, K_y e K_z = condutividade hidráulica ao longo dos eixos x, y e z , respectivamente [L/T];

S_s = Armazenamento Especifico [1/L];

t = tempo [T];

W = representa fontes ou sumidouros de água [L³/T].

A equação do fluxo subterrâneo configura-se como uma equação diferencial parcial, para a obtenção de sua solução utilizam-se de métodos numéricos, presentes em programas computacionais.

Destaca-se que o fluxo de água subterrânea é dependente das condições de pressão de um aquífero. Portanto, um aquífero confinado caracteriza-se por ter as camadas acima e abaixo impermeáveis, com condições de contorno de fluxo nulo. Considerando que os aquíferos são praticamente horizontais e a variação de espessura é desprezível, a análise pode ser feita apenas no plano do aquífero (Freire, 2002). Isto implica em carga hidráulica independente da posição, ou seja, $h = h(x, y, t)$.

Chamando a espessura do aquífero de b e considerando um modelo bidimensional, tem-se a equação:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(bK_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(bK_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S_s b \frac{\partial h}{\partial t} \pm bW \quad \text{Equação 11}$$

Chamando bW os termos de fontes por R , aplicando as definições de transmissividade ($T = K b$) e de coeficiente de armazenamento ($C = S_s b$) e considerando a transmissividade constante, obtêm-se:

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \pm \frac{R}{T} \quad \text{Equação 12}$$

Sendo:

h = carga hidráulica [L];

T = Transmissividade [L^2/T];

S = Coeficiente de Armazenamento [adm];

t = tempo [T];

W = representa fontes ou sumidouros de água [L^3/T].

2.2.2 Modelos Matemáticos para Águas Subterrâneas

Os modelos são ferramentas fundamentais para o planejamento e previsões de situações reais, ou seja, é uma representação da realidade. Portanto, um modelo é uma representação através de equações matemáticas, como exemplo a equação do fluxo de água subterrânea, solucionada através de aplicativos computacionais.

Feitosa et al (2008) comentam que na hidrogeologia, as interpretações dos resultados de uma simulação, realizadas por um modelo matemático, servem para “entender o funcionamento do aquífero e sistematizar as informações; e as previsões servem para conhecer a resposta do aquífero a determinadas ações”.

De acordo com Custodio e LLamas (1976), “os tipos de modelos se diferenciam na forma de resolver a equação diferencial e na forma de descrever o sistema”. Esses modelos podem ser: *analíticos*, quando a solução exata da equação diferencial utiliza funções analíticas; e *matemáticos*, que são modelos que utilizam métodos numéricos para resolver a equação diferencial. O método numérico mais utilizado é o das diferenças finitas, com que se obtém a solução da equação para uma série de pontos discretos espacialmente e temporalmente. Esse será utilizado durante a execução dessa pesquisa como subsídio para o entendimento do sistema aquífero da Bacia Sedimentar Costeira do Baixo Curso do Rio Paraíba.

2.2.3 Classificação dos Modelos Matemáticos de Águas Subterrâneas

A classificação dos modelos matemáticos de águas subterrâneas está mostrada na Figura 2.

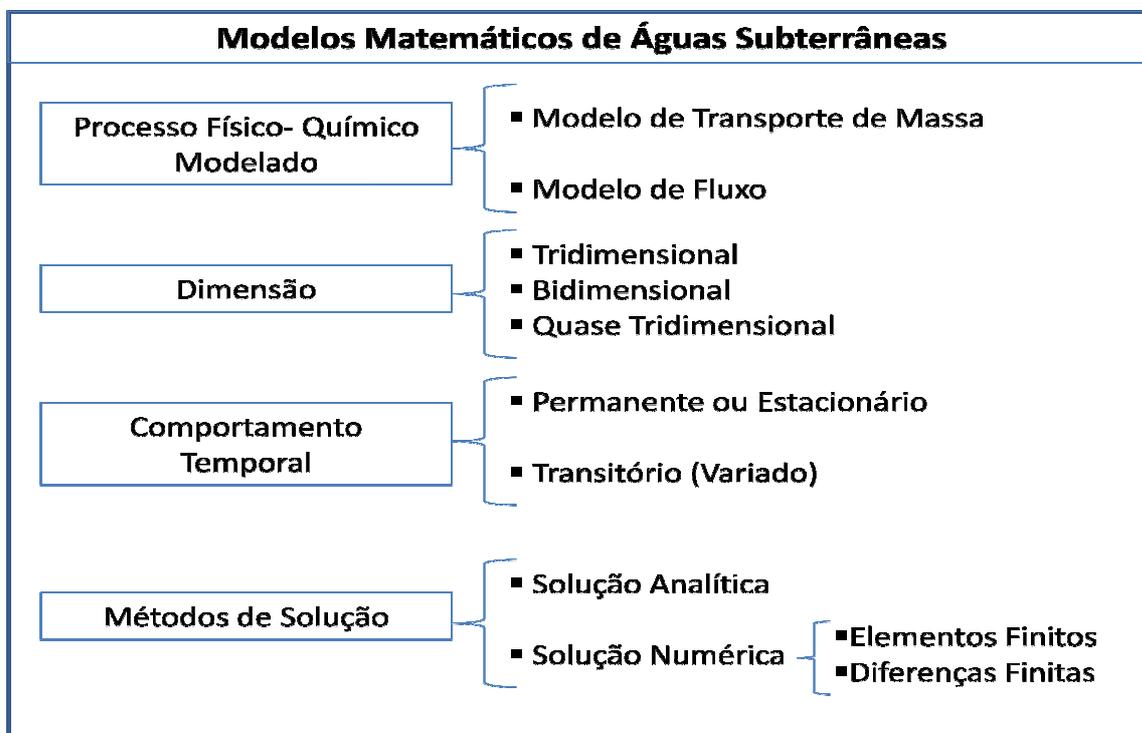


Figura 2 – Classificação dos Modelos Matemáticos de Águas Subterrâneas (adaptado de REGO E ALBUQUERQUE, 2004).

Em relação ao processo físico-químico modelado (Figura 2), os modelos matemáticos de águas subterrâneas dividem-se em *Modelo de Transporte de Massa*; sendo esses os que consideram a propagação, no meio, da concentração de substâncias presentes na água, em solução; e o *Modelo de Fluxo* que trata unicamente do fluxo de água no meio geológico.

De acordo com as direções preferenciais de fluxo ocorrentes, os modelos podem ser: Tridimensionais, bidimensionais e quase tridimensionais.

Os modelos *Tridimensionais* ocorrem quando os componentes de fluxo vertical são importantes e torna-se necessário levá-los em consideração na modelagem. Esses modelos, em geral, são mais difíceis de serem aplicados e necessitam de computadores com maior capacidade de memória e maior velocidade de processamento.

Os modelos bidimensionais horizontais consideram que não existem variações significativas na direção vertical, sendo assim, utilizam equações baseadas em variáveis X e Y. Esses podem ser aplicados para os seguintes tipos de aquíferos: Confinado, Semiconfinado (também chamado de confinado drenante), Não confinado (aquífero livre ou freático) (Figura 3).

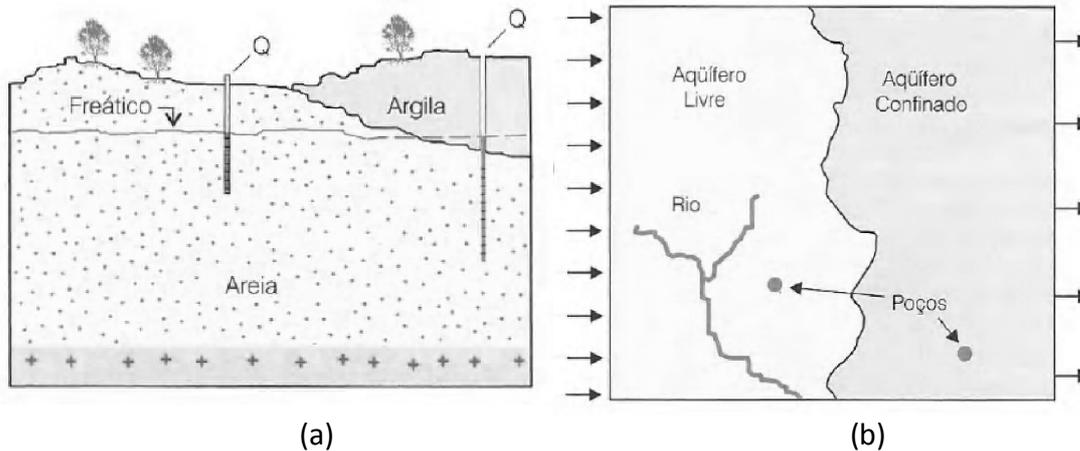


Figura 3- Aquífero, parte não confinada e parte confinada: (a) geologia – corte vertical e (b) modelo horizontal (FEITOSA et al, 2008).

Os modelos bidimensionais verticais são assim denominados quando as características físicas e hidrogeológicas são constantes ao longo de uma direção. Como exemplo de modelos verticais tem-se o escoamento em drenos agrícolas, percolação em barragens e intrusão marinha (Figura 4).

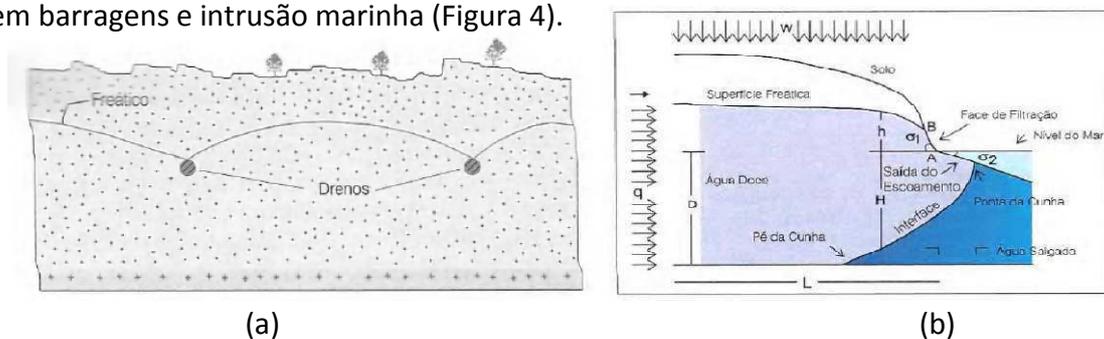


Figura 4-(a) Modelo vertical para análise de drenagem agrícola e (b) Modelo vertical para análise de intrusão marinha (FEITOSA et al, 2008).

Os Modelos Quase Tridimensionais simulam uma sequência de aquíferos superpostos com intercalações de outras camadas semipermeáveis, não considerando as cargas hidráulicas, nem a capacidade de armazenamento das camadas semiconfinantes. Para Newman e Witherspoon (1969) apud Cabral e Demétrio (1997),

“a utilização desses tipos de modelos deve ocorrer quando a condutividade da camada semiconfinante for pelo menos 100 vezes menor do que a condutividade das camadas confinadas” (Figura 5).

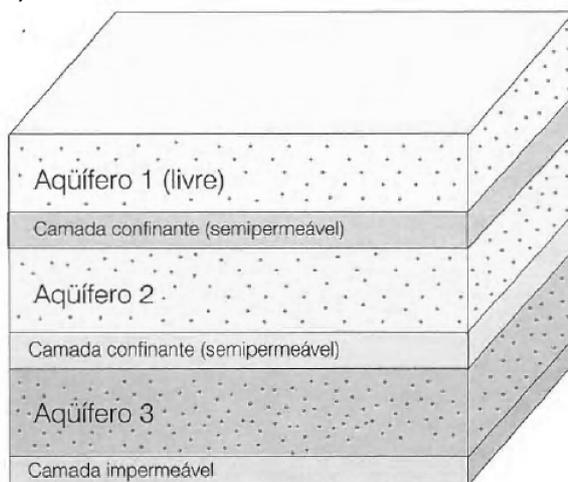


Figura 5- Vista esquemática de um Modelo Quase Tridimensional. As propriedades de drenança das camadas confinantes são utilizadas para conectar os aquíferos (CABRAL E DEMÉTRIO, 1997).

Conforme as variações ao longo do tempo, das grandezas envolvidas no modelo, determinarão se o mesmo será *Permanente* ou *Transitório* (variado).

Por fim, tem-se a classificação de acordo com o método matemático de solução: *modelos analíticos*, ocorrem uma simplificação das equações, de modo que a solução possa ser obtida por métodos analíticos. Enquanto que, os modelos por *métodos numéricos*, as equações são aproximadas numericamente, resultando num sistema de equações que podem ser resolvido usando o computador.

2.2.4 Elementos da Modelagem

Modelo Conceitual em Águas Subterrâneas

O modelo conceitual é uma etapa essencial para a realização da modelagem matemática, e pode ser entendido conforme Rosen e Legran (2000):

Os modelos conceituais compõem uma simplificação das condições naturais de circulação das águas ou representam o entendimento das condições hidrogeológicas sobre bases tridimensionais, possibilitando explicar de forma didática o comportamento dos fluidos.

Esse modelo consiste na representação da realidade do sistema hidrogeológico da forma mais fiel possível, com algumas simplificações que possibilitem a aplicação do

modelo matemático. A compreensão desse sistema baseia-se na interpretação e análise semiquantitativa dos dados de forma que as unidades hidroestratigráficas com respectivas características hidráulicas e o sistema de fluxo da água subterrânea sejam identificadas.

Nesse contexto, Lousada e Campos (2005) afirmam que os modelos conceituais têm importância adicional, uma vez que são as bases para a elaboração dos modelos matemáticos e computacionais, em geral, mais robustos e complexos.

Condições de Contorno

As condições de contorno são expressões matemáticas que especificam a variável dependente (velocidade) ou fluxo nos contornos do domínio e são usadas para incluir os efeitos do sistema hidrogeológico externo da área modelada (COSTA e CASTRO, 2007). Baseiam-se no sistema hidrogeológico real e são utilizadas para a definição das fronteiras hidráulicas (divisores de águas ou linhas de fluxos) ou físicas (como corpos superficiais de águas, rochas impermeáveis) que delimitam o domínio do modelo. Do ponto de vista matemático, as condições de contorno são classificadas em:

- Tipo 1 ou Condição de Dirichlet (Carga Hidráulica Especificada) - representa uma fronteira com carga hidráulica especificada, sendo constante ou em função do tempo.
- Tipo 2 ou Condição de Neumann (Fluxo Especificado) - refere-se a um fluxo de água subterrânea assimilada na fronteira de um modelo. A forma mais utilizada é uma fronteira com fluxo igual a zero, simulando zonas impermeáveis e divisores de água subterrânea.
- Tipo 3 ou Condição de Cauchy (Fluxo dependente de Carga Hidráulica)- o fluxo de água, através de uma fronteira, é calculado com base na diferença entre uma carga hidráulica especificada e a carga hidráulica calculada pelo modelo utilizado, frequentemente, para definir a drenagem de um corpo de água superficial.

Condições Iniciais

Essas condições estão relacionadas com a distribuição tridimensional de carga hidráulica, no domínio do modelo matemático, tomando-se por base o início da

simulação (tempo atual igual a zero). Observa-se que quando são conhecidas as cargas hidráulicas reais, essas podem ser utilizadas como condição inicial, melhorando a resposta do modelo nos primeiros passos de tempo de simulação.

Anderson e Woessner (1992) afirmam que nas simulações em estados transientes, costumam-se utilizar as cargas hidráulicas simuladas em estado permanente como condição inicial.

Calibração do Modelo

A calibração do modelo consiste no ajuste do modelo matemático simulado ao sistema hidrogeológico observado. Assim, os parâmetros hidrogeológicos e as condições de contorno são ajustados para que as cargas hidráulicas, simuladas pelo modelo, sejam semelhantes às cargas observadas.

Anderson e Woessner (1992) comentam que o processo mais utilizado para calibração de um modelo matemático é o de “tentativa e erro”, ou seja, os parâmetros são ajustados manualmente através de simulações sucessivas e comparação entre as cargas hidráulicas calculadas e observadas.

Quando a diferença entre a carga hidráulica calculada e a observada atinge um valor aceitável, também, denominado de “critério de calibração”, o modelo será considerado calibrado.

As três maneiras mais utilizadas para calcular a média das diferenças entre as cargas hidráulicas observadas e calculadas no domínio do modelo são: média dos resíduos, média dos resíduos absoluto e desvio padrão.

A *média dos resíduos* (denominado nos programas como ME - “mean error”), é simplesmente a média da diferença entre as cargas hidráulicas calculadas pelo modelo (h_{calc}) e observadas (h_{obs}) determinado pela equação 13:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{ni}^n (h_{obs} - h_{calc})_i \quad \text{Equação 13}$$

Onde: n é o número de valores de calibração.

Este cálculo da média do resíduo considera os valores positivos e negativos, enquanto que a *média do resíduo absoluto* (referenciado como ME -, “mean absolute

error” nos programas existentes) considera o valor absoluto da diferença entre a carga hidráulica observada e a calculada. Essa média absoluta é obtida pela equação 14.

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(h_{obs} - h_{calc})_i| \quad \text{Equação 14}$$

O *desvio padrão*, isto é, a raiz quadrada da *média dos quadrados do resíduo*, é um dos critérios de calibração mais utilizados, sendo denominado nos programas pela sigla RMS (“root mean squared”), e é calculado pela equação 15.

$$RMS = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_{obs} - h_{calc})_i^2 \right]^{0,5} \quad \text{Equação 15}$$

O programa a ser utilizado na calibração do modelo é o PEST (Doherty *et al.*, 1994), esse possibilitará uma redução no tempo despendido nas calibrações manuais, estando o mesmo completamente integrado ao PMWIN. A técnica de calibração utilizada consiste em ajustar os valores dos parâmetros, de maneira que os valores das cargas hidráulicas calculadas nos poços com medição representem o mais próximo possível os valores medidos. Oliveira (2002) salienta que, a calibração é sem dúvida a etapa que demanda mais tempo e exige cautela na análise dos resultados, pois, sem isto podem ser obtidos resultados não condizentes com a realidade.

2.2.5 Exemplos de Aplicações de Modelos Matemáticos para Águas Subterrâneas

Diante da exploração desordenada dos recursos hídricos, em particular das águas subterrâneas, a maneira de verificar os impactos ocasionados com o uso excessivo é a utilização de modelos matemáticos, ou seja, promover um estudo mais completo da dinâmica da água subterrânea, sendo capaz de prever cenários futuros. Neste tópico serão apresentados estudos realizados com modelos de fluxo subterrâneo para melhor entender o comportamento dos aquíferos e verificar a importância desses estudos como subsídio para a Gestão dos Recursos Hídricos.

Âmbito Internacional

Varni & Usunoff (1999) utilizaram um modelo tridimensional (MODFLOW) para simular o fluxo de água subterrânea na Bacia do rio Azul, província de Buenos Aires-Argentina, a fim de avaliar a eficácia do modelo conceitual do sistema hidrogeológico. Os resultados da modelagem indicaram que a recarga do aquífero não era uniforme para toda região, sendo melhor representada por três taxas de recargas e as taxas de evapotranspiração, foram maiores que as previstas anteriormente, usando o método matemático de Thornthwaite.

Estudo feito por Froukh (2002), na Cisjordânia, mostrou a eficiência da modelagem para aquíferos cársticos e com características heterogêneas. Utilizando uma base de dados de água subterrânea, sistema de informações geográficas e um sistema de modelagem, Froukh (2002) investigou o sistema de aquíferos e concluiu que o aquífero, em estudo, era sensível ao bombeamento.

Hrissanthou et al (2003) utilizaram a modelagem para estimar a vazão, o fluxo subterrâneo e o transporte de sedimentos na Bacia do lago Kastoria, situado no noroeste da Grécia. Através da modelagem foi possível identificar as áreas do lago que produziam mais sedimentos e, então, tomar uma série de medidas para diminuir a produção.

Qahman & Abdelkader (2006) avaliaram a intrusão salina nos aquíferos de Gaza, na Palestina. O modelo foi utilizado para prever alterações futuras no nível de água e a concentração de soluto nas águas subterrâneas por um período de 17 anos. O resultado da modelagem mostrou que a intrusão salina seria agravada se o bombeamento da água subterrânea continuasse na mesma intensidade. O modelo forneceu resultados satisfatórios para a evolução da salinidade do aquífero. Os resultados preliminares da modelagem sugeriram que a intrusão salina começou na década de 1960, coincidindo com informações obtidas a respeito do brusco crescimento do bombeamento da água subterrânea na região.

Âmbito Nacional

Souza et al (2008) utilizaram a modelagem computacional de águas subterrâneas, na cidade de Fortaleza - CE, para gerar cenários de transporte de

contaminantes, com o intuito de obter informações e prever possíveis danos à integridade do meio subsuperficial a partir da disseminação de poluentes oriundos do cemitério Bom Jardim. Esses autores obtiveram, como resposta a não degradação da qualidade das águas subterrâneas, por motivo da presença de uma camada insaturada com indicações de argilas que dificultaram a passagem de organismos microbiológicos e patogênicos.

Lucena (2007) implementou um modelo de simulação do balanço hídrico do solo para estimar a recarga do aquífero freático em João Pessoa, no Bairro do Bessa, almejando à geração de cenários de gestão de recursos hídricos através de simulações em um modelo de fluxo subterrâneo, previamente calibrado para essa área. Os resultados mostraram boa concordância entre observações e simulações. Assegurando, assim, que o modelo de cálculo da recarga foi validado para a área estudada.

Kunzler (2007) aplicou o modelo de fluxo subterrâneo para verificar o comportamento hidrogeológico, em especial a recarga, da bacia sedimentar do Rio do Peixe, na Paraíba. Em linhas gerais, concluiu-se que o aquífero não apresentava rebaixamentos significativos para os cenários simulados.

Em Recife, foi utilizando a modelagem do fluxo subterrâneo proposto por Paiva et al. (2004), devido ao racionamento no abastecimento público de água, ocasionando a perfuração de poços para suprir e complementar o abastecimento d'água. Esses autores diagnosticaram que a vazão bombeada superou as taxas de recarga natural do aquífero, de modo que está ocorrendo um rebaixamento excessivo da carga hidráulica nos poços, inclusive com risco de salinização.

Bonganha (2005) demonstrou a viabilidade da aplicação da modelagem matemática tridimensional como uma ferramenta importante para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos no município de Araraquara, Estado de São Paulo, através da simulação de cenários (atuais e futuros) e da determinação das zonas de captura da água subterrânea. Os resultados alertaram para a preocupação com os recursos hídricos subterrâneos sob o ponto de vista quantitativo.

3.1 Localização

Essa pesquisa apresenta como área de estudo uma parte da Bacia Sedimentar Costeira Paraíba-Pernambuco, inserida na Região do Baixo Curso do rio Paraíba, a leste do estado da Paraíba. De acordo com o IBGE (2005) essa região apresenta-se como uma das mais desenvolvidas do Estado da Paraíba, devido ao fato de apresentar municípios com grande expressividade, como Cabedelo e João Pessoa cujos PIBs (Produto Interno Bruto) per capita estão entre os dez maiores do Estado.

A porção da Bacia Sedimentar Costeira Paraíba-Pernambuco inserida na Região do Baixo Curso do rio Paraíba (Figura 6) está delimitada pelas coordenadas UTM 235769 W e 9234992 N e 302017 E e 9193129 S. Possui uma área de 1108,69 km² abrangendo os seguintes municípios (total ou parcialmente): Bayeux, Cabedelo, Cruz do Espírito Santo, Lucena, João Pessoa, Mari, Mulungu, Pedras de Fogo, Santa Rita, São Miguel de Taipu e Sapé. As atividades econômicas que se destacam na região estão relacionadas com a indústria e o agronegócio, principalmente da cana-de-açúcar, do abacaxi, do inhame, etc.

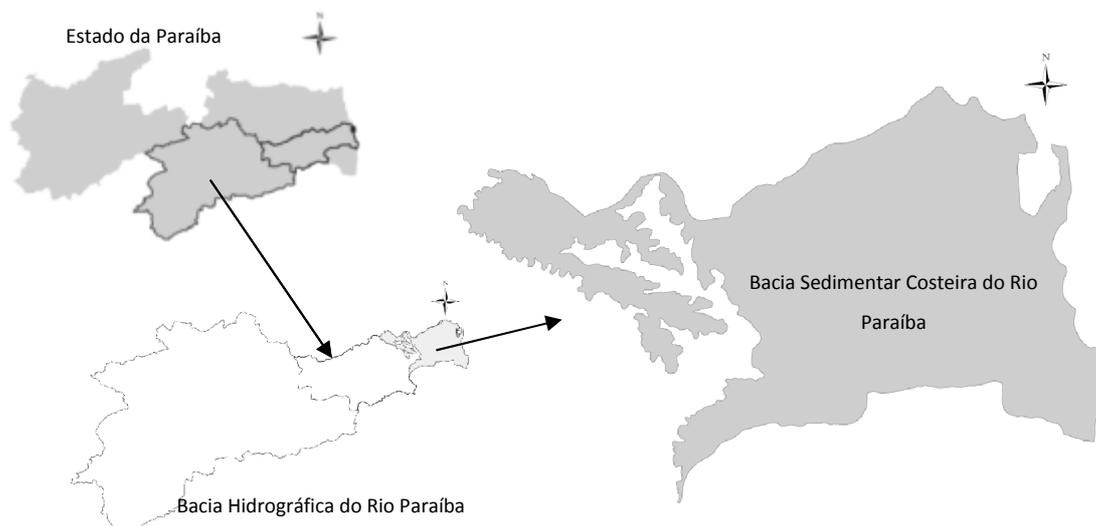


Figura 6-Bacia Sedimentar Costeira inserida na sub-bacia do Baixo Curso do rio Paraíba.

A área de estudo (Figura 7) está compreendida entre as coordenadas UTM 288000 W e 9230000 N e 303000E e 9200000 S, sendo um das zonas de gerenciamento proposta pelo PROJETO ASUB (2009). É individualizada pela falha de Cabedelo a oeste, pelo oceano Atlântico ao norte e a leste e pelo divisor de bacia do

rio Gramame ao sul. Hidrogeologicamente é integrada pelo subsistema livre contido nas formações Barreiras, Aluviais e depósitos flúvio-marítimos da planície costeira e pelo subsistema confinado contido nas formações Beberibe Superior e Inferior. A área é limitada no topo pelo calcário Gramame e na base pelo cristalino que ocorre em subsuperfície, totalizando 169,40 km². Abrange os municípios de João Pessoa e Cabedelo e apresenta uma quantidade significativa de poços cadastrados, os quais são utilizados para os mais diversos usos. Esta área também apresenta grande concentração de fontes poluidoras de águas subterrâneas, pois abrange a Região Metropolitana de João Pessoa.

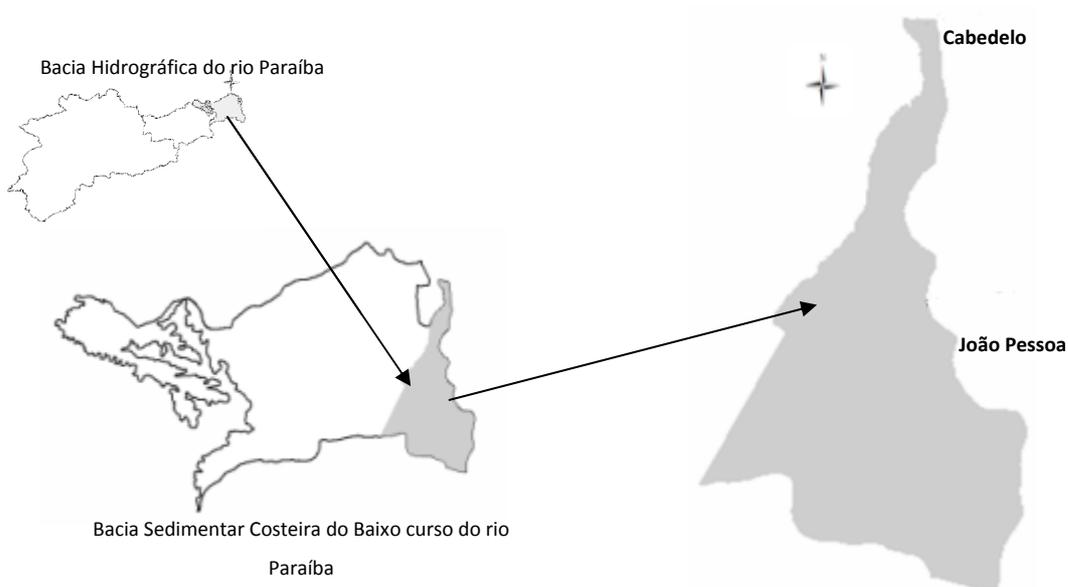


Figura 7- Área de Estudo.

3.1.1 Fatores Socioeconômicos

O município de Cabedelo está localizado na Região Metropolitana de João Pessoa e tem população total estimada de 53 mil (cinquenta e três mil) habitantes, segundo o senso do IBGE (2009). Apresenta um IDH (Índice de Desenvolvimento Humano) médio de 0,757 (PNUD, 2000). Com um PIB de 1.481.757 mil (IBGE,2005), sendo a maior atividade econômica o turismo náutico no período de verão, aonde a população da cidade chega a se duplicar.

A cidade de João Pessoa é a capital e cidade mais populosa do estado da Paraíba. Possui a maior densidade demográfica da Paraíba, em torno de 3,3 mil hab/Km², com uma população absoluta de aproximadamente 702 mil habitantes (IBGE, 2009) e IDH médio de 0,783 (PNUD, 2000).

O município de João Pessoa apresenta uma economia diversificada e bem distribuída no setor secundário, com a presença de indústrias de bebidas alcoólicas, usinas de beneficiamento e destilaria de cana-de-açúcar, além de fábricas do setor calçadista e têxtil. No comércio destaca-se o mercado de exportação de peixes, além da produção de crustáceos derivados dos manguezais que se formam nos principais rios que compõem a rede hidrográfica.

3.1.2 Aspectos Hidro-Climatológicos

Classificação Climática

Segundo Costa et al (2007), “A classificação climática de uma região é realizada a partir de séries temporais dos elementos que compõem o clima, tais como: precipitação, temperatura, umidade, insolação, entre outros condicionantes climáticos”. Estes dados são obtidos em postos e estações, observados e registrados ao longo do tempo.

No domínio da área de estudo desta pesquisa localiza-se uma estação climatológica na capital do estado, na cidade de João Pessoa, cuja identificação e localização são as seguintes (Tabela 1):

Tabela 1-Estação climatológica localizada em João Pessoa

Número	Estação	Latitude (Sul)	Longitude (Oeste de Greenwich)	Altitude	Período
82798	João Pessoa	70 7'	340 53'	5 m	1961/1990

Fonte: Adaptado de Costa et al., 2007.

De acordo com a classificação climática de Köeppen, a Região do Baixo Curso do rio Paraíba possui um clima do tipo Aw'i, ou seja, tropical úmido com estação seca na primavera e variação de temperatura mensal do ar ao longo do ano praticamente desprezível (AESA, 2006).

Temperatura

Os dados de temperatura estão descritos nas Tabelas 2, 3 e 4 apresentadas a seguir. Verificam-se que os valores mínimos estão compreendidos entre 19,7 °C e 22,2 °C, e os valores máximos entre 28,3 °C e 31,2 °C nos meses de janeiro e fevereiro. A temperatura média mensal anual está em torno dos 25,6 °C.

Tabela 2 – Distribuição temporal das médias das temperaturas mínimas mensais e anuais – Estação climatológica de João Pessoa (°C)

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
22,0	22,1	22,2	22,1	21,6	20,8	20,3	19,7	20,2	20,7	20,9	21,4	21,2

Fonte: UACA (2009).

Tabela 3 – Distribuição temporal das médias das temperaturas médias mensais e anuais – Estação climatológica de João Pessoa (°C)

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
26,7	26,8	26,7	26,3	25,5	24,6	23,8	23,9	24,8	25,7	26,3	26,5	25,6

Fonte: UACA (2009).

Tabela 4 – Distribuição temporal das médias das temperaturas máximas mensais e anuais – Estação climatológica de João Pessoa (°C)

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
31,1	31,2	30,8	30,4	29,8	29,0	28,3	28,5	29,5	30,2	31,0	31,0	30,1

Fonte: UACA (2009).

Umidade Relativa do Ar

A umidade relativa do ar nessa região varia de 76,7% a 84,8% em se tratando de valores médios, onde os valores máximos estão compreendidos nos meses de junho e julho e os mínimos estão nos meses de novembro e dezembro (Tabela 5).

Tabela 5- Distribuição mensal da umidade relativa do ar – Estação climatológica de João Pessoa (em %)

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
77,7	79,0	80,4	82,4	84,3	84,8	84,5	82,8	80,0	77,3	76,7	76,7	80,5

Fonte: UACA (2009).

Insolação

Segundo a AESA (2006), a insolação ao longo do ano apresenta uma variação, nos meses de janeiro a julho, de 7 a 8 horas diárias, e nos meses de agosto a dezembro, de 8 a 9 horas diárias (Tabela 6).

Tabela 6 - Distribuição mensal da insolação global – Estação climatológica de João Pessoa (em horas).

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
8,1	8,3	7,3	7,9	6,5	6,0	6,3	7,8	8,4	9,1	9,1	8,5

Fonte: UACA (2009).

Pluviometria

Essa área está inserida na região litorânea paraibana, apresenta duas estações bem definidas, uma seca e outra chuvosa. A estação chuvosa compreende os meses de março a agosto, e a estação seca ocorre entre os meses de setembro a fevereiro.

os dados pluviométricos indicam que a precipitação média anual é cerca de 1.500 mm, variando entre 1.200 e 1.700 mm, com valores decrescentes para o interior. Observa-se que a maior concentração do total precipitado ocorre nas áreas mais próximas do oceano, nas áreas costeiras (AESAs, 2006).

Os valores da precipitação média para 2009 foram obtidos do posto em João Pessoa de propriedade da AESA, a Tabela 7 mostra esses valores.

Tabela 7- Precipitações mensais(mm) para o Ano de 2009.

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
192,6	197,8	190,0	223,7	340,7	267,1	385,3	206,6	57,4	1,70	44,1	28,6

Evaporimetria

As perdas por evaporação podem ser medidas por várias maneiras, o Tanque Classe A é geralmente o método mais utilizado. A Tabela 8 apresenta os valores médios mensais de evaporação.

Tabela 8- Distribuição mensal da evaporação – Estação climatológica de João Pessoa (em mm)

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
158,9	139,5	118,0	89,2	86,8	94,8	95,2	68,7	152,3	149,0	91,0	70,1	1.313,5

Fonte: Costa et al. 2007

De acordo com o Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba-PERH (AESAs, 2006) a evaporação anual na região indica valores entre 1.300 a 1.800 mm, decrescendo do interior da região para o litoral.

Costa et al (2007) comentam que, ao se comparar os dados de evaporação média mensal com os de precipitação média mensal para se verificar o déficit ou saldo no balanço hídrico de uma bacia hidrográfica, existe a ocorrência de um equívoco sobre o seu potencial e as suas disponibilidades hídricas que seriam negativas quando os índices de evaporação suplantassem os de precipitação. Entretanto, a equação do balanço hídrico se relaciona com a evapotranspiração real que é, sempre, uma parcela

da precipitação e com o saldo convertendo-se em escoamento superficial e subterrâneo, mesmo que temporal. Sendo assim, a evaporação se relaciona com perdas de reservatórios e a evapotranspiração com a precipitação em bacias ou regiões hidrográficas.

3.1.3 Morfologia

Relevo

As unidades de relevo que correspondem à área da modelagem, são: Tabuleiro Costeiro, Planície Costeira e Baixada Litorânea (AESAs, 2006).

O *Tabuleiro Costeiro* é um planalto, com o limite ocidental praticamente coincidindo com a curva de nível de 100 m, cota que domina a topografia da Bacia do rio Paraíba, atingindo um mínimo de 30 m próximo ao litoral.

A *Planície Costeira* é uma unidade que ocorre na orla litorânea, com cotas médias de 3 m acima do nível do mar, estendendo-se desde as falésias limitantes com o Tabuleiro Costeiro até a linha da costa. É constituída por sedimentos depositados em ambiente misto, flúvio-marinho, de areias finas, siltes e argilas. Nesta unidade, as embocaduras dos rios estão afogadas, formando um ecossistema peculiar: o mangue, característico das costas de imersão.

A *Baixada Litorânea* caracteriza-se geralmente por praias estreitas e arenosas que formam pequenas enseadas, interrompidas pelo avanço do Baixo Planalto até o mar e pelos estuários dos rios que deságuam no Oceano Atlântico (Figura 8).

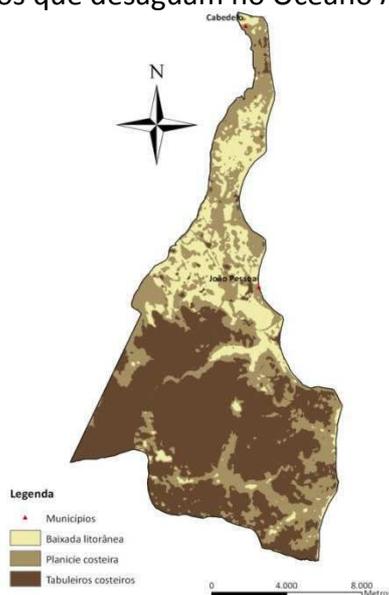


Figura 8 – Modelo Digital de Elevação da Área Modelada.

Solos

A área estudada apresenta solos dos tipos Podzólico Vermelho Amarelo, Solos Indiscriminados de Mangues e Cambissolo Eutrófico. Convém destacar, também, a ocorrência de solos Aluviais Eutróficos com textura arenosa, bem drenada e com ausência de pedregosidade (AESAs, 2006).

Em relação ao domínio dos Tabuleiros Costeiros:

Os solos apresentam-se bem desenvolvidos com a formação de horizontes bem definidos, sendo o nível mais superficial relativamente espesso e rico em matéria orgânica vegetal. A constituição mineralógica é dependente do bed-rock (rocha-mãe) do mesmo: onde o embasamento é o Grupo Barreiras, os solos são ricos em alumínio (argilas) e quartzo (areias) e onde a base são os sedimentos do Grupo Paraíba, os solos são ricos em alumínio e ferro (Formação Beberibe Inferior); alumínio, cálcio e magnésio (Formação Beberibe Superior); cálcio e magnésio (Formação Gramame). Deve-se destacar o intenso lixiviamento que afetou os solos cuja rocha-mãe é a Formação Beberibe, tornando-os altamente arenosos e de cor branca.

Cobertura Vegetal

Existem algumas áreas com a vegetação nativa da Mata Atlântica e ecossistemas associados, ou seja, manguezais, campos de várzeas e formações mistas de restingas (AESAs, 2006).

Costa et al (2007) consideram que os ecossistemas situados na faixa litorânea ou costeira, tais como vegetação de praias e dunas, manguezais, mata de restinga, mata atlântica e zona de tensão ecológica já sofrem ações antrópicas. Os manguezais encontram-se bastante afetados pelo crescimento da capital, João Pessoa.

3.1.4 Hidrografia

A Região do Baixo Curso do rio Paraíba drena uma área de 3.940,45 km² e deságua no oceano Atlântico na cidade de Cabedelo, tendo como principal afluente o rio Paraibinha (COSTA et al, 2007). Essa região apresenta rios intermitentes (quando correm sobre o cristalino) e perenes (quando adentra na região da Bacia Sedimentar Costeira Paraíba-Pernambuco, devido à influência das águas subterrâneas sobre a vazão de base dos rios). Na área de estudo dessa pesquisa (com área de 169,4 km²) observam-se alguns rios, entre eles, Jaguaribe, Cuiá, Mandacaru e Paraíba.

3.1.5 Geologia

A geologia da área estudada é caracterizada por apresentar ocorrência do embasamento cristalino, com presença de rochas vulcânicas e plutônicas de idades diversas, e terrenos sedimentares na região litorânea. Observa-se nessa área a presença das seguintes formações (Figura 9).

Os sedimentos aluviais e fluvio-marítimos são constituintes da Planície Costeira, das dunas, dos sedimentos de praia e dos aluviões que ocorre nos vales dos rios e riachos que se instalaram na superfície da bacia sedimentar. Esses são formados por areias finas e médias, branca, e sucedidas, em profundidade, por camadas de areias com presença de resto de conchas de pequenos moluscos e apresentam espessura variando de 20 a 60 metros, segundo os perfis de poços localizados sobre a planície costeira.

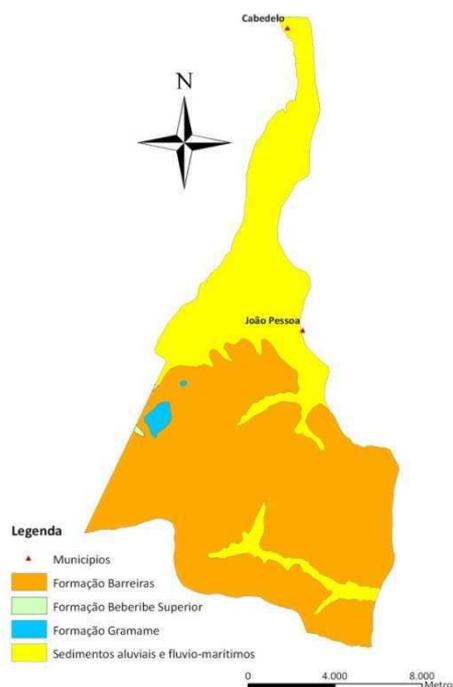


Figura 9- Mapa de distribuição superficial das Formações Geológicas da área.

A formação Barreiras ocorre constituindo um capeamento detrítico, depositado, indistintamente, sobre as formações Beberibe (superior ou inferior) e Gramame e, até, sobre o Cristalino. Trata-se de uma sequência de areias, siltes e argilas, repetida irregularmente na dimensão vertical, com predominância ora da litologia arenosa, ora da siltosa, ora da argilosa, apresentando granulometrias e cores variadas. Segundo Costa et al (2007), a espessura da Formação Barreiras, na área

paraibana da bacia sedimentar Pernambuco-Paraíba, varia entre 20 e 70m a julgar pelos registros de perfuração de poços e pelos levantamentos geofísicos.

A formação Gramame compreende um pacote sedimentar com até 102m de espessura (poço situado na sede de Jacumã), com média de 50m, formado por calcários argilosos cinzentos de fácies marinha plena, com algumas intercalações finas de argila, geralmente bioturbadas, e camadas de margas e argilas mais puras. Mostra um caráter transgressivo sobre os arenitos Beberibe e, no topo, passa sem interrupção para os sedimentos Cenozóicos da Formação Barreiras e, na orla marítima paraibana, para os depósitos flúvio-marítimos constituintes das planícies costeiras.

A formação Beberibe é uma sequência que se inicia com arenitos continentais, quartzozos, com uma espessura que pode atingir em território paraibano, até 100m, com média de 50m, em geral, sem fósseis. São arenitos médios, finos e grossos, cinzentos, cremes, vermelhos e roxos, mal selecionados, apresentando grãos sub-angulosos a sub-arredondados, com componente argiloso. Repousa sobre o embasamento cristalino de rochas metamórficas e ígneas, datado do Pré-Cambriano. Este substrato é, em grande parte, coberto pela referida crosta ferruginosa, relativamente espessa, aflorante nas partes oeste e sul da Bacia Sedimentar. O limite superior da formação se faz com a Formação Gramame ou, mesmo, com os sedimentos da Formação Barreiras no quadrante noroeste da bacia, principalmente.

3.1.6 Hidrogeologia

Em relação às suas características hidrogeológicas, a área de estudo situa-se sobre o sistema aquífero Pernambuco-Paraíba que tem por arcabouço geológico a bacia sedimentar homônima. Trata-se de uma bacia de origem tectônica (semi-graben) preenchida por sedimentos continentais e marinhos constituintes das Formações: Beberibe Inferior e Beberibe Superior, também denominada Itamaracá.

No que diz respeito à área ora estudada, a falha de gravidade de Cabedelo preservou todo o pacote de sedimentos depositados na bacia. Assim, ocorrem nesta área dois subsistemas: um sistema livre ou não-confinado e um subsistema confinado (Figura 10).

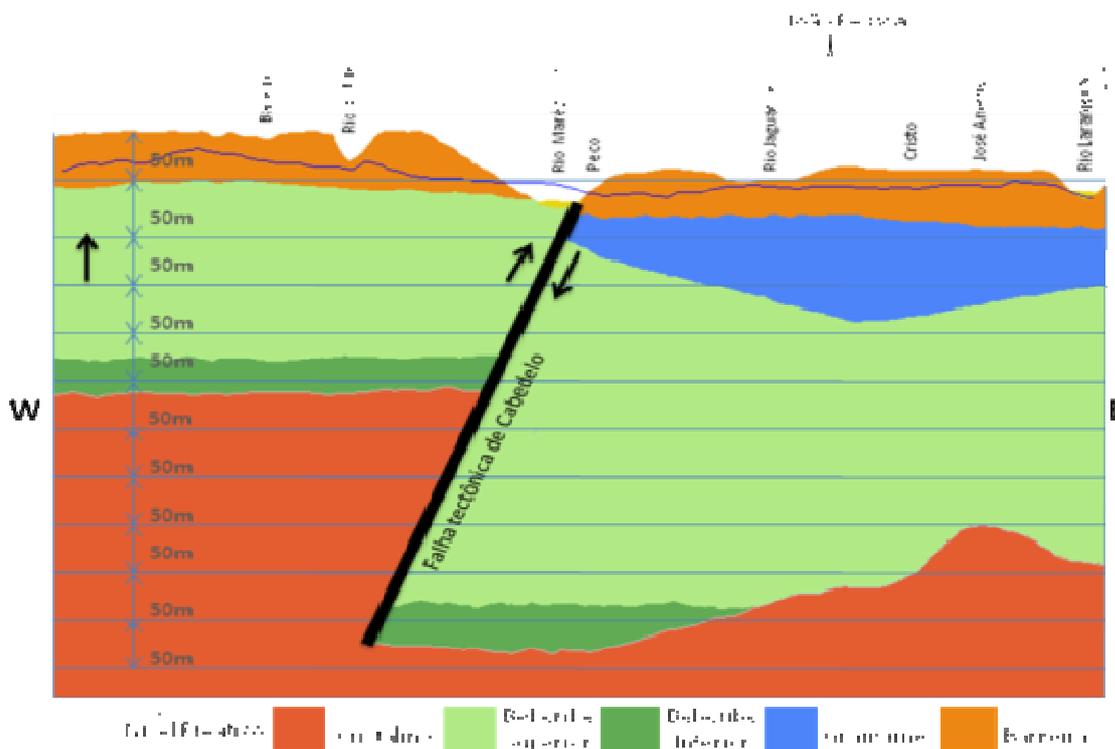


Figura 10-Corte Geológico da Bacia Sedimentar Costeira PE-PB (Projeto ASUB, 2009).

Formação Beberibe/ Itamaracá

O subsistema confinado, sotoposto, contido nas Formações Beberibe Inferior e Superior, com espessura entre 200 e 350 metros, tendo como camada confinante superior a formação Gramame e o Cristalino como embasamento confinante inferior.

Formação Barreiras

O sistema livre ou não confinado encontra-se contido na Formação Barreiras e nos sedimentos flúvio-marítimos constituintes da Planície Costeira e nas areias aluviais e de praias, possuindo espessura entre 20 e 70 metros.

3.1.7 Utilização das águas subterrâneas na área

Com base no cadastro de poços outorgados pela AESA (2009), apresentados no anexo I observa-se que na área estudada as águas subterrâneas (Figura 11) são utilizadas para o abastecimento humano, comercial e industrial. Conforme já descrito, o subsistema livre está em contato direto com a poluição e possui baixa qualidade de águas. Dessa forma, tem sido utilizado para usos menos restritos, por exemplo, para irrigar os jardins de condomínios residenciais.



(a)



(b)

Figura 11 - Poços da Cagepa (a) Bairro de Cruz das Armas – João Pessoa e (b) Bairro do Centro – Cabedelo.

Ainda sobre esse cadastro, a vazão de exploração dos subsistemas tem valor de 2195 m³/h, desse valor 89% representa a exploração da água subterrânea para suprir o abastecimento humano das cidades de João Pessoa e Cabedelo. A Figura 12, além de apresentar a porcentagem do abastecimento humano, demonstra as porcentagens dos demais usos ocorrentes na área estudada.

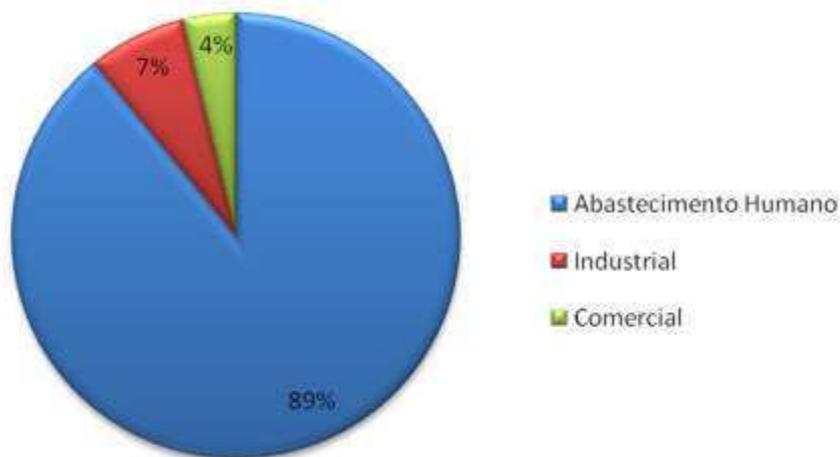


Figura 12 – Usos das águas subterrâneas na área de estudo.

CAPÍTULO IV – MODELAGEM DA ÁREA DE ESTUDO

A modelagem da área de estudo seguiu as etapas apresentadas na Figura 13.

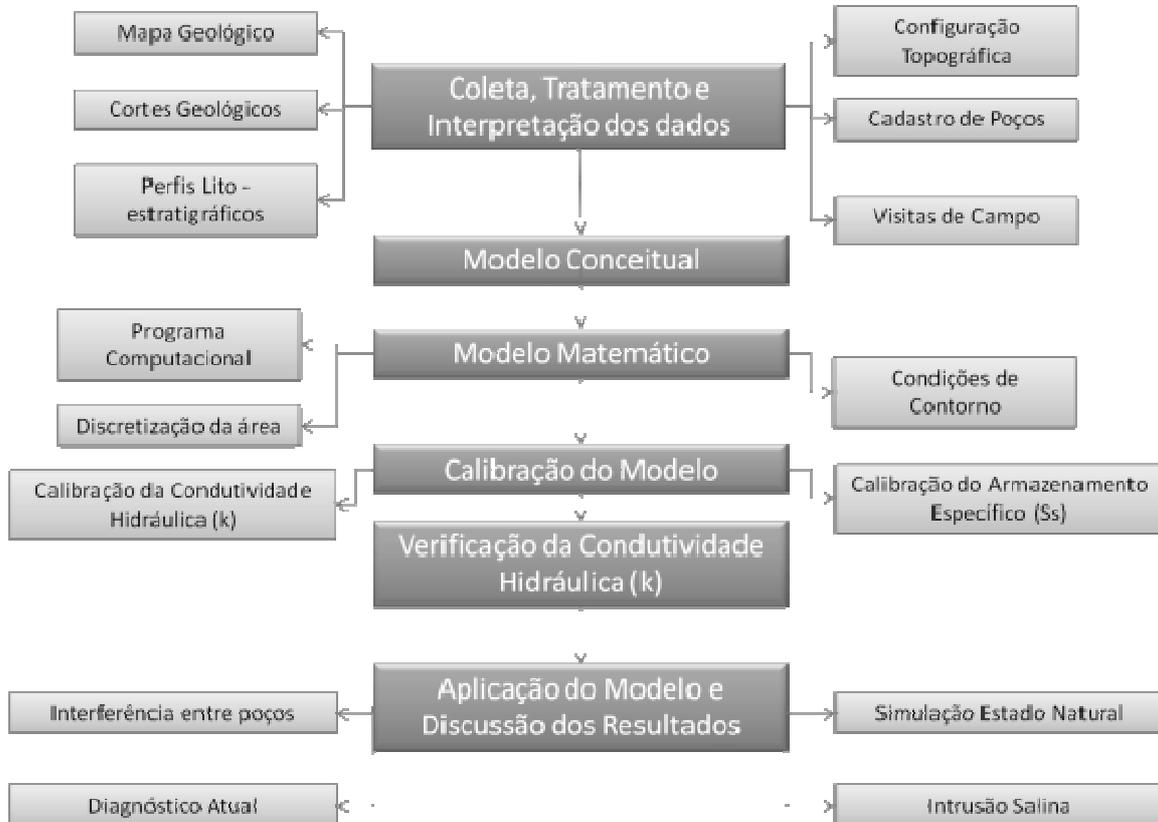


Figura 13 – Fluxograma da modelagem da área de estudo.

4.1 Coleta, Tratamento e Interpretação dos Dados Básicos

Para a construção do modelo hidrogeológico da área de estudo faz-se necessária a análise do maior número de informações físicas, de cadastros de poços, de visitas de campo, dentre outras informações.

4.1.1 Mapa Geológico

A análise do mapa geológico regional permitiu um entendimento dos aspectos relacionados com a geologia, hidrografia e hidrogeologia da Bacia Sedimentar Costeira do Baixo Curso do rio Paraíba. Foram observadas na análise desse mapa, entre outros aspectos, as falhas geológicas e as formações geológicas presentes. Na área de estudo, as formações geológicas são as seguintes: os Sedimentos Aluviais e Fluvio- Marítimos, Formação Barreiras, Formação Gramame, Formação Beberibe (superior e inferior) e o

embasamento cristalino. A Figura 14 apresenta um mapa geológico parcial da Bacia Sedimentar Costeira do Baixo Curso do rio Paraíba (contendo a área de estudo), com os aspectos de maior interesse para a modelagem pretendida, com destaque para a localização dos cortes geológicos.

4.1.2 Cortes Geológicos

Os Cortes geológicos (AB e EF) apresentados nas Figuras 15 e 16 indicam as formações geológicas e seus contatos, inclusive em pontos do contorno da área de estudo. Identifica-se, em toda a área a presença de dois subsistemas aquíferos: o primeiro, livre, caracterizado pelos sedimentos aluviais e fluvio-marítimos e pela formação Barreiras e o segundo, confinado, representado pelas formações Beberibe inferior e superior. A formação Gramame funciona como camada confinante, separando os dois subsistemas em toda a área modelada.

Figura 14 – Mapa Geológico Parcial da Bacia Sedimentar Costeira do Baixo Curso do Rio Paraíba.

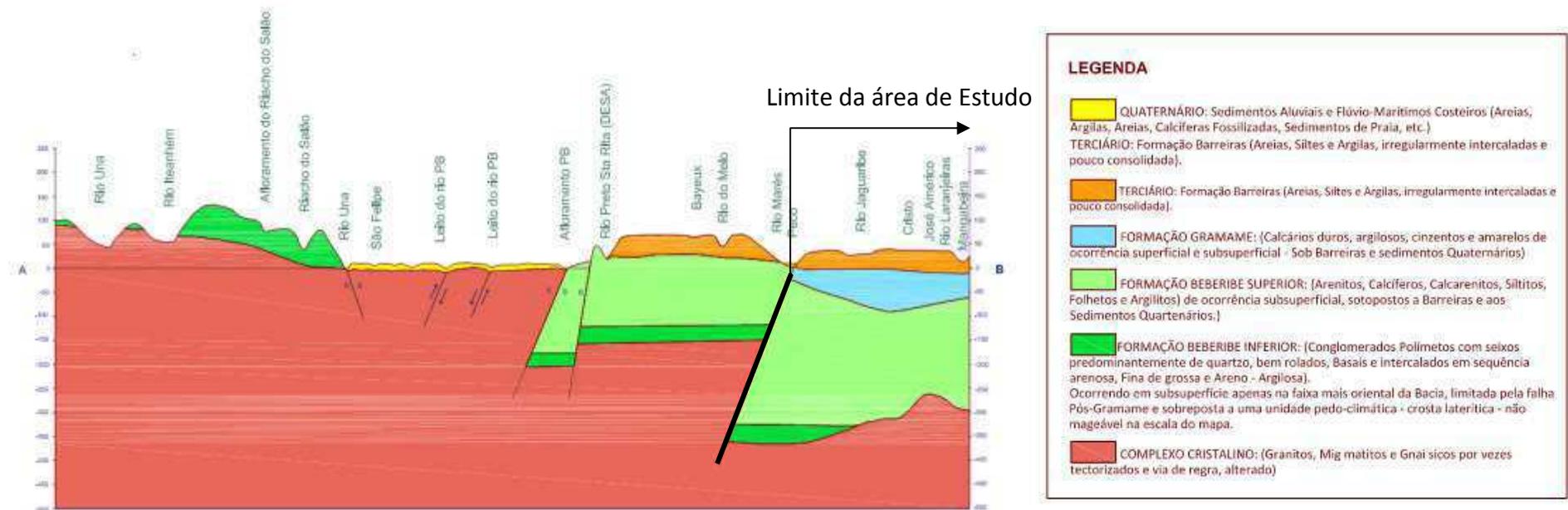


Figura 15 – Corte Geológico AB (Bacia Sedimentar Costeira do Baixo Curso de Rio Paraíba).

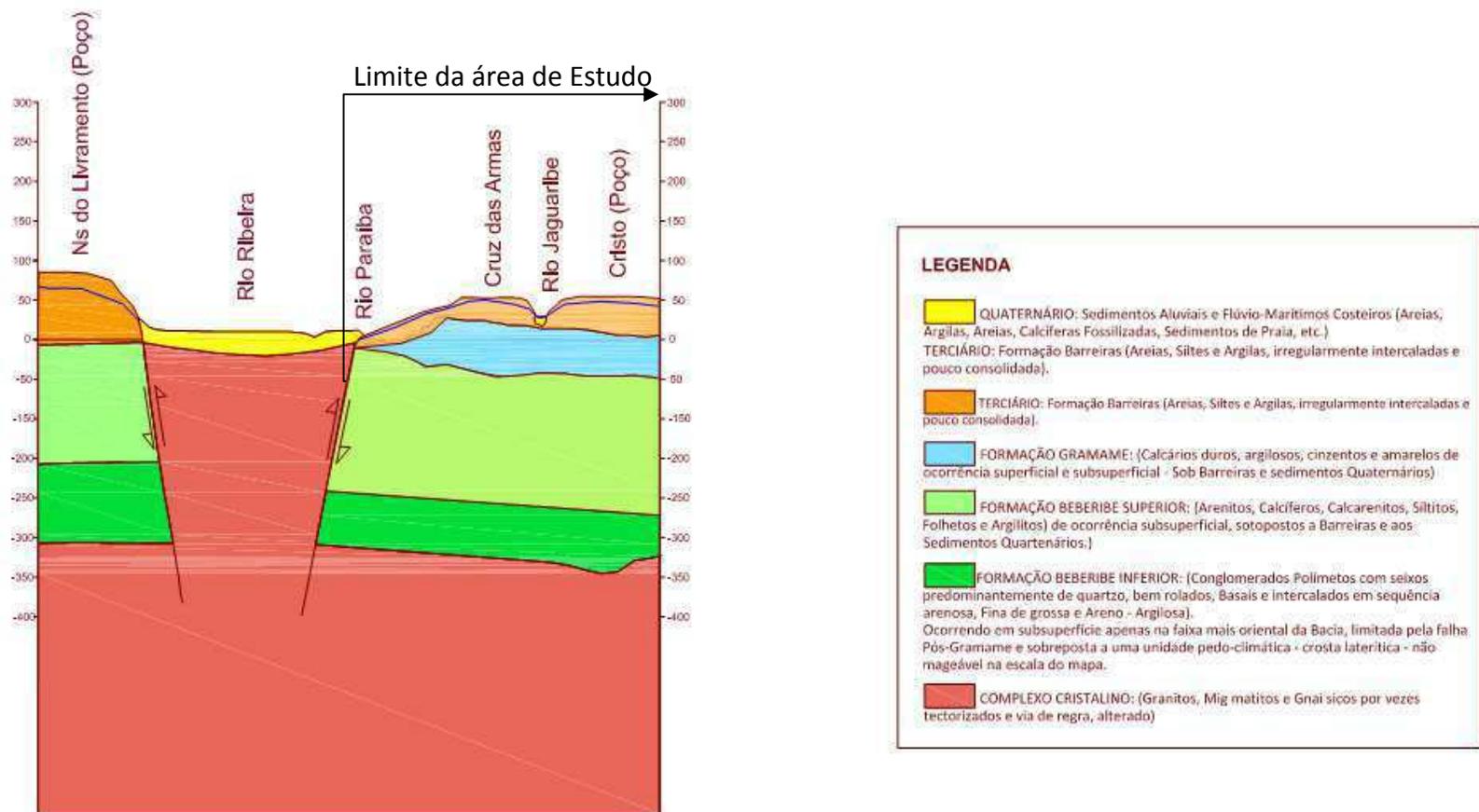


Figura 16 – Corte Geológico EF (Bacia Sedimentar Costeira do Baixo Curso de Rio Paraíba).

4.1.3 Perfis Lito-estratigráficos de poços

Esses foram necessários para verificar, além da presença das formações geológicas, as características dos solos e a espessura das formações presentes na área. No anexo II encontra-se um perfil utilizado nesse estudo.

4.1.4 Configuração Topográfica

A topografia foi obtida a partir das seguintes fontes de informação:

- Marcos Geodésicos da Cidade de João Pessoa (PMJP, 2009);
- Imagens DEM (Digital Elevation Model) com resolução de 30 x 30 m (NASA, 2000);
- Cotas obtidas durante levantamentos topográficos, presentes nos cadastros dos poços.

A partir desses dados, foi possível a interpolação empregando o programa ArcGIS 9.2 e a determinação das cotas dos pontos de medição, utilizados mais adiante para calibração do modelo. Com a configuração topográfica (Figura 17) e os perfis de poços com indicação das espessuras das formações atravessadas, foram estabelecidas as cotas do topo e da base das formações geológicas, importantes dados para entrada no modelo matemático.

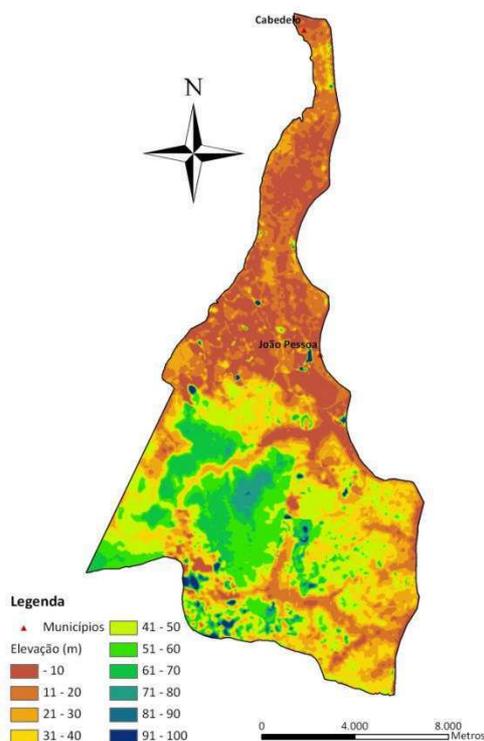


Figura 17 – Cotas Topográficas da área estudada.

4.1.5 Cadastro de poços

As informações sobre os poços existentes na área de estudo foram obtidas a partir de cadastros, montados pelo estudo de Costa et al. (2007), pela Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba – AESA (2009), CDRM e SIAGAS (Sistema de Informações sobre Águas Subterrâneas). Dois dados importantes foram retirados dessas informações: a profundidade/cota do nível estático e a vazão de bombeamento (Anexo II e III). Observa-se que os valores do nível estático medido significam cargas observadas, importantes para calibração e aplicação do modelo. Os dados de vazão têm funcionalidade para representar o fluxo hídrico subterrâneo da retirada nas simulações. Destaca-se que os poços utilizados para medição da profundidade do nível estático são de propriedade da CAGEPA (Companhia de Água e Esgoto do Estado da Paraíba).

4.1.6 Visitas de Campo

As visitas de campo foram fundamentais para o reconhecimento da área de estudo. A partir delas (Figura 18) foram escolhidos os locais para (i) as medidas de níveis estáticos de poços; (ii) medição do escoamento fluvial de base dos rios; (iii) e foi consolidado o entendimento do comportamento hidrogeológico dos aquíferos com ênfase na recarga, circulação e descarga.



(a)



(b)

Figura 18 - (a) Captação a fio d'água no Parque Arruda Câmara (Bica) em João Pessoa e (b) medição do nível estático do Poço da Cagepa no Bairro do Centro em Cabedelo.

Foram realizadas duas campanhas de medições de níveis estáticos: uma em julho de 2009, quando foram visitados 31 poços e medidos 18; e outra campanha em outubro de 2009, quando 19 poços foram visitados e 11 poços medidos. Todos os poços medidos são de propriedade da CAGEPA. Foi solicitado à companhia o

desligamento do bombeamento 24 horas antes da medição, afim de que houvesse a recuperação dos níveis freáticos nos poços e a medida representasse os níveis estáticos e não os níveis dinâmicos. Alguns problemas foram encontrados nas campanhas de medições de níveis, tais como: dificuldade para a paralisação dos poços pela CAGEPA durante 24 horas, visto que muitos têm bombeamento contínuo, e sua paralisação afetaria o abastecimento público; falta de um orifício adequado no poço para permitir a entrada do medidor de nível; desconhecimento das características dos poços, etc.

4.2 Etapas Metodológicas da Modelagem

4.2.1 Modelo Conceitual

A construção do modelo conceitual é necessária para que se tenha uma visão geral dos aspectos hidrogeológicos, bem como a identificação de todos os elementos que, de alguma forma, condicionam o fluxo subterrâneo e que por sua importância requerem um maior grau de detalhamento. O modelo conceitual é a base para o modelo matemático.

Para a obtenção do modelo conceitual da área dessa pesquisa foram efetuados levantamentos bibliográficos e de campo, conforme os já citados buscando informações referentes à hidrogeologia, geologia, hidrologia entre outros.

Com base nas informações e dados levantados pela pesquisa, foi concebido um modelo hidrogeológico conceitual para a área de estudo, cujas características estão esquematizadas nas Figuras 19 e 20 e são relatadas a seguir:



Figura 19 – Distribuição vertical dos sistemas hidrogeológicos da área de estudo.

1. Formações geológicas ocorrentes: Barreiras, Sedimentos Aluviais e Fluvio marítimos, Gramame e Beberibe (Inferior e Superior).

2. Composição do Sistema Aquífero: Um subsistema superior, livre, em toda a extensão constituída pelas formações Barreiras (na parte dos Tabuleiros Costeiros) e os Sedimentos Aluviais e Fluvio-marítimos (na planície Costeira). Um subsistema confinado, inferior, também em toda a extensão da área de estudo, constituído pelas formações Beberibe superior e inferior (confinado).
3. Um aquíclodo constituído pela formação Gramame, separando os dois subsistemas e serve como camada confinante da parte superior do Aquífero Beberibe.
4. O Embasamento Cristalino serve como camada confinante na parte inferior do aquífero Beberibe.
5. O aquífero livre é recarregado pelas chuvas e sistema fluvial que descarrega neste e diretamente ao mar.
6. A recarga do aquífero confinado ocorre exclusivamente em alguns trechos da fronteira deste (parte noroeste e sudoeste) através do fluxo subterrâneo horizontal proveniente de regiões vizinhas, nas quais a formação Beberibe aflora à superfície e o aquífero passa a ser livre e a interagir diretamente com o sistema atmosférico (precipitação e evaporação). A descarga do aquífero confinado ocorre diretamente ao mar.

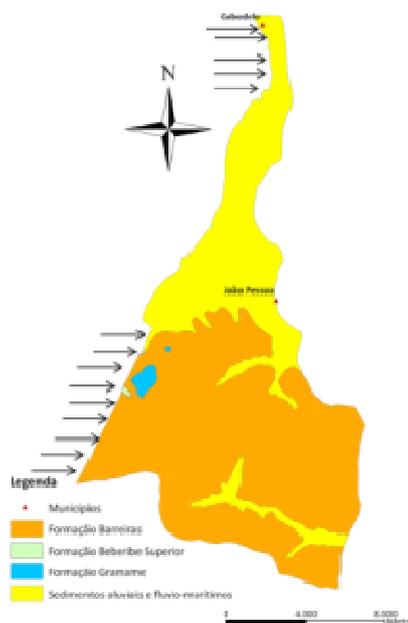


Figura 20 – Mapa de Distribuição Superficial das Formações Geológicas e fluxo horizontal (→) no aquífero Beberibe.

O subsistema livre representado, ora pela formação Barreiras ora pelos Sedimentos Aluviais e Fluvio-Marítimos, apresenta baixa qualidade da água e está em contato direto com a poluição advinda dos impactos antrópicos, consequentemente tem sido explorado para usos menos exigentes.

O subsistema confinado representado pela formação Beberibe (superior e inferior), apresenta-se na área de estudo com uma boa qualidade de água, fator este que justifica a alta demanda para suprir os diversos usos dos recursos hídricos, em particular o abastecimento urbano e industrial. Dentro deste enfoque, resolveu-se nessa pesquisa utilizar a modelagem do fluxo subterrâneo para compreender os aspectos hidrogeológicos do aquífero Beberibe (confinado) e através do aplicativo matemático subsidiar a Gestão de Recursos Hídricos. Portanto, a Figura 21 demonstra o modelo conceitual do aquífero confinado para a implementação no modelo matemático.



Figura 21 – Modelo conceitual do aquífero confinado a ser implementado no aplicativo matemático.

4.2.2 Escolha da Plataforma Computacional

Para a elaboração do modelo matemático do fluxo subterrâneo na área de estudo, foi utilizado o programa MODFLOW (McDONALD e HARBAUGH, 1988) contido no pacote computacional PMWIN (*Processing Modflow for Windows- versão 7.0*). Este programa utiliza uma grade de diferenças finitas, na qual o ponto onde o valor de um dado ou informação está localizado no centro da célula ou bloco, sendo por isso, chamado de diferenças finitas centrada no bloco. O aplicativo simula o fluxo bidimensional ou tridimensional em meios porosos e oferece alternativas para simulações de aquíferos confinados, não confinados, ou uma combinação de

confinados e não confinados. Nesse contexto, esse programa foi aplicado para a obtenção do comportamento hidrogeológico do subsistema confinado (Beberibe).

4.2.3 Discretização da Área Modelada

Após a obtenção do modelo conceitual, foi estabelecido o modelo a ser implementado no aplicativo matemático, cujas características são:

- A unidade hidroestratigráfica a ser modelada é o subsistema confinado representado pela formação Beberibe (Superior e Inferior) – nesse caso o modelo terá uma única camada confinada;
- Modelo bidimensional horizontal, ou seja, não estão sendo consideradas as variações verticais nesse modelo.

Inicialmente, a malha foi discretizada com células de 500 m x 500 m, porém verificou-se que essa discretização gerava células muito grandes e, portanto, insuficientes para representar as variações espaciais das características do subsistema modelado. Após algumas tentativas, a malha foi finalmente discretizada, horizontalmente, de forma regular, com as células possuindo dimensão de 100 m x 100 m em todo o domínio do modelo, perfazendo uma área de 450 Km². No plano vertical o modelo foi dividido apenas em uma camada, ou uma única unidade hidroestratigráfica, já que se pretendia modelar apenas o aquífero inferior, totalmente confinado, isto é, sem trocas significativas com o sistema superior livre (vide Figura 21).

4.2.4 Condições de Contorno

A área modelada apresenta os seguintes contornos físicos: ao norte e a leste, a linha da costa do oceano atlântico; a oeste, os contactos geológicos com as formações adjacentes, definidas aproximadamente pela falha geológica de Cabedelo – e ao sul o divisor de água entre a Bacia Hidrográfica do Baixo Curso do rio Paraíba e a Bacia hidrográfica do rio Gramame (Figura 22).

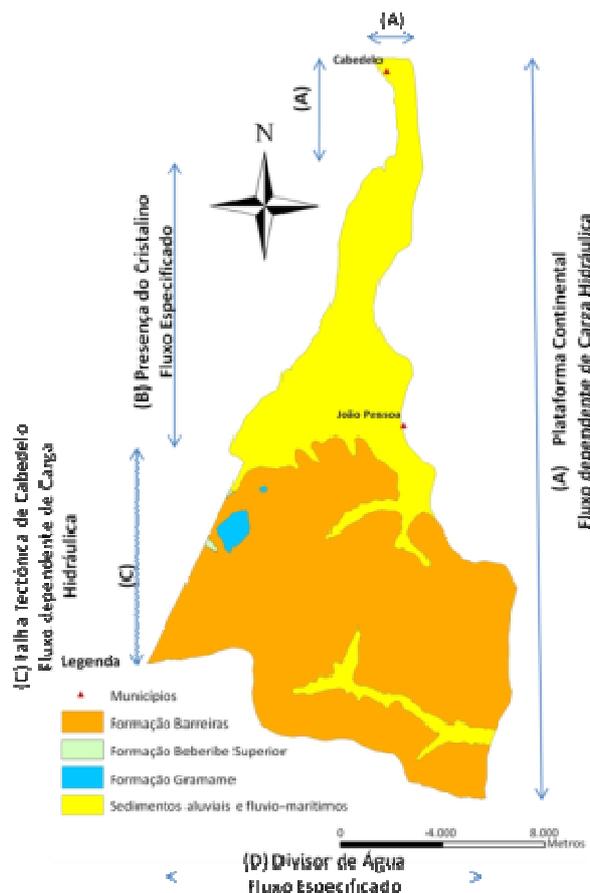


Figura 22 – Condições de Contorno estabelecidas para o modelo matemático.

Essas fronteiras são representadas no modelo para diferentes condições hidráulicas, isto é, de fluxo e/ou de carga hidráulica, conforme apresentadas a seguir:

Condição de Contorno (A):

Engloba todo o contorno Leste e Norte da área de estudo e parte noroeste dessa área. Nesse contorno, por motivo do aquífero Beberibe não terminar na costa litorânea, considerou-se a sua extensão até o final da plataforma continental¹ (aspecto físico), que possui 50 km de extensão média (Figura 23). Portanto, a cota do nível piezométrico, ou seja, a carga hidráulica desse aquífero apresenta-se constante e com valor zero somente no fim da plataforma continental (Figura 23). Como não se conheciam as cargas hidráulicas no contorno, foi estabelecida, a partir de algumas cargas hidráulicas medidas em campo, uma relação linear apresentada na equação 16 e baseada na Figura 23, para o cálculo da carga hidráulica em cada célula do contorno do modelo na linha da costa litorânea. Por apresentar cargas variando no tempo,

¹ A extensão da plataforma continental é estreita e apresenta um valor em torno de 50 Km (MUEHE, 2006).

regime transitório, esse contorno expressa uma condição de carga hidráulica dependente do fluxo (Cauchy).

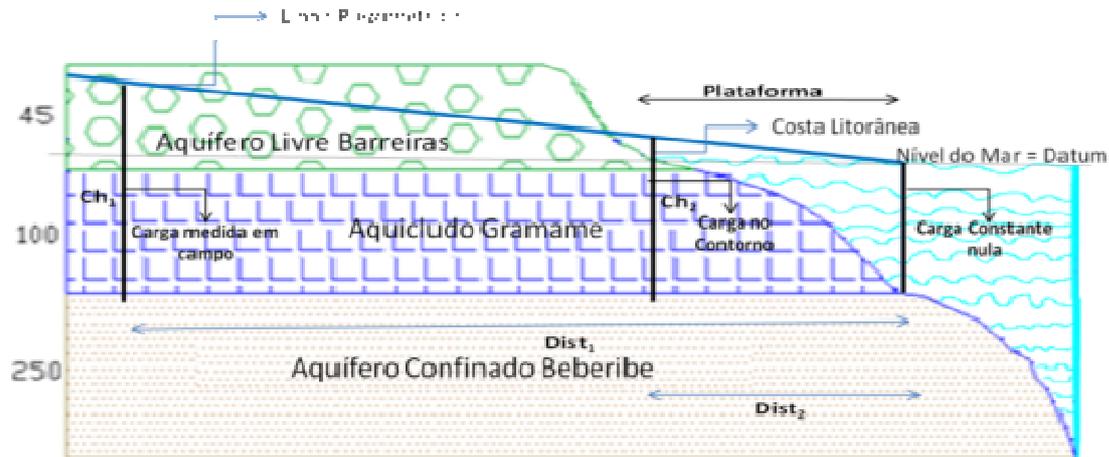


Figura 23 – Esboço da determinação da condição de contorno (A).

$$Ch_2 = \frac{Ch_1 \times Dist_2}{Dist_1} \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

Ch_1 = Carga Hidráulica medida em campo (medição de campo);

Ch_2 = Carga Hidráulica Calculada para inserção no contorno;

$Dist_1$ = Distância do ponto de medição ao fim da plataforma continental;

$Dist_2$ = Distância da célula do contorno do modelo até a plataforma continental.

Condição de Contorno (B):

Através do corte geológico EF (Vide Figura 16) observa-se, na fronteira da região modelada, a presença do embasamento cristalino, onde o fluxo é nulo, expressando uma condição de contorno de fluxo especificado ou condição de Neumann.

Condição de Contorno (C):

O corte geológico AB (vide Figura 15) mostra a formação aquífera Beberibe estendendo-se para a região vizinha, havendo, portanto fluxo através deste contorno. É um das zonas de recarga do aquífero modelado onde a carga hidráulica depende do fluxo.

Condição de Contorno (D):

O divisor de água entre a Bacia Hidrográfica do Baixo Curso do rio Paraíba e a Bacia hidrográfica do rio Gramame foi admitida como o divisor natural das águas subterrâneas. Assim estabeleceu-se uma condição de fluxo especificado (condição de Neumann). Nesse caso o fluxo é nulo.

Destacam-se que todas as células do modelo externas a área de estudo, são desativadas e não entram no processo computacional para a solução da equação diferencial parcial do fluxo subterrâneo.

4.2.5 Atribuição dos dados no aplicativo matemático

Além das condições de contorno, cuja natureza e obtenção foram acima descritas, outros dados são necessários à construção e aplicação do modelo.

Tipo da Camada:

Conforme já se fez referência acima, o modelo consta de uma única camada. No caso em estudo uma camada confinada, representada pela formação Beberibe (Superior e Inferior).

Topo e base da camada:

Como dados de entrada em cada célula, no modelo matemático são necessários as cotas do topo e da base da camada, que foram gerados a partir da configuração topográfica e dos perfis de poços existentes.

Condições de Contorno:

As condições de contorno (Figura 24) são inseridas no aplicativo matemático através de um código para cada célula do modelo. Se for atribuído o valor positivo (1), a carga hidráulica é computada, se colocado o valor negativo (-1), a carga é fixada em um valor dado, e se o valor (0) for atribuído, nenhum fluxo ocorre para dentro da célula.

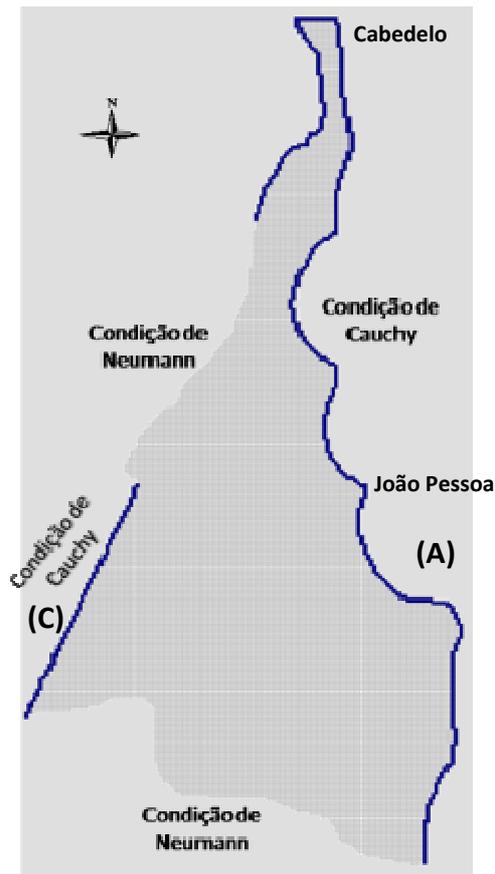


Figura 24 - Condições de limite de fluxo atribuído ao modelo. Na cor cinza claro estão indicadas as células que foram atribuídas sem fluxo, e em cinza média (parte interna da área estudada) e azul, dentro dos contornos, são células com fluxo ativo.

Condições Iniciais:

No regime permanente, deve-se especificar como condições iniciais ($t=0$), as cargas hidráulicas conhecidas, referentes às células definidas como de carga fixa; nas demais células um valor qualquer arbitrado. De acordo com a descrição do item 4.2.4, foram inseridos os valores de carga hidráulica da condição (A), e para condição do contorno (C) foram interpolados com os dados dos poços do mês de julho próximos a esse contorno. Para o Regime Transiente, as cargas hidráulicas iniciais precisam ser conhecidas em todas as células. Portanto, nesse regime foram inseridas as cargas hidráulicas calculadas advindas da calibração das cargas no regime permanente.

4.3 Calibração do Modelo

4.3.1 Calibração da Condutividade Hidráulica (K)

Conforme verificado, para solução da equação do fluxo subterrâneo é necessária a determinação dos parâmetros hidráulicos do aquífero (condutividade hidráulica e armazenamento específico). Com os dados de cargas hidráulicas observadas e a aplicação do modelo matemático esses parâmetros são determinados através de processos de calibração.

Na etapa de calibração da condutividade hidráulica, foi utilizado o regime de fluxo permanente, ou seja, a carga hidráulica não varia com o tempo. Implicando na anulação do segundo membro da equação do fluxo subterrâneo (Equação 11).

Os dados de medição das profundidades dos níveis estáticos dos 16 poços utilizados na área de estudo para a obtenção das cotas topográficas e dos respectivos níveis piezométricos foram obtidos durante a 1ª campanha de medição realizada pelo Projeto ASUB – PB (Figura 25), no período de 29 a 31 de julho de 2009. Na tabela 9, que também apresenta a localização de cada poço, estão indicadas as referidas cotas obtidas a partir da configuração topográfica.

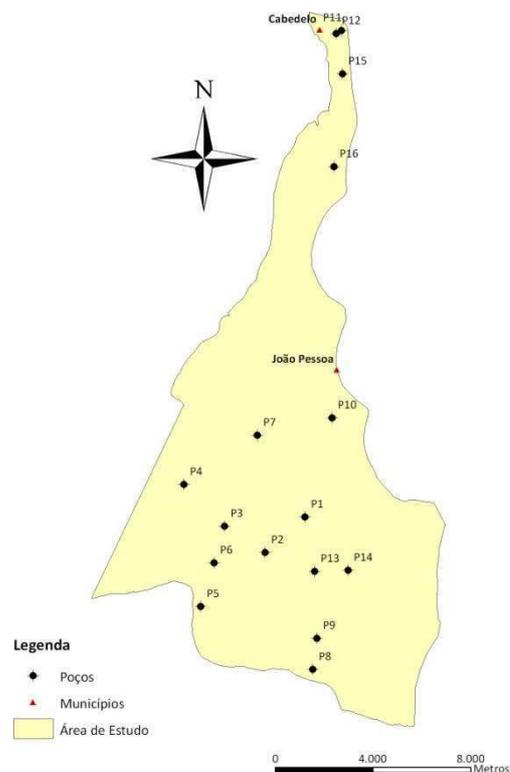


Figura 25 – Distribuição dos poços com medições de níveis estáticos (NE) utilizados na calibração da condutividade hidráulica.

Tabela 9 – Dados de níveis estáticos (1ª campanha ASUB – PB)

Poço	Localidade	Proprietário	Cota Topográfica (m)	Longitude	Latitude	Prof. NE(m) julho 2009	C.H.*(m) Julho 2009
1	ANATÓLIA	CAGEPA	23	296322	9209110	30,22	-7,22
2	CONJ. JOSÉ AMÉRICO	CAGEPA	46	294690	9207656	44,92	1,08
3	CRISTO REDENTOR	CAGEPA	63	293029	9208725	41,50	21,50
4	CRUZ DAS ARMAS	CAGEPA	49	291365	9210448	47,61	1,57
5	FUNCIONÁRIOS II	CAGEPA	54	292058	9205428	41,15	12,58
6	P. EXP. DE ANIMAIS	CAGEPA	46	292605	9207218	18,96	27,04
7	TORRE	CAGEPA	45	294364	9212479	51,17	-6,17
8	VAL. FIGUEIREDO (P2)	CAGEPA	40	296634	9202832	33,27	6,73
9	VAL. FIGUEIREDO (P3)	CAGEPA	43	296803	9204122	41,49	1,51
10	TAMBAÚ	CAGEPA	31	297429	9213196	38,87	-7,87
11	SEDE II	CAGEPA	2	297813	9229144	0,44	1,56
12	SEDE	CAGEPA	6	297595	9229030	0,50	5,5
13	MANGABEIRA II	CAGEPA	50	296719	9206868	43,46	6,54
14	MANGABEIRA VII	CAGEPA	42	298085	9206922	44,75	-2,75
15	CAMALAU	CAGEPA	3	297856	9227368	1,91	1,09
16	PRAIA DO POÇO	CAGEPA	6	297501	9223536	4,08	1,92

* CH = Carga Hidráulica

No modelo matemático para o regime permanente, somente foi necessário colocar as condições iniciais nas cargas com valores fixos, ou seja, na parte leste, norte, noroeste e sudoeste da área de estudo. As condições de contorno (A) e (C), mudam de categoria e passam de carga dependente de fluxo (Condição de Cauchy) no regime transitório, para carga fixa conhecida (Condição de Dirichlet) no presente caso de fluxo permanente. Para o contorno (A), as cargas hidráulicas calculadas foram obtidas de acordo com a equação 16 (item 4.2.4) e as cargas hidráulicas do contorno (C), foram estabelecidas pela interpolação das medições dos níveis piezométricos dos poços próximos a esse contorno.

Uma observação importante para a calibração da condutividade hidráulica foi a especificação de cargas fixas no modelo matemático para os poços com valores de cotas de níveis potenciométricos medidos em julho de 2009 na área de estudo. Dessa forma, foram consideradas as influências dos poços no instante ($t=0$) para esses locais, as cargas hidráulicas inseridas estão especificadas na Tabela 9.

Por não se apresentar de forma homogênea a condutividade hidráulica na área modelada, utilizaram-se dois métodos para delimitação de áreas de mesma condutividade hidráulica, apresentados a seguir: (i) método das iso-condutividades e (ii) método considerando a presença da formação Beberibe completa (superior e inferior).

As iso-condutividades são linhas que apresentam mesma condutividade. Para a determinação dessas linhas utilizou-se os valores das condutividades hidráulicas obtidas através dos testes de bombeamento em alguns poços da área estudada (Tabela 10).

Tabela 10 – Condutividade Hidráulica obtida através de ensaio de Bombeamento.

LOCALIDADE*	K(m/d)
CRUZ DAS ARMAS	1,18
ALTO DO MATEUS II	0,24
CIAD	1,03
SEDE SAELPA (CRISTO RED)	0,261
DISTRITO INDUSTRIAL	5,94
HOSPITAL UNIVERSITÁRIO	5,24

* Ensaio de bombeamento realizados por Costa et al (2007), esses poços não foram utilizados para medidas de níveis estáticos.

A partir de interpolação, foram traçadas as iso-condutividades (Figura 26), e com base nesses resultados, estabelecidas áreas de condutividade hidráulica com intervalos especificados. Destaca-se que, esses intervalos foram utilizados como parâmetros de entrada no modelo, ou seja, foram especificados valores iniciais de condutividade hidráulica para que o modelo matemático fosse processado e calibrado.

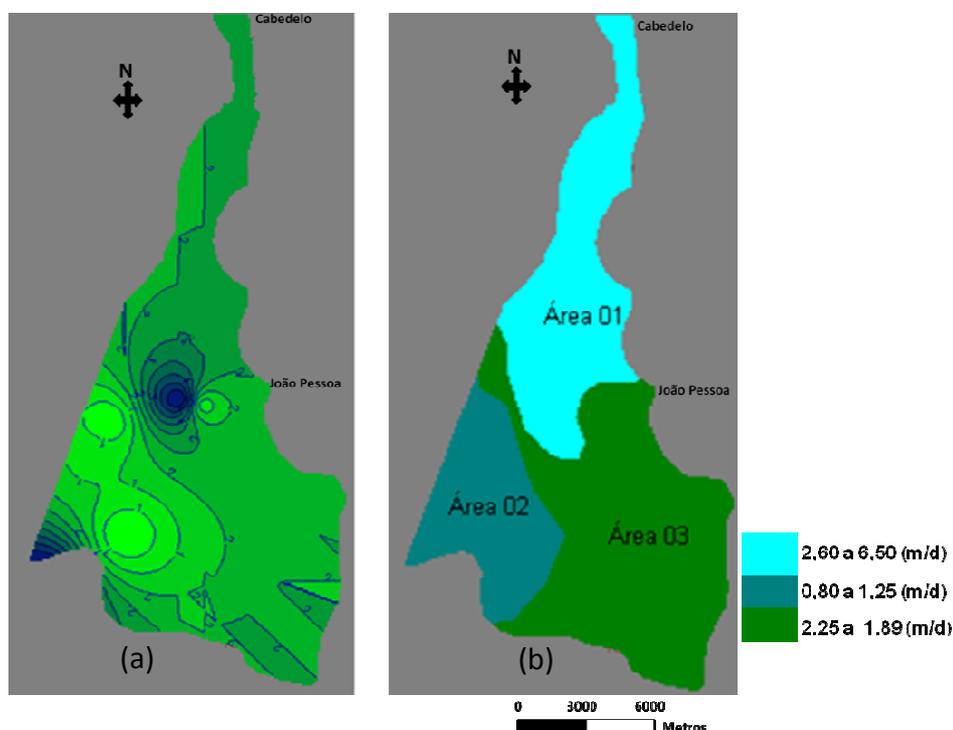


Figura 26 – Método da (a) Iso – condutividades e (b) áreas de condutividade hidráulica, com respectivos intervalos de condutividade hidráulica.

Após várias tentativas de calibração, verificou-se que aplicando apenas o método das iso-condutividades não se alcançava a calibração satisfatória do modelo, principalmente na região representada pelas áreas 2 e 3 (Figura 26b), onde se apresentam as formações Beberibe superior e inferior (vide Figura 15). Destaca-se que na área 2, a formação Beberibe inferior tem espessuras maiores que na parte sudeste da área 3, isso foi observado pelos perfis lito-estratigráficos utilizados nessa pesquisa. Outra informação relevante é que na parte sudoeste da área 3 (Figura 26b), a formação Beberibe inferior foi totalmente decomposta. Portanto, foram traçadas novas áreas de condutividade hidráulica considerando tanto o método (i) como o método (ii), obtendo-se finalmente a delimitação mostrada na Figura 27.

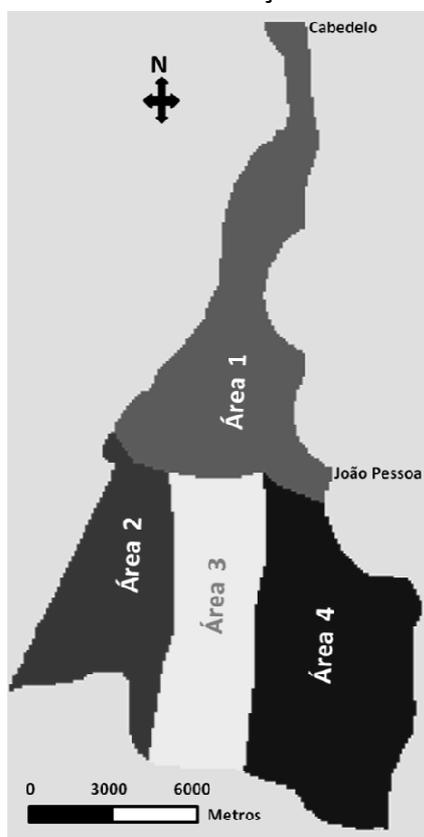


Figura 27 – Áreas de condutividade.

A calibração automática, com o programa computacional PEST (DOHERTY et al., 1994) consiste no ajuste dos valores dos parâmetros, de maneira que os valores das cargas hidráulicas calculadas nos poços com medição representem valores mais próximos possíveis das cargas hidráulicas observadas em campo. Para o caso em estudo, as cargas hidráulicas calculadas e observadas nessa calibração estão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Cargas Hidráulicas calculadas e observadas para julho de 2009

Poço	Localidade	Proprietário	Longitude	Latitude	Cargas Hidráulicas Observadas(m)	Cargas Hidráulicas Calculadas(m)	Desvio Padrão
1	ANATÓLIA	CAGEPA	296322	9209110	-7,22	-5,5	-1,72
2	CONJ. JOSÉ AMÉRICO	CAGEPA	294690	9207656	1,08	1,7	-0,62
3	CRISTO REDENTOR	CAGEPA	293029	9208725	21,5	19,3	2,2
4	CRUZ DAS ARMAS	CAGEPA	291365	9210448	1,57	1,8	-0,23
5	FUNCIONÁRIOS II	CAGEPA	292058	9205428	12,58	12,6	-0,02
6	P. EXP. DE ANIMAIS	CAGEPA	292605	9207218	27,04	22,9	4,14
7	TORRE	CAGEPA	294364	9212479	-6,17	-5,5	-0,67
8	VAL. FIGUEIREDO (P2)	CAGEPA	296634	9202832	6,73	6,2	0,53
9	VAL. FIGUEIREDO (P3)	CAGEPA	296803	9204122	1,51	2,1	-0,59
10	TAMBAÚ	CAGEPA	297429	9213196	-7,87	-6,8	-1,07
11	SEDE II	CAGEPA	297813	9229144	1,56	2,1	-0,54
12	SEDE	CAGEPA	297595	9229030	5,5	5,2	0,3
13	MANGABEIRA II	CAGEPA	296719	9206868	6,54	5,6	0,94
14	MANGABEIRA VII	CAGEPA	298085	9206922	-2,75	-1,6	-1,15
15	CAMALAÚ	CAGEPA	297856	9227368	1,09	1,4	-0,31
16	PRAIA DO POÇO	CAGEPA	297501	9223536	1,92	1,5	0,42

Conforme descrito, o parâmetro determinado nessa calibração foi à condutividade hidráulica, de acordo com as áreas propostas a partir dos testes de bombeamento e das características da formação Beberibe (Superior e Inferior) conforme mostrado na Tabela 12.

Tabela 12 – Condutividade Hidráulica para a área de estudo

Áreas	Condutividade Hidráulica	
	(m/d)	(m/s)
1	6,50	$7,52 \times 10^{-05}$
2	6,00	$6,94 \times 10^{-05}$
3	1,50	$1,74 \times 10^{-05}$
4	13,50	$1,56 \times 10^{-04}$

A Figura 28 mostra as superfícies potenciométricas calculadas e observadas, para o mês de julho de 2009, empregada para a calibração. Nela pode-se observar que as direções de fluxo (perpendiculares as linhas equipotenciais) são praticamente as mesmas, muito embora as piezometrias não sejam totalmente coincidentes, apresentando alguma variação. Com base na Figura 28, o modelo foi considerado calibrado, uma vez que as equipotenciais calculadas apresentam mesma tendência às

observadas e não há nenhuma grande singularidade que o modelo calibrado não represente.

A Figura 29 apresenta o diagrama de dispersão, das cargas observadas e calculadas. Esse diagrama mostra que, em geral, os valores de carga hidráulica observada apresentam a mesma tendência das cargas calculadas, o que implica em dizer que a calibração pode ser considerada satisfatória, embora não perfeita, caso este em que os pontos estariam sobre uma reta de 45° sem desvios, ou seja, as cargas hidráulicas calculadas seriam iguais às observadas. Os valores mais discrepantes correspondem aos pontos onde as cargas hidráulicas possuem maior valor.

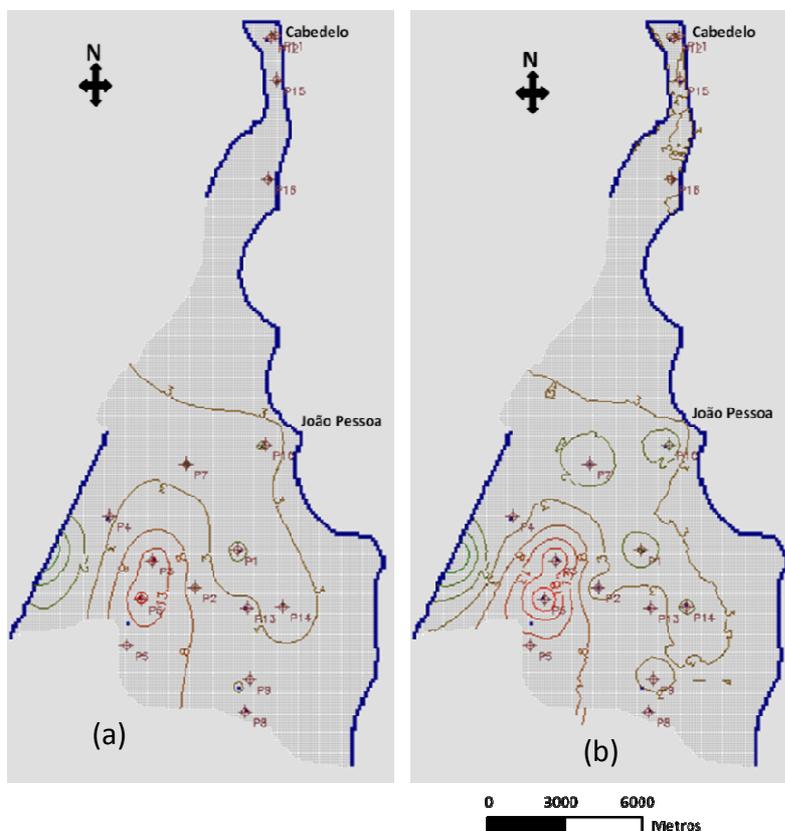


Figura 28 – Mapa potenciométrico (a) valores de carga hidráulica calculados (5 em 5 m) e (b) valores de carga hidráulica observados (5 em 5 m) em julho de 2009.

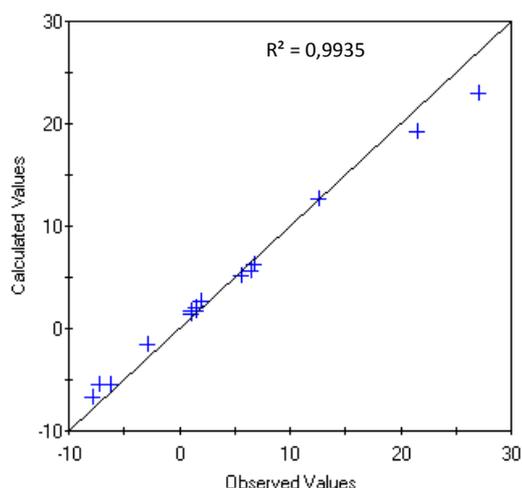


Figura 29 - Diagrama de dispersão obtido na calibração estacionária (permanente) para 16 poços usados nesta calibração.

A avaliação matemática da calibração, ou calibração quantitativa, permite uma análise melhor do grau de ajuste do modelo calibrado aos pontos onde foram levantados níveis potenciométricos. Desta forma, essa análise diz respeito à verificação dos resíduos entre as cargas observadas e calculadas e deve apresentar os menores valores possíveis.

O coeficiente de correlação (R^2), que é um parâmetro estatístico, apresenta-se com um valor 0,9935, o que justifica a correlação das cargas hidráulicas calculadas e observadas.

Os principais parâmetros de cálculo utilizados para a verificação da calibração quantitativa do modelo no regime permanente apresentaram os seguintes resultados:

- Média dos resíduos: $ME = \frac{\sum r}{n}$, o valor de ME obtido foi igual a -0,09 m
- Média absoluta dos resíduos: $MEA = \frac{\sum |r|}{n}$, e seu valor foi igual a 0,54 m.
- Erro médio quadrático: $RMS = \sqrt{\frac{\sum r^2}{n}}$, o qual apresentou um valor de 0,39 m.
- Média normalizada: $RN = \frac{RMS}{h_{\max} - h_{\min}}$, os resultados mostram um valor de RN igual a 1,12 %.

Onde r é a diferença entre os valores calculados e observados, n é o número de poços e h_{\max} e h_{\min} são, respectivamente, as cargas máximas e mínimas observadas no sistema.

4.3.2 Calibração do Armazenamento Específico (Ss)

Para a calibração do armazenamento específico, o escoamento foi simulado em regime transitório (transiente), ou seja, com a carga hidráulica apresentando variações ao longo do tempo. O período empregado foi de julho a outubro de 2009.

Os dados de medição da profundidade dos níveis estáticos dos poços, utilizados para a obtenção da cota do nível piezométrico foram obtidos durante a 1ª e a 2ª campanhas de medição realizada pelo Projeto ASUB – PB (Figura 30). Alguns poços observados na 1ª campanha não puderam ser visitados na 2ª campanha por não ser possível a paralisação durante 24 horas, somente os poços que tiveram as medições nas duas campanhas estão apresentados na Tabela 13.

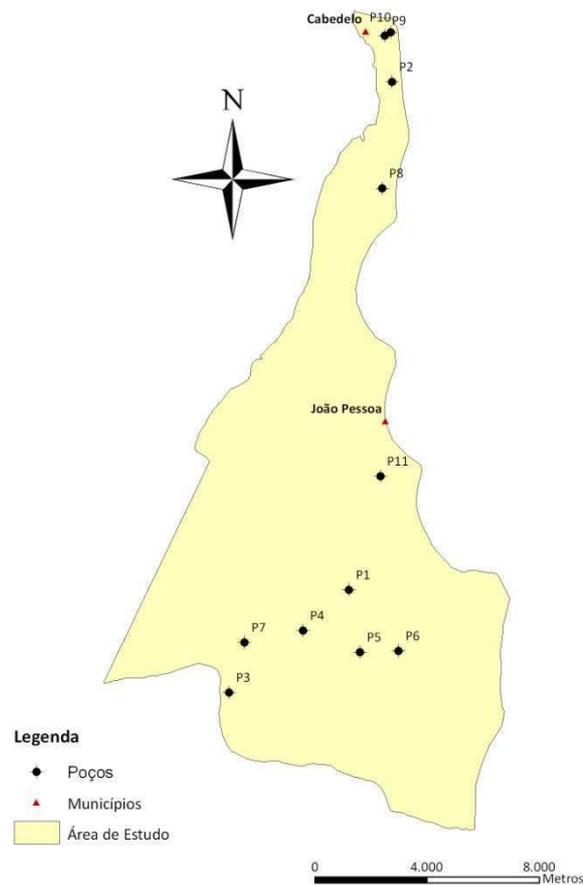


Figura 30 - Distribuição dos poços com medições de níveis estáticos (NE) utilizados na calibração do armazenamento específico.

Tabela 13 - Dados de níveis estáticos (1ª e 2ª campanhas ASUB – PB)

Poço	Localidade	Cota Topográfica (m)	Longitude	Latitude	Prof. do NE(m) Julho 2009	C.H.*(m) Julho 2009	PROF. NE(m) Outubro 2009	C.H.*(m) Outubro 2009
1	ANATÓLIA	23	296322	9209110	30,22	-7,22	32,08	-9,08
2	CAMALAU	3	297856	9227368	1,91	1,09	2,24	0,76
3	GROTÃO R 27	54	292058	9205428	41,15	12,58	41,98	11,75
4	José Américo	46	294690	9207656	44,92	1,08	44,13	-1,87
5	MANGABEIRA II	50	296719	9206868	43,46	6,54	45,65	4,35
6	MANGABEIRA VII	42	298085	9206922	44,75	-2,75	43,85	-1,85
7	P EXPOSIÇÃO DE ANIMAIS	46	292605	9207218	18,96	27,04	19,65	26,35
8	PRAIA DO POÇO (Mirinha)	6	297501	9223536	4,08	1,92	4,23	1,20
9	SEDE	6	297595	9229030	0,50	5,50	0,8	5,25
10	SEDE II	2	297813	9229144	0,44	1,56	0,77	1,23
11	TAMBAÚ	31	297439	9213198	38,70	-7,70	41,09	-10,09

* Carga Hidráulica

No regime transitório, as condições de contorno da parte noroeste, norte, leste e sudoeste precisaram ser modificadas, uma vez que nesse caso há variação das cargas nas fronteiras ao longo do tempo. Nas aplicações anteriores, para obtenção da condutividade hidráulica, empregou-se a condição de contorno de Dirichlet de carga hidráulica constante, correspondente ao regime permanente. Utilizou-se para a presente etapa a condição de contorno de Cauchy, de carga variável, dependente de fluxo. A ferramenta GHB (General Head Boundary) do MODFLOW permite o cálculo das cargas hidráulicas dependendo do fluxo. Dois parâmetros constituem essa ferramenta:

A *Condutância* – Expressa o produto da condutividade hidráulica e da distância entre os centros da célula, calculada pela equação seguinte:

$$C = Kx d_{cent} \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

K = condutividade Hidráulica [L/T];

C = Condutância [L²/T];

d_{cent} = distância entre os centros das células[L], para o estudo 100 m.

A *Carga Externa ao Contorno* - Nesse parâmetro utiliza-se a metodologia do princípio dos vasos comunicantes, estabelecendo uma inter-relação entre a parte interna e a parte externa da área de estudo. As cargas externas ao contorno, nos meses de julho e outubro, quando foram feitas as campanhas de medição, foram obtidas com a equação 16, deduzidas das hipóteses já relatadas no item 4.2.4 e esquematizada na Figura 23. Adotando-se o intervalo das medidas por mês (passo de tempo da simulação) sendo necessárias as cargas hidráulicas correspondentes aos períodos intermediários entre as medições. Nesse caso admitiram-se as seguintes relações lineares para a obtenção da carga externa nos meses de agosto e setembro, uma vez que se têm as cargas hidráulicas em julho e outubro advindas das medições de campo:

$$h_{agosto} = h_{julho} - \frac{(h_{julho} - h_{outubro})}{n} \quad \text{Equação 18}$$

$$h_{setembro} = h_{agosto} - \frac{(h_{julho} - h_{outubro})}{n} \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

n : é o número de períodos;

h_{julho} : carga medida em julho(m);

h_{agosto} : carga externa no mês de agosto(m);

$h_{setembro}$: é a carga externa no mês de agosto(m);

$h_{outubro}$: carga medida em outubro(m).

No modelo matemático, para que seja simulado o regime transitório, deve ser informada a quantidade de períodos. Nesse caso, foram adotados quatro períodos compreendendo o intervalo entre os meses de julho a outubro de 2009. Desse modo, verifica-se a importância da medição das profundidades dos níveis estáticos dos poços em períodos diferentes do ano, visto que essas medições indicarão como ocorrem as variações das cotas potenciométricas para o aquífero modelado. Nessa pesquisa foram utilizadas equações lineares, conforme descritas acima, para a determinação das cargas hidráulicas nos meses de agosto e setembro, os quais não apresentavam dados de medição das profundidades dos níveis estáticos.

Outro aspecto considerado para a calibração do armazenamento específico, em virtude do subsistema confinado estar perturbado, foram os bombeamentos dos poços ocorrentes na área de estudo. Esses bombeamentos representam, juntamente com a circulação natural do subsistema, a variação da carga hidráulica no regime transitório; simultaneamente à calibração do armazenamento específico foram determinadas as vazões de exploração ocorrentes na área modelada. Foram inseridas no modelo matemático as vazões dos poços para o período de julho a outubro (Figura 31) da CAGEPA (Tabela 14).

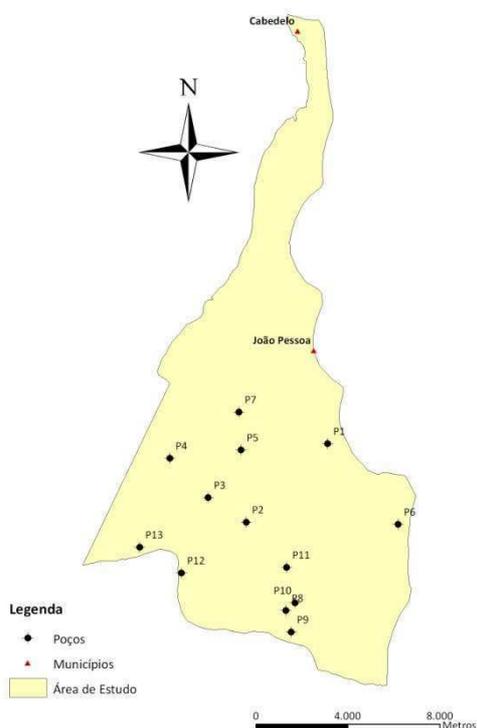


Figura 31- Distribuição dos poços de bombeamento da CAGEPA.

Tabela 14 – Poços de bombeamento

Poços	Localidade	Proprietário	Longitude	Latitude	Vazões (m ³ /d)
1	ALT. CABO BRANCO	CAGEPA	298220	9211096	1300,00
2	CONJ, JOSÉ AMÉRICO	CAGEPA	294690	9207656	3600,00
3	CRISTO REDENTOR	CAGEPA	293029	9208725	1300,00
4	CRUZ DAS ARMAS	CAGEPA	291365	9210448	1500,00
5	MATA DE BURAQUINHO	CAGEPA	294463	9210820	3000,00
6	PRAIA DA PENHA II	CAGEPA	301288	9207560	750,00
7	TORRE	CAGEPA	294364	9212479	2500,00
8	VAL. FIGUEIREDO (P1)	CAGEPA	296410	9203782	500,00
9	VAL. FIGUEIREDO (P2)	CAGEPA	296634	9202832	500,00
10	VAL. FIGUEIREDO (P3)	CAGEPA	296803	9204122	500,00
11		CAGEPA	296447	9205664	1000,00
12		CAGEPA	291875	9205430	2000,00
13		CAGEPA	290060	9206559	2000,00

Para a calibração do armazenamento específico, necessitou-se de valores iniciais para o armazenamento específico, esses foram obtidos pela equação 20.

$$S = S_s b \quad \text{Equação 20}$$

Onde:

S = Coeficiente de Armazenamento [adm];

Ss = Armazenamento Específico [1/m];

b = espessura média do aquífero [m].

Considerando o coeficiente de armazenamento médio determinado no estudo de Costa et al.(2007) os valores estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Valores iniciais de armazenamento específicos para as áreas

Áreas	Coeficiente de Armazenamento - S (adimensional)	b _{média} (m)	Armazenamento Específico - Ss(1/m)
1	$1,50 \times 10^{-4}$	136,00	$1,10 \times 10^{-6}$
2	$1,50 \times 10^{-4}$	190,00	$0,79 \times 10^{-6}$
3	$1,50 \times 10^{-4}$	220,50	$0,52 \times 10^{-6}$
4	$1,50 \times 10^{-4}$	132,50	$1,13 \times 10^{-6}$

As condições iniciais utilizadas foram as cargas calculadas pelo modelo no regime permanente quando ocorreu a calibração da condutividade hidráulica. Ressalta-se que, para representar a distribuição espacial do armazenamento específico, foram utilizadas as mesmas áreas determinadas para a calibração da condutividade hidráulica. A Figura 32 mostra a superfície piezométrica observada e calculada para o mês de outubro. Nela pode-se verificar que as linhas equipotenciais apresentam formatos e valores não coincidentes, sendo as linhas calculadas de valores mais elevados. Isso indica que as vazões reais são maiores do que as simuladas, que foram aquelas informadas para os poços em funcionamento da CAGEPA. Por isso, para se chegar a situação de rebaixamento, foram inseridas além das vazões dos poços mencionados anteriormente, outros poços de bombeamento presentes no cadastro da AESA (2009) para a calibração do armazenamento específico e conseqüentemente a determinação da vazão de exploração do aquífero modelado.

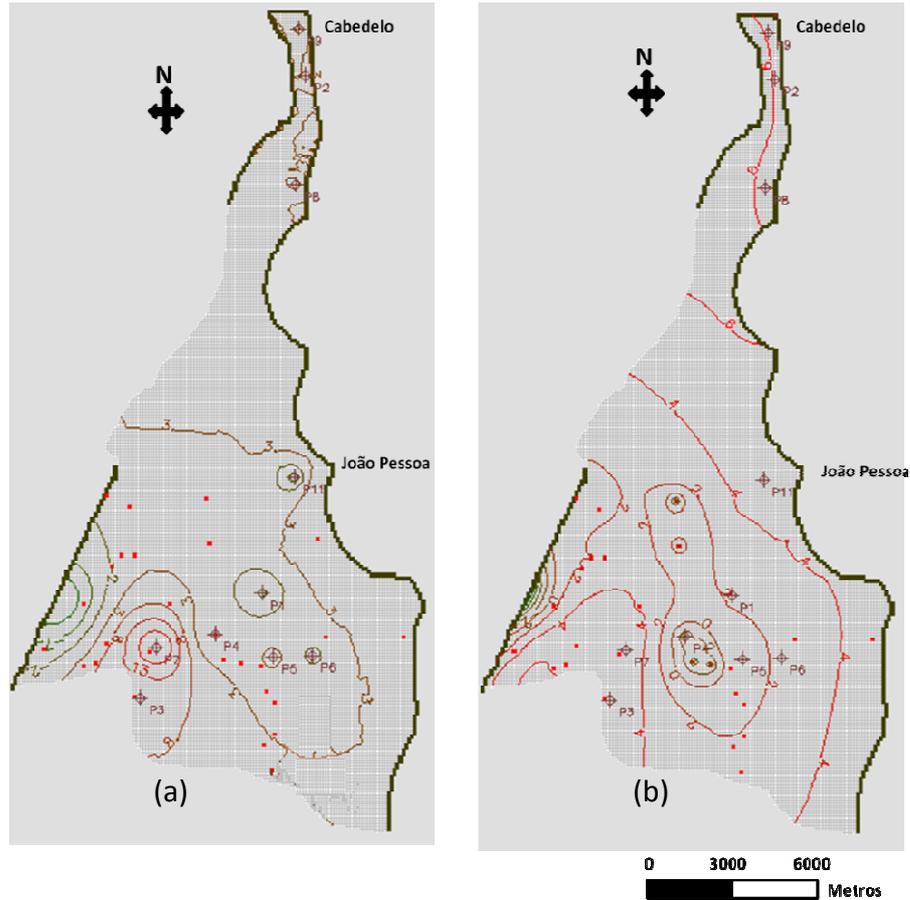


Figura 32 – Mapa potenciométrico (a) valores de carga hidráulica observados (5 em 5 m) e (b) valores de carga hidráulica calculados (5 em 5 m) em outubro de 2009.

Os parâmetros determinados nesta calibração referem-se, portanto, aos armazenamentos específicos e simultaneamente as taxas de bombeamento dos poços do aquífero Beberibe. O processo consistiu em aumentar a vazão bombeada e processar a calibração automática do armazenamento específico (com o programa computacional PEST), até atingir um ajuste aceitável. Os valores do armazenamento específico estão apresentados na Figura 33.

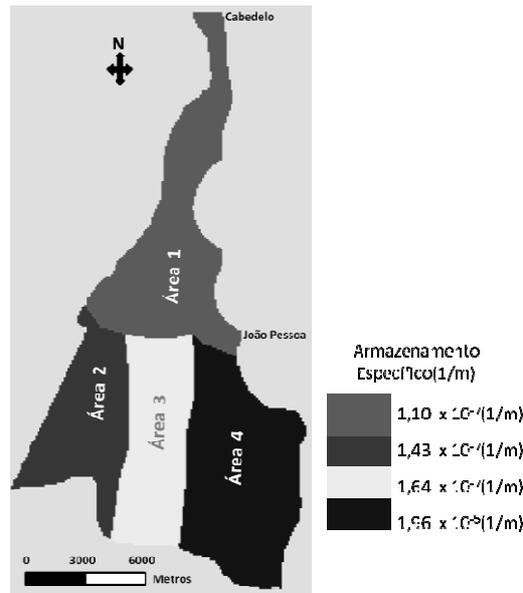


Figura 33 – Áreas com valores do armazenamento específico calibrados.

A Figura 34 apresenta as linhas equipotenciais calculadas e observadas, para o mês de outubro de 2009, empregada para a calibração. Nela pode-se observar que as direções de fluxo (perpendiculares às linhas equipotenciais) são praticamente as mesmas, muito embora as piezometrias não sejam totalmente coincidentes, apresentando alguma variação. Com base na Figura 34, o modelo foi considerado calibrado, uma vez que as equipotenciais calculadas apresentam mesma tendência às observadas e não há nenhuma grande singularidade que o modelo calibrado não represente.

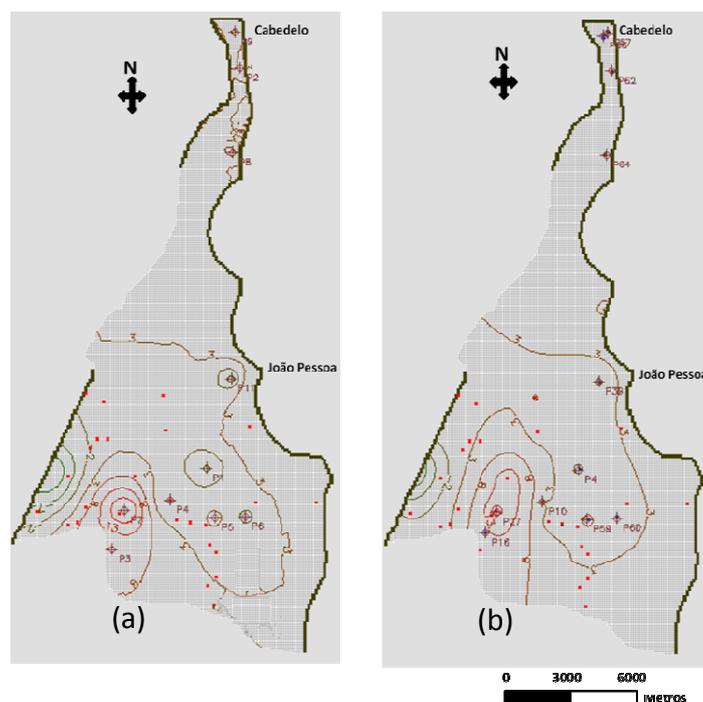


Figura 34 – Mapa potenciométrico (a) valores de carga hidráulica observados (5 em 5 m) e (b) valores de carga hidráulica calculados (5 em 5 m) em outubro de 2009.

A Figura 35 apresenta o diagrama de dispersão, das cargas observadas e calculadas.

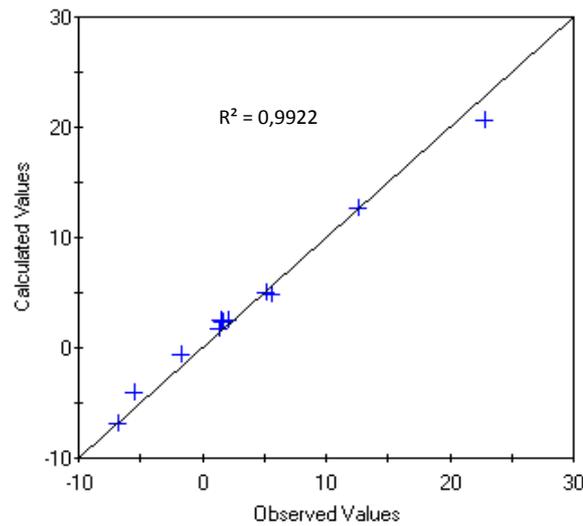


Figura 35 - Diagrama de dispersão obtido na calibração transiente para 11 poços usados nesta calibração.

Os principais parâmetros de cálculo utilizados para calibração quantitativa do modelo no regime transiente são:

Média dos resíduos: $ME = \frac{\sum r}{n}$, o valor de R obtido foi igual a 0,03 m

Média absoluta dos resíduos: $MEA = \frac{\sum |r|}{n}$, e seu valor foi igual a -0,347 m.

Erro médio quadrático: $RMS = \sqrt{\frac{\sum r^2}{n}}$, o qual apresentou um valor de 0,106 m.

Média normalizada: $RN = \frac{RMS}{h_{\max} - h_{\min}}$, os resultados mostram um valor de 0,360 %.

Onde r é a diferença entre os valores calculados e observados, n é o número de poços e h_{\max} e h_{\min} são, respectivamente as cargas máximas e mínimas observadas no sistema.

A Tabela 16 apresenta, além da localização dos poços (Figura 36), as vazões calibradas pelo modelo.

Tabela 16 – Poços de bombeamento com vazões calibradas para área de estudo

Poços	Localidade	Proprietário	Longitude	Latitude	Vazões (m ³ /d)
1	ALT. CABO BRANCO	CAGEPA	298220	9211096	1320,00
2	CONJ, JOSÉ AMÉRICO	CAGEPA	294690	9207656	3000,00
3	CRISTO REDENTOR	CAGEPA	293029	9208725	1320,00
4	CRUZ DAS ARMAS	CAGEPA	291365	9210448	2000,00
5	MATA DE BURAQUINHO	CAGEPA	294463	9210820	3000,00
6	PRAIA DA PENHA II	CAGEPA	301288	9207560	960,00
7	TORRE	CAGEPA	294364	9212479	2500,00
8	VAL. FIGUEIREDO (P1)	CAGEPA	296410	9203782	500,00
9	VAL. FIGUEIREDO (P2)	CAGEPA	296634	9202832	500,00
10	VAL. FIGUEIREDO (P3)	CAGEPA	296803	9204122	500,00
11		CAGEPA	296447	9205664	1000,00
12		CAGEPA	291875	9205430	2000,00
13		CAGEPA	290060	9206559	2000,00
14		Particular	296763	9205308	2000,00
15		Particular	298538	9207595	1000,00
16		Particular	292360	9207045	2000,00
17		Particular	290459	9206625	2000,00
18		Particular	290895	9212523	2000,00
19		Particular	291013	9210057	2000,00
20		Particular	291821	9210462	2000,00
21		Particular	290886	9207362	2000,00
22		Particular	288707	9207201	2000,00
23		Particular	200103	9208766	2000,00
24		Particular	291664	9212127	2000,00
25		Particular	292369	9207110	2000,00
26		Particular	294977	9206757	3000,00
27		Particular	295555	9206662	3000,00
28		Particular	296253	9206567	3000,00

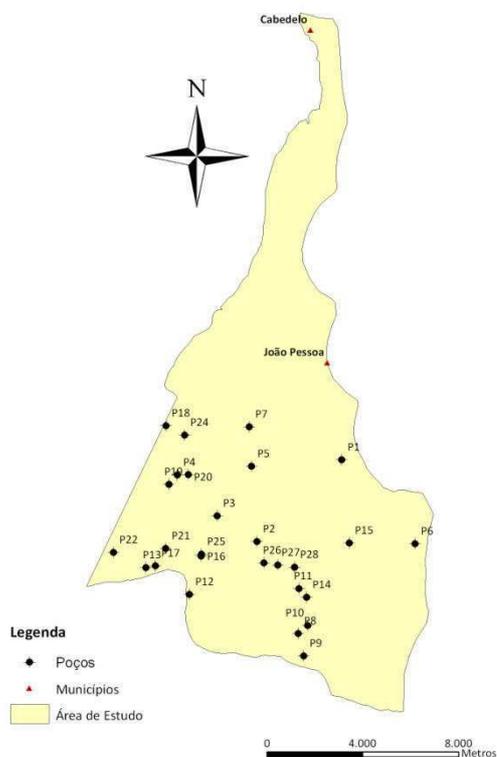


Figura 36 – Localização dos poços com taxas de bombeamentos calibradas.

Os resultados dos parâmetros da condutividade hidráulica e do armazenamento específico (vide Figura 33) encontram-se na Tabela 17.

Tabela 17 – Parâmetros Hidrodinâmicos calibrados para a área de estudo

Áreas	Condutividade Hidráulica (m/d)	Armazenamento Específico (1/m)
01	6,50	$1,10 \times 10^{-7}$
02	6,00	$1,43 \times 10^{-7}$
03	1,50	$1,64 \times 10^{-7}$
04	13,5	$1,96 \times 10^{-5}$

4.4 Verificação da Condutividade Hidráulica (K)

Além da calibração foi realizada a verificação da condutividade hidráulica, a partir dos dados de medições de níveis estáticos (Tabela 18) do estudo de Costa et al. (2007). Ressalta-se que a verificação consiste na análise do modelo conceitual e dos parâmetros calibrados, para averiguar se o subsistema modelado comporta-se de maneira coerente quanto ao subsistema real. No caso em estudo, foram utilizados dados de cotas de níveis potenciométricos do ano de 2007 (Figura 37) conforme citado acima. Portanto, foram editadas as condições de contorno da mesma forma da calibração da condutividade hidráulica com os dados de 2007. Os valores alcançados da condutividade hidráulica permaneceram os mesmos, e assim foi processado o modelo matemático para os dados de 2007, objetivando a verificação do subsistema em estudo.

Tabela 18 - Dados de níveis estáticos (Costa et al.,2007)

Poço	Localidade	Proprietário	Cota (m)	Longitude	Latitude	Prof. NE 2007 (m)	C. H.*(m) (2007)
1	ANATÓLIA	CAGEPA	23	296322	9209110	28,93	-5,93
2	ALTIPLANO CABO BRANCO	CAGEPA	44	298220	9211096	32,70	11,30
3	CONJ. JOSÉ AMÉRICO	CAGEPA	46	294690	9207656	34,20	11,80
4	CRISTO REDENTOR	CAGEPA	63	293029	9208725	41,50	21,50
5	FUNCIÓNÁRIOS II (GROTÃO R 27)	CAGEPA	54	292058	9205428	39,60	14,13
6	MANGABEIRA VII	CAGEPA	42	298085	9206922	21,00	21,00
7	P, EXPOSIÇÃO DE ANIMAIS	CAGEPA	46	292605	9207218	17,34	28,66
8	VALENTINA FIGUEIREDO (P3)	CAGEPA	43	296803	9204122	30,60	12,40
9	VALENTINA FIGUEIREDO (P2)	CAGEPA	40	296634	9202832	31,60	8,40
10	SEDE	CAGEPA	6	297595	9229030	0,30	5,70
11	SEDE II	CAGEPA	2	297813	9229144	0,25	1,75

* CH = Carga Hidráulica

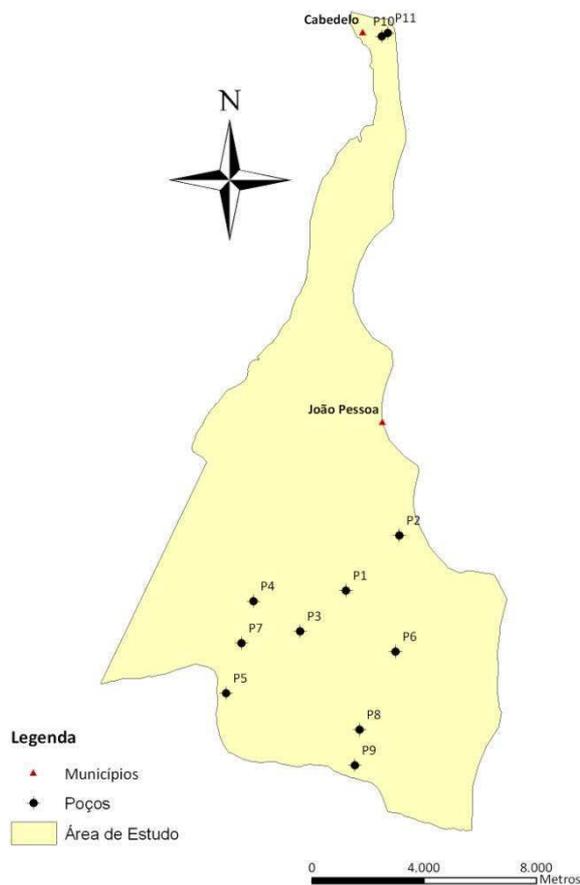


Figura 37 – Localização dos poços utilizados na verificação da condutividade hidráulica.

Os resultados seguintes referem-se à verificação dos valores da condutividade hidráulica para o ano de 2007. A Figura 38 mostra as curvas equipotenciais calculadas e observadas para o ano de 2007. Pode-se observar que as direções de fluxo (perpendiculares às linhas equipotenciais) são praticamente as mesmas, muito embora as piezometrias não sejam totalmente coincidentes, apresentando alguma variação. Com base na Figura 38, o modelo foi considerado verificado, uma vez que as equipotenciais calculadas apresentam mesma tendência às observadas e não há nenhuma grande singularidade que o modelo calibrado não represente.

A Figura 39 apresenta o diagrama de dispersão das cargas observadas e calculadas. Esse diagrama mostra que, em geral, os valores de carga hidráulica observada apresentam a mesma tendência das cargas calculadas, o que implica em dizer que a calibração pode ser considerada satisfatória, embora não perfeita, caso este em que os pontos estariam sobre uma reta de 45° sem desvios, ou seja, as cargas hidráulicas calculadas seriam iguais às observadas.

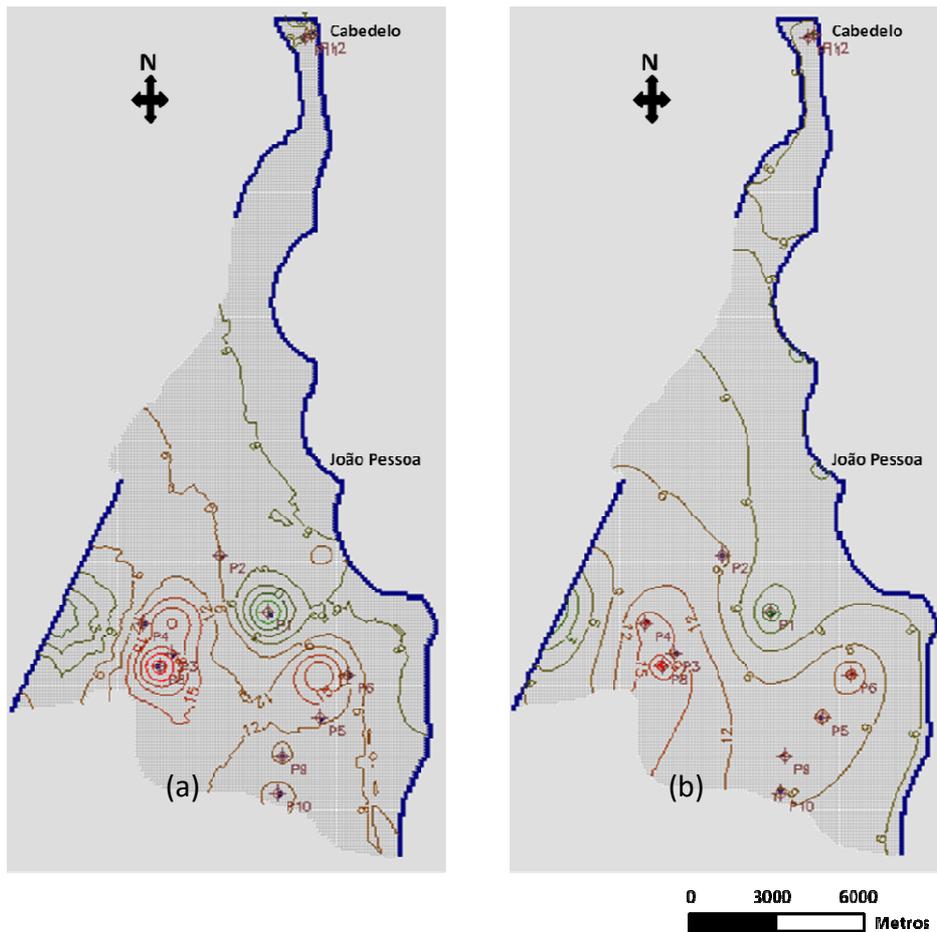


Figura 38 - Mapa potenciométrico (a) valores de carga hidráulica calculados (3 em 3 m) e (b) valores de cargas observados (3 em 3 m) em 2007.

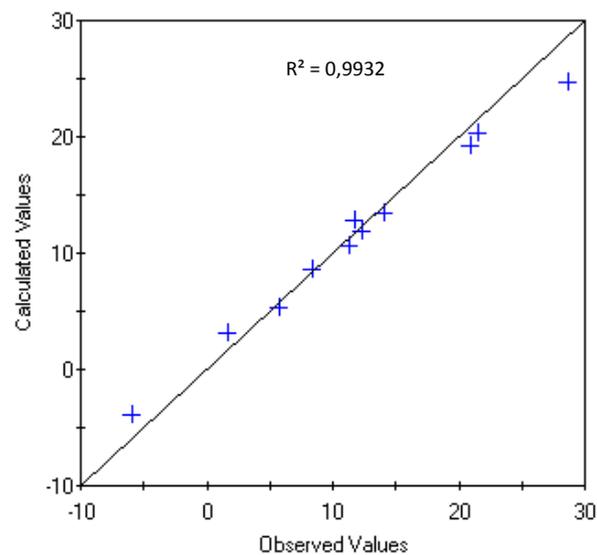


Figura 39 - Diagrama de dispersão obtido na verificação estacionária para 11 poços usados nesta verificação.

Os principais parâmetros de cálculo utilizados para a verificação do modelo quantitativa do modelo no regime permanente são:

- Média dos resíduos: $ME = \frac{\sum r}{n}$, o valor de ME obtido foi igual a -0,41 m
- Média absoluta dos resíduos: $MEA = \frac{\sum |r|}{n}$, e seu valor foi igual a 0,87 m.
- Erro médio quadrático: $RMS = \sqrt{\frac{\sum r^2}{n}}$, o qual apresentou um valor de 1,36 m.
- Média normalizada: $RN = \frac{RMS}{h_{\max} - h_{\min}}$, os resultados mostram um valor de RN igual a 3,93 %.

Onde r é a diferença entre os valores calculados e observados, n é o número de poços e h_{\max} e h_{\min} são respectivamente as cargas máximas e mínimas observadas no sistema.

CAPÍTULO V – APLICAÇÕES DO MODELO E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

5.1 Modelo Conceitual

O modelo conceitual, descrito no item 4.1.7, foi uma etapa primordial para a aplicação da modelagem matemática. Desta forma, seu resultado permitiu uma compreensão do comportamento hidrogeológico da área de estudo, visto que, foram obtidas informações, tais como: as formações geológicas, as unidades hidroestratigráficas e o entendimento do fluxo subterrâneo no aquífero Beberibe.

Outra discussão importante sobre esse resultado é a relação entre os aquíferos livre e confinado. Nessa pesquisa foi considerado a não ocorrência de conexão hidráulica entre eles, através do aquíclodo gramame. Todavia, estudos sobre essa consideração devem ser realizados para confirmar esta hipótese.

O entendimento hidrogeológico da área de estudo, a partir do modelo conceitual, permitiu a análise das áreas de recarga e descarga do subsistema confinado. Nesse enfoque, cabe aos tomadores de decisão desempenhar medidas de proteção para essas áreas, visando o não comprometimento dos aspectos quantitativos e qualitativos dos recursos hídricos.

As delimitações da área de estudo admitidas nessa modelagem levaram em consideração aspectos como os contatos geológicos, plataforma continental, falha tectônica e divisor de água. Portanto, a condição de contorno definida pelo divisor de água entre a Bacia Hidrográfica do rio Gramame e a Região da Bacia Sedimentar Costeira do Baixo Curso do rio Paraíba, parte sul da área modelada, precisa de um monitoramento dos níveis potenciométricos mais distribuídos nesse contorno em relação ao divisor de água, pois esse divisor sofre influências através da exploração das águas subterrâneas.

Uma melhor representação das espessuras das formações geológicas obtidas nessa pesquisa pode ser feita à medida que forem obtidos perfis lito-estratigráficos dos poços inseridos na área de estudo.

5.2 Calibração do Modelo

A etapa da calibração do modelo descrito no item 4.2, permitiu a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos do subsistema confinado (Beberibe), a partir dos valores de carga observados em campo. Após essa etapa foram realizadas algumas aplicações do modelo matemático descritas e analisadas mais adiante.

A calibração dos parâmetros hidrodinâmicos do subsistema confinado, confirmou as hipóteses formuladas para a área de estudo. Uma delas foi a descarga do aquífero confinado no mar, no final da plataforma continental. A outra foi o cálculo aproximado das cargas hidráulicas nas fronteiras do modelo. Essas hipóteses se mostraram bastante razoáveis ao permitir a calibração dos parâmetros na forma de ajuste das cargas hidráulicas calculadas, quando estas são comparadas com as cargas observadas em campo. Essa etapa pode ser melhorada a medida que sejam inseridos dados de cargas hidráulicas observadas em campo, e realizados teste de bombeamento distribuídos uniformemente por toda a área de estudo.

5.3 Interferência entre poços

O critério de interferência entre poços para outorga de direito de uso da água com abrangência local (Costa, 2009) foi simulado a partir do raio de influência do poço o qual depende do tempo de bombeamento e dos parâmetros calibrados (condutividade hidráulica e armazenamento específico) para obtenção da transmissividade – produto da condutividade hidráulica pela espessura do aquífero; e do coeficiente de armazenamento – produto do armazenamento específico pela espessura do aquífero. Objetivou-se, verificar qual a distância em que, os cones de rebaixamento de poços próximos, bombeando simultaneamente, não sofreriam interferência. Esse raio de influência foi determinado por:

$$R = 1,5\sqrt{\frac{T \times t}{S}} \quad \text{Equação 21}$$

Onde:

R = raio de influência [m];

T = transmissividade [L^2/T];

t = tempo de bombeamento [T];

S = coeficiente de armazenamento [adimensional].

A aplicação desse critério, a partir da calibração dos parâmetros hidrodinâmicos através do modelo matemático, permitiu verificar qual a distância em que poços bombeando simultaneamente não se interferem, conseqüentemente não terá influencia no rendimento dos poços. A Tabela 19 apresenta os raios de influência para poços. Observa-se que os mesmos foram determinados por áreas específicas, uma vez que essas possuem características hidrodinâmicas diferentes.

Tabela 19 – Raio de influência de poços para regime de bombeamento de 8, 12 e 24 horas

Áreas	Transmissividade (m ² /h)	Coefficiente de Armazenamento	Tempo de Bombeamento(h)	Raio de Influência(m)
1	36,83	1,50E-05	8	4.438,13
2	47,50	2,72E-05	8	3.739,79
3	13,78	3,62E-05	8	1.746,08
4	74,53	2,58E-04	8	1.519,11
Áreas	Transmissividade (m ² /h)	Coefficiente de Armazenamento	Tempo de Bombeamento(h)	Raio de Influência(m)
1	36,83	1,50E-05	12	5.435,57
2	47,50	2,72E-05	12	4.580,29
3	13,78	3,62E-05	12	2.138,50
4	74,53	2,58E-04	12	1.860,52
Áreas	Transmissividade (m ² /h)	Coefficiente de Armazenamento	Tempo de Bombeamento(h)	Raio de Influência(m)
1	36,83	1,50E-05	24	7.687,06
2	47,50	2,72E-05	24	6.477,50
3	13,78	3,62E-05	24	3.024,29
4	74,53	2,58E-04	24	2.631,17

De acordo com Feitosa et al,(2008) o raio de influência, depende do tempo e das características do aquífero, porém independe da vazão de bombeamento. Esse critério de outorga dos direitos de uso da água, não é excludente, ou seja, caso ocorra interferência não será inviabilizado a concessão da outorga, pois o órgão gestor poderá propor horários distintos de bombeamento, excetuando o bombeamento de 24 horas.

5.4 Diagnóstico Atual do Subsistema Confinado

Essa aplicação do modelo depois de formulado, calibrado e verificado consistiu em analisar a situação atual do aquífero modelado, representado pelo seu comportamento no período compreendido entre os meses de julho a outubro de 2009. Observa-se que, tanto na parte central do perfil AB (Figura 40), como no extremo

oeste, ocorrem cargas hidráulicas com valores negativos em relação ao nível do mar, ocasionado por bombeamentos, provocando rebaixamentos concentrados dos níveis potenciométricos, induzindo o fluxo para esses locais. Assim, o bombeamento no aquífero provocou a ocorrência de duas regiões de rebaixamentos dos níveis piezométricos, separado por um divisor de água, conforme se verifica na Figura 40 ressaltados pelo perfil AB.

Conforme o modelo conceitual, dois locais (parte noroeste e parte sudoeste) da área de estudo são responsáveis pela recarga do subsistema Beberibe que se dá naturalmente através dos contornos (Figura 40). Com a simulação através da modelagem matemática durante os meses de julho a outubro de 2009, foi verificado na fronteira sudoeste da área modelada (Perfil AB), a ocorrência de níveis potenciométricos negativos em relação ao nível do mar, que pode ser explicado pela exploração de 27.500 m³/d em vários poços situados em torno da fronteira. Esse resultado indica uma concentração da exploração justamente na zona onde deveria haver recarga (parte sudoeste da área modelada), o que traz à tona a importância de um monitoramento dos níveis freáticos próximos a esse local de recarga, visto que é um local de fundamental importância para a manutenção do subsistema Beberibe. A exploração intensa afetará a circulação, recarga e descarga da água para o aquífero estudado.

Um resultado importante desta análise diz respeito às taxas de bombeamento dos poços. O modelo matemático permitiu obter os valores dessas taxas para as áreas determinadas na calibração do modelo (vide Figura 33). Esses valores estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Taxas de Bombeamento por áreas

Áreas	Taxas de Bombeamento (m ³ /d)
01	-
02	27.500
03	11.750
04	13.250

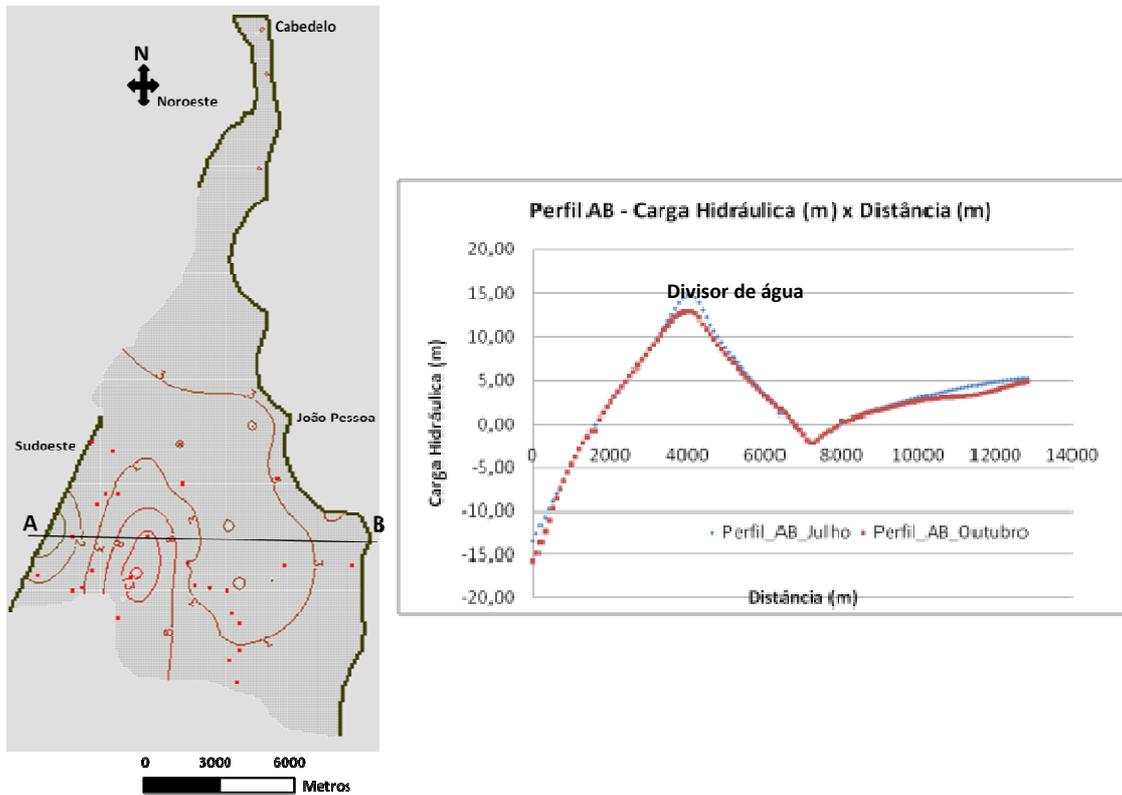


Figura 40 – Perfil AB– Cargas calculadas pelo modelo matemático para os meses de julho e outubro de 2009.

O comportamento das linhas potenciométricas na entrada sudoeste (Perfil AB) da área de estudo, indica que, nesse local, ao invés de estar entrando água no subsistema, como esperado, ocorre fluxo na direção contrária motivado pela existência de poços. No modelo bidimensional horizontal não se considera as variações do fluxo na direção vertical. Assim, é possível que esteja ocorrendo concentrações de fluxo nas partes rasas (superiores) do aquífero onde existe captação, e que na parte mais inferior do aquífero, continue a haver fluxo de entrada, conforme esquema mostrado na Figura 41. Uma melhor análise com relação a esse fato pode ser feita a partir de um modelo bidimensional vertical para este local.

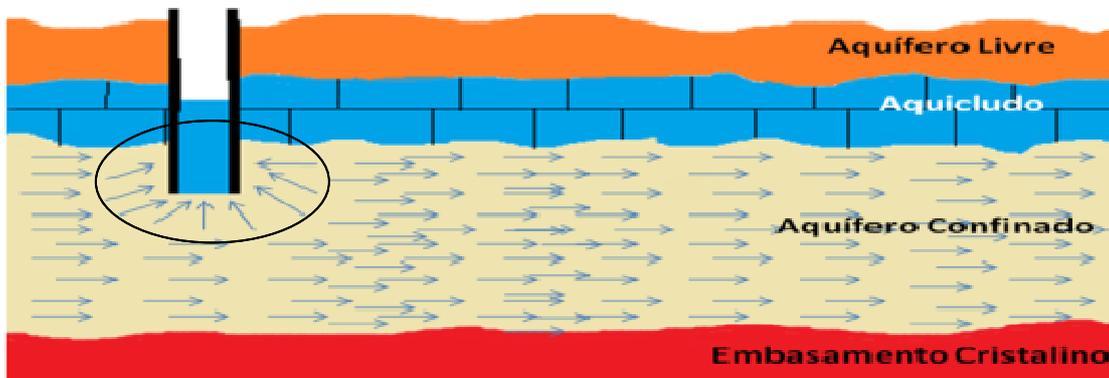


Figura 41 – Esquema do possível comportamento do fluxo na entrada sudoeste da área de estudo.

Outra informação obtida a partir das cargas calculadas para os meses de julho a outubro (Figura 42), diz respeito à parte noroeste (Perfil CD), outro local de recarga do aquífero Beberibe. Observaram-se pequenas variações nos níveis freáticos, isto pode ser justificado tanto pela circulação natural das águas subterrâneas como pela pouca quantidade de água captada por poços. Portanto, o fluxo nesta parte ocorre normalmente do interior para o litoral, ou seja, as perturbações no subsistema ainda não modificaram de forma sensível o seu fluxo subterrâneo natural.

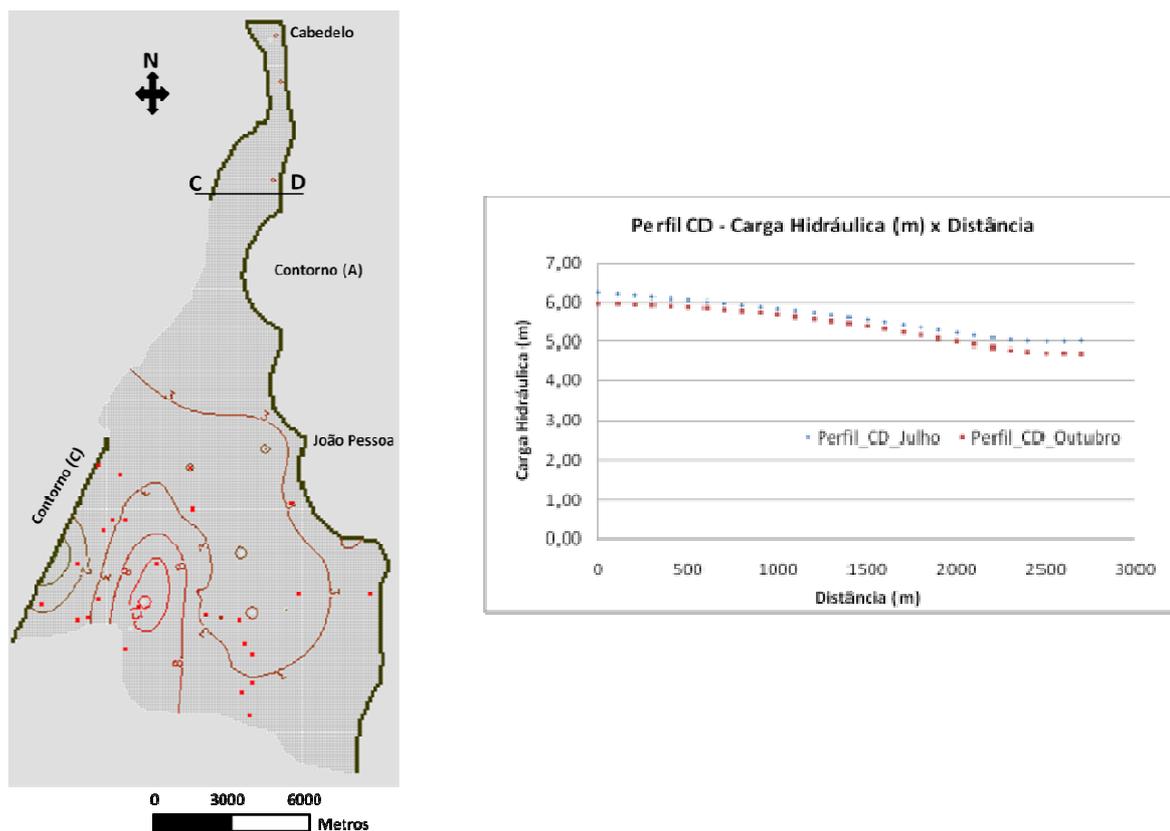


Figura 42 – Perfil CD – Cargas calculadas pelo modelo matemático para os meses de julho e outubro de 2009.

Ainda sobre esse diagnóstico, os resultados do modelo mostraram que a taxa de bombeamento para área de estudo no período simulado tem valor de 52.700 m³/d. Desse valor 20.700 m³/d são utilizados pela CAGEPA e o restante 29.000 m³/d são utilizados por usuários particulares. Analisando o cadastro de poços outorgados pela AESA (Anexo I) observa-se que a vazão outorgada para os usuários particulares é de 20.346,72 m³/d, ou seja, esse valor outorgado é inferior ao valor obtido pelo modelo matemático cuja diferença é 11.653,28 m³/d (Tabela 21).

Tabela 21 – Diagnóstico das vazões de bombeamento

Quantidade	Proprietário	Modelo (m ³ /d)	Outorgado AESA (2009) – (m ³ /d)
13	CAGEPA	20.700,00	20.700,00
15	PARTICULAR	32.000,00	20.346,72
TOTAL		52.700,00	41.046,72

Dessa forma, existe uma exploração de água subterrânea sem devida autorização da AESA detectados pela aplicação do modelo. Portanto, evidencia-se que o modelo matemático permite aos gestores de recursos hídricos o conhecimento da exploração do subsistema Beberibe, colaborando assim, para que seja realizada uma fiscalização adequada. Outro aspecto importante para a gestão de recursos hídricos na área de estudo é a inserção de áreas de proteção do aquífero Beberibe, nos locais de entrada do subsistema (noroeste e sudoeste), em virtude da exploração acentuada nesses locais, pois a propagação de contaminantes nessas áreas se estenderá por todo o aquífero.

5.5 Simulação do Modelo para o Estado Natural

Essa aplicação teve o intuito de verificar como estaria acontecendo o balanço natural do subsistema, caso não houvesse exploração, para o período de julho a outubro de 2009, objetivando quantificar o volume de água da descarga natural do subsistema modelado. Esta descarga natural é importante para a gestão de recursos hídricos, pois está associado à disponibilidade de água subterrânea (ALBUQUERQUE e REGO, 1999).

Nessa simulação foram feitas algumas considerações para a obtenção do estado natural do aquífero Beberibe. A primeira corresponde a admitir que o divisor de água com cargas hidráulicas mais altas (Figura 43) corresponde aos resquícios do sistema natural anteriormente à exploração. A segunda corresponde à consideração da descarga natural do subsistema confinado ocorrer no final da plataforma continental com carga hidráulica constante e nula. Portanto, foi estabelecida a relação linear para obtenção das cargas hidráulicas em cada célula do modelo, a partir da carga do divisor de água obtida do diagnóstico atual do subsistema confinado (Figura 44).

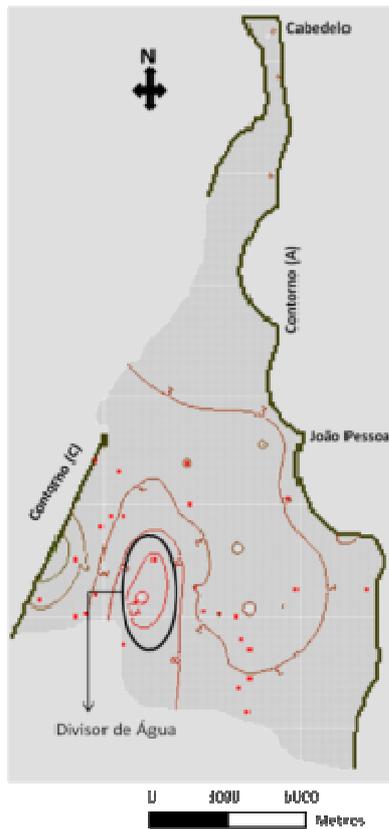


Figura 43 – Cargas hidráulicas calculadas pelo modelo matemático, em destaque a localização das cargas correspondente aos resquícius do sistema natural.

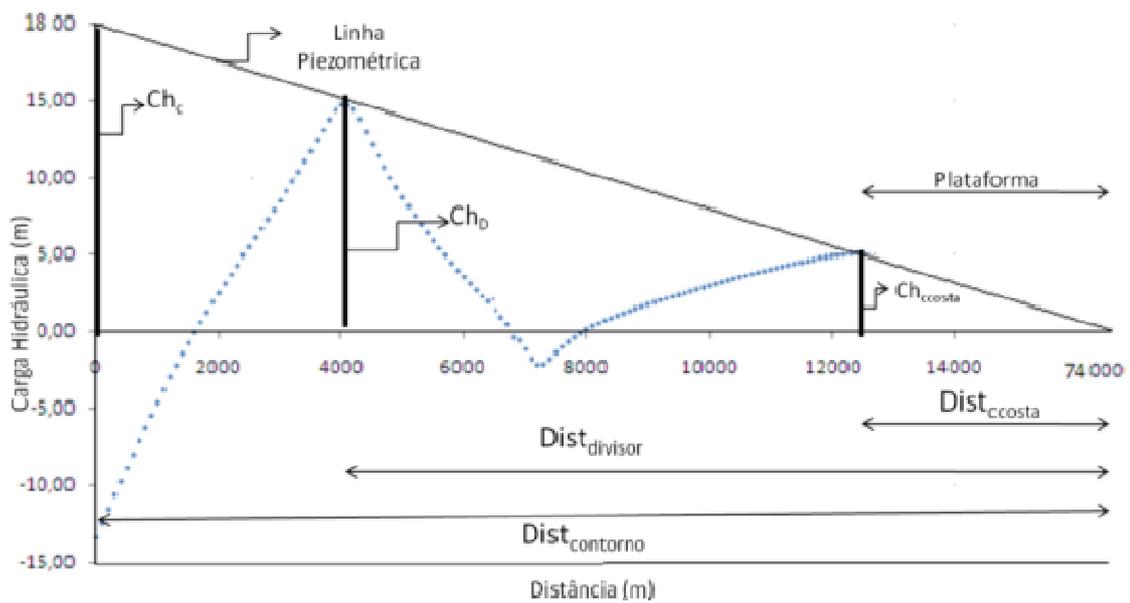


Figura 44 – Esquema para obtenção das cargas hidráulicas no estado natural do subsistema.

As relações apresentadas nas equações seguintes foram utilizadas para o cálculo das cargas no contorno para o sistema no estado natural.

$$Ch_c = \frac{Ch_D \times Dist_c}{Dist_D} \quad \text{Equação 22}$$

$$Ch_{cCosta} = \frac{Ch_D \times Dist_{cCosta}}{Dist_D} \quad \text{Equação 23}$$

Onde:

Ch_c = Carga hidráulica no contorno(m);

Ch_D = Carga Hidráulica no divisor de água(m);

Ch_{cCosta} = Carga Hidráulica no contorno da costa litorânea(m);

$Dist_c$ = Distância contorno do até o final da plataforma (m);

$Dist_D$ = Distância do divisor de água até o final da plataforma (m);

$Dist_{cCosta}$ = Distância do contorno da costa até o final da plataforma (m);

As condições iniciais importantes dados de entrada no modelo matemático para o regime transitório foram obtidas a partir da simulação do modelo para o regime permanente. Na simulação do regime permanente as cargas hidráulicas foram inseridas nas células fixas no contorno (A) e (C) da área modelada cujos valores foram obtidos a partir das relações das equações 22 e 23 acima descritas para o mês inicial, julho de 2009. As cargas fixas em destaque na Figura 45 foram assim definidas com intuito de especificar o valor da carga hidráulica no divisor de água. Com essa simulação em regime permanente, as cargas hidráulicas calculadas pelo modelo matemático foram inseridas como condições iniciais para o regime transitório.

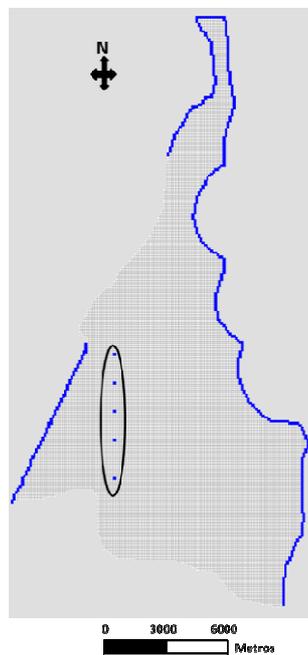


Figura 45 – Células de cor azul, cargas especificadas (fixas), para o regime permanente.

As Figuras 46 e 47 apresentam as cargas calculadas para o subsistema confinado no estado natural. Verifica-se que o fluxo subterrâneo ocorre como era de se esperar, pelo modelo conceitual, do interior para o litoral sem nenhuma influencia para toda a área. A realização dessa simulação permitiu a quantificação do volume de descarga para os meses de julho a outubro de 2009, uma vez que o subsistema confinado encontra-se sem exploração. Sendo este o volume possível de exploração, uma vez que o subsistema confinado encontra-se sem exploração. Esse volume foi de 4.184.000 m³ para os meses de simulação do modelo matemático.

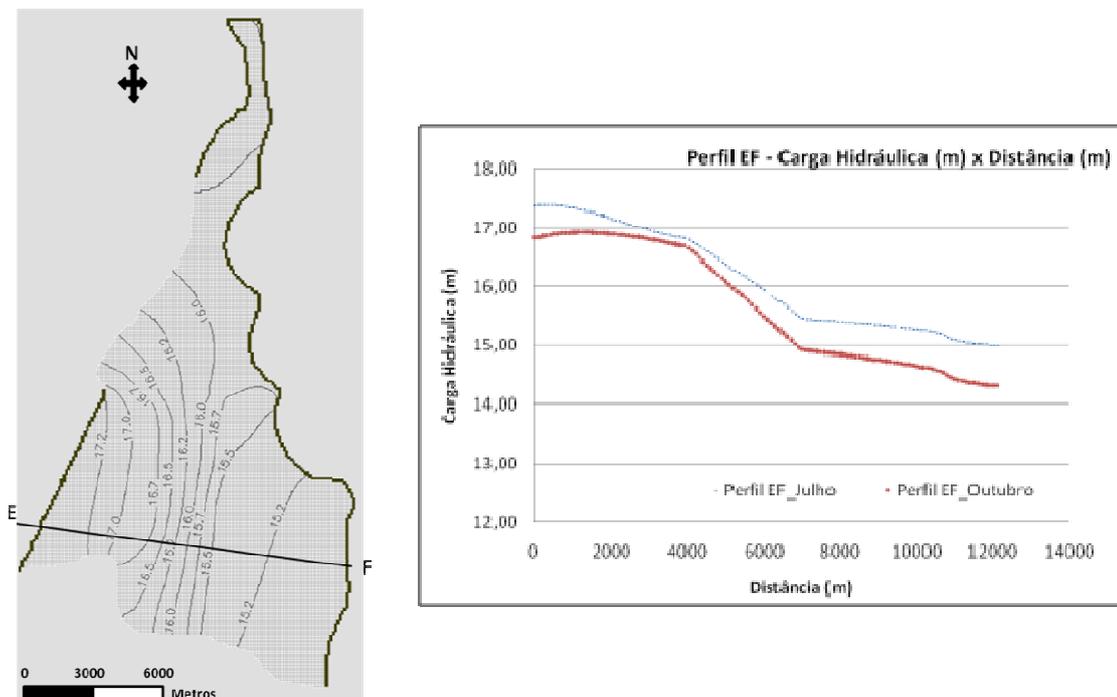


Figura 46 – Perfil EF – Cargas calculadas pelo modelo matemático para os meses de julho e outubro de 2009 (estado natural).

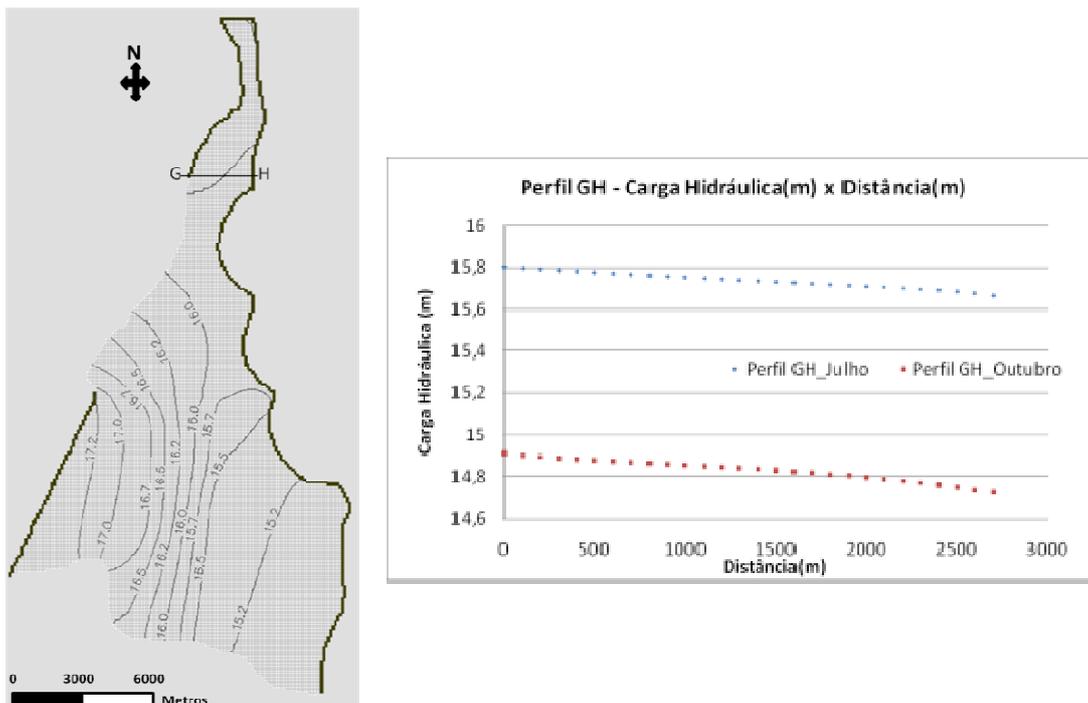


Figura 47 – Perfil GH – Cargas calculadas pelo modelo matemático para os meses de julho e outubro de 2009 (estado natural).

O diagnóstico realizado para a situação atual do subsistema confinado mostrou que a exploração por poços totaliza um volume de 6.429.400 m³ para os meses de julho a outubro de 2009. Este é um valor superior ao volume da descarga natural do mesmo subsistema (4.184.000 m³), indicando a ocorrência de uma superexploração, se a descarga natural for retirada como disponibilidade máxima do aquífero.

Desta forma, a recarga natural não repõe o volume de água explorado, causando um déficit hídrico que resulta na diminuição dos níveis potenciométricos do aquífero na região, o que resulta em um rebaixamento dos níveis potenciométricos ao longo do tempo, o que já se observa em alguns poços. É o caso do poço da CAGEPA em Marés, que na época de sua perfuração apresentava-se como jorrante e, atualmente, encontra-se com nível estático abaixo do nível do mar. Portanto, medidas tais como: proteção das áreas de recarga, observação da capacidade de recarga do aquífero dentre outras, devem ser utilizadas pelos gestores de recursos hídricos para que sejam preservados os recursos hídricos, em particular os subterrâneos para o aquífero modelado.

Os valores encontrados nessa simulação devem ser vistos como uma primeira avaliação condicionada aos poucos dados disponíveis e abrangendo apenas uma parcela do ciclo anual de recarga, circulação e descarga. Com a expansão do

monitoramento deverão ser obtidas séries mais longas, de observação plurianuais, que darão maior confiança aos resultados do modelo. Contudo, a situação representa muito bem os resultados atuais e serve de alerta para se evitar as consequências advindas da superexploração detectada.

Um das maneiras, que podem ser utilizadas pela gestão de recursos hídricos para o controle das emissões de outorga de direito de uso dos recursos hídricos existente no subsistema confinado, é a integração da Política Estadual de Recursos Hídricos com a Política Nacional de Saneamento Básico - Lei Federal nº 11.445-(BRASIL, 2007), visto que em seu art.45, segundo parágrafo, a Lei de Saneamento básico determina que não poderá ser utilizado nenhuma outra fonte de água, se o local estiver ligado a rede pública de abastecimento. Deste modo, devem ser fiscalizadas as outorgas já existentes para averiguar essa integração.

5.6 Intrusão Salina

De acordo com Costa (2009), a intrusão salina ocorre em aquíferos costeiros, compreendendo o desequilíbrio entre a água doce advinda da descarga natural do sistema em questão e a água salgada do mar, esse problema é ocasionado pela intensa exploração de águas subterrâneas. Dessa forma, a referida autora propõe como critério de outorga de direito de uso dos recursos hídricos a análise da intrusão salina. O emprego do modelo matemático permite a verificação desse critério para o aquífero modelado.

No presente estudo, a partir do diagnóstico atual do subsistema confinado descrito no item 5.4, e com as cargas hidráulicas calculadas pelo modelo matemático (vide Figura 40) foi possível avaliar o estado do aquífero quanto ao problema da intrusão salina. A linha potenciométrica do subsistema confinado em uma seção contendo limites da área modelada (Perfil AB-Figura 40) foi determinada conforme Figura 48.

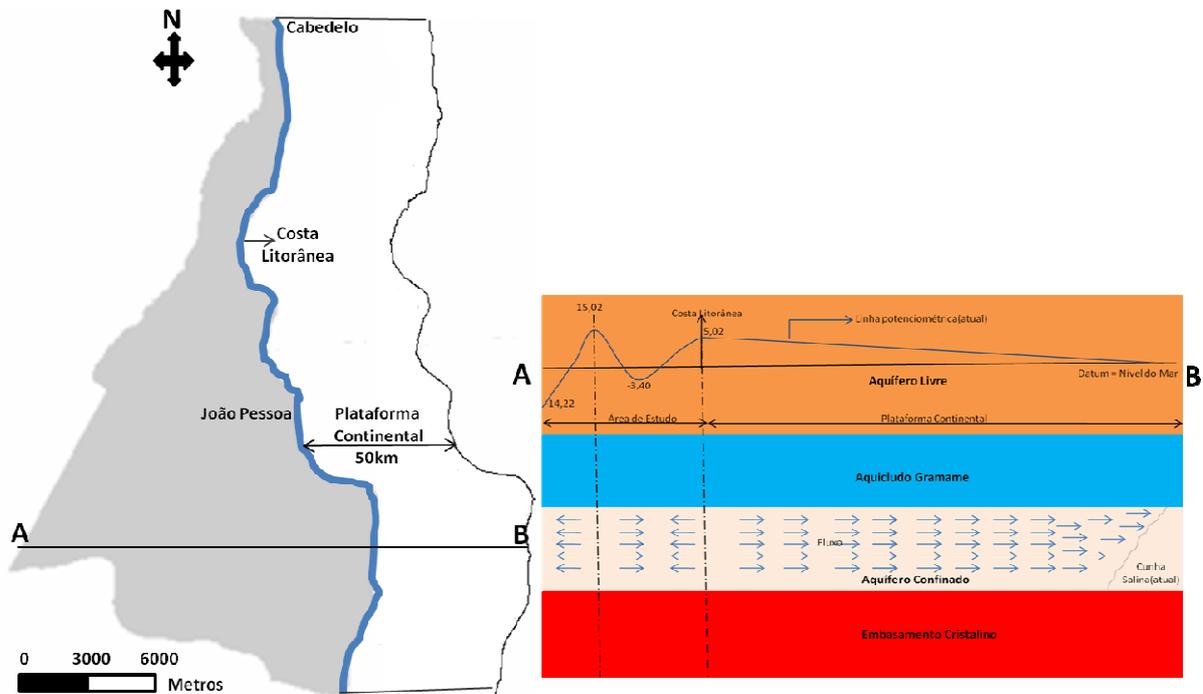


Figura 48 – Esboço da intrusão salina para o aquífero modelado.

Como se observa na figura 48, considerando as condições de contorno estabelecidas nessa pesquisa, a intrusão salina, problema ocorrente em zonas costeiras, ainda não está presente na área de estudo, apesar de ocorrer alguns níveis potenciométricos negativos na área modelada. Nela pode-se verificar um divisor de água exatamente no limite da costa litorânea, possuindo cargas hidráulicas positivas que diminuem na direção do litoral até o final da plataforma continental. O escoamento, portanto, ainda ocorre predominantemente em direção ao oceano.

A situação vai sendo alterada na medida em que for ocorrendo exploração acentuada da área modelada, principalmente próximo ao limite da costa litorânea. A cunha salina, interface entre a água doce e a água salgada, vai, então avançar pela plataforma na direção do continente. A Figura 49 mostra de forma esquematizada a projeção tanto da linha potenciométrica como a da cunha salina para o caso acima citado.

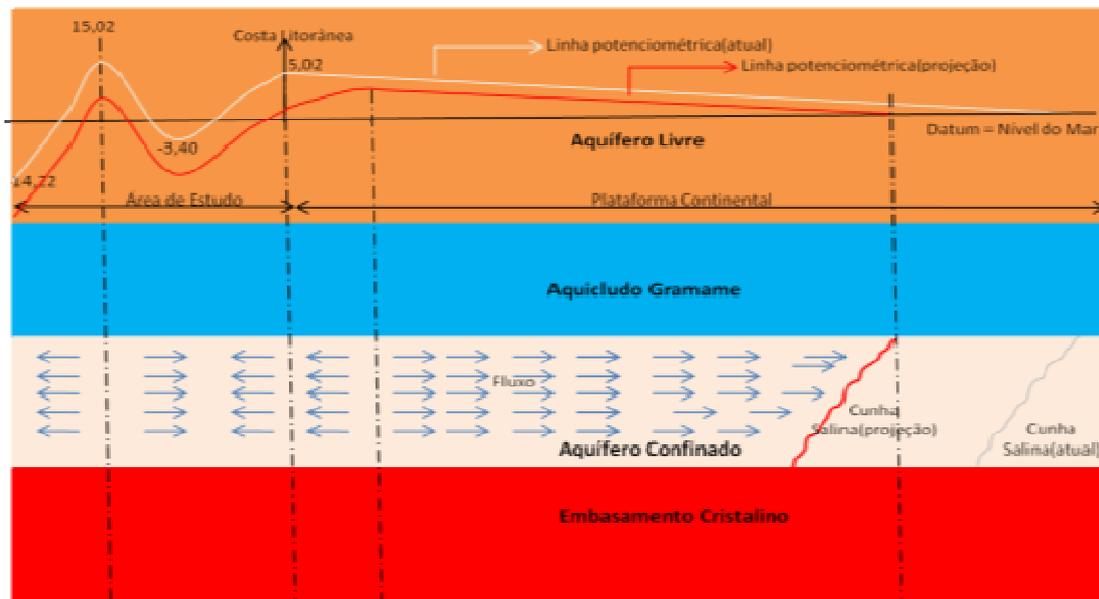


Figura 49 – Esquema da intrusão salina com a continuidade da exploração do subsistema confinado.

Com maiores informações sobre os níveis piezométricos na área modelada, principalmente na costa litorânea, seria possível, com o modelo, avaliar os tempos gastos no avanço da cunha salina em função de taxas de bombeamento praticadas no aquífero.

Uma análise ainda mais rigorosa sobre o avanço da cunha salina pode ser realizada com a extensão da área modelada para incluir a plataforma continental (modificação da posição da fronteira leste da área modelada). Portanto, com a aplicação do modelo matemático foi possível colocar em prática um critério para outorga de direito de uso dos recursos hídricos para o subsistema confinado.

6.1 Conclusões

A modelagem do fluxo subterrâneo estabelecida nessa pesquisa demonstra a eficiência da aplicação de modelos matemáticos para subsidiar a gestão de recursos hídricos, visto que vários resultados foram encontrados a respeito do aquífero modelado.

Observou-se, ainda, a importância da modelagem matemática para o entendimento do subsistema hidrogeológico estudado, uma vez que foi possível verificar as mudanças ocorridas no fluxo subterrâneo quando submetido a explorações. Permitiu, também, direcionar as necessidades de levantamentos de novos dados, visando sempre enriquecer as informações que são a base deste tipo de investigação, tornando-o mais próximo possível da realidade ambiental.

Com respeito aos parâmetros calibrados, esses apresentaram valores coerentes, tendo em vista a pequena quantidade de dados para a calibração. Entretanto, à medida que forem sendo atualizados os dados no modelo matemático, esses parâmetros serão melhorados e uma nova calibração poderá ser executada.

O aplicativo matemático possibilitou quantificar o volume de descarga natural do subsistema confinado. Uma primeira estimativa para o período da simulação (julho a outubro de 2009) foi obtida neste trabalho.

Na aplicação do modelo matemático, foi diagnosticada uma vazão de bombeamento superior àquela atualmente outorgada pelo Órgão Gestor de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba, mostrando que é necessária uma fiscalização mais acentuada da vazão de retirada do subsistema confinado. Ainda sobre esse resultado, é possível perceber, através de monitoramento dos níveis estáticos dos poços, onde estão ocorrendo essas captações não outorgadas, visto que nas áreas próximas a elas o modelo acusa punções nas cargas hidráulicas.

Com relação aos resultados das taxas de bombeamento, esses indicam uma concentração da exploração justamente na zona onde deveria haver recarga (parte sudoeste da área modelada), o que traz à tona a importância de um monitoramento dos níveis freáticos próximos a esse local de recarga, visto que, é um local de

fundamental importância para a manutenção do subsistema Beberibe e a exploração intensa afetará a circulação, recarga e descarga da água para o aquífero estudado.

A obtenção dos raios de influência e da intrusão salina, como critérios de outorga de direito de uso dos recursos hídricos, simulados pelo modelo matemático, mostrou uma forma eficiente de análise da outorga de águas subterrâneas, porém outros critérios devem ser considerados, pois cada área detém características distintas.

A utilização unicamente da vazão de teste de poço, como disposto no Decreto nº. 19.260/97 (PARAÍBA, 1997), como critério de outorga de direito de uso das águas subterrâneas, configura-se como ineficiente em relação aos aspectos quantitativos desse recurso, pois não se consideram as potencialidades, disponibilidades dos aquíferos para a exploração das águas subterrâneas.

6.2 Recomendações

6.2.1 Recomendações para pesquisas futuras

- Realização da modelagem das áreas vizinhas a área estudada, para obter a entrada do fluxo subterrâneo na parte noroeste e sudoeste da área modelada;
- Modelagem do subsistema livre em conjunto com o subsistema confinado, para verificar se existe alguma conexão hidráulica entre eles, na área de estudo;
- Aplicação de um modelo bidimensional vertical, nas entradas de fluxo do aquífero modelado na área de estudo;
- Realização de monitoramento na parte sul da área de estudo, com a finalidade de observar como ocorre o divisor de água entre a Bacia Sedimentar Costeira do Baixo Curso do rio Paraíba e a Bacia Hidrográfica do rio Gramame.

6.2.2 Recomendações para a Gestão de Recursos Hídricos na Área de Estudo

- Observação dos locais de entrada de água no subsistema, para não ocorrer o comprometimento quantitativo e qualitativo da água subterrânea, em virtude da exploração;

- Realização de cadastros atualizados dos poços com sua localização, estado de operação, profundidade, perfis lito-estratigráficos, níveis estáticos e dinâmicos, e testes de bombeamento;
- Monitoramentos sistemáticos do nível estático dos poços que permita a atualização permanente do modelo matemático para sua aplicação como ferramenta, na gestão de recursos hídricos;
- Fiscalização das taxas de bombeamento dos poços outorgados, com base no potencial de água subterrânea da área de estudo, uma vez que já ocorre uma exploração superior ao volume renovável anualmente.
- Utilização de outros critérios de outorga de uso dos recursos hídricos subterrâneos, além dos indicados nessa pesquisa. Um exemplo é o potencial (reserva renovável) de água subterrânea.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AESA (2008). Comunicação Pessoal. Reunião com Diretoria de Gestão e Apoio Estratégico.

AESA (2006). Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba. Relatório Final. Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/perh/>>. Acesso em: Agosto. 2009.

ALBUQUERQUE, J. do P. T.; RÊGO, J. C. (1999). **Subsídios para o gerenciamento racional e integrado dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos do estado da Paraíba**. In: XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre, ABRH, 1999.

ALBUQUERQUE, J. do P.T. (2008). Comunicação Pessoal.

ANDERSON, M.P e WOESSNER, W.W. **Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport**. San Diego, EUA : Academic Press, 1992.

BONGANHA, C.A. (2005). **A utilização da modelagem matemática como ferramenta para a gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos subterrâneos: uma proposta para o município de Araraquara**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente).Centro Universitário de Araraquara, São Paulo.

BRASIL (1988). **Constituição Federal de 1988**. Disponível em: <<http://www.senado.gov.br/sf/legislacao/const/>>. Acesso em: Julho. 2009.

BRASIL (1997). **Política Nacional de Recursos Hídricos**. Diário Oficial da União DOU de 09 de janeiro de 1997, Seção 1, Brasília DF, p. 470-474.

BRASIL (2007). **Política Nacional de Saneamento Básico**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm > Acesso: Maio.2009.

CABRAL J. J. da S. S. e DEMÉTRIO, J. G. (1997). Aplicação de Modelos em Hidrogeologia. In: FEITOSA, F. e MANOEL FILHO, J. 1997 (org). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicação**. Fortaleza. CPRM, LABHID-UFPE. p 367-388.

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos (2008). Resolução nº. 92. **Estabelece critérios e procedimentos gerais para proteção e conservação das águas subterrâneas no território brasileiro**. Brasília: MMA

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos. (2001). Resolução nº. 16. **Estabelece critérios gerais para a outorga de direito de uso dos recursos hídricos**. Brasília: MMA.

COSTA, C.T. e CASTRO, M.A.H.(2007). **Uma Metodologia Numérico-Analítica Aplicada a Problemas Transparentes de Transporte de Contaminante**. In: Revista Brasileira de Recursos Hídricos.V.12,n.4,p.183-197, Julho. 2007.

COSTA, W. D.; ALBUQUERQUE, J. do P. T. de; BRANCO, R. L. de C.; MARANHÃO, C. M. L.; GOLDFABER, M. (2007). **Estudo de caracterização e verificação da disponibilidade hídrica da vertente litorânea do estado da Paraíba**. Estudos Hidrogeológicos. Relatório Final. Tomo I – Texto. Ministério da Integração Nacional.

COSTA (2009). **Estabelecimento de Critérios de Outorga de Direito de Uso para Águas Subterrâneas**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba-PB.

CUSTODIO, E. LLAMAS, M. R. (1976). **Hidrologia Subterrânea**. 2ª. Edição. Editora Omega, S. A. Barcelona

DOHERTY, J.; BREBBER, L. e WHITE, P. (1994). **PEST – Model Independent Parameter Estimation**. User's Manual. Watermark Computing. Austrália.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. ; FEITOSA, C.E.; DEMETRIO,J.G.A.(2008). **Hidrogeologia: Conceitos e aplicações**. CPRM, LABHID-UFPE, 2008, 812p.

FREIRE, C. C. (2002). **Modelo de Gestão para a água subterrânea. Porto Alegre. UFRGS**. Programa de Pós- Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento

Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado em Engenharia.

FROUKH, L. J., (2002). **Groundwater Modelling in Aquifers with highly Karstic and Heterogeneous Characteristics (KHC) in Palestine.** in: Water Resources Management, v.16, pp.369–379, 2002.

HRISSANTHOU, V., MYLOPOULOS N., TOLIKAS D., MYLOPOULOS Y. (2003). **Simulation Modeling of Runoff, Groundwater Flow and Sediment Transport into Kastoria Lake, Greece.** In: Water Resources Management, vol 17, pp.223–242.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2005). Disponível em: <[www.ibge.gov.br/home /estatistica/economia/pibmunicipios/2005/tab01.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pibmunicipios/2005/tab01.pdf)>. Acesso em: Maio. 2009.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2009). Disponível on-line em <[www.ibge.gov.br/home /estatistica/economia/pibmunicipios/2005/tab01.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pibmunicipios/2005/tab01.pdf)>. Acesso: Junho. 2009.

KUNZLER, J.C.S. (2007). **Estimativa da Recarga da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe através da Modelagem Matemática do Fluxo Subterrâneo.** Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba-PB.

LOUSADA, E. O. e CAMPOS, J. E. G. (2005). **Proposta de Modelos Hidrogeológicos Conceituais Aplicados aos Aquíferos da Região do Distrito Federal.** in: revista brasileira de geociências. v.35,n.3.407-414, setembro de 2005.

LUCENA, S.C.B. (2007). **Estimativa da Recarga para Gestão de Águas Superficiais e Subterrâneas: Aplicação em um área urbana Costeira.** Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, Paraíba –PB.

McDONALD, M. G. e HARBAUGH, A. W. (1988). **A Modular three-Dimensional Finite-Diference Ground-Water Flow Model**. U. S. Geological Survey, Open-file report 83-875, Chapter A1.

MUEHE, D. (2006). **O Litoral Brasileiro e Sua Compartimentação**. In: CUNHA, S.B. e GUERRA(org). Geomorfologia do Brasil. 4ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 392p.

NASA (2000). **National Aeronautics and Space Administration**. Disponível em: <https://wist.echo.nasa.gov/api>. Acesso em: Novembro. 2009.

NOBRE, M.M.M. e NOBRE, R.C.M. (2001). **Caracterização Hidrogeológica para o Uso Racional e Proteção dos Mananciais Subterrâneos em maceió – AL**. In: Revista Brasileira de Recursos Hídricos.v.6,n.1,p.7-20. Março. 2001.

OLIVEIRA, J.N.(2002). **Ferramenta de Gestão de Águas Subterrâneas para a Cidade de São José do Rio Preto**. Tese de doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos.

PAIVA, Anderson Luiz R. de; CABRAL, Jaime Joaquim da S. P.; DEMETRIO, José Geilson A. (2004). **Modelagem do Fluxo Subterrâneo em Aquífero Estratificado na Região Central de Recife**. In: VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. São Luis: ABRH

PARÁIBA (1996). **Lei Estadual nº. 6.308 de 02 de julho de 1996**. Institui a Política Estadual de Recursos Hídricos, suas diretrizes e dá outras providências. Disponível em: <www.aesa.pb.gov.br/legislacao/leis/estadual/politica_estadual_recursos_hidricos.pdf>. Acesso em: Dezembro. 2009.

PARÁIBA (1997). **Decreto Estadual nº. 19.260, de 31 de outubro de 1997**. Regulamenta a outorga do direito de uso dos recursos hídricos e dá outras providências. Disponível em <www.aesa.pb.gov.br/legislacao/decretos/estadual/19260_97_outorga_agua.pdf>. Acesso em: Dezembro. 2009.

PARAÍBA (2007). **Lei Estadual nº. 8.446, de 28 de dezembro de 2007**. Dá nova redação e acrescenta dispositivos à Lei nº. 6.308, de 02 de julho de 1996, que institui a Política Estadual de Recursos Hídricos, e determina outras providências. Disponível em <www.aesa.pb.gov.br/legislacao/leis/estadual/Lei_Estadual_8.446.pdf>. Acesso em: Dezembro. 2009.

PMJP (2009). PREFEITURA DE JOÃO PESSOA. Marcos Geodésicos da Cidade de João Pessoa. Disponível em:< http://www.joaopessoa.pb.gov.br/secretarias/seplan/direedivi/dire_geo_cad_urba/. Acesso em maio de 2009.

PNUD (2000) – **Programa das Nações Unidas**. Disponível em: <http://www.pnud.org.br/home/>. Acesso em: Outubro. 2009.

PROJETO ASUB (2009). **Integração dos instrumentos de outorga, enquadramento e cobrança para a Gestão das águas Subterrâneas**. Relatório Técnico Parcial nº 1. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande - PB.

QAHMAN, K., LARABI, A. (2006). **Evaluation and numerical modeling of seawater intrusion in the Gaza aquifer (Palestine)** in: Hydrogeology Journal, v.14, p. 713–728.

REGO, J. C. e ALBUQUERQUE, J. do P. T. (2004). **Hidrogeologia Aplicada**. Campina Grande: UFCG/UNESCO.155p. Riverside Technology Inc.

ROSEN, L. e LEGRAN, H.E. (2000). **Systematic makings of early stage hydrogeologic conceptual models**. Groundwater 38, v.6:887-893. Disponível em <<http://www3.interscience.wiley.com/journal/119034527/abstract?CRETRY=1&SRETRY=0>>. Acesso em: Julho. 2009.

SOUZA, C. D.; LEAL JUNIOR, C. R. M. & CASTRO, M. A. H.(2008). **Simulação computacional do fluxo hídrico subterrâneo na região do cariri cearense e estimativa de parâmetros a partir dos dados de cargas hidráulicas observadas**. In: XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Natal: ABAS

UACA – Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande. (2009). **Informações climatológicas**. Disponível em <www.dca.ufcg.edu.br/tsm.htm>. Acesso: Dezembro. 2009.

UFCG/UFAL/UFSM (2007). **Chamada Pública MCT/FINEP/CT-HIDRO – IGRH 01/2007**. ASUB – Integração dos Instrumentos de outorga, cobrança e enquadramento para a gestão das águas subterrâneas.

VARNI, R. M., USUNOFF E. J., (1999). **Simulation of regional-scale groundwater flow in the Azul River basin, Buenos Aires Province, Argentina**. In: Water Resources Management. Water Resources Management. v.7, p. 180–187.

VIEIRA, Z. M. DE C. L.; RIBEIRO, M. M. R. (2007). **A gestão de recursos hídricos no Estado da Paraíba: aspectos legais e institucionais**. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007, São Paulo.

Anexo I – Poços Outorgados pela AESA na Área de Estudo (2009)

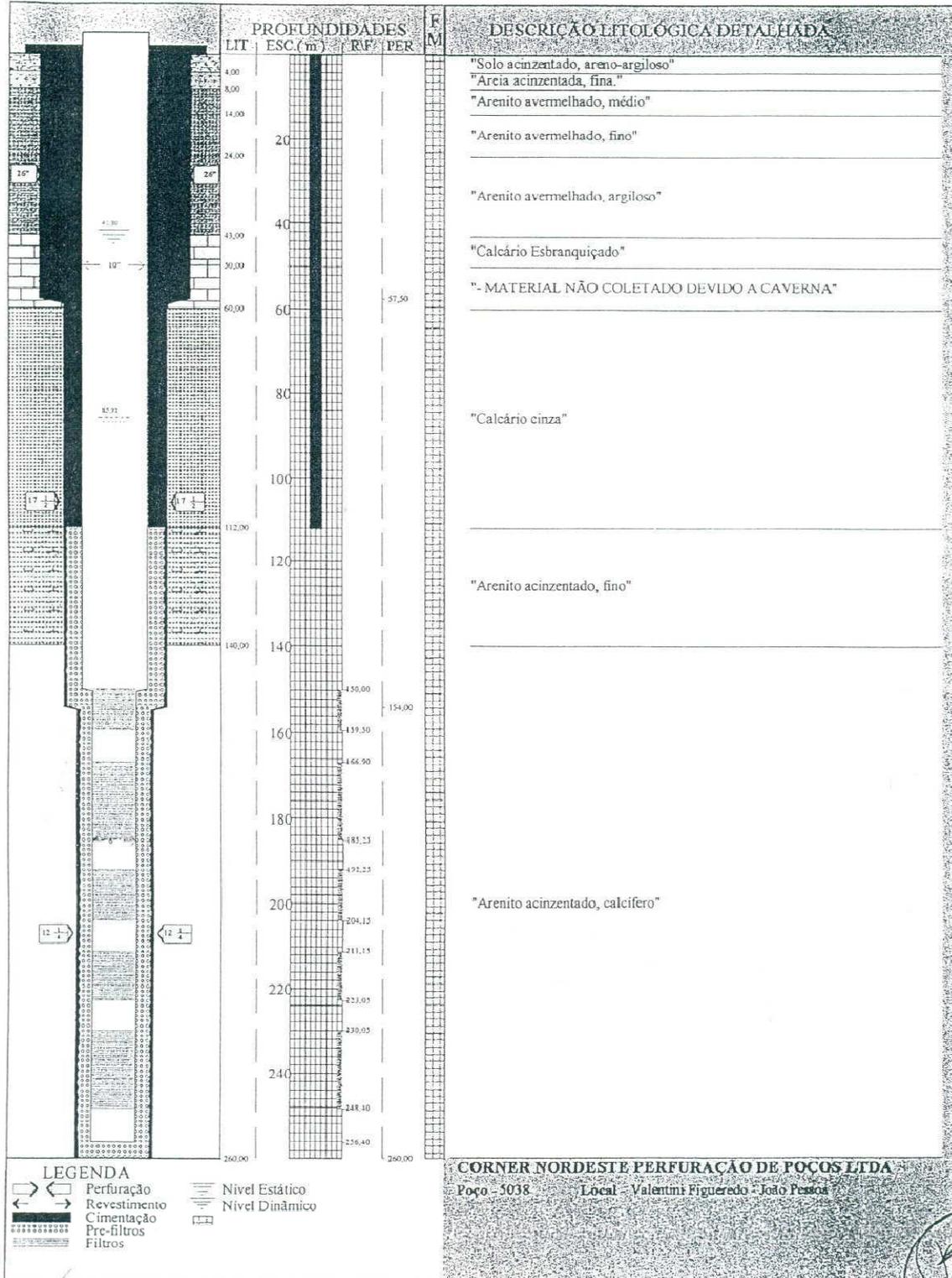
Num.	Proprietário	Bacia Rio Paraíba	Município	Tipo de uso	Vazão (m³/h)	Longitude	Latitude	Localidade	Situação
1	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba-CAGEPA	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	50	296362	9203684	Valentina	Ativado
2	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba-CAGEPA	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	60	296729	9203993	Valentina	Ativado
3	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba-CAGEPA	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	90	291845	9205386	Valentina	Ativado
4	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba-CAGEPA	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	27	296732	9205464	Mangabeira	Desativado
5	Icaro Anderson de Queiroz Cavalcante	Baixo Curso	João Pessoa	Comercial	1.5	296416	9205620	Mangabeira	-----
6	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba-CAGEPA	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	60	292056	9206217	Mangabeira	Desativado
7	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba-CAGEPA	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	35	289410	9206313	Funcionários	Desativado
8	Cerâmica Elizabeth Ltda.	Baixo Curso	João Pessoa	Industrial	10	289545	9206384	Funcionários	-----
9	INTRAFRUT- Indústria Transformadora de Frutos S/A	Baixo Curso	João Pessoa	Industrial	4	289581	9206501	Bairro das Indústria	-----
10	INTRAFRUT- Indústria Transformadora de Frutos S/A	Baixo Curso	João Pessoa	Industrial	4	290029	9206515	Bairro das Indústria	-----
11	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba-CAGEPA	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	66	290428	9206582	Bairro das Indústria	Ativado
12	Arlindo Fonseca Lins Cia Ltda.	Baixo Curso	João Pessoa	Comercial	2	289344	9206725	Bairro das Indústria	-----
13	Elizabeth Revestimentos Ltda - Filial	Baixo Curso	João Pessoa	Industrial	11.5	296657	9206788	Bairro das Indústria	-----
14	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba-CAGEPA	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	160	297669	9206823	Mangabeira	Desativado

15	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba-CAGEPA	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	210	297669	9206823	Mangabeira	Desativado
16	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba-CAGEPA	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	34.56	292329	9207001	Mangabeira	Desativado
17	Xerium Technologies Brasil - Ind. e Com. S/A	Baixo Curso	João Pessoa	Industrial	6.3	293621	9207006	João Paulo II	-----
18	Auto Posto Ronaldão Ltda	Baixo Curso	João Pessoa	Comercial	3	292338	9207066	Cristor Redentor	-----
19	Xerium Technologies Brasil - Ind. e Com. S/A	Baixo Curso	João Pessoa	Industrial	9	290855	9207318	João Paulo II	-----
20	Makro Atacadista S/A	Baixo Curso	João Pessoa	Comercial	5.5	301441	9207422	Ernani Sátiro	-----
21	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba-CAGEPA	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	80	298507	9207551	Penha	Ativado
22	Indústria de Poupa de Frutas Ideal Ltda	Baixo Curso	João Pessoa	Industrial	3.2	297666	9207560	Anatólia	-----
23	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba-CAGEPA	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	50.8	294645	9208058	Anatólia	Desativado
24	LIMP FORT- Engenharia Ambiental Ltda	Baixo Curso	João Pessoa	Comercial	1.5	292997	9208678	Anatólia	-----
25	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba-CAGEPA	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	110	299276	9208704	Cristor Redentor	Ativado
26	Ecomax Empreendimentos Imobiliários Ltda.	Baixo Curso	João Pessoa	Irrigação	20	290072	9208722	Oitizeiro	-----
27	Posto de Serviços e Abastecimentos de Veículos - Postos São Mateus	Baixo Curso	João Pessoa	Comercial	1.5	295463	9209054	Oitizeiro	-----
28	Condomínio Residencial Amanda	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	4	296156	9209091	Água Fria	-----
29	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba-CAGEPA	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	29.4	292995	9209170	Água Fria	Desativado
30	Silvano Lourenço dos Santos - ME	Baixo Curso	João Pessoa	Comercial	6.66	301240	9209292	Cristor Redentor	-----
31	Max Frederick Geomoglio Macêdo	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	1	297137	9209371	Portal do Sol	-----

32	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba-CAGEPA	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	150	300107	9209592	Portal do Sol	Ativado
33	Vertical Engenharia e Incorporações Ltda	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	6	300693	9209683	Portal do Sol	-----
34	JHALM -Hotelaria e Turismo Ltda (Bargão)	Baixo Curso	João Pessoa	Comercial	4.8	296062	9209742	Cabo Branco	-----
35	Luiza Valdira Franca da Costa Araújo	Baixo Curso	João Pessoa	Comercial	0.6	290982	9210013	Cabo Branco	-----
36	CCB - Cimpor Cimentos do Brasil Ltda	Baixo Curso	João Pessoa	Industrial	5	291790	9210419	Cruz das Armas	-----
37	Condomnio Residencial Anísio Silva Albuquerque	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	3	294585	9210651	Cruz das Armas	-----
38	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba-CAGEPA	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	144	294585	9210651	Mata do Buraquinho	Ativado
39	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba-CAGEPA	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	170	298697	9210787	Mata do Buraquinho	Ativado
40	Pegmatech - Especialidades Tecnológicas LTDA	Baixo Curso	João Pessoa	Industrial	3	298143	9211034	Cabo Branco	-----
41	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba-CAGEPA	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	55	294909	9211740	Altiplano Cabo Branco	Ativado
42	Condomínio do Edifício Residencial Expedicionários III	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	4	296390	9211949	Torre	-----
43	Paulo de Oliveira Fernandes	Baixo Curso	João Pessoa	Lazer	3	295873	9211982	Expedicionários	-----
44	Condomínio Residencial Quatro Estações	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	10	291633	9212083	Bairro dos Estados	-----
45	Serviço Social da Indústria - SESI	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	1.85	294332	9212432	Trincheiras	-----
46	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba-CAGEPA	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	116	294638	9212618	Torre	Ativado
47	Condomínio Centro Empresarial Eptácio Pessoa	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	4	294672	9212685	Torre	-----
48	Condomínio do Edifício Expedito Sarmento	Baixo Curso	João Pessoa	Comercial	4	297912	9212794	Torre	-----

49	Condomínio Residencial Maison Tambaú	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	5	297368	9213059	Tambaú	-----
50	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba-CAGEPA	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	160	296815	9213149	Tambaú	Desativado
51	Condomínio RESIDENCIAL PAGANINI	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	3	296938	9213211	Manaíra	-----
52	Condomínio Residencial Vila Lobos	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	3	298483	9213552	Brisamar	-----
53	Algarves Hotel LTDA	Baixo Curso	João Pessoa	Comercial	0.5	297401	9214091	Tambaú	-----
54	Lava Jato Brasil (Vergniaud Belmont de B. Sabino)	Baixo Curso	João Pessoa	Comercial	1.5	293801	9214857	Tambaú	-----
55	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba-CAGEPA	Baixo Curso	João Pessoa	Abastecimento Urbano	28.3	295903	9214896	Alto do Céu	Desativado
56	PORTAL ADMINISTRADORA DE BENS LTDA	Baixo Curso	João Pessoa	Comercial	32	296206	9214984	João Agripino	-----
57	Condomínio Manaíra	Baixo Curso	João Pessoa	Comercial	17	295419	9216861	João Agripino	-----
58	Supermix Concreto S/A	Baixo Curso	Cabedelo	Industrial	10	297700	9216922	João Agripino	-----
59	LSC Bar e Restaurante Ltda	Baixo Curso	João Pessoa	Comercial	3	296689	9224129	Jardim Oceania	-----
60	TECOP - Terminal de Combustíveis da Paraíba Ltda.	Baixo Curso	Cabedelo	Industrial	50	297378	9227603	Cabedelo	-----
61	J. Macedo S/A	Baixo Curso	Cabedelo	Industrial	60	297060	9228942	Cabedelo	-----
62	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba-CAGEPA	Baixo Curso	Cabedelo	Abastecimento Urbano	170	296416	9205620	Cabedelo	Desativado

Anexo II – Perfil Lito-Estratigráfico do Poço Valentina Figueiredo – Proprietário CAGEPA



Anexo III – Dados de Poços utilizados para obtenção do Mapa Geológico e para medição dos Níveis estáticos

Poço	Localidade	Proprietário	COTA	Longitude	Latitude	Vazão (m³/d)	PROF. DO NE 2007 (m)	Carga Hidráulica (m)(2007)	PROF. NE(m) 1ª Visita	Carga Hidráulica (m) Julho 2009	PROF. NE(m) 2ª Visita	Carga Hidráulica (m) Outubro 2009	SITUAÇÃO ATUAL DO POÇO
1	ALTIPLANO CABO BRANCO	CAGEPA	44	298220	9211096	1320	32,70	11,30		-	-	-	EM OPERAÇÃO NA VISITA
2	ALTO DO MATEUS (R 17)	CAGEPA	60	288357	9210987	2073	44,50	15,50	62,36	-2,36	-	-	EM OPERAÇÃO/MEDIDO
3	ALTO MATEUS (R 15)	CAGEPA	49	288777	9211374	600	46,05	2,95		-	-	-	EM OPERAÇÃO NA VISITA
4	ANATÓLIA	CAGEPA	23	296322	9209110	984	28,93	-5,93	30,22	-7,22	32,08	-9,08	DESATIVADO/MEDIDO
5	BETEL	CAGEPA	47	289137	9209704	-	-	-		-	-	-	EM OPERAÇÃO
6	CAMALAU	CAGEPA	3	297856	9227368	-	-	-	1,91	1,09	2,24	0,76	DESATIVADO/SEM MEDIR
7	CASTELO BRANCO	CAGEPA	30	295960	9211154	3168	-	-	-	-	47,77	-17,77	DESATIVADO/S FUNCIONÁRIO
8	CONJ, BANCÁRIOS II	CAGEPA	40	297238	9209409	4320	57,56	-17,56	-	-	-	-	OBSTRUÍDO
9	CONJ, J, VIEIRA DINIZ	CAGEPA	61	288926	9206557	1680	24,60	36,40	-	-	-	-	OBSTRUÍDO
10	CONJ, JOSÉ AMÉRICO	CAGEPA	46	294690	9207656	3600	34,20	11,80	44,92	1,08	44,13	-1,87	MEDIDO
11	CRISTO REDENTOR	CAGEPA	63	293029	9208725	1320	41,50	21,50	7,00	56,00	-	-	MEDIDO
12	CRUZ DAS ARMAS	CAGEPA	49	291365	9210448	1555,2	46,09	3,09	47,61	1,57	-	-	MEDIDO
13	FUNCIONÁRIOS II	CAGEPA	54	291204	9206186	840	44,60	9,40	xxx	-	18,23	35,77	DESATIVADO
14	FUNCIONÁRIOS II (GROTÃO R 27)	CAGEPA	54	292058	9205428	600	39,60	14,13	41,15	12,58	41,98	11,75	DESATIVADO/MEDIDO
15	GRAMAME/ENGENHO VELHO	CAGEPA	52	291731	9203496	-	43,50	-	-	-	-	-	OBSTRUÍDO
16	MANGABEIRA II	CAGEPA	50	296719	9206868	1440	-	-	43,46	6,54	45,65	4,35	DESATIVADO/MEDIDO
17	MANGABEIRA VII	CAGEPA	42	298085	9206922	960	21,00	21,00	44,75	-2,75	43,85	-1,85	DESATIVADO/MEDIDO
18	MARÉS	CAGEPA	18	289058	9208946	3110,4	20,00	-2,00	35,04	-17,04	-	-	EM OPERAÇÃO/MEDIDO
19	MATA DE BURAQUINHO	CAGEPA	8	294463	9210820	-	4,50	3,50	-	-	-	-	NÃO PODE PARAR
20	P, EXPOSIÇÃO DE ANIMAIS	CAGEPA	46	292605	9207218	-	17,34	28,66	18,96	27,04	19,65	26,35	MEDIDO PROB. NA BOMBA
21	PAVILHÃO DO CHÁ	CAGEPA	50	291749	9212337	-	51,74	-1,74	-	-	-	-	DESATIVADO
22	PRAIA DA PENHA II	CAGEPA	26	301288	9207560	960	25,14	0,86	-	-	-	-	NÃO PODE PARAR
23	PRAIA DO POÇO (Mirinha)	CAGEPA	2	297501	9223536	-	-	-	4,08	-2,08	4,23	1,20	DESATIVADO/MEDIDO
24	SEDE	CAGEPA	6	297595	9229030	-	0,30	5,70	0,50	5,50	0,8	5,20	DESATIVADO/MEDIDO
25	SEDE II	CAGEPA	2	297813	9229144	-	0,25	1,75	0,44	1,56	0,77	1,23	DESATIVADO/MEDIDO
26	TAMBAÚ	CAGEPA	31	297429	9213196	-	-	-	38,87	-7,87	40,89	-9,89	DESATIVADO
27	TAMBAÚ	CAGEPA	31	297439	9213198	-	-	-	38,70	-7,70	41,09	-10,09	DESATIVADO
28	TORRE	CAGEPA	45	294364	9212479	2784	48,37	-3,37	51,17	-6,17	-	-	EM OPERAÇÃO/MEDIDO
29	VALENTINA FIGUEIREDO (P1)	CAGEPA	57	296410	9203782	2246,4	41,80	15,20	XXX	-	-	-	DESATIVADO/MEDIDO
30	VALENTINA FIGUEIREDO (P2)	CAGEPA	40	296634	9202832	1440	31,60	8,40	33,27	6,73	-	-	DESATIVADO/MEDIDO
31	VALENTINA FIGUEIREDO (P3)	CAGEPA	43	296803	9204122	1200	30,60	12,40	41,49	1,51	-	-	EM OPERAÇÃO/MEDIDO
32	FAVELA BOA ESPERANÇA	GOVERNO DO ESTADO		291222	9207796	-	-	-	-	-	-	-	-

33	HOTEL IGATU	MARIA CARMÉSIA M, LEITE	2	298632	9211820	-	-	-	-	-	-	-	-
34	ALTIPLANO CABO BRANCO III	ODILON RIBEIRO COUTINHO	45	298106	9212924	-	-	-	-	-	-	-	-
35	MERCADO CENTRAL	PREFEITUA DE JOÃO Pessoa	52	292432	9212010	-	-	-	-	-	-	-	-
36	SEINFRA	PREFEITURA DE JOÃO PESSOA	35	294332	9212755	-	-	-	-	-	-	-	-
37	BAIRRO DAS INDÚSTRIAS	SERTEC	52	286783	9205289	-	-	-	-	-	-	-	-
38	MANGABEIRA II	SUPLAN-DETRAN	35	298343	9207333	-	-	-	-	-	-	-	-
39	HOSPITAL UNIMED	UNIMED	34	294918	9211473	-	-	-	-	-	-	-	-
40	HOSPITAL UNIVERSITÁRIO	UNIV, FEDERAL DA PARAÍBA	38	296765	9210737	-	-	-	-	-	-	-	-
41	PRAIA DO SOL/LOT, SOLIMARES	WBS- ADM. E CONSTR. LTDA	37	299408	9201991	-	-	-	-	-	-	-	-
42	CABO BRANCO	PARTICULAR	10	298055	9211072	-	-	-	-	-	-	-	-
43	COLONIA JULIANO MOREIRA	PARTICULAR	63	293462	9211501	-	-	-	-	-	-	-	-
44	CONJUNTO PARATIBE	PARTICULAR	71	292040	9212000	-	-	-	-	-	-	-	-
45	CRUZ DAS ARMAS	PARTICULAR	68	291304	9210377	-	-	-	-	-	-	-	-
46	D. I. JOAO PESSOA	PARTICULAR	46	289785	9205596	-	-	-	-	-	-	-	-
47	ESPACO CULTURAL	PARTICULAR	50	296532	9212378	-	-	-	-	-	-	-	-
48	FABRICA TOALIA	PARTICULAR	52	288976	9202835	-	-	-	-	-	-	-	-
49	FABRICA TOALIA	PARTICULAR	52	289128	9203735	-	-	-	-	-	-	-	-
50	HOSPITAL GEN. EDSON RAMALHO	PARTICULAR	7	293712	9212896	-	-	-	-	-	-	-	-
51	HOTEL XÊNIOUS	PARTICULAR	2	298593	9212548	-	-	-	-	-	-	-	-
52	INOCOP	PARTICULAR	70	291980	9212000	-	-	-	-	-	-	-	-
53	INSTITUTO DE R. DO MENOR	PARTICULAR	36	297810	9208148	-	-	-	-	-	-	-	-
54	RESINOR	PARTICULAR	62	292100	9212200	-	-	-	-	-	-	-	-

(1) Poços de número 01 ao 31, foram utilizados para a atualização do mapa geológico e para medidas de níveis estáticos.

(2) Poços de número 32 ao 54, foram utilizados para a atualização do mapa geológico.

Anexo IV – Poços com vazões de bombeamento utilizadas na calibração do Armazenamento específico

Poço	Localidade	Proprietário	Longitude	Latitude	Vazões (m³/d)	Vazões (m³/h)
1	ALTIPLANO CABO BRANCO	CAGEPA	298220	9211096	1320,00	55,00
2	CONJ, JOSÉ AMÉRICO	CAGEPA	294690	9207656	3600,00	150,00
3	CRISTO REDENTOR	CAGEPA	293029	9208725	1320,00	55,00
4	CRUZ DAS ARMAS	CAGEPA	291365	9210448	2000,00	83,33
5	MATA DE BURAQUINHO	CAGEPA	294463	9210820	3000,00	125,00
6	PRAIA DA PENHA II	CAGEPA	301288	9207560	960,00	40,00
7	TORRE	CAGEPA	294364	9212479	2750,00	114,58
8	VALENTINA FIGUEIREDO (P1)	CAGEPA	296410	9203782	250,00	10,42
9	VALENTINA FIGUEIREDO (P2)	CAGEPA	296634	9202832	250,00	10,42
10	VALENTINA FIGUEIREDO (P3)	CAGEPA	296803	9204122	250,00	10,42
11		CAGEPA	296447	9205664	1000,00	41,67
12		CAGEPA	291875	9205430	2000,00	83,33
13		CAGEPA	290060	9206559	2000,00	83,33
14		Particular	296763	9205308	1000,00	41,67
15		Particular	298538	9207595	1000,00	41,67
16		Particular	292360	9207045	1000,00	41,67
17		Particular	290459	9206625	2000,00	83,33
18		Particular	290895	9212523	2000,00	83,33
19		Particular	291013	9210057	2000,00	83,33
20		Particular	291821	9210462	2000,00	83,33
21		Particular	290886	9207362	2000,00	83,33
22		Particular	288707	9207201	2000,00	83,33
23		Particular	200103	9208766	2000,00	83,33
24		Particular	291664	9212127	2000,00	83,33
25		Particular	292369	9207110	1000,00	41,67
26		Particular	294977	9206757	3000,00	125,00
27		Particular	295555	9206662	3000,00	125,00
28		Particular	296253	9206567	3000,00	125,00