



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE *CAMPUS* FORTALEZA
MESTRADO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL

JUAN MOREIRA DE AZEVEDO

CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA DOS AQUÍFEROS POROSOS NO
CAMPO DE DUNAS ENTRE AS PRAIAS DE PECÉM E TAÍBA, CE

FORTALEZA
2020

JUAN MOREIRA DE AZEVEDO

CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA DOS AQUÍFEROS POROSOS NO CAMPO DE
DUNAS ENTRE AS PRAIAS DE PECÉM E TAÍBA, CE.

Dissertação de Mestrado apresentado ao curso de Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre. Área de concentração: Hidrologia.

Orientador: Prof. Dr. Mariano da Franca de Alencar Neto.

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na
Publicação Instituto Federal do
Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A994c Azevedo, Juan Moreira de.
 Caracterização Hidrodinâmica dos aquíferos porosos no campo de dunas entre as praias do
 Pecém e Taíba, CE / Juan Moreira de Azevedo. - 2020.
 106 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Tecnologia e Gestão
 Ambiental, Campus Fortaleza, 2020.
 Orientação: Prof. Dr. Mariano da Franca de Alencar Neto.
1. Hidrogeologia. 2. Modelagem. 3. Modflow. 4. Gestão. . I. Título.

CDD 628



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
Av. 13 de maio, 2081, - Bairro Benfica - CEP 60040-531 - Fortaleza - CE - www.ifce.edu.br

AVALIAÇÃO

Processo: 23256.006067/2020-11

Interessado: Coordenadoria do Curso de Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental
(PGTGA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

JUAN MOREIRA DE AZEVEDO

CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA DOS AQUÍFEROS POROSOS NO CAMPO DE DUNAS ENTRE AS PRAIAS DE PECÉM E TAÍBA, CE

*Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em
Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - Campus
Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de
Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de
concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.*

Aprovada em: 29/05/2020



Documento assinado eletronicamente por **Enéas Oliveira Lousada, Usuário Externo**, em 01/06/2020, às 20:25, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marco Aurélio Holanda de Castro, Usuário Externo**, em 02/06/2020, às 15:15, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mariano da Franca Alencar Neto, Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 08/06/2020, às 09:18, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade do documento pode ser conferida no site https://sei.ifce.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 informando o código verificador **1708369** e o código CRC **3D620873**.

A Deus.

A Guida.

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Reservo-me nessas breves estrofes, o direito de falar um pouco dessa caminhada, que jamais teria sido tão bela, tão viva e tão bem realizada se não fosse por tudo e todos que passaram e permanecem comigo. Ao bom Deus, em seu infinito amor, meu muito obrigado. Meus pais, Paulo e Waldirene, pela educação, carinho, persistência, força e palavras de ânimo, como é bom poder lhes oferecer, de todo coração, essa “pequena/grande” conquista. À Margarida, “Guida”, como é bom estar com você, esses últimos nove anos da minha vida, como eu aprendi com você, flor, é bom olhar de lado e ver contigo minha paz, guia, futuro, parafraseando um famoso cientista: “Diante da vastidão do tempo e da imensidão do universo, é um imenso prazer para mim dividir um planeta e uma época com você”. Minha avó, Dalva, como eu te amo. Agradeço de forma carinhosa à família, que encontro aqui nas pessoas do meu irmão Pedro Paulo e nos primos, Tauan Azevedo e Vitor Saulo. Aos amigos, Anderson Sindeaux, Pedro Marques, Guilherme Filgueiras, Inácio Neto, Irabson Mota, Éneas, Alexandre, Daniel Chagas, Joel Pedrosa, Marcos Pinho, Felipe Holanda, Roberto Felismino, Ronaldo, Vinicius, Willhem, Alex, Malu, Mabel Sthefanie, Julianna, Karinny e meu nefrologista Dr. Paulo César de Mesquita, meu muito obrigado. Aqueles que por emoção ou descuido, neste grupo não esteja, mas que participaram disso, meu verdadeiro sentimento de gratidão. Agradeço à COGERH, inicialmente pelos dados que me foram prontamente servidos, em especial, devo muito à minha amiga Zulene Almada, sempre muito querida, me depositou confiança, tenho sorte de ter sido seu funcionário. Fica aqui meu agradecimento especial ao presidente João Lúcio e o ao Secretário de Recursos Hídricos, Francisco Teixeira. Nesta companhia, agradeço a Valéria, ao Manu, Elano Joca, Bruno Rebouças, Marcos, Glauter, Micaella, Lorena e o queridíssimo Davi Martins. Ao Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Ceará, meu muito obrigado! Aos colegas de turma, Ismael, Nirlania, Guilherme, Zillene, Karol, Xerez, Mayara, Veruska, Jéssica(s), Rovênia e Eugênia, perdoem se esqueci alguém, vocês são pessoas incríveis, queridos. Todo corpo docente do PGTGA, no nome dos professores(as) Waleska Elói, Maurício, Adeildo, Sérgio, Gemelle e Nádjila. Todos com algum significado na minha caminhada, contudo, de singular importância, sou eternamente grato ao professor Mariano por todos seus ensinamentos.

RESUMO

A região litorânea oeste da capital, Fortaleza, onde localiza-se o Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), hoje recebe valorosa contribuição de poços tubulares, construídos e administrados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH), chegando a oferecer em torno de 300 L/s para o abastecimento de uma termoeletrica e uma siderurgica. Foram caracterizadas as formas de recarga, fluxo e outros aspectos envolvidos na hidrodinâmica desses mananciais subterrâneos, para isso, um modelo de fluxo de diferença finita (Modflow) foi utilizado. A interpretação de dados pretéritos através de um tratamento diferencial proporcionou a criação de um modelo conceitual de três camadas aquíferas, sendo elas: Dunas, Paleodunas e Barreiras, dispostas lateralmente e com interconexão vertical e horizontal, conforme conceitos da estratigrafia de sequências, em oposição ao tradicional modelo “Cake layer”. O aquífero Dunas se mostrou o principal meio de recarga assim como duas estruturas se mostraram indispensáveis na calibração: A presença de um paleocanal na Barra do Guaribas e a Lagoa do Gereraú, esta última funcionando como bacia de estabilização natural de cheias. O fluxo subterrâneo alimenta os principais rios da área e oceano Atlântico. O cálculo das reservas indicou um volume de aproximadamente, 80 milhões de m³/ano, para a renovável. A pesquisa evidenciou, portanto, cenários fundamentais para a manutenção das condições ambientais sustentáveis dos aquífero locais.

Palavras-chave: Hidrogeologia. Modelagem. Modflow. Gestão.

ABSTRACT

In the west coastal region of the capital, Fortaleza, where Pecém Industrial and Port Complex (CIPP) is stated/located, today obtains valuable contribution of tube wells, built and managed by Ceará Water Resources Management Company (COGERH), providing around 300 L/s to the water supply of a thermoelectric plant and a large sized steel mill. Concepts which allow to improve characterization of recharging waterground supply, flood and other aspects involved in hydrodynamics of basement flow were addressed; in order to do so, a finite difference flow mathematical model (ModFlow) was employed/used. Past data interpretation through differential processing provided the design of a conceptual model in three aquifer layers, which are Dunas, Paleodunas and Barreiras, laterally disposed and presenting vertical and horizontal interconnexion, according to concepts of sequenced stratigraphy, in contrast to “Cake Layer” traditional modelling. Dunas aquifer has proven to be the main recharge mean as did two other structures who showed to be paramount to calibration: the presence of a paleochannel in Guaribas’s Barra and Gereraú Lake, the last one working as a natural stabilization basin flood. Waterground flow feeds the main rivers around, besides the Atlantic Ocean. Estimate supply showed around 80 million m³/year amount due to renewable waterground resources. The research highlighted, therefore, key scenarios to sustainable local aquifers preservation.

Keywords: Hydrogeology. Modeling. Modflow. Management.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esboço da coluna de solo usado por Darcy	19
Figura 2 – Domínios hidrogeológicos do Estado do Ceará.....	22
Figura 3 - Mapa potenciométrico em aquífero dunar.....	24
Figura 4 - Representação esquemática do ciclo hidrológico.....	27
Figura 5- Relações rio-aquífero.....	28
Figura 6 - Relações rebaixamento/estabilização em aquífero testado.....	30
Figura 7 - Representação esquemática da simplificação de um modelo	31
Figura 8 - Etapas envolvidas na modelagem.....	32
Figura 9 - Exemplo de malha nodal centralizada no bloco para simulação numérica de rede de fluxo adotada em Diferenças Finitas (MODFLOW)	33
Figura 10 - Exemplo de relação aquífero/rio, condição do 1º tipo.....	35
Figura 11 - Esquema da relação de fluxo nulo, condição do tipo 2	35
Figura 12 - Esquema de condição do tipo 3	36
Figura 13 - Localização da área de estudo	41
Figura 14 - Contexto litológico da área de estudo.....	44
Figura 15 - Modelo digital de elevação extraído de carta ortofoto retificada.	45
Figura 16 - Distribuição espacial dos poços monitorados pela COGERH.....	49
Figura 17 - Leitura dos níveis piezométricos dos poços na bateria do CIPP	51
Figura 18 - Malha regular gerada no programa ModelMuse e o contorno da área ativa.	56
Figura 19 - Mapa de uso e ocupação da área de estudo	58
Figura 20 – Monitoramento temporal da lâmina d'água na Lagoa do Gereraú	61
Figura 21 - Modelo digital de elevação, sotoposto por a camada dunas e poços construído	72
Figura 22 - Camadas geológicas sobrepostas em bloco diagrama	73
Figura 23 - Modelo tridimensional dos aquíferos sedimentares na região.....	74
Figura 24 - Representação em corte do modelo conceitual geológico de hipótese simplificadora e adaptação para modelo conceitual numérico de blocos	75
Figura 25 - Comparativo entre o modelo observado e o simulado através da morfologia dos mapas potenciométricos	80
Figura 26 – Entradas em m ³ /s no modelo.....	84
Figura 27 – Saídas em m ³ /s no modelo	85
Figura 28 – Perfis de cargas hidráulicas no modelo simulado	86
Figura 29 - Hidrodinâmica dos aquíferos simulados.....	88
Figura 30 - Estágios teóricos de lagoas reguladoras em aquífero livre	90
Figura 31 – Modelo simulado para recargas em regime de baixas precipitações.	90
Figura 32 - Superfície topo do cristalino e depressão morfométrica na Barra do Guaribas.....	91
Figura 33 - Esquema conceitual da deposição do Paleocanal Barra do Guaribas	93
Figura 34 – Destaque em cortes da camada Paleocanal como inomogeneidade do aquífero em função da alta condutividade hidráulica.....	96
Figura 35 – Cargas hidráulicas observadas mínimas e máximas em 2017	97

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Série Pluviométrica Amostrada	59
Gráfico 2 - Comparativo da Pluviometria em anos de interesse	60
Gráfico 3 - Flutuações dos níveis piezométricos dos poços 01 a 24	63
Gráfico 4- Flutuações dos níveis piezométricos dos poços 30 a 49	64
Gráfico 5 - Gráfico termo-pluviométrico da área.....	67
Gráfico 6 - Representação da infiltração efetiva na porção do aquífero Dunas	68
Gráfico 7 - Representação da infiltração efetiva na porção do aquífero Dunas	71
Gráfico 8 - Correlação linear entre cargas observadas e simuladas	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Camadas geoeletricas interpretadas na área entre Pecém e Paracuru	25
Tabela 2 - Parâmetros hidráulicos dos aquíferos locais da área metropolitana de Fortaleza	26
Tabela 3 - Característica dos principais tipos de solo.	38
Tabela 4 - Síntese dos postos pluviométricos da FUNCEME na área	47
Tabela 5 - Síntese dos poços monitorados pela COGERH	48
Tabela 6 – Distribuição temporal dos poços utilizados.....	54
Tabela 7 - Variação da altura piezométrica entre os meses de nível máximo e mínimo.....	65
Tabela 8 - Série histórica das precipitações pontuais.....	66
Tabela 9 - Balanço hídrico da série histórica para o aquífero Dunas	68
Tabela 10 - Balanço hídrico da série histórica de precipitação para o aquífero Barreiras.	70
Tabela 11 - Valores de referência das variáveis hidrogeológicas	76
Tabela 12 - Porosidades efetivas baseadas em valores encontrados por Driscoll (1987)	76
Tabela 13 - Valores utilizados no modelo numérico calibrado e respostas obtidas	81
Tabela 14 - Valores adquiridos para o modelo simulado.....	82
Tabela 15 – Taxas de transferência hídrica por zonas de contribuição.....	83
Tabela 16 – Vazões de escoamento por zona de saída do modelo	83
Tabela 17 – Comparativo dos valores de vazão nos modelos simulados.....	97
Tabela 18 – Valores comparativos de reserva renovável em aquíferos costeiros correlatos.....	98

LISTA DE SIGLAS

COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
IFCE	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará
SRH	Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará
CIPP	Complexo Industrial e Portuário do Pecém
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

LISTA DE SÍMBOLOS

Ωm	Ohm por metro, unidade de resistividade elétrica
K	Condutividade hidráulica
$t_1; t_2$	Intervalos de tempo de observação
K_{xx}	Condutividades hidráulica na direção x
K_{yy}	Condutividade hidráulica na direção y
K_{zz}	Condutividades hidráulicas na direção z
h	Carga hidráulica (<i>hydraulic head</i>)
[L/T]	Unidade vazão generalista
[L]	Unidade de volumétrica generalista
[T]	Unidade de tempo generalista
Ss	Armazenamento efetivo adimensional
1 D	Uma dimensão
2 D	Duas dimensões
3 D	Três dimensões
P	Precipitação pluviométrica (mm/ano)
ETR	Evapotranspiração (mm/ano)
Df	Deflúvio (unidade generalista)
Ie	Infiltração (unidade generalista)
CAD	Capacidade máxima de água disponível (mm)
CC	Umidade do solo à capacidade de campo (%peso)
PPT	Precipitação
PMP	Umidade do solo ao ponto de murcha permanente (% peso)
Da	Densidade aparente do solo (g/cm^3)
z	Profundidade efetiva do sistema radicular da cultura (cm)

Ie	Infiltração efetiva;
Kn	Fator de correção adimensional;
Ti	Temperatura média de cada mês do ano;
Im	Índice térmico mensal (varia de 1 a 12)
I	Índice térmico anual
a	Parâmetro obtido em função do índice térmico
R	Recarga
Sy	Porosidade efetiva
Δh	Variação de carga hidráulica
Δt	Variação de tempo
ρ	Resistividade elétrica;
x_{rms}	RMS (<i>Root Mean Square</i>)
Rre	Reserva Renovável por fluxo do modelo simulado
Rrn	Reserva renovável por variação de nível
Rrt	Reserva renovável por superfície de área infiltrada

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. PESQUISAS EM ÁGUA SUBTERRÂNEAS: HISTÓRICO E DESENVOLVIMENTO.....	18
2.1 Águas subterrâneas no Brasil.....	19
2.2 Hidrogeologia do Estado do Ceará	20
2.3 Histórico das pesquisas em aquíferos costeiros no Ceará.....	22
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	26
3.1 Aquíferos: O ciclo hidrológico e suas implicações na recarga e reservas.....	26
3.2 Hidrodinâmica de poços em meio Saturado: Regime Estacionário e Transiente.....	29
3.3 Modelagem em hidrogeologia: Conceitos fundamentais e aplicação.....	30
3.3.1 Equação Governante, Condições de Contorno e Método das Diferenças Finitas.....	33
3.5 Aplicação de métodos geoeletricos no estudo das águas subterrâneas	36
3.6 Balanço hídrico: conceitos gerais	36
3.6.1. Caracterização Hidrológica e Física do Balanço Hídrico	37
4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA	41
4.1 Fisiografia Geral.....	41
4.2 Geologia e Hidrogeologia	42
4.3 Geomorfologia.....	45
4.4 Clima.....	46
4.5 Hidrografia superficial.....	47
4.6 Série histórica do monitoramento de poços pela COGERH.....	47
5. METODOLOGIA.....	49
5.1 Sensoriamento remoto	49
5.2 Monitoramento manual da hidrodinâmica	50
5.3 Tratamento de dados da série monitorada	51
5.4 Caracterização dos parâmetros hidráulicos	51
5.4.1. Caracterização da condutividade hidráulica (K):	52
5.4.1.1 Relação com a resistividade elétrica do solo.....	52
5.5 Balanço Hídrico	53
5.6 Modelo Geológico Conceitual.....	54
5.6.1 Modelo geológico de área reduzida.....	55
5.7 Modelo Numérico de fluxo.....	55
5.8 Calibração de modelos hidrológicos em regime permanente	56
5.9 Obtenção de valores máximos e mínimos de carga em cenários limítrofes	56
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57

6.1 Sensoriamento Remoto	57
6.1.1 <i>Uso e ocupação e CAD</i>	57
6.1.2 <i>Lagoa do Gereraú</i>	59
6.2 Flutuações dos níveis piezométricos na série observada de dados tratados.....	62
6.3 Precipitação e balanço hídrico por Thornthwaite	66
6.3.1 <i>Série histórica</i>	66
6.4 Modelo geológico conceitual	71
6.4.1 <i>Modelo de área reduzida</i>	71
6.4.2 <i>Modelo geológico simplificado da área</i>	74
6.5 Condutividade hidráulica e porosidade efetiva	76
6.6 Hidrodinâmica do sistema-aquífero	77
6.6.1 <i>Pacotes e Condições de Contorno do modelo para calibração</i>	77
6.6.2 <i>Calibração do modelo com base na análise das cargas hidráulicas</i>	78
6.6.3 <i>Zonas de Balanço e Fluxo subterrâneo</i>	81
6.6.4 <i>Hipótese adicional :Deposição do “Paleocanal Barra do Guaribas”</i>	91
6.6.5 <i>Cálculo da carga máxima e mínima</i>	97
6.6.6 <i>Reserva renovável estimada</i>	98
7. CONCLUSÕES.....	99
8 . REFERÊNCIAS	101
ANEXOS	103

1. INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas representam de mais de 95% de toda a água doce disponível (excluindo geleiras) no mundo (FREEZE & CHERRY, 1979). No estado do Ceará, mesmo nas regiões mais secas e de menor aptidão hidrogeológica a água subterrânea é utilizada de forma complementar ou mesmo como fonte principal de abastecimento.

Rebouças (2002, p. 39) cita:

“... A extração desordenada atual da água subterrânea de uma bacia hidrográfica poderá afetar, principalmente, o escoamento básico dos seus rios, a descarga de suas fontes ou nascentes, os níveis de seus açudes, lagoas e pantanais, engendrar o deslocamento da interface marítima nos seus aquíferos costeiros, reduzir a umidade do solo que dá suporte ao desenvolvimento da exuberante biomassa natural ou cultivada.”

A boa gestão dos recursos hídricos é fundamental para o desenvolvimento adequado e sustentável da região semiárida. Em meios subterrâneos a gestão hídrica depende, sobretudo, do entendimento de seu comportamento e interação com o cenário climático e socioeconômico. Outra preocupação permanente na gestão de aquíferos regionais costeiros trata-se da contaminação por meios antrópicos ou pela intrusão de cunha salina, conforme Custodio e Llamas (2001, p 1317):

“O estudo e o conhecimento das relações entre a água doce e salgada nas regiões costeiras possui um grande interesse, uma vez que muitos aquíferos derramam suas águas diretamente no mar. Este fluxo de água doce cria um estado de equilíbrio entre as duas águas que só sofrem mudanças naturais a longo prazo, devido a mudanças climáticas ou movimentos relativos da terra e do mar”.

Entretanto, não é possível um estudo consequente de contaminação de aquíferos e de inclusão salinas sem um modelo de fluxo coerente com os aspectos hidrogeológicos da região estudada.

Em virtude da necessidade de uma gestão eficiente, a melhor forma de antecipar ações é, baseando-se em séries de dados consolidados, elaborar modelos hidrogeológicos.

Segundo Tucci (1998), um modelo é a representação de um objeto ou sistema de uma bacia hidrográfica. No caso da hidrogeologia, são utilizadas as equações que regem o fluxo subterrâneo (Cabral e Demétrio *in* Feitosa, p 687).

A modelagem hidrogeológica propõe uma melhor representatividade do ambiente como em seu comportamento, sua dinâmica e seus pontos mais vulneráveis às alterações, melhorando a compreensão dos processos e das características do aquífero, servindo de subsídio para as ações a serem executadas nos níveis de governança e sócio educacional.

No litoral cearense, a situação atual dos recursos hídricos subterrâneos no entorno do Complexo Industrial e Portuário do Pecém – CIPP exige uma demanda elevada por água, implicando em uma preocupação constante das autoridades responsáveis sobre o comportamento dos recursos hídricos na região. Ao longo de sua área, existem cidades de médio porte, comunidades difusas e assentamentos indígenas em diversos usos da água em sua dinâmica social.

A gestão das águas a nível estadual é feita pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará - COGERH, que dentre suas atribuições, está incumbida do planejamento e elaboração de projetos em regiões de relevante interesse estratégico, tal qual a área supracitada. Segundo a COGERH ¹(2016, p. 1):

“A situação atual dos recursos hídricos subterrâneos na região de Pecém e Paracuru denota uma demanda elevada que está momentaneamente suprida através da exploração de lagoas, provavelmente alimentadas pelos volumes armazenados no aquífero Dunas/Paleodunas. Esta demanda é decorrente de atividades industriais, incrementadas com a instalação do complexo portuário do Pecém, instalação de complexos turísticos e residências particulares de veraneio”.

Justifica-se, portanto, a importância estratégica da pesquisa hidrogeológica na área costeira entorno do CIPP. Um modelo geologicamente consequente, com simulação numérica de fluxo e de cenários de diferentes balanços hídricos dos aquíferos porosos presentes, pode contribuir para o planejamento e gestão das ações ambientais na região.

O objetivo principal desta pesquisa é a modelagem dos fenômenos naturais, hidrogeológicos que controlam o fluxo hídrico subterrâneo, com simulações em regime estacionário aplicadas aos aquíferos porosos da região dunar entre as praias do Pecém e Taíba, por meio de modelos matemáticos por diferenças finitas (MODFLOW), com foco na gestão integrada das águas do Estado do Ceará, especificamente, na zona do CIPP entre o Lagamar do Cauípe e o Rio Anil na região do Siupé

É objetivo secundário desta pesquisa estimar as relações de interação entre riachos e oceano com o aquífero costeiro, identificando entrada ou saída do aquífero e, quantificar, quando possível os volumes desse fluxo, oferecendo dados à gestão e interação dos sistemas hídricos locais.

¹ Relatório chave, marco introdutório nos estudos governamentais na região, sob supervisão de Dra. Zulene Almada, elaborado com consultoria do Professor Dr. Enéas Lousada.

2. PESQUISAS EM ÁGUA SUBTERRÂNEAS: HISTÓRICO E DESENVOLVIMENTO

O uso dos recursos hídricos subterrâneos data de milhares de anos, sendo provável que a construção de poços antecede ao próprio homo sapiens. No período de estiagem, os antepassados da humanidade escavavam leitos de rios intermitentes em busca de água (ALENCAR NETO, 2008 p.41). Existem registros de pinturas rupestres de 4500 a.C. e hierógrafos como os da construção de poços atribuídas a Henu, líder militar do faraó Mentuhotep III, em 2100 A.C (MACHADO 2005, p 2).

A compreensão dos fenômenos inerentes ao ciclo hidrológico, entretanto, só passou a despertar interesse científico no racionalismo grego, onde filósofos como Tales de Mileto (624 ~ 548 a.C), Anaximenes de Mileto (585 ~ 528 a.C.), Heráclito de Éfeso (540 ~ 479 a.C.) e Aristóteles (384 ~ 322 a.C.), discutem a natureza e ocorrência da água.

Apenas por volta de 1500 D.C, que o ciclo hidrológico veio a ser melhor compreendido. Alencar Neto (2008 p.64), cita que na esteira da revolução newtoniana (final do século XVIII e início do século XIX) a Europa fora marcada pelo florescimento da Física-Matemática com a intensificação dos estudos matemáticos na abordagem dos fenômenos físicos. É neste contexto que surgem os trabalhos de Daniel e Bernoulli (1738) e Fourier (1822).

Considerado um marco para a ciência hidráulica e os conhecimentos sobre escoamento subterrâneo, o trabalho do engenheiro francês Henry Darcy (1856), estabeleceu a caracterização do fluxo da água através de colunas experimentais de areia (Figura 1).

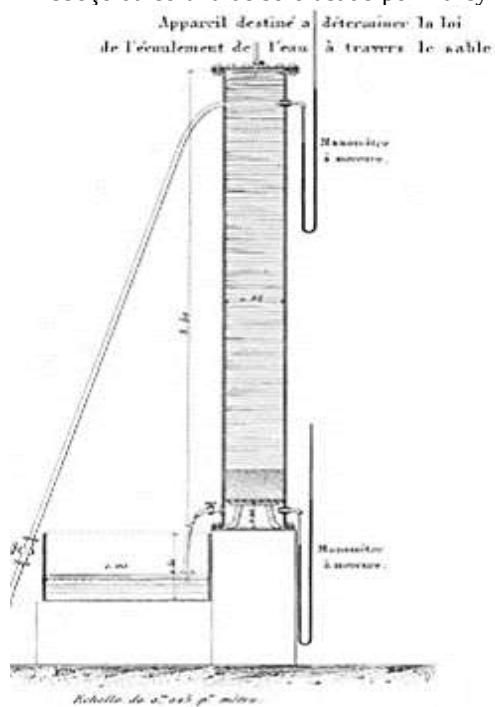
Darcy (1856, p. 7) conclui:

“ Cada experimento consiste em estabelecer uma pressão específica na câmara superior de uma coluna pelo ajuste de uma torneira que regula a entrada do fluxo; quando isso é estabelecido por duas observações, significando que o fluxo tornou-se essencialmente uniforme, o fluxo de saída do filtro é durante certo intervalo de tempo anotado, e por meio disto se calculou o fluxo de saída por minuto.[...]”.

A equação de Darcy permitiu expressar a descarga de água através de um meio poroso, por unidade de superfície, em função da condutividade hidráulica do material e do gradiente hidráulico composto por uma carga de pressão e uma carga gravitacional. Essa lei constitui a base de muitos métodos de avaliação quantitativa de recursos hídricos subterrâneos (MANOEL FILHO, 2000, p. 4).

Posteriormente, o amadurecimento da Matemática como ferramenta de análise dos fenômenos físicos possibilitou grandes avanços para a consolidação da teoria para escoamentos subterrâneos (ALENCAR NETO, 2008). Vale citar Dupuit (1863), Thiem (1870), Forchheimer (1788).

Figura 1 - Esboço da coluna de solo usado por Darcy



Fonte: Darcy (1856, p. 8)

Em relação aos estudos em aquíferos costeiros, os problemas relacionados com a contaminação salina são conhecidos desde a antiguidade e avaliados de forma empírica, entretanto só a partir de Braitwaite (1855, *apud* Custódio e Llamas, 2001, p.1318) estudos detalhados da interação de água doce e salgada em regiões costeiras ganharam suas primeiras publicações.

2.1 Águas subterrâneas no Brasil

Ao que se tem registro, desde o período o Período Colonial, a água subterrânea é utilizada como ferramenta de suporte ao desenvolvimento no Brasil. Esta, já nos primeiros anos de colônia, era captada de nascentes ou fontes e extraída por meio de poços escavados nos núcleos de povoamento, visando garantir o abastecimento humano e animal. Segundo Diniz e Feitosa (2008, p.3) os registros históricos mostram que a construção de mosteiros, fortes e

outros prédios de relevante importância eram precedidos por prospecções efetuadas por monges e outros indivíduos conhecidos como apontadores de água.

Atualmente é de conhecimento global a potencialidade hídrica do Brasil, sobretudo em função de seus grandes rios na região Norte e da existência de aquíferos de grandes proporções, tal qual o Guarani, no centro-sul e o Alter do Chão na região Norte. Contudo, como esperado em um país cujas dimensões são continentais, a distribuição destes recursos hídricos não é equitativa, o que pode ser comprovado pela escassez, sobretudo na região Nordeste onde o clima semiárido e os condicionantes geológicos não favorecem o armazenamento de água.

Para facilitar o estudo das águas subterrâneas o Brasil foi dividido pela comunidade de hidrogeólogos em regiões homogêneas, formando 10 províncias hidrogeológicas. Os limites dessas províncias não coincidem necessariamente com os das bacias hidrográficas, sendo estas províncias, regiões onde os sistemas aquíferos apresentam condições semelhantes de armazenamento, circulação e qualidade de água. Com relação aos sistemas aquíferos, os de melhor transmissão de água estão localizados nos terrenos sedimentares, que ocupam 48% da área do Brasil (IBAMA, 2013).

Diversas instituições brasileiras foram criadas ao longo dos anos em função da convivência com a seca no semiárido brasileiro, como a Comissão da Seca. Destaca-se o Serviço Geológico e Mineralógico, a Inspetoria de Obras Contra as Secas – IOCS (sucendida pelo DNOCS), e o DNPM.

2.2 Hidrogeologia do Estado do Ceará

“Durante a seca de 1846, a Ceará *Water Supply Company* foi autorizada a perfurar poços artesianos, uma vez que lagoas e poços escavados que abasteciam Fortaleza estavam secando. Para tanto, foi contratada a empresa *Armstrong & Sons Drillers*, do Texas, que perfurou três poços em Fortaleza com profundidades de até 150 metros. Como os poços não jorraram o que era uma exigência contratual, o contato foi rescindido, sendo as máquinas apreendidas.” Diniz & Feitosa (2008, p.4).

No Ceará o conhecimento hidrogeológico ainda é muito reduzido (PERH-CE, 2005), limitando a capacidade de avaliação pontual do potencial dos aquíferos e a adoção de medidas que possibilitam o uso de maneira racional deste recurso. De forma sintética, os aquíferos são agrupados seis grandes domínios hidrogeológicos, como é apresentado na figura 2.

Na região costeira, ao norte do Estado, ocorrem os aquíferos formados pelo Grupo Barreiras e os sedimentos litorâneos recentes.

Os aquíferos da Bacia Sedimentar do Araripe, localizam-se na Chapada do Araripe e no Vale do Cariri, no Sul do Estado do Ceará. Segundo a Funceme (2007), este sistema conta com um bom potencial hidrogeológico, com uma vazão média dos seus poços da ordem de 6,10 m³/h.

Os aquíferos da Bacia Sedimentar Potiguar, que no Ceará formam a Chapada do Apodi, localizados a Leste do Estado, são considerados os de maior potencial hidrogeológico. Poços explotando a Formação Cárstica do Jandaíra atinge, em sua maioria, vazões superiores a 10,00 m³/h.

O aquífero da Bacia Sedimentar do Parnaíba está restrito aos arenitos mais ou menos arcossianos do Grupo Serra Grande, com vazão média dos poços, aí construídos, de 4,20 m³/h (FUNCEME, *op cite*).

A Bacia de Iguatu, única bacia sedimentar interior do Ceará, ocorre em estreitas faixas formando um grupo de pequenas bacias isoladas, localizadas próximo à confluência do rio Salgado com o rio Jaguaribe. Os aquíferos são formados pelos arenitos do Grupo Rio do Peixe e a vazão média dos poços é na ordem de 7,00 m³/h. (IBGE, 1999).

Por fim, tem-se a ocorrência das rochas cristalinas (ígneas e metamórficas), que constituem o domínio dos aquíferos fissurais e perfazem, aproximadamente, 75% da superfície do Estado. Além das baixas vazões de seus poços, normalmente com vazões inferiores a 2,00 m³/h, embora ocorram, excepcionalmente, casos particulares.

Apesar de não se individualizar como um grande domínio hidrogeológico, os depósitos aluvionares junto aos grandes rios (Jaguaribe, Banabuiú, Coreaú e Acaraú, dentre outros) são aquíferos expressivos. As vazões de produção dos poços nessas áreas, como por exemplo nos poços rasos do aquífero aluvionar do Jaguaribe, são da ordem de 50,00 m³/h/poço (FUNCEME, *op cite*), embora ocorram também poços improdutivos, sobretudo vinculados à um perfil argiloso referente a deposição do próprio rio.

Figura 2 – Domínios hidrogeológicos do Estado do Ceará



Fonte: Autor, com base em dados da CPRM.

2.3 Histórico das pesquisas em aquíferos costeiros no Ceará.

O Sistema Aquífero Dunas se desenvolve da pós-praia em direção ao interior da zona costeira a partir da acumulação de areias quartzosas médias e finas vindas da praia, representando um ponto de fundamental importância nas relações geodinâmicas das regiões litorâneas, em razão da participação desta unidade no controle dos processos erosivos e na formação e na recarga dos aquíferos. Suas espessuras na área estudada são, predominantemente, inferiores a 30 metros (BIANCHI, PADILHA e TEIXEIRA, 1984 *apud* MORAIS 2011, p.26).

Durante anos, considerava-se que o grande problema com estes aquíferos estava relacionado com a exploração desordenada, acarretando, possivelmente, sérios problemas de

contaminação, inclusive o de salinização advindo do avanço da cunha salina. Trabalhos recentes têm mostrado o uso e ocupação do solo com relação a sua vulnerabilidade, elucidando essa temática e propondo novas diretrizes para a gestão dos recursos subsuperficiais.

A Região Metropolitana de Fortaleza conta com vasto acervo bibliográfico, referente aos estudos dos condicionantes geoambientais e dos componentes do sistema de recursos hídricos. Alguns desses estudos são exemplos da relevância para o conhecimento técnico-científico da região, como, por exemplo: BELTRÃO & MANOEL FILHO (1973), MORAIS *et al.* (1984), BIANCHI *et al.* (1984), CAVALCANTE *et al.* (1990), CAVALCANTE (1993), BRANDÃO (1995), além do Plano Estadual de Recursos Hídricos (SRH, 1992), entre outros.

Quesado Junior & Cavalcante (2000) relatam que a capital cearense, na porção nordeste do Estado, é representada hidrogeologicamente pelas dunas/paleodunas, aluviões, Barreiras e embasamento cristalino. Dentre estes, o primeiro constitui o melhor sistema aquífero, com águas de boa qualidade físico-química e bacteriológica e vazão média de 6 m³/h. Calculando a reserva total para as dunas e paleodunas é 34,2 e 56,5 milhões de m³, respectivamente, para área correspondente à Fortaleza, sendo a soma da reserva renovável das duas aproximadamente 17,5 milhões m³/ano. Os autores, contudo, apontam que o sistema dunas/paleodunas é um meio de alta vulnerabilidade natural, dependendo, portanto, de um rigoroso controle de uso e ocupação do meio físico para minimizar o impacto nas águas subterrâneas.

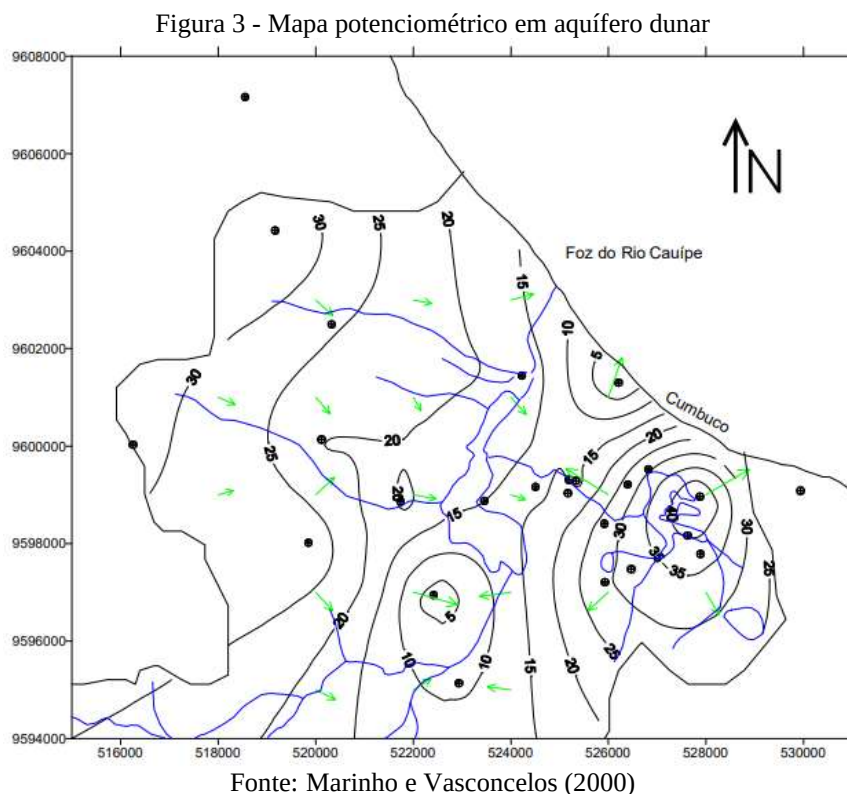
Estas observações corroboram com o que fora previsto por Cavalcante (1998):

“Ao mesmo tempo em que o Sistema Aquífero Dunas se mostra, a mercê de suas características sedimentológicas, como importante fonte potencial de recursos hídricos facilmente utilizáveis, seu arcabouço hidrogeológico revela, por outro lado, frágeis condições naturais de preservação [...] se infere que em última instância favorece a sua degradação pelos agentes poluidores, em face ao crescimento populacional devido, principalmente, ao uso e ocupação pelo componente turístico e residencial”.

Marinho *et al* (2000), integraram dados geofísicos aos hidrogeológicos em estudo na Bacia Costeira do Rio Cauípe, Município de Caucaia, afim de sistematizar parâmetros diretos e suas correlações com os dados indiretos possíveis de adquirir. Os autores concluíram que as possibilidades hidrogeológicas do domínio sedimentar na área em questão eram restritas, sugerindo que as captações de água se utilizassem também da contribuição do aquífero fissural.

Marinho e Vasconcelos (*op cite*), ainda destacam que o mapa potenciométrico (Figura 3) revela dois fatos importantes: a) a existência de um paleovale do rio Cauípe na parte central da área, o qual está deslocado para leste; os mapas do topo do substrato cristalino e das isópacas

da zona saturada corroboram esta afirmativa; b) A lagoa do Banana está no divisor de águas das bacias do Cauípe e Juá.”



Moura *et al* (2016 p.8), desenvolveu pesquisa acerca do Mapeamento da Vulnerabilidade dos Aquíferos Dunas, Barreiras e Fissural na porção norte do Complexo Industrial e Portuário do Pecém, cruzando dados de uso e ocupação e métodos já conhecidos na temática.

Morais (2016 p 126), com base na análise dos dados e informações coletadas no decorrer de sua pesquisa, além do conhecimento hidrogeológico de campo, distingue as áreas de influência, compreendendo duas bacias hidrográficas; Rio Cauípe e Microbacia da Lagoa do Gereraú. Segundo o autor, o aquífero Duna é livre, homogêneo e captado por poços predominantemente rasos, com profundidades oscilando abaixo de 20m, nível estático freático com média de 4,00 m. A espessura dos sedimentos oscila até 40,00 m, sendo destes, um perfil saturado entre 3,00 m e 9,00 m (média de 6,00 m).

Segundo Moraes (2016 p.127), o aquífero Dunas possui recarga fundamentalmente pluviométrica, embora haja uma contribuição de maneira secundária dos espelhos hídricos superficiais, tais como a lagoa do Gereraú, e as lagoas do Tucum, Eguenhambi e Bolso.

A COGERH (2016) publicou um relatório: “Avaliação hidrogeológica qualitativa do campo de dunas Pecém/Paracuru, no Estado do Ceará”. Este levantamento, permitiu observação de um gradiente normal em função da diferença de topografia, evidenciada no sistema Dunas/Paleodunas, cujas zonas de recarga estão associadas aos altos topográficos, enquanto que a zona de descarga é compreendida pela região do baixo curso do rio Siupé, nas proximidades da praia da Taíba. A piezometria varia de 2 a 30 m ao longo da área estudada. Em relação a reserva renovável, o consumo atual atinge, segundo os autores, apenas 0.6% da reserva renovável, que seria em torno de 86 milhões de m³/ano em uma área de 161.492.500 m².

Com base nos estudos geoeletricos, o relatório da COGERH (*op cite*), interpreta 75 SEV's efetuadas, e conclui que a espessura da camada aquífera viária entre 2,80 m e 23,30 m (média de 10,4 m), já a profundidade média do nível estático é de 4,90 m atingindo até 31,80 m em regiões contrárias ao fluxo (Tabela 1).

Tabela 1 - Camadas geoeletricas interpretadas na área entre Pecém e Paracuru

Camada Geoeletrica	Espessura média (m)	Resistividade média (Ω m)	Variação de resistividade(Ω m)	Interpretação geológica
1	4,90	4,90	205,20 – 73.121,00	Dunas (insaturado)
2	10,40	15,30	47,90 – 9977,40	Dunas e Paleodunas (aquífero freático)
3	39,70	55,00	2,40 – 276,90	Fm. Barreiras e/ou Saprolito (Aquicludo)
4	Indefinido	Indefinido	172,40 – 10.884,40	Rochas cristalinas (fissural/impermeável)

Fonte: Adaptado de COGERH (2016).

Os parâmetros hidrogeológicos também são levantados por alguns autores ao longo de décadas, seja em trabalhos de campo ou compilação de dados e estimativas matemáticas. Parâmetros como a condutividade hidráulica (K) é próprio de cada meio e dependente de características como porosidade, tamanho, forma, homogeneidade e rugosidade dos grãos. Estes dados encontram-se reunidos no Tabela 2 de maneira ilustrativa, valores de condutividade hidráulica atribuídos aos principais aquíferos costeiros.

Tabela 2 - Parâmetros hidráulicos dos aquíferos locais da área metropolitana de Fortaleza

Aquífero	Local	K(m/s)	Autor
Dunas	Posto de Gasolina p1	5,89E-04	COGERH 2016
	Taíba P5	1,68E-04	COGERH 2016
	Taíba Lagoa das Cobras P8	6,91E-04	COGERH 2016
	-	1,40E-04	Nogueira et al. (2005)
	Dunas/Parque Cocó	1,80E-04	Vasconcelos, 1999
	Dunas/Parque Cocó (SUDENE/1973)	4,40E-04	Vasconcelos, 1999
	Dunas/Parque Cocó (CAGECE/PLANAT/1974)	2,50E-04	Vasconcelos, 1999
	Dunas/Fortaleza	2,04E-04	CAGECE(1976a, 1976b, 1977 e 1978, segundo Sabadia, 2001)
	Média	3,33E-04	
Fm. Barreiras	Barreiras/Fortaleza	1,80E-06	Cavalcante, 1998
	Barreiras/Fortaleza	1,00E-06	Beltrão e Manoel Filho, 1973
	Barreiras/Fortaleza	1,54E-04	Bianchi, Padilha e Teixeira (1984);
	Barreiras/RN	1,00E-05	(IPT, 1982 e Feitosa et al, 2010)
	Barreiras/RN	1,04E-06	Dantas da Silva, 2014
	Média	3,36E-05	

Fonte: Organizado pelo autor.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

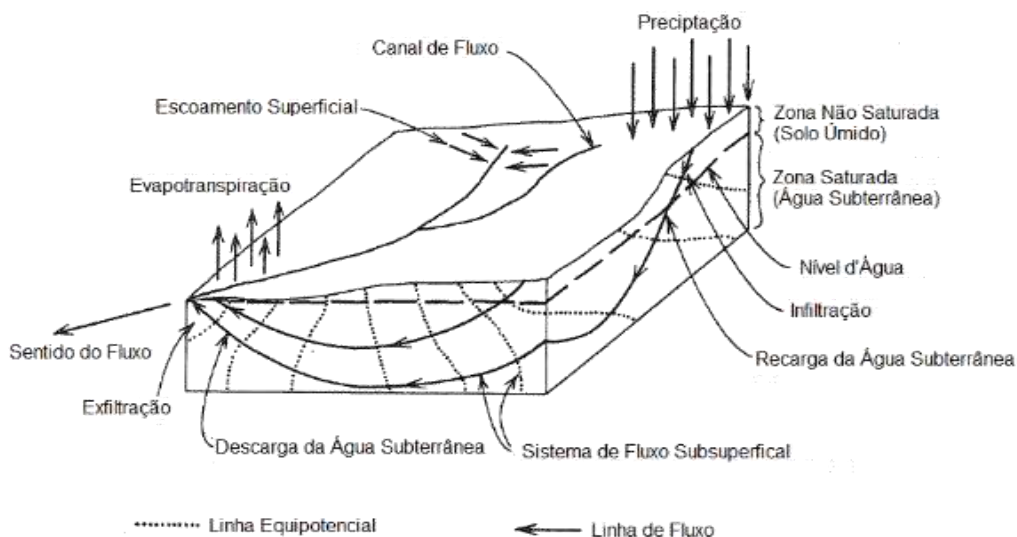
3.1 Aquíferos: O ciclo hidrológico e suas implicações na recarga e reservas

Aquífero é um meio geológico saturado, capaz de armazenar e transmitir quantidades significativas de água sob gradientes hidráulicos naturais (FREEZE & CHERRY, 1979). Estes, podem ser categorizados de acordo com seu grau de confinamento como confinados (sujeitos a pressões acima da atmosféricas), não-confinados (conhecidos também como livres ou freáticos – sob pressão atmosférica), podem ainda ser classificados quanto a sua natureza geológica como: sedimentar, cársticos, fissural e mistos.

Todo aquífero é, portanto, considerado um reservatório de água subterrânea, isto é, unidades/formações hidrogeológicas caracterizadas por parâmetros dimensionais e hidrodinâmicos, dependendo de padrões faciológicos, de condições de recarga e descarga e de variáveis de estado e tempo que descrevam a situação do aquífero em cada instante.

Os recursos exploráveis podem variar no espaço e no tempo, sobretudo em função das condições hidrogeológicas e do efeito das explorações. Nesse conceito, o entendimento de recarga impacta o próprio balanço hídrico e as premissas básicas do ciclo hidrológico (Figura 4).

Figura 4 - Representação esquemática do ciclo hidrológico.



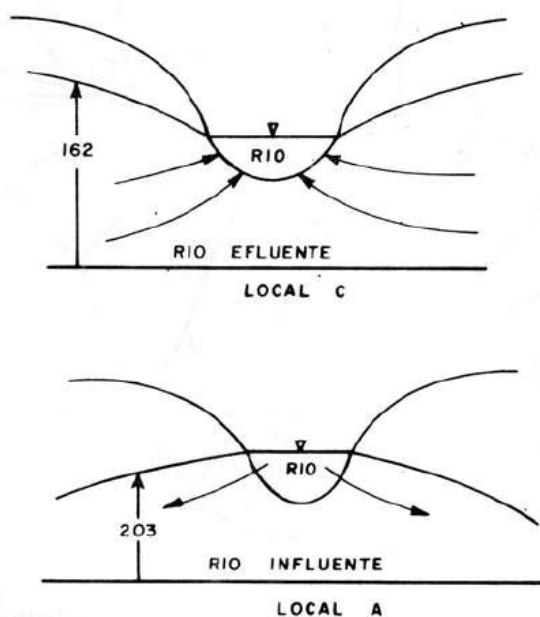
Fonte: Adaptado de Freeze e Cherry (2017, pág.4)

Em linhas gerais, o principal fator responsável pela recarga de uma bacia hidráulica se trata da precipitação atmosférica. O volume precipitado pode tomar diversos rumos: empoçar, evaporar, infiltrar, evapotranspirar e escoar. Em hidrogeologia, via de regra, chamamos as áreas de maior cota, o que pode traduzir-se em termos de carga hidráulica, como áreas de recarga, já áreas de menor cota, são conhecidas como áreas de descarga, obedecendo os princípios de fluxo subterrâneo de cada meio (Freeze and Cherry, 1979).

É comum haver, sobretudo em aquíferos livres, uma correlação hidráulica entre pontos superficiais de água como rios, lagos e lagoas com os aquíferos subjacentes (Figura 5). Estes podem representar um ponto de ressurgência da água subterrânea em função de sua carga hidráulica e pressão, assim indicando que o aquífero contribui para a recarga do ponto de água superficial.

Outras vezes, os a água superficial serve como reservatório temporário ou permanente para a recarga dos aquíferos. Esta relação pode ser melhor entendida quando a região de interação rio-aquífero for estabelecida comparando-se as cotas de superfície piezométrica do aquífero com as correspondentes cotas altimétricas no delineamento dos rios.

Figura 5- Relações rio-aquífero



Fonte: Adaptado de Freezy e Cherry (2017, pág.20)

Uma das questões mais importantes e frequentes dos tomadores de decisão trata-se de quanto de água se pode extrair de forma segura de um aquífero, isto é, de suas reservas. Consideram-se as reservas dos aquíferos sob dois aspectos principais: Reservas reguladoras, ou renováveis; volume de água da zona de flutuação (anual ou sazonal) no nível de saturação. Correspondem ao volume de realimentação anual ou estacional; Reservas permanentes; volume de água da parte do aquífero situada abaixo da zona de flutuação anual ou estacionária. Nas condições naturais, este volume varia somente em intervalos de tempo geológico. Assim, enquanto as reservas permanentes dão uma ideia da grandeza do volume da água armazenada no aquífero, as reservas reguladoras indicam suas condições de recarga.

Vale ressaltar ainda a necessidade de revisões constantes na base de dados, de modo que permitam uma sustentabilidade para os cálculos de ano para ano ajustando os valores das reservas as mudanças nos ciclos além do anual.

A questão sobre o uso das reservas reguladoras é bastante debatida na hidrogeologia, opiniões mais conservadoras defendem que a reserva reguladora não deve ser totalmente explorada, pois parte dela deverá garantir a vazão dos rios. Já os menos conservadores defendem que a reserva pode ser totalmente explorada, e até uma parte da reserva permanente pode ser usada em casos de extrema escassez. De toda forma, todos concordam que o uso das águas subterrâneas em quantidades superiores à da reserva reguladora interfere na reserva permanente, considerada estratégica (Cavalcante, 1999).

3.2 Hidrodinâmica de poços em meio Saturado: Regime Estacionário e Transiente

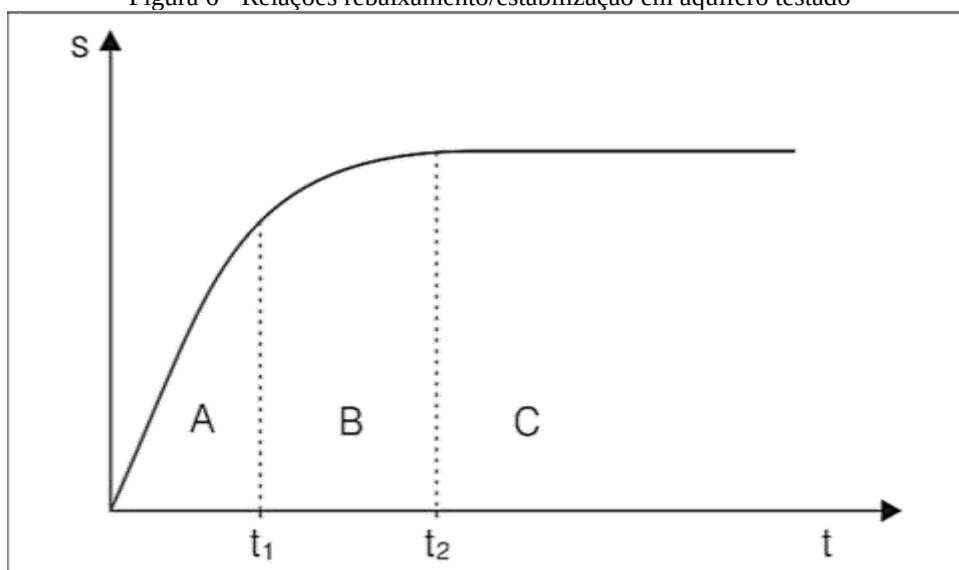
De acordo com Freezy e Cherry (2017, página 55):

“Fluxo em estado estacionário, ou fluxo permanente, ocorre quando em qualquer ponto em um campo de fluxo a magnitude e a direção da velocidade de fluxo são constantes como tempo. O fluxo transiente (ou fluxo instável, ou fluxo não permanente, ou fluxo transitório) ocorre quando em qualquer ponto de um campo de fluxo a magnitude ou a direção da velocidade de fluxo varia com o tempo.”

Como exemplo e de maneira simplificada, ao imaginar o bombeamento de um poço, ocorre o rebaixamento progressivo do nível piezométrico, formando uma superfície conhecida como cone de rebaixamento. Teoricamente esse cone evolui ao longo do tempo, sendo possível observá-lo em distâncias contínuas ao longo do poço testado. Inicialmente, a água que é retirada é potencialmente do aquífero, provocando um contínuo rebaixamento com o tempo, chamado assim de regime ou estado transiente. Ao dar continuidade ao rebaixamento, o cone pode chegar a atingir massas de água superficiais, ou mesmo provocar a drenança de outros aquíferos, passando a ser alimentado por uma contribuição externa, assim a água bombeada será uma composição entre a proveniente do aquífero e uma fonte externa. Nesses termos, quando há a estabilização do rebaixamento do aquífero no tempo e no espaço esse regime é chamado de permanente ou estacionário, assim, como característica fundamental, o aquífero passa a funcionar apenas como um meio de transmissão.

Para exemplificar, a figura 6 mostra o instante em que o aquífero é bombeado com contribuição única da sua formação, onde há rebaixamento até t_1 . A partir daí, começa a haver entrada de uma fonte externa de água, entre os instantes de t_1 e t_2 , até sua completa estabilização em t_2 , tornando o regime a ser permanente.

Figura 6 - Relações rebaixamento/estabilização em aquífero testado



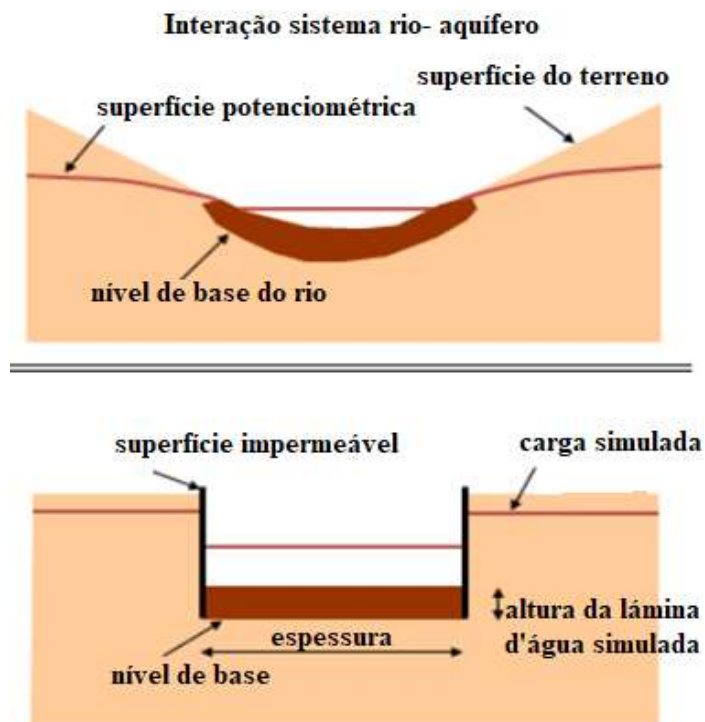
Fonte: Adaptado de CPRM (2002).

3. 3 Modelagem em hidrogeologia: Conceitos fundamentais e aplicação

Os modelos, de maneira geral, são fundamentais como ferramentas de gestão e estudos sobre uma determinada área específica.

Modelos de hidrogeológicos buscam reunir dados observados em campo e processos hidrogeológicos atuantes em cenários para os fenômenos envolvendo a ocorrência, captação e transmissão de águas subterrâneas, sendo assim eles podem ser usado como alerta sobre fenômenos que não foram previamente considerados ou mesmo corroborar na identificação de áreas de maior interesse no cerne da quantidade e qualidade das águas. Portanto, o modelo pode ser entendido como a representação (Figura 7) simplificada de um fenômeno real ou imaginário, no caso envolvendo água subterrânea.

Figura 7 - Representação esquemática da simplificação de um modelo



Fonte: Adaptado de Feitosa in CPRM (2002, p.530).

Entende-se, ainda, que o modelo é uma ferramenta para atingir objetivos. Usualmente, os objetivos principais se dividem em: Preditivo e Interpretativo. No primeiro caso tem-se que o modelo é utilizado na expectativa futura (*forecast*) em função dos seus usos recentes e/ou para recriar as condições passadas do aquífero (*hindcast*). Já os interpretativos, tão somente busca entender o funcionamento do aquífero e a sistematização das informações (adaptado de Ribeiro *et al*).

Por fim, entende-se que o modelo resalta as características e parâmetros que mais influenciam o fenômeno e minimizam aqueles com pouca influência

Segundo Cabral e Demétrio (in Feitosa, p 687) um modelo pode ainda ser classificado como modelo físico, analógico (geralmente com analogia membranas ou dispositivos elétricos – em desuso) ou matemático. Os modelos físicos já foram os mais utilizados em um passado não muito remoto, entretanto foram substituídos pelos matemáticos mais complexos e com maior poder de simulação devido ao desenvolvimento dos computadores. Os modelos matemáticos são compostos de um sistema de equações, geralmente equações diferenciais, que representam o fenômeno observado e busca estudar suas variáveis dependentes que afetam o sistema.

Os modelos matemáticos podem ser classificados como analíticos e numéricos (Cabral e Demétrio in Feitosa 2012, p 688). Os modelos analíticos se utilizam de equações simplificadas

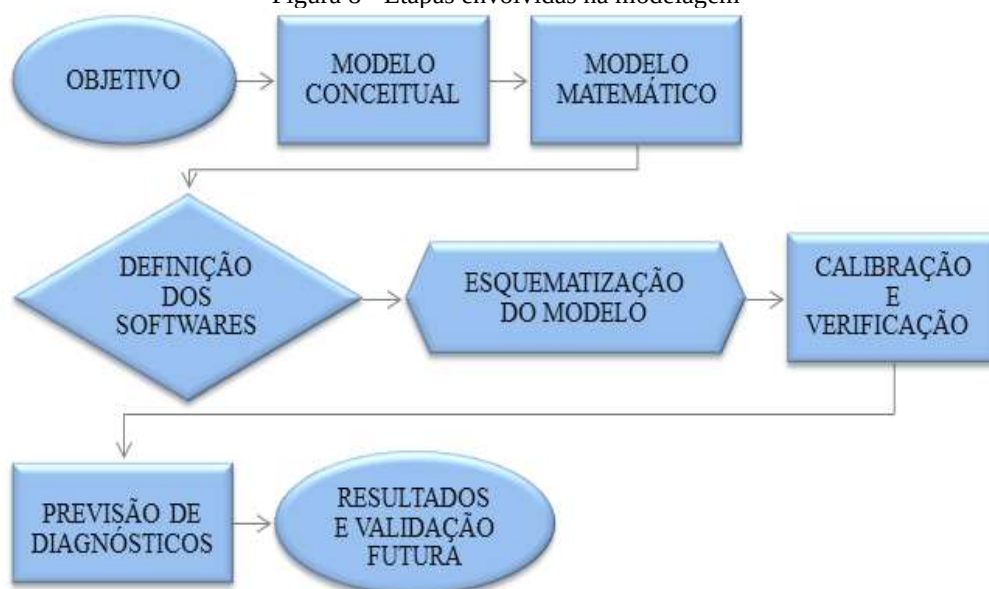
para situações generalistas como, por exemplo, ao utilizar-se das equações de Theis em meios homogêneos, isotrópicos, cujo regime é tipicamente transiente.

Entretanto, na maioria das situações, a geologia é anisotrópica e não homogênea e seus polígonos não são malhas regulares, de forma que fica difícil e, muitas vezes, impossível, resolver estes problemas sem uma base de algoritmos que sejam processados em múltiplos cenários por meio de softwares. Assim, os métodos numéricos, utilizam-se de equações governantes com técnicas de aproximação numéricas obtidas por meio de uma discretização das condições reais do aquífero e suas incógnitas geradas. São com base nestes softwares, que rodam soluções múltiplas, que se torna possível resolver problemas de equações diferenciais do fluxo subterrâneo em diversos tipos de aquíferos, em geral são utilizadas ou métodos de diferenças finitas e/ou métodos de elementos finitos (Feitosa *in* CPRM, 2003).

Durante o processo de modelagem de um aquífero estão envolvidas diversas etapas (FIGURA 13) das quais a simulação matemática computacional é apenas uma destas.

Segundo Cleary (1989, p.66) a preponderante maioria dos modelos é determinístico em sua estrutura, isto é, relaciona causa e efeito e geralmente envolvem parâmetros característicos dos aquíferos, como condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento. Entretanto, algumas abordagens utilizam-se de modelos estocásticos, cujo um elemento de incerteza inerente é atribuído, gerando margem de confiança e erros padrões. Estes últimos são mais utilizados para estudos de transporte de contaminantes, sobretudo nos casos em que as heterogeneidades naturais, que causam efeito de dispersão, são levadas em conta.

Figura 8 - Etapas envolvidas na modelagem



Fonte - Autor, 2019.

3.3.1 Equação Governante, Condições de Contorno e Método das Diferenças Finitas

A Equação governante do processo de escoamento subterrâneo é escrita em termos de equações diferenciais abordando a variação da carga hidráulica por todo domínio analisado ao longo das direções dimensionais e temporal, expressa numericamente (CASTRO & RIGHETTO, 2013) da seguinte maneira:

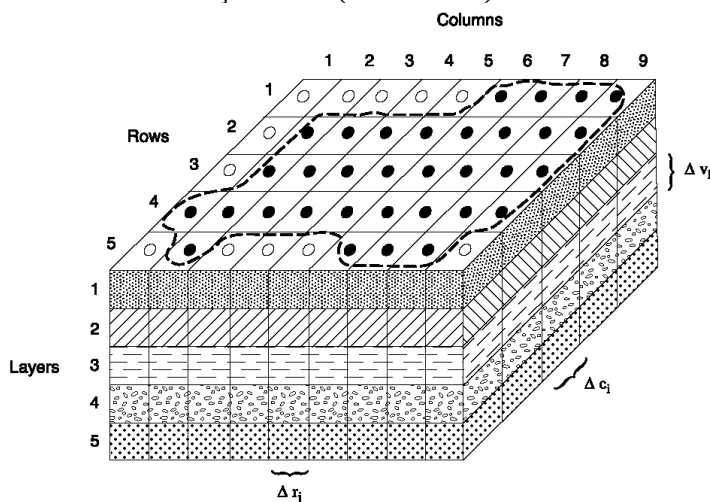
$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right] + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Onde:

- K_{xx} , K_{yy} e K_{zz} , são as condutividades hidráulicas nas direções x,y,z [L/T]
- h é a carga hidráulica [L]
- W é a recarga por unidade de volume [T^{-1}]
- S_s é a armazenagem efetiva [L^{-1}]
- t é o tempo [T]

Como já discutido, potencialmente, existem duas abordagens mais usuais em hidrogeologia: aquela que envolve formulação por diferenças-finitas e outra que envolve formulação por elementos-finitos. Em ambos métodos a equação original é discretizada nas variáveis espaciais x, y e z. Um modelo discretizado em um número finito de blocos, cada possui suas próprias propriedades hidrogeológicas e um nó central, no qual a carga hidráulica seja definida para o bloco como um todo (FIGURA 9).

Figura 9 - Exemplo de malha nodal centralizada no bloco para simulação numérica de rede de fluxo adotada em Diferenças Finitas (MODFLOW)



Fonte: Manual Modflow (1988)

Na discretização, em termos gerais, a região analisada é dividida Dx , Dy e Dz em uma malha (grid) composta tridimensionalmente, possuindo um nó central, bem como em incrementos temporais, Dt , para as condições transientes.

No estado permanente, estes elementos são modelados em função de condições conhecidas – fluxo, carga e uma relação linear entre fluxo e carga. As condições conhecidas dizem respeito a pontos específicos, geralmente dispostos nas fronteiras da região modelada. Procura-se, portanto, determinar o comportamento do fenômeno nos demais pontos do domínio (grid). Caracterizando um Problema de Valor de Contorno.

No caso transiente, conhecidas as condições iniciais em todos os pontos do domínio (tempo zero) calcula-se os valores em todo domínio para o momento seguintes, caracterizando um Problema de Valor Inicial.

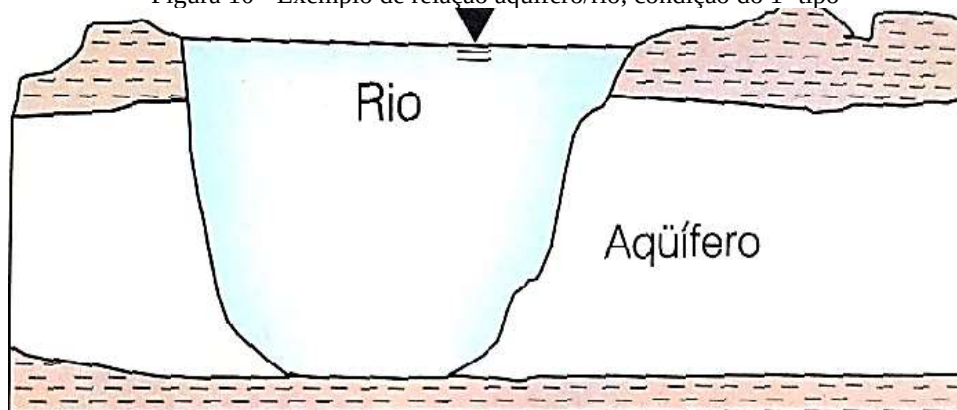
A intuição sugere que quanto maior o número de pontos discretizados, tanto para o domínio espacial (caso permanente) quanto para domínio temporal (transiente) mais próximo o modelo estará da realidade estudada. Entretanto, oscilações numéricas e o próprio esquema de resolução de equações implícitas podem introduzir erros consideráveis e influir na convergência da solução final. Deve-se, portanto, adotar certo equilíbrio na escala de discretização da região estudada.

A equação governante é, então, discretizada em termos de diferenças finitas, obtendo-se um sistema linear de equações a ser resolvido.

Condições e restrições de contorno representam o estado de um sistema físico. Estas podem representar entradas e saídas do fluxo de água dentro do sistema como limitantes para uma solução controlada. Um sistema de fluxo de águas subterrâneas é geralmente um conjunto de condições de contornos de cargas e fluxos.

A Condição de Contorno de carga conhecida (Figura 10), também conhecida como condição de 1º tipo ou de Dirichlet, representa uma carga hidráulica que não muda com o tempo e não é afetada pelo sistema de águas subterrâneas simuladas. Usualmente representa grandes corpos de água, os quais possui cargas não afetadas pela dinâmica no sistema modelado, como lagoas, rios ou oceano, como ilustrado na figura 10. Outro uso é para representar as cargas hidráulicas observadas no campo.

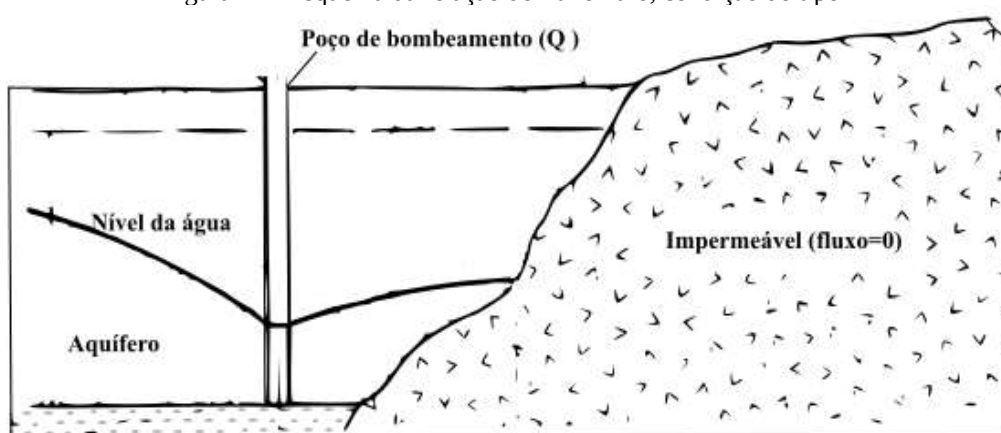
Figura 10 - Exemplo de relação aquífero/rio, condição do 1º tipo



Fonte: Adaptado de CPRM (2002, p.530).

A segunda condição de contorno, também chamada de Neumann, de fluxo conhecido é comumente usada para representar pontos ou linhas fontes de recarga-descarga, zonas impermeáveis, como mostrado na Figura 2. De modo geral podemos dizer que o fluxo é calculado por Darcy, sendo essa condição contorno usualmente empregados para representar recargas ou extrações (FIGURA 11).

Figura 11 - Esquema da relação de fluxo nulo, condição do tipo 2

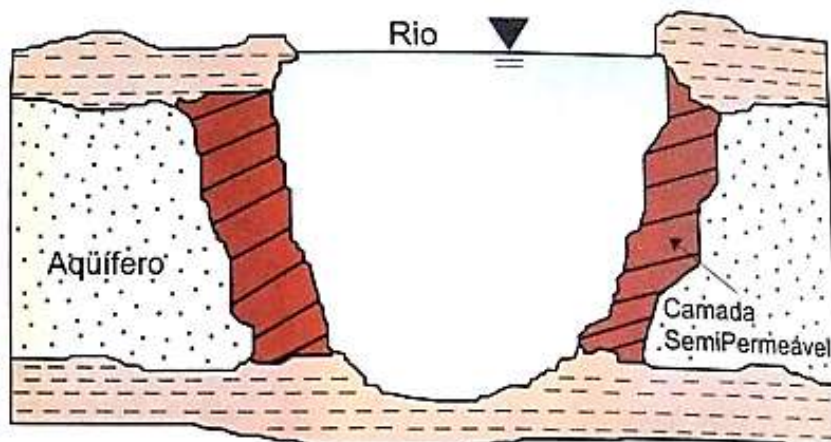


Fonte: Adaptado de Anderson *et al* (2002, p.530).

A última condição presente no esquema numérico de diferenças finitas codificado pelo Software aplicado é a condição de 3º tipo, ou de Robin, e pode ser entendida como uma combinação linear entre os dois primeiros tipos, correlacionando carga e fluxo, como por exemplo para simular drenança entre camadas de diferentes permeabilidade e semipermeáveis - aquíferos e aquíferos, ou mesmo em contatos entre o aquífero e corpos de água superficiais interligados por uma camada de diferente condutividade hidráulica (FIGURA 12).

Os valores de carga hidráulica obtidos em uma simulação em regime estacionário são utilizados na representação do estado inicial da simulação em regime transiente.

Figura 12 - Esquema de condição do tipo 3



Fonte: Adaptado de CPRM (2002, p.530).

3.5 Aplicação de métodos geoeletricos no estudo das águas subterrâneas

Os métodos geofísicos baseiam-se na determinação de propriedades físicas do meio subterrâneo e suas correlações com o ambiente geológico. Entre os principais métodos, destacam-se os métodos elétricos, com suas modalidades diversas, estes também são conhecidos como métodos geoeletricos.

Estes métodos possuem inúmeras modalidades de uso, em geral, todas se baseiam no princípio da lei de Ohm e as interações do campo elétrico e eletromagnético terrestre, bem como a resposta dos meios físicos à estímulos em campos artificiais.

O método geoeletrico, segundo Braga (2016, p.10), permite assumir para estudo das variações dos parâmetros físicos dos materiais geológicos a partir de três formas de investigação: sondagens (investigação 1D), caminhamentos (2D) ou perfilagens. De maneira sintética, pode-se dizer que através destes métodos torna-se capaz de correlacionar os valores de resistividade elétrica do solo, dada uma corrente de injeção e sua impedância elétrica, com as porosidades, níveis dos aquíferos e outros parâmetros hídricos.

3.6 Balanço hídrico: conceitos gerais

Segundo Custódio e Llamas (1976), o balanço hídrico é caracterizado pela aplicação do princípio de conservação de massa a uma região definida por determinadas condições de contorno. Este princípio estabelece que a diferença entre a entrada e saída de massa em um sistema é igual ao armazenamento dentro dele.

Em geral, segundo Manoel Filho (in CPRM, 2012), a equação básica do balanço hídrico pode ser escrita, considerando precipitação (P), evapotranspiração real (ETR), deflúvio (Df) e infiltração efetiva (Ie) como:

$$BH = P - ETR - Df - Ie \quad (\text{eq.4})$$

Embora esta equação forneça uma solução simplificada para a determinação dos balanços de massa dentro de uma bacia hidráulica qualquer há uma certa dificuldade de estabelecer uma relação segura dos parâmetros adquiridos e a sensibilidade do meio natural, ocasionando, via de regra, pouca segurança na aquisição destes.

A distribuição espacial da precipitação pode ser corrigida a partir de dados observados em pluviômetros com o uso de técnicas de distribuição de área, estatísticas simples como média aritmética ou mesmo probabilística e interpolação. As formas mais usuais de análise tratam-se dos métodos de Thiessen e de isoietas. O método de Thiessen consiste em construir polígonos interpolando as estações pluviométricas, depois interceptando outros polígonos e atribuindo pesos para cada poligonal resultante. As áreas desses polígonos representam frações da área total e, portanto, estes pesos são utilizados para corrigir as distâncias e atribuir ponderações às medidas estimadas.

3.6.1. Caracterização Hidrológica e Física do Balanço Hídrico

Para os estudos referentes ao projeto em apreço, o balanço hídrico tem o objetivo de auxiliar na determinação da recarga do aquífero em questão, estimando suas reservas e condições de circulação, de modo a orientar na tomada de decisões quanto à exploração sustentável das águas armazenadas.

Visto tamanhas incertezas da sazonalidade temporal, alguns pesquisadores preferem adotar métodos que possam trazer dados para essa estimativa.

Um dos principais métodos utilizados para esta estimativa de balanço foi proposto por Thornthwaite em 1948, e posteriormente modificado por Mather, no ano de 1955, ficando conhecido como “Balanço Hídrico de Thornthwaite e Mather” (THORNTHWAITE e MATHER, 1955), essa metodologia permite que valores de recarga dos aquíferos sejam estimados através de um parâmetro conhecido como infiltração efetiva. O método de Thornthwaite é o que melhor se adapta às áreas com as características climáticas que apresentam alternância de períodos secos e chuvosos bem diferenciados”. Para o método, são

necessárias informações físicas, como o valor máximo de capacidade de água disponível no solo (CAD), e hidrológicas, como a precipitação e a evapotranspiração potencial, entre outros.

Uma vez que o objetivo é determinar o armazenamento de água no solo (ARM), é imprescindível saber qual a máxima quantidade de água que o solo em questão pode reter, na forma líquida. A essa grandeza determina-se Capacidade Máxima de Água Disponível (CAD), a qual pode ser determinada por meio da seguinte expressão:

$$CAD = \frac{((CC - PMP) \times Da \times z)}{10} \quad (\text{eq.5})$$

Onde;

- CAD = capacidade máxima de água disponível (mm);
- CC = umidade do solo à capacidade de campo (%peso);
- PMP = umidade do solo ao ponto de murcha permanente (%peso);
- Da = densidade aparente do solo (g/cm³);
- z = profundidade efetiva do sistema radicular da cultura (cm).

Este valor é arbitrado considerando-se as características físicas dos solos. Segundo *Castany* (1975) solos arenosos apresentam capacidade de retenção de 50 mm e solos argilosos de 200 mm. Na ausência de valores medidos utiliza-se o valor de 100 mm como sendo o valor de CAD. *Israelsen e Hansen* (1967) resumiram algumas propriedades físicas de diversos tipos de solos (Tabela 3).

Tabela 3 - Característica dos principais tipos de solo.

Textura do solo	$\frac{g}{Da (cm^3)}$	CC(%peso)	PMP(%peso)
Arenoso	1,65 (1,55-1,80)	9 (6-12)	4 (2-6)
Franco arenoso	1,50 (1,40-1,60)	14 (10-18)	6 (4-8)
Siltoso argiloso	1,30 (1,25-1,35)	31 (27-35)	15 (13-17)
Argiloso	1,25 (1,20-1,30)	35 (31-39)	17 (15-19)

Fonte: *Israelsen e Hansen* (1967)

Thornthwaite considera as médias mensais de pluviometria (PPT) e temperatura (T), fornecendo a evapotranspiração potencial (ETP) e a avaliação da evapotranspiração real (ETR), permitindo a obtenção da infiltração efetiva (Ie), sendo Kn um fator de correção adimensional, relacionado com a latitude local da área estudada. Assim segue a equação:

$$ETP = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \ln x Kn \quad (\text{eq.6})$$

Onde;

O índice térmico anual (I) é calculado pela expressão:

$$I = \sum_{i=1}^{12} I_i$$

$$\text{Em que: } I_i = \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1,5}$$

T_i = temperatura média de cada mês do ano;

I_m = índice térmico mensal, que varia de 1 a 12 o somatório dará o índice anual (I).

a = parâmetro obtido em função do índice térmico, sendo dado por:

$$a = 0,49239 + (1792 \times 10^{-5} I) - (771 \times 10^{-7} + I^2) + (675 \times 10^{-9} I^3).$$

Dessa forma, quando $ETP > PPT$ e, sendo $>$ Capacidade de campo (CAD), esse valor infiltra no solo

Outra forma de estimar recarga de um balanço hídrico trata-se dos métodos físicos, estes estão entre os mais utilizados para estimar a taxa de recarga em aquíferos livres. Entre estas técnicas, destaca-se o método WTF (*Water Table Fluctuation*), cujos princípios são baseados na flutuação do nível d'água subterrâneo.

Neste método a recarga é estimada utilizando produto do rendimento específico (S_y), que em meios porosos pode ser considerado a porosidade efetiva, por um quociente da variação dos rebaixamentos pelo tempo, transcrevendo isso temos:

$$R = S_y \cdot (dh/dt) = S_y \cdot (\Delta h / \Delta t) \quad (\text{eq.7})$$

Onde Δh é igual à diferença entre o pico de subida e o ponto mais baixo da curva de recessão antecedente extrapolada até o instante do pico. A curva de recessão antecedente extrapolada é a linha que a curva do poço teria na ausência de elevação de nível d'água.

O método WTF assume que todos os outros componentes do balanço hídrico (fluxo de base, entrada e saída subsuperficial e evapotranspiração) são nulos durante a recarga. De acordo com Healy e Cook (2002), a principal vantagem no uso do WTF consiste em sua simplicidade de uso. Não são necessárias premissas sobre os mecanismos de transferência da água através da zona não saturada. Dessa forma, a presença de caminhos preferenciais na zona insaturada não restringe a aplicação do método, o WTF pode ser visto mais como uma aproximação do

que uma medida pontual dos métodos baseados na zona insaturada. Contudo, o método possui algumas limitações:

- i. É melhor aplicado para aquíferos rasos, que possuem maior sensibilidade para aumentos e diminuições do nível estático (NE). Aquíferos profundos podem não apresentar sensibilidade para essas variações, pois as frentes de umidade da recarga tendem a se dispersar em longas distâncias. No entanto, o método tem sido aplicado aos sistemas com espessas zonas insaturadas e que apresentam flutuações sazonais de nível.
- ii. Normalmente, as taxas de recarga variam substancialmente dentro de uma
- iii. área, devido à heterogeneidade geológica, geomorfológica, entre outras. Os
- iv. poços utilizados necessitam estar localizados de forma que sejam
- v. representativos para toda a bacia.
- vi. O método não pode ser aplicado em locais com taxa constante de recarga.
- vii. Uma das grandes dificuldades de aplicação do método é a identificação da porosidade efetiva do aquífero, onde usualmente um valor constante é atribuído para toda a área de estudo. Sloto (1990) mostrou que a porosidade específica (efetiva) também varia com a profundidade do aquífero, para maiores profundidades ocorre uma redução da constante.

Outra metodologia se baseia na diferença de nível potenciométrico, representa uma maneira de quantificar a parte da recarga que ocorreu no aquífero e ainda está disponível após o evento de recarga. O método é uma importante ferramenta de gestão para os aquíferos, e permite que após o período de recarga (quadra chuvosa) sejam conhecidos os volumes ainda disponíveis, evitando assim que a reserva renovável seja ultrapassada.

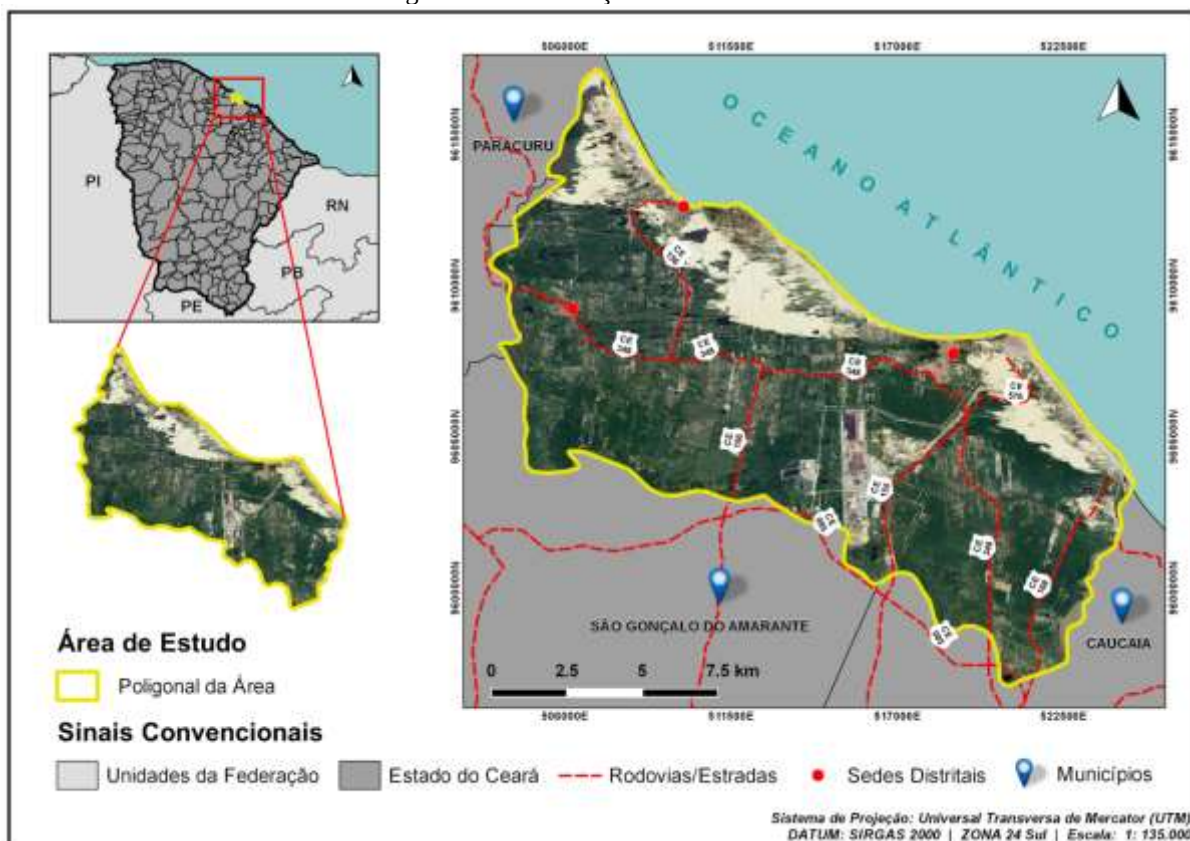
A equação utilizada, com bons resultados, pelo método é a mesma utilizada no WTF, conforme apresentado na equação 1, entretanto, a obtenção dos valores de Δh ocorre de maneira diferente. A obtenção dos valores de Δh se dá a partir das médias mensais de nível estático obtidas no ano hidrológico, utilizando a diferença entre o valor mínimo (observado na pré-estação ou, ainda, na estação chuvosa) e o valor máximo (máxima recarga do período). O método foi aplicado em dois importantes trabalhos de recarga subterrânea desenvolvidos na Bacia Sedimentar do Araripe por Vasconcelos *et al.* (2013) e COGERH (2009).

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

4.1 Fisiografia Geral

A área de estudo (Figura 13) situa-se na região oeste da RMF, centralizada grande parte no Município de São Gonçalo do Amarante, mais especificamente próximo ao Centro Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), limitando-se ao Norte com o Oceano Atlântico, à Oeste com o riacho Siupé ou Anil (Município de Paracuru), ao Leste com o Lagamar do Cauípe (Município de Caucaia), e ao Sul limita-se com o contato geológico com rochas do embasamento cristalino.

Figura 13 - Localização da área de estudo



Fonte: Autor. De imagens orbitais ESRI (2019) e dados vetoriais: IBGE (2010); DNIT (2012); IPECE (2019).

A população em 2010 para o Município de São Gonçalo era de 43.890 habitantes tendo sua população estimada em 2018 de 48.516 habitantes e representa o maior Complexo Portuário do Ceará e uma das áreas maior industrialização, com destaque para a Siderúrgica Nacional, uma usina termoeletrica dentre outras. Por trata-se também de região litorânea e sua proximidade com a capital cearense, a região possui ainda o turismo como uma atividade lucrativa, gerando diversos empregos formais e informais.

4.2 Geologia e Hidrogeologia

A Geologia da região é composta basicamente por três (03) unidades litológicas, na base o embasamento cristalino constituído por rochas gnáissicas e migmatíticas do Proterozóico Inferior; seguidos por as unidades sedimentares objetos deste estudo:

- i. Sedimentos Cenozóicos e Plio-pleistocênicos da Formação Barreiras;
- ii. Sedimentos eólicos, Aluviais, Flúvio-marinhos, Marinheiros e Holocênicos, dos quais se definirá como: Dunas, Paleodunas e aluviões

A Formação Barreiras, predominantemente areno-argilosa e silto-arenosa, distribui-se de forma variável acompanhando a linha de costa, sotoposta às paleodunas e das dunas atuais. Por vezes, estes sedimentos ocorrem próximos ao mar, chegando a aflorar na forma de falésias.

O aquífero predominante no setor setentrional é a formação barreiras, que se caracteriza por sua média potencialidade, baixa profundidade e qualidade da água variável. O maior comprometimento dessas águas refere-se à diluição de óxido de ferro, proveniente das camadas da formação barreiras com maior concentração deste. Essa contaminação é, popularmente, denominada de “capa rosa”.

O campo de dunas segundo Morais (2014, p.44): “É composto por areias pouco consolidadas e extremamente homogêneas, finas a médias, com diâmetro efetivo predominando entre 0,15 a 0,25 mm e espessuras entre 10 a 30 m”. Por vezes, nos depósitos dunares, podem ocorrer intercalações de níveis siltico-argilosos a argilosos.

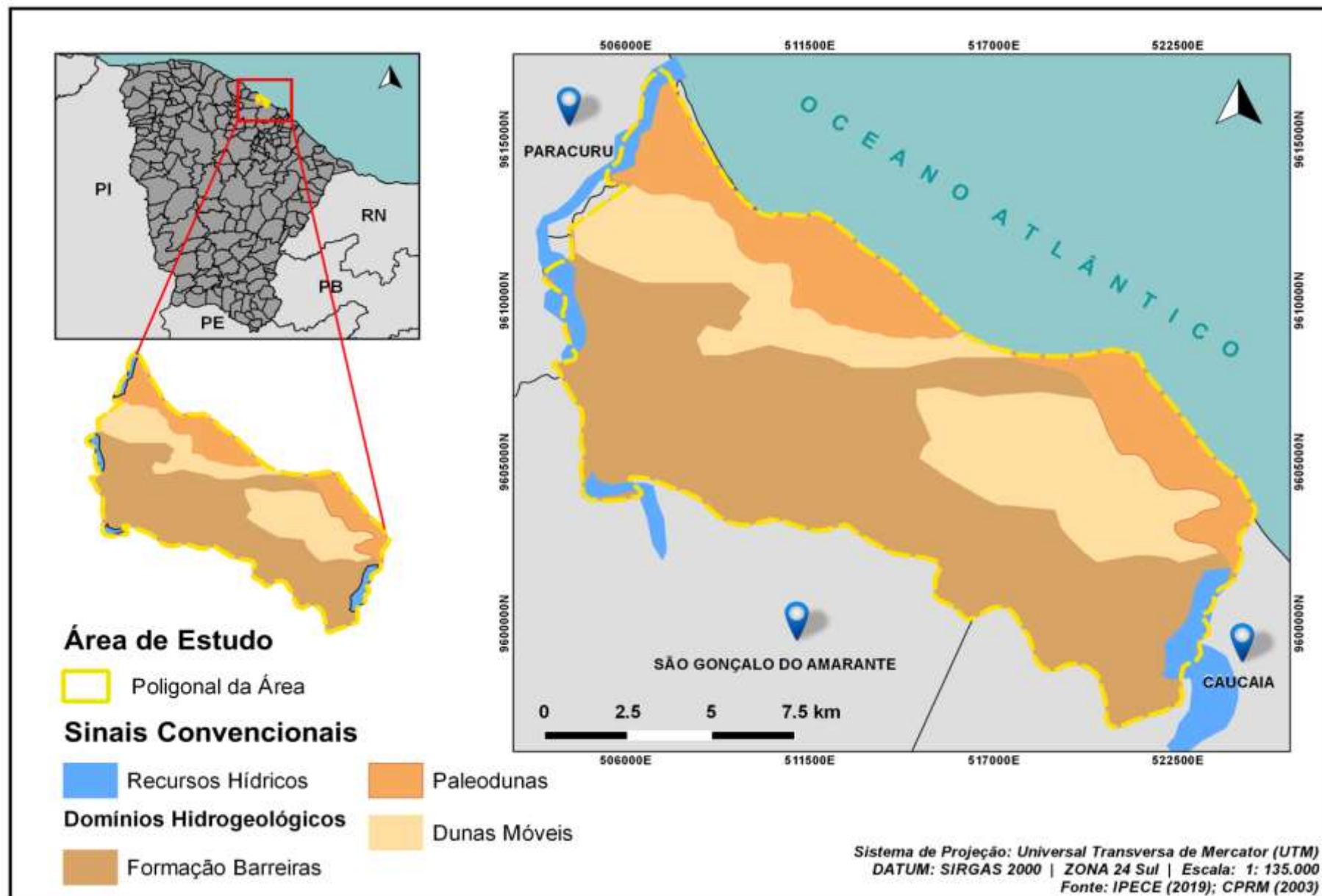
O setor norte, onde afloram e predominam a ocorrência das dunas, ocorrem as maiores potencialidades em termos de facilidade de captação e reserva explorável de água. As características básicas do setor favorecem o acúmulo de águas subterrâneas a poucos metros de profundidade e, também, dos recursos hídricos superficiais nas áreas mais rebaixadas.

O consenso geral, segue as premissas de Bianchi (1984), em que, justifica-se ao dizer que as diferenças litológicas as dunas e as paleodunas não constituem razões suficientes para que se caracterize uma separação hidráulica entre essas duas unidades, o que leva a serem consideradas como um só sistema aquífero(dunas/paleodunas). Contudo, recentes trabalhos como o de Martins *et al* (2012). e mapeamentos em escala de detalhe da CPRM, mostram uma diferenciação deste sistema aquífero. Martins *et al* (*op cite*) relata altíssimos valores de condutividade hidráulica, na ordem de $10E-2$ e $10E-3$ m/s, associadas à presença do aquífero paleodunas bem como intercalações de paleocanais.

No setor sul, em decorrência da predominância de terrenos “cristalinos”, a captação de águas subterrâneas apresenta como características básicas a baixa potencialidade e a ocorrência frequente de poços com águas salobras ou salinas.

A figura 14 detalha a distribuição espacial dos aquíferos locais, usados para modelo conceitual desta pesquisa.

Figura 14 - Contexto litológico da área de estudo



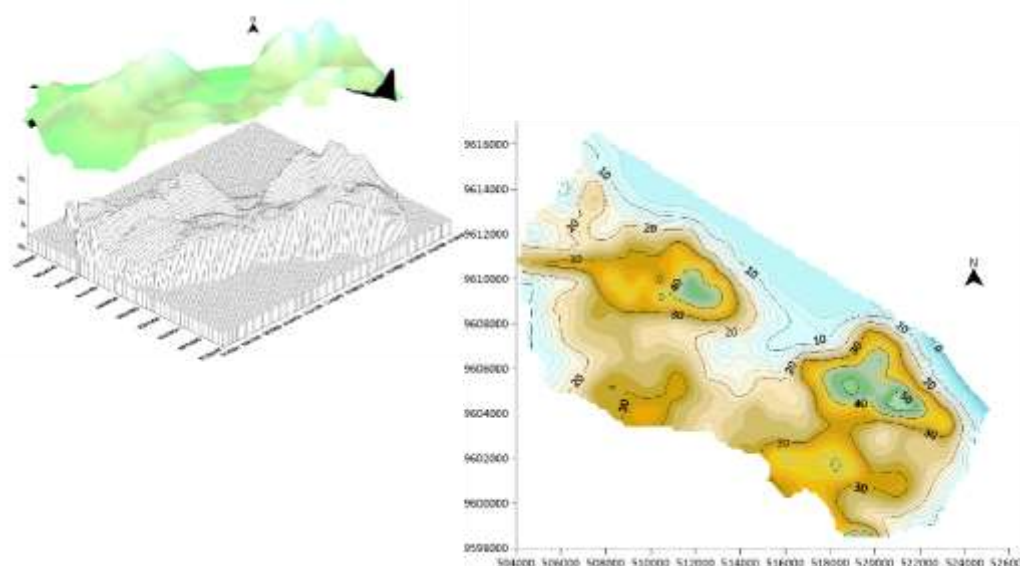
4.3 Geomorfologia

O litoral possui um conjunto de feições morfológicas desenvolvido pelos mais diversos fatores, que se traduzem no avançado estágio de regularização alcançado. As macro-feições do ambiente litorâneo representado pelas dunas podem ser identificadas no interior do continente onde adentram, em média, 2,5 km.

O Sistema Dunas tem um destaque especial na consideração dos ambientes costeiros pela sua magnitude espacial e pelo seu destaque altimétrico, além das alternativas ecológicas correlatas a estes ambientes (BIANCHI, MORAIS & GURGEL JR, 1985). Estas dunas, podem ainda ser classificadas como: Dunas frontais, lençóis de areia, dunas lineares ou longitudinais, parabólicas, transversais, barcanas e eolionitos.

Em termos altimétricos, o relevo das dunas é bem marcado na paisagem, contrastando com as feições morfológicas dos tabuleiros pré-litorâneos. A figura 15 demonstra as altitudes variam entre 0 e 85 metros em relação ao nível do mar. As máximas altitudes, ocorrem pontualmente, mais a dentro do continente existem pontos aflorantes de rochas cristalinas, como na porção sudoeste, a qual afloram com relevo protuberante em relação ao entorno.

Figura 15 - Modelo digital de elevação extraído de carta ortofoto retificada.



Fonte: Autor, com base em dados aerolevantados do IDACE.

4.4 Clima

No Estado do Ceará, segundo a classificação modificada de Köppen-Geiger (1918) predomina o Clima Quente de Caatinga (Bsh) com variações de temperaturas nas diferentes regiões do estado, Litoral (27°C), Serras (22°C) e Sertão (33°C durante o dia e 23°C a noite). O litoral, onde encontra-se a região estudada possui Clima Tropical Subúmido (Aw) com pluviometrias que variam entre 1.000mm e 1.600mm.

Já de acordo com a classificação climática de Gaussen, o clima da região é do tipo 4bTh e 4cTh, apresentando curva térmica sempre positiva; dias curtos secos; índice xerotérmico variando entre 0 e 200; período seco de até 8 meses consecutivos e duas estações distintas bem marcadas: uma seca e outra chuvosa.

Em geral, na região as temperaturas variam, durante o dia, de mínimas de 25 °C até máximas de 28 °C. É raro as temperaturas ultrapassarem os 35 °C na região litorânea, ao contrário do que ocorre no sertão cearense. A média pluviométrica da região é de 1020 mm/ano e a temperatura anual média de 27°C O regime de chuvas é controlado por uma estação seca, de junho a dezembro, e outra chuvosa, com aproximadamente 75% das precipitações entre fevereiro e maio (FUNCEME, 2013).

Segundo Moraes (2016, p 75): “O padrão climático de variação sazonal apontado por ambas as classificações é resultado da ação de dois sistemas sinóticos formadores de precipitações: a Zona de Convergência Intertropical (ZCTI) e o Centro de Vorticidade Ciclônica”.

Em relação aos postos pluviométricos proximais, disponíveis, uma série temporal completa pode ser observada nas Estações: São Gonçalo do Amarante e SGA Sede, Paracuru e Caucaia. Os postos Siupé, Pecém e Pitombeira possuem lapsos de medição que foram listados a seguir (Tabela 4).

Tabela 4 - Síntese dos postos pluviométricos da FUNCEME na área

Postos pluviométricos				
Código	Nome	Ano de Início	Ano de fim	Hiato Temporal
113	São Gonçalo do Amarante	1974	Atual (2019)	Completo
743	São Gonçalo do Amarante SEDE	2010	Atual (2019)	Completo
742	Siupé	2009	Atual (2019)	Julho-Setembro 2010
156	Pecém	1988	2016	1988;2003;2015;2016
273	Pitombeira	2000	2014	Diversos entre 2006 e 2014
109	Paracuru	1977	Atual (2019)	Completo
38	Caucaia	1973	Atual (2019)	Completo

Fonte: Organizado pelo autor, baseado em Funceme (2019).

4.5 Hidrografia superficial

Na parte sul, ocorrem uma grande proficiência de canais de drenagem, em geral estreitos e pouco profundos, basicamente, intermitentes, dos quais se destaca o rio Cauípe. Além de outros riachos, o referido setor apresenta algumas pequenas lagoas sazonais. Já à norte, em consonância com as variações do terreno, sendo esse mais arenoso, tem-se a diminuição do número de riachos drenando o setor. O número de lagoas, também, diminui, contudo, tem-se, na porção sul da área, lagoas bastante representativas por conta da área do seu espelho d'água, destacando-se entre essas a lagoa do Gereraú, situada no setor sul do segmento, com uma superfície de 280 ha, e a lagoa do Bolso, localizada no setor central.

As maiores planícies fluvio lacustres encontradas na área são formadas pelo rio Cauípe, riachos Guaribas, Matões e Aníl. O rio Cauípe e o Riacho Matões correlacionam-se com a formação do lagamar do Cauípe e a lagoa formada na foz do rio Cauípe. O riacho Guaribas, segundo (CEARA 2013) “...é formado a partir do escoamento das águas do lagamar do Gereraú, lagoa formada pelo acúmulo das águas de alguns canais de drenagem, que convergem para a bacia da lagoa”.

4.6 Série histórica do monitoramento de poços pela COGERH

A Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará, após o ano de 2015 começou a instituir diversas ações de monitoramento e regularização dos recursos hídricos litorâneos,

sobretudo após um relatório executado neste mesmo ano, coordenado pela Gerência de Estudos e Projetos da companhia intitulado: Avaliação hidrogeológica quali-quantitativa do campo de dunas Pecém/Paracuru, no Estado do Ceará. Com a crescente demanda por instrumentos que permitissem a correta gestão do aquífero, a COGERH passou a monitorar (tabela 5) 50 poços das comunidades e usuários locais, bem como, iniciou-se a construção nos anos 2017 e 2018 de uma bateria de poços que permitissem um abastecimento complementar para a região, sobretudo com finalidade humana e industrial. Estas duas baterias possuem 38 e 35 poços, e são situadas no CIPP (nas proximidades do reservatório apoiado) e na Taíba/Siupé, onde uma crescente demanda local levou a companhia supracitada a adquirir uma área e para o empreendimento.

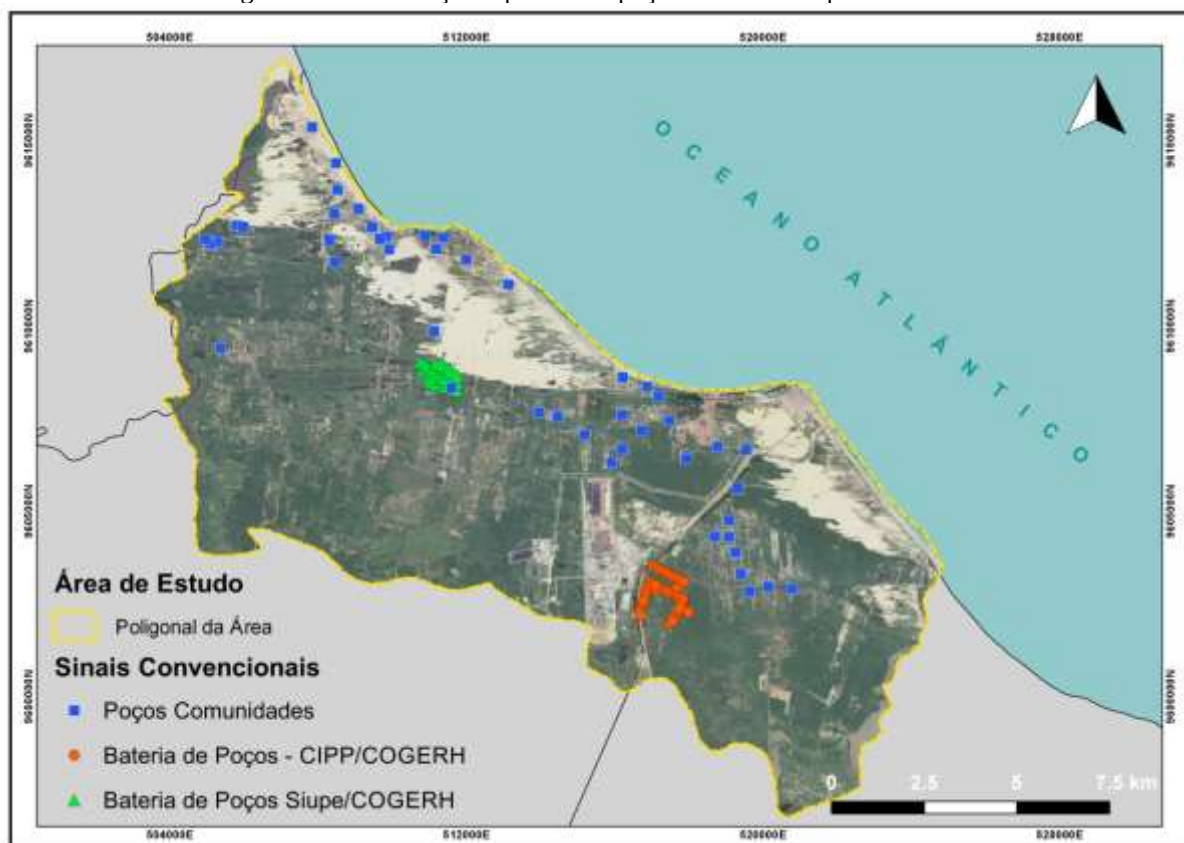
Tabela 5 - Síntese dos poços monitorados pela COGERH

Poços Monitorados			
Local	Início		Último
			Número de dados
Comunidades locais	Abril	2017	Agosto 2019
Bateria de abastecimento CIPP	Janeiro	2017	Agosto 2019
Bateria de abastecimento Taíba	Outubro	2018	Agosto 2019

Fonte: Organizado pelo autor, com base em dados da COGERH (2019).

A distribuição espacial destes poços contempla a área de estudo em quase sua totalidade, tendo uma orientação com leve tendência para o centro-norte da área, sobretudo em função da maior ocorrência de poços distribuídos nestas localidades e sua representatividade do aquífero Dunas (FIGURA 16).

Figura 16 - Distribuição espacial dos poços monitorados pela COGERH



Fonte: Autor, com base nos dados da COGERH e imagem do satélite Landsat.

5. METODOLOGIA

5.1 Sensoriamento remoto

A utilização de imagens de satélite foi empregada com duas finalidades: Classificar o perfil vegetado e uso ocupação de solo para obtenção de valores compatíveis com a infiltração no balanço hídrico e avaliar o comportamento dinâmico da Lagoa do Gereraú, uma vez que este representa importante corpo hídrico cuja dinâmica influencia na área.

O primeiro estudo, levou em conta a técnica da classificação supervisionada, através do método de amostragem para delimitação das classes. Esta técnica considera uma área, na forma de pequenas amostras, no espaço de atributos ao redor do conjunto de treinamento, um algoritmo considera um intervalo de valores, dentro de cada categoria na área de treinamento, definidos como valores mínimo e máximo para cada banda espectral.

Para o método, são necessárias informações físicas, como o valor máximo de capacidade de água disponível no solo (CAD), entendida como a máxima quantidade que um determinado solo tem de reter água na sua forma líquida.

Para a avaliação da Lagoa do Gereraú, foi usada uma interpretação visual, com base nas imagens históricas disponíveis na plataforma Google Earth, adotando a série temporal de melhor resolução e, filtrando-a, nos anos de maior interesse no balanço hídrico, sobretudo, usando os anos de menor e maior recarga até 2017. Foi ainda identificada, para essa análise, a verificação das modificações do padrão de espelho da água dentro do ano de 2017.

5.2 Monitoramento manual da hidrodinâmica

Para esta etapa, foram utilizados os dados coletados através da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH). Inicialmente, o volume de dados tratava-se de 105 poços, divididos entre poços monitorados de usuários locais e poços construídos com recursos estaduais para abastecimento humano e atividades industriais diversas. Os poços utilizados inicialmente foram apenas os 50 monitorados nas comunidades, já que bateria de abastecimento do CIPP em função de seu uso controlado e dados de vazão obtidos de maneira sistemática, indicaram condição de fluxo e exploração, bem como previsão de rebaixamentos locais. Os dados da Bateria da Taíba, por conta de sua implantação recente, não foram usados.

Todos os dados utilizados foram obtidos por medidas diretas em campo por técnicos da COGERH, com coletas mensais e elaboração de boletins e implementação de um banco de dados controlado por a Gerência de Estudos e Projetos.

O levantamento das coordenadas planas dos poços de monitoramento foi efetuado utilizando-se GPS (modelo GARMIN eTrex 30) bem como as altimetrias, sendo estes últimos corrigidos a partir de criação de uma superfície equipotencial que será tratada a seguir.

Para aferição dos níveis d’água foi utilizado um medidor elétrico de nível d’água da marca Hidrosuprimentos (FIGURA 17). Assim, conhecendo-se a cota altimétrica da boca do poço, a simples subtração da medição da profundidade fornece a cota altimétrica da superfície potenciométrica naquele poço.

Figura 17 - Leitura dos níveis piezométricos dos poços na bateria do CIPP



Fonte: Autor, 2019.

5.3 Tratamento de dados da série monitorada

Nas séries históricas pode ocorrer interferência nas medições não ocasionadas pela recarga subterrânea. Healy e Cook (2002) mostram que bombeamento nas proximidades ou no próprio poço, variação da pressão barométrica, presença de ar entre a frente de umidade e o nível estático, entre outros, ocasionam variações nos níveis em curtos períodos de tempo. Para diminuir os ruídos das medições no presente trabalho, utilizou-se uma plotagem visual em área e remoção dos pontos visualmente discrepantes, sendo estes: aqueles em que a variação (positiva ou negativa) era diferente do padrão observado nas épocas de recarga e descarga natural e, aqueles em que haviam níveis estáticos anômalos aos poços das áreas circunvizinhas, demonstrando a possibilidade de: interferência externa, leitura equivocada ou outro fator não controlável.

5.4 Caracterização dos parâmetros hidráulicos

Nesta etapa, foram utilizadas técnicas para obtenção e interpretação dos parâmetros hidrodinâmicos que possuem maior relevância na caracterização dos aquíferos. De maneira geral, podemos entender que esses são:

- Condutividade Hidráulica,
- Transmissividade,
- Porosidade específica e
- Armazenamento específico;

Estes últimos dois, por se tratar de uma área de aquíferos livres, foram considerados como de valores similares, isso é, o armazenamento específico, sem a presença de um coeficiente de compressibilidade, se comporta igual (em termos numéricos) à porosidade efetiva.

Para um melhor entendimento das etapas e processos envolvidos na obtenção destas variáveis esse tópico encontra-se particionado por procedimento metodológico envolvido.

5.4.1. Caracterização da condutividade hidráulica (K):

Para obtenção de valores condizentes com a condutividade hidráulica de cada fração da região estudada, buscou-se uma contextualização com os dados bibliografados e uma correlação empírica indireta através de geofísica (BRAGA, 2006) com uso de dados levantados previamente por COGERH (2012).

5.4.1.1 Relação com a resistividade elétrica do solo

Essa técnica foi inicialmente desenvolvida por Braga (2006), o mesmo sugere que existe uma relação direta entre os parâmetros: Condutividade elétrica e condutividade hidráulica. O autor supracitado, após inúmeros ensaios de campo e laboratório, relacionando ambos parâmetros, sugere uma equação para estimar a condutividade hidráulica (K) através do valor base de resistividade real (p) da camada saturada (equação 8).

$$K = 9^{-10} - \rho^{4,585} \quad (\text{eq.8})$$

Em certas situações não ocorre relação direta entre esses parâmetros, pois a resistividade dependerá não somente do número de vazios, tornando possível a relação direta, mas também da natureza química dos grãos. Portanto, essa técnica deverá ser usada sempre como complementar.

Para o uso dessa técnica, foram utilizados 38 dados de SEV's executadas pela COGERH, no âmbito de seus trabalhos de pesquisa e gestão de aquíferos.

5.4.1.3 Cálculo da velocidade e vazão de escoamento:

Para obtenção aproximada dos volumes de contribuição do aquífero para os principais corpos hídricos superficiais, ou fluxo de base, foi utilizada a formulação proposta por *Darcy*, onde o modelo calibrado fornece os valores de condutividade hidráulica (K), a área da seção molhada pode ser obtida através do produto entre o comprimento de uma linha de carga observada pela espessura molhada obtida pela diferença da cota à base do aquífero e, por fim o gradiente que representa o quociente entre a diferença de carga e a distância entre as duas cargas arbitradas .

5.4.2. Caracterização da porosidade efetiva por *Biecinski* (1960)

Este parâmetro pode ser obtido por diversas metodologias distintas, a maioria, através de ensaios *in situ* dos quais exige-se uma disponibilidade grande de recursos e tempo para uma boa caracterização da área. No presente trabalho, esses dados foram obtidos a partir de duas metodologias distintas, usando-se parâmetros indiretos com confiabilidade inferida a partir de conhecimento prévio da geologia local. Desta forma, a porosidade efetiva foi adquirida a partir dos valores da condutividade hidráulica usando *Biecinski* (1960) e por meio da caracterização geológica da área estudada e correlação com valores previamente tabelados.

No cálculo da porosidade específica do aquífero utilizou-se a equação de *Biecinski*, onde correlaciona-se a condutividade hidráulica (K) em metro por dia, com a porosidade efetiva adimensional (equação 9).

$$S_y = 0,117\sqrt[7]{K} \quad (\text{eq.9})$$

5.5 Balanço Hídrico

Para elaboração do balanço hídrico pelo método de *Thornthwaite* foi necessária a determinação dos parâmetros envolvidos no mesmo sendo, a obtenção destes feitas de maneira sistemática seguindo uma rotina de processos que serão melhores descritos abaixo.

5.5.1 Pluviometria

A primeira fase consistiu-se na seleção dos postos pluviométricos que contemplassem uma série histórica representativa e localização privilegiada, dessa forma foram selecionadas as seguintes estações (TABELA 8):

Tabela 6 – Distribuição temporal dos poços utilizados

Postos pluviométricos				
Código	Nome	Ano de Início	Ano de fim	Hiato Temporal
113	São Gonçalo do Amarante	1974	Atual (2019)	Nenhum(completo)
109	Paracuru	1977	Atual (2019)	Nenhum(completo)
38	Caucaia	1973	Atual (2019)	Nenhum(completo)

Fonte: Baseado em dados da FUNCEME, 2019.

Dada a seleção destas estações, fora feito um processo de interpolação e distribuição de isoietas. Para essa interpolação tomou-se o cuidado de executar o procedimento entre os anos de interseção das séries temporais, isto é, de 1977 e 2018 para as estações de São Gonçalo do Amarante, Paracuru e Caucaia.

Os dados de temperatura foram adquiridos utilizando o programa CELINA (2007), desenvolvido pelo Laboratório de Climatologia do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Ceará, que faz uso de equações características e regressão linear.

5.6 Modelo Geológico Conceitual

Para construção do modelo geológico conceitual utilizou-se os conhecimentos pretéritos e as novas interpretações das camadas geoeletricas, bem como dados adquiridos em visitas de campo, tal como existência de afloramentos de rochas cristalinas e níveis potenciométricos que caracterizassem o armazenamento do aquífero.

É possível acrescentar que do ponto de vista do modelo, a utilização de dados geofísicos foi primordial para a obtenção do posicionamento correto (altimétrico e estratigráfico) do cristalino, uma vez que para a modelagem, dependemos deste condicionante.

Desta forma, utilizou-se os dados disponíveis para a criação dois modelos: Um modelo de malha irregular, para a área do CIPP, da qual deveria ser extraído um modelo conceitual multicamadas e, um modelo de malha regular, do qual, deve ser simulado todo modelo de numérico de fluxo.

Vale citar que nenhum modelo incluiu a base cristalina para simulação dos modelos, uma vez que esta não constituiu fundamentalmente caminho preferencial de escoamento (fluxo=0)

e, a título de caracterização das cargas as camadas sedimentares são, para este caso, representativas.

5.6.1 Modelo geológico de área reduzida

Esse modelo apresenta maior grau de sofisticação em relação as informações disponibilizadas. Com cada valor interpretado e a topografia adquirida em modelo equivalente, conforme preconizado, foi possível obter o topo de cada camada através da subtração simples dos valores relativos das contrapondo as cotas dos pontos de levantamento geofísico, isso é, as altitudes subtraídas das profundidades de cada topo de camada geolétrica interpretadas.

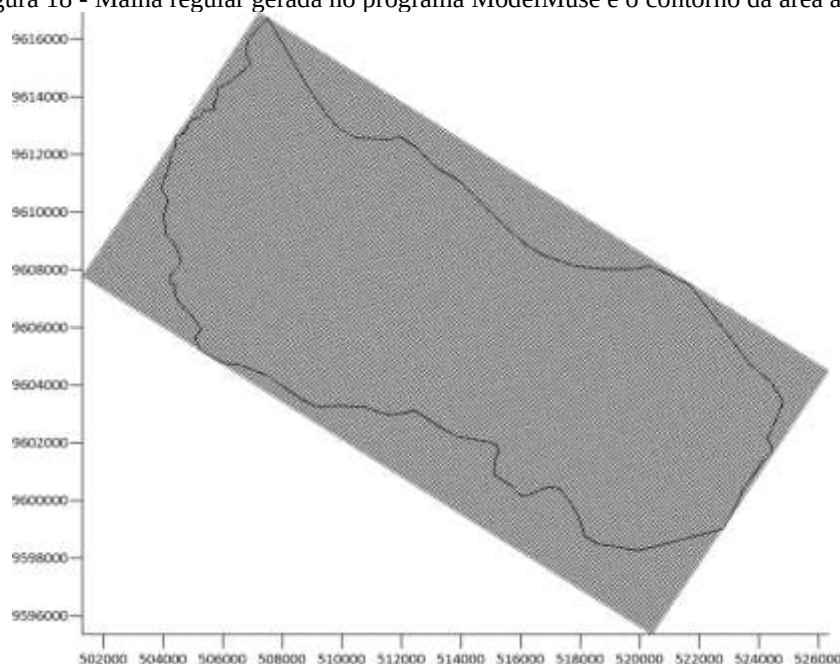
5.7 Modelo Numérico de fluxo

Para a criação do modelo, foi adotada uma abordagem convencional com os algoritmos do Modflow 2005, desenvolvido pelo serviço geológico norte americano, em sigla local, USGS. Desta forma o modelo usado possui as seguintes características:

- Área da célula: 100 m x100 m;
- Camada 1(Dunas): Elevação à base dunas;
- Camada 2(Barreiras):base dunas +10 m;
- Objetos fixos: Drenos, na Lagoa do Gereraú, nos rios Aníl, Cauípe, Oceano; Camada Paleodunas ao norte sobrepondo a camada 2 e camada aluvionar nos rios.

Quanto às dimensões tem-se: 23,5 km ao norte; 8,7 leste km; 14,5 km oeste; 22,4 km sul. Área discretizada total foi de 247,609 km² (22.878 km x 10.870 km) A área ativa ficou vinculada às formações sedimentares, rios, cristalino e oceano, contemplando condições de contorno ao longo de toda área delimitada (FIGURA 18).

Figura 18 - Malha regular gerada no programa ModelMuse e o contorno da área ativa.



5.8 Calibração de modelos hidrológicos em regime permanente

Na calibração em regime permanente, a variável tempo não é considerada, refletindo a condição de equilíbrio do aquífero e, neste caso, sem a influência de qualquer instrumento de rebaixamento do nível d'água, para ano hidrológico normal, considerado, 2017.

O principal fator de correlação utilizado no modelo foi a carga hidráulica observada e a calculada pelo software ModelMuse, utilizando poços de observação (*Observed wells*) através do RMS (*Root Mean Square*). Sua fórmula pode ser expressa pela equação 10:

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i^2} \quad (\text{eq.10})$$

O RMS é calculado tomando a média do quadrado dos erros para as observações e, em seguida, obtendo sua raiz quadrada. Isso tende a dar mais peso aos casos em que existem alguns valores extremos de erro.

Adicionalmente, o ajuste também teve como base a experiência local do comportamento observado das cargas, notoriamente inferidas como maiores nas regiões dunares, assim, a calibração buscou incorporar um aspecto visual ao tratamento numérico.

5.9 Obtenção de valores máximos e mínimos de carga em cenários limítrofes

Para essa abordagem, após o modelo devidamente calibrado usando os valores médios de cargas, foram utilizados valores adicionais de recarga para efetuar a calibração em um

cenário de ajustes com as cargas máximas e mínimas observadas na série temporal de monitoramento 2016-2017.

Neste sentido, as recargas foram acrescidas e decrescidas, proporcionalmente às recargas médias utilizadas no modelo calibrado, de modo que as cargas observadas nos piezômetros, utilizando o pacote de pós processamento HOB do ModelMuse.

Com as calibrações dos cenários limítrofes, foi gerado um modelo de elevação das cargas no surfer e subtraídos de um nível de referência, nesse caso, o nível do mar. Os encontrados nessa abordagem, refletem o volume acima do nível do mar, com isso, ao encontrarmos o produto do volume total pela área temos uma carga média, valor este que fora usado no cenário final para cálculo de reserva. As espessuras das camadas puderam ser obtidas através do artifício matemático da ferramenta Calc do programa Surfer por subtração simples de dois Grid's para fins comparativos.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

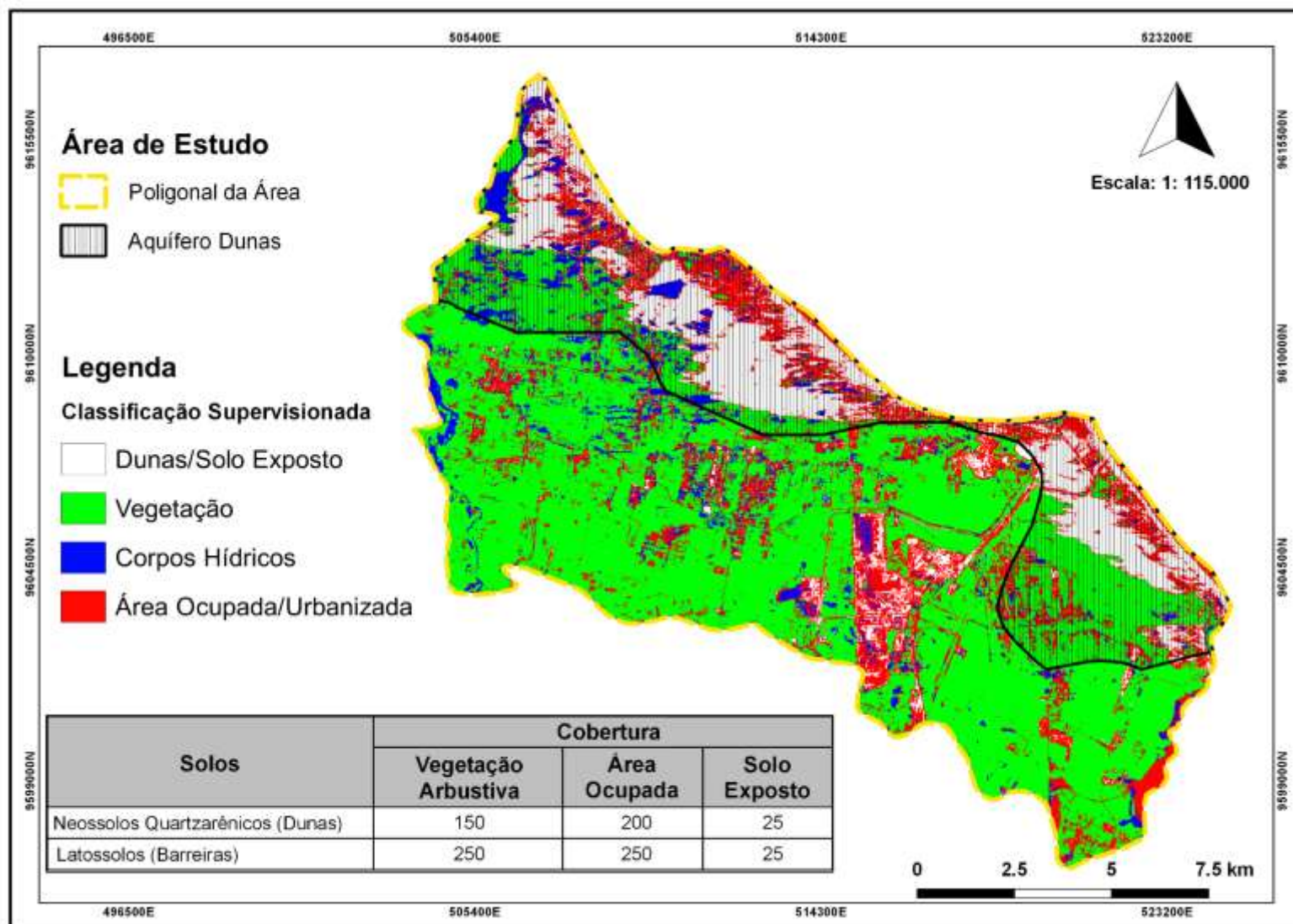
6.1 Sensoriamento Remoto

6.1.1 Uso e ocupação e CAD

Com base nas técnicas discutidas, o solo foi classificado como: Dunas/solo exposto, vegetação, corpos hídricos e área ocupada/urbanizada. Essa classificação permitiu entender como se comporta a exposição do solo à precipitação atmosférica, bem como auxiliou no entendimento de processos hidrológicos locais.

De modo geral o perfil de solo exposto concentra-se todo na região norte, nas dunas móveis, protegidas de atividade urbana. Nestes locais o solo exposto tem capacidade máxima de infiltração. A parte vegetada pode ser entendida sob duas óticas, na parte norte, dentro dos limites do aquífero dunas, o material sotoposto facilita uma infiltração, que embora não ocorra na mesma proporção do solo exposto, o valor de CAD é inferior ao da parte vegetada na Fm. Barreiras. O mesmo argumento é usado para a área urbana, quando na área do aquífero Dunas, seu valor de CAD é consideravelmente menor ao valor do aquífero Barreiras. Os valores de CAD e a distribuição do mapa de uso e ocupação pode ser visto na figura 19, tendo sido usados na obtenção do balanço hídrico como será visto adiante.

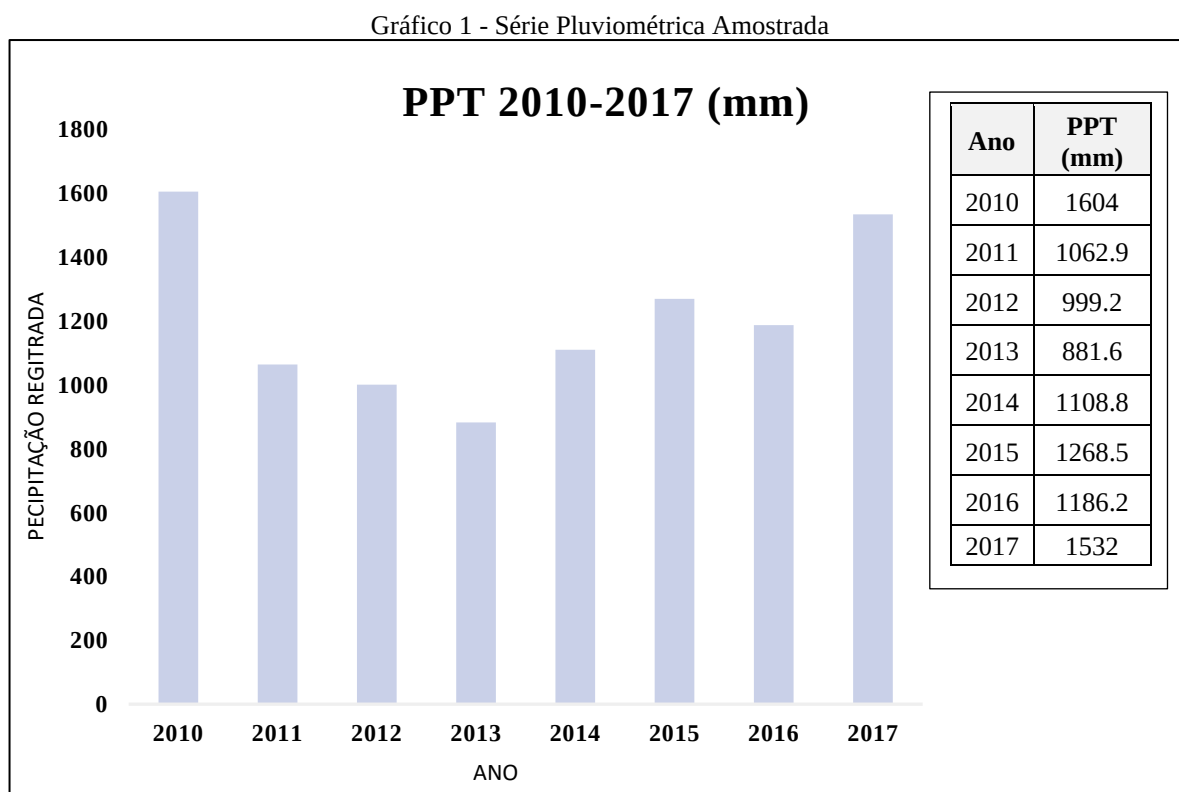
Figura 19 - Mapa de uso e ocupação da área de estudo



Fonte: Autor, com base em imagem Google Earth e software Qgis

6.1.2 Lagoa do Gereraú

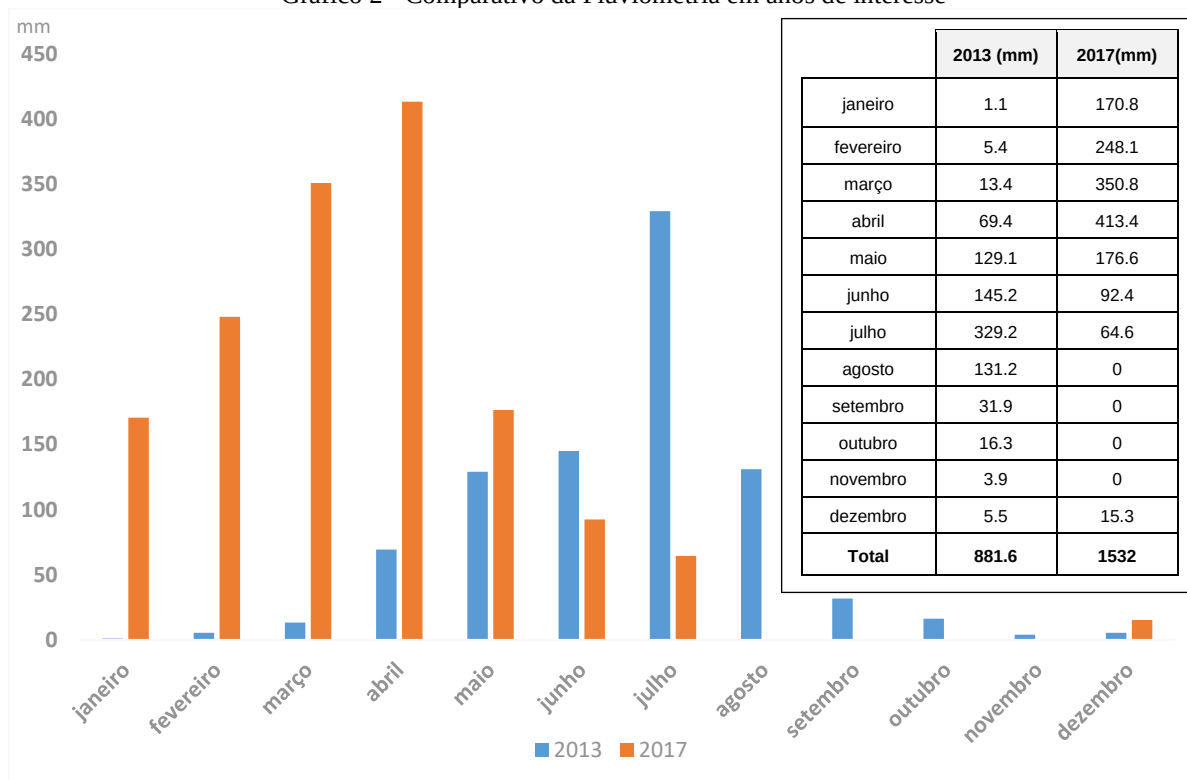
Inicialmente, a primeira triagem foi feita com base na análise da série de precipitação para o posto São Gonçalo do Amarante, tendo este como o mais próximo da área e mais confiável. Usou-se os anos de 2010 a 2017 visando as melhores resoluções de imagem, selecionando assim os anos de 2013 e 2017 (GRÁFICO 3).



Após isto, foi feita uma análise comparativa mensal entre os dois anos supracitados, comparando-os em amplitude e distribuição da ocorrência das chuvas. Segundo Funceme (2013): “O período chuvoso no Ceará, compreendido entre os meses de fevereiro e maio, ficou abaixo da média histórica em 2013 abaixo da média histórica em 2013 Este fato ocorreu porque as condições termodinâmicas do Oceano Atlântico tropical estiveram mais aquecidas ao norte e influenciaram o posicionamento desfavorável da Zona de Convergência Intertropical, que é o principal sistema indutor de chuvas no Ceará. Neste ano, choveu somente 378,3 milímetros no período. Em comparação com a média, que é de 607,5 mm, houve desvio de -37,7%”. Somado a isto, a distribuição mensal das chuvas ocorreu em máxima fora do pico natural da quadra chuvosa, sendo os maiores registros entre julho e agosto. Para explicar essa mudança na distribuição natural, é provável que neste período tenham ocorrido o fenômeno conhecido como

“ondas de leste”. Este pode ser explicado como ondas que se formam no campo de pressão atmosférica, na faixa tropical do globo terrestre, na área de influência dos ventos alísios, e se deslocam de oeste para leste, ou seja, desde a costa da África até o litoral leste do Brasil.

Gráfico 2 - Comparativo da Pluviometria em anos de interesse



Com base nestes gráficos, a análise temporal do espelho de água, bem como em comparação ao volume acumulado até a data da imagem tornou-se importante parte do entendimento do processo.

As evidências mostram que em anos de baixa precipitação ocorre uma redução significativa da área do espelho d'água, embora a parte norte da lagoa, próxima à borda do aquífero, encontre-se com os contornos e cargas preservadas. Outro fato que é importante ressaltar é que dentro do mesmo ano, como evidente em 2017, após a queda do aporte chuvoso a lagoa tende a diminuir seu espelho de água, situação parecida à discutida acima, mantendo-se as cargas na parte norte. É possível que exista contribuição superficial à montante, contudo, tendo em visto que esta contribuição e o volume aportados na lagoa não seriam suficientemente grandes para manter as cargas durante todo ano sem secar, sobretudo imaginando que a evapotranspiração, conforme bibliografia, é acima de 1,1 metro, é provável que exista uma contribuição subterrânea do aquífero para a lagoa.

Figura 20 – Monitoramento temporal da lâmina d’água na Lagoa do Gereraú



Fonte: Autor, com uso de imagens Google Earth

6.2 Flutuações dos níveis piezométricos na série observada de dados tratados

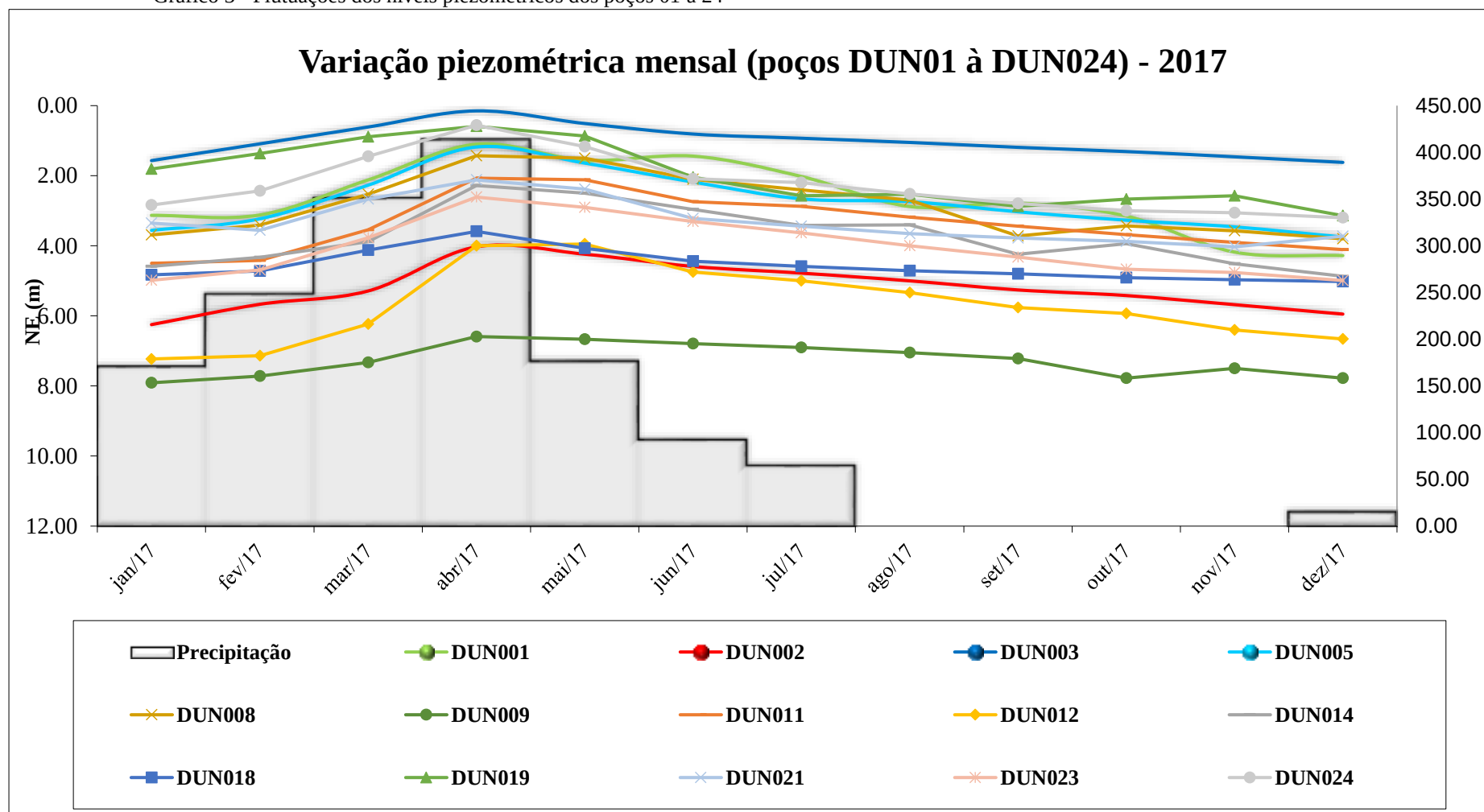
Os níveis piezométricos monitorados entre março de 2016 e Fevereiro de 2019 demonstraram um comportamento de flutuações similar ao esperado em aquíferos livres em regiões pouco impermeabilizadas, isso é, as respostas de subida e descida dos nível ocorrem proporcionalmente às recargas pluviométricas, para exemplificar essa tendência, a figura 32 mostra as oscilações dos níveis à precipitação na estação São Gonçalo, localizada na área de estudo e com dados consistentes para a escala de observação trabalhada.

Dentro da maior margem de certeza dos dados, escolheu-se o ano de 2017, em uma série mensal contínua de monitoramento. Alguns valores mereceram cuidado adicional, usando como margem para filtro, a variação anual muito acima da média, o posicionamento.

Tendo a linha de costa como o nível de base referenciado, a maior carga hidráulica observada foi de 30,927 metros em junho de 2017 no poço DUN48 e a menor carga, está no poço DUN33, em dezembro (ANEXO A).

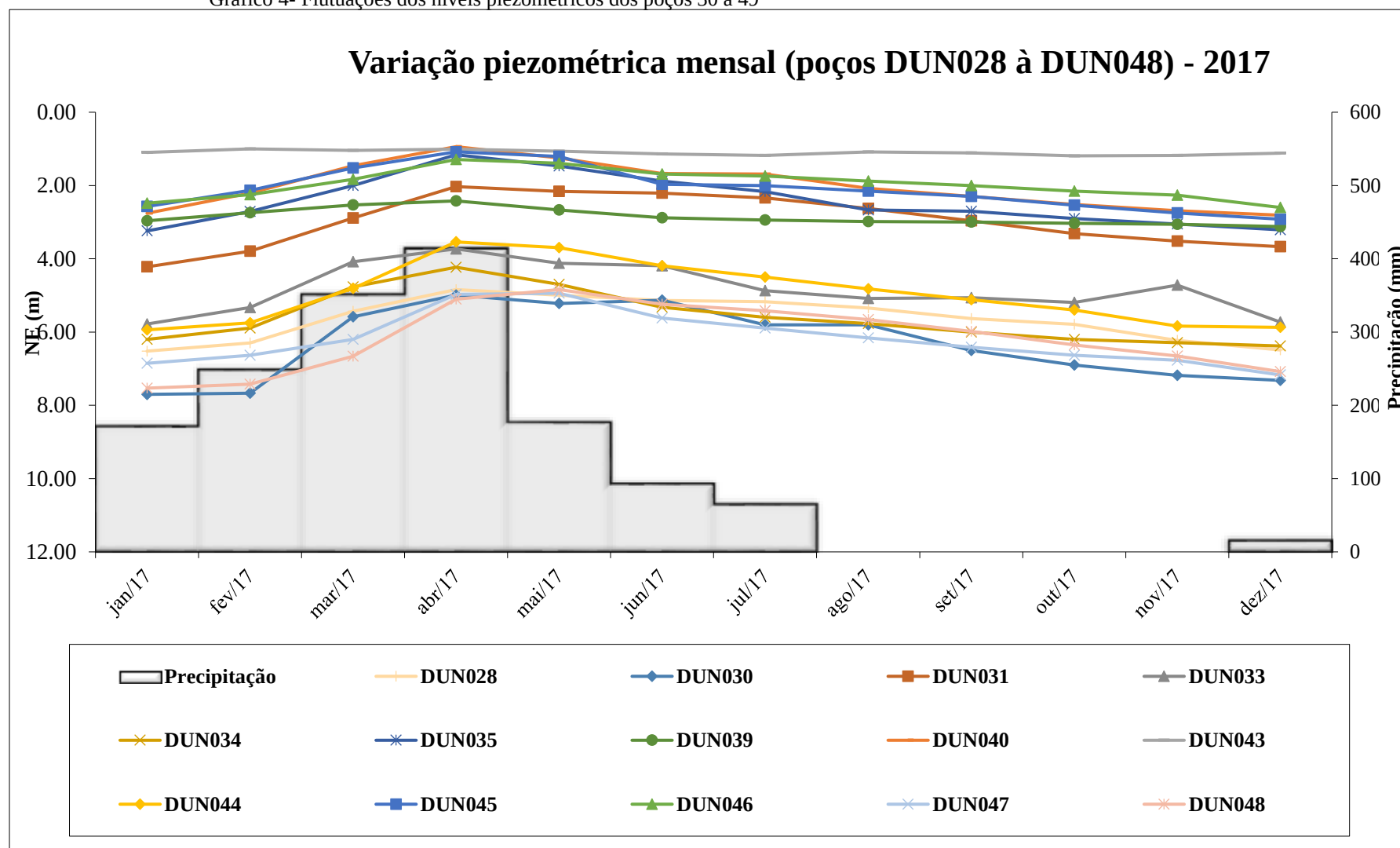
De modo geral, para o aquífero como um todo, se observou uma tendência de níveis mais rasos em abril e mínimos em dezembro do mesmo ano. Para uso do modelo, os valores foram usados como média, representativos do período anual.

Gráfico 3 - Flutuações dos níveis piezométricos dos poços 01 a 24



Fonte: Autor, com base em dados da COGERH

Gráfico 4- Flutuações dos níveis piezométricos dos poços 30 a 49



Fonte: Autor, com base em dados da COGERH (2019)

A recarga dos níveis foi melhor observada quando utilizada a técnica do método da diferença de nível potenciométrico obtenção dos valores de Δh se dá a partir das médias mensais de nível estático obtidas no ano hidrológico, utilizando a diferença entre o valor mínimo (observado na pré-estação ou, ainda, na estação chuvosa) e o valor máximo (máxima recarga do período).

O monitoramento dos níveis tem mostrado que o tempo de resposta dos valores máximos e mínimos varia poço a poço, embora a tendência de variação permaneça similar. Para esse cálculo fora usada a amplitude temporal entre os meses de dezembro e abril, para os anos de 2016 a 2017 e dezembro a maio.

Tabela 7 - Variação da altura piezométrica entre os meses de nível máximo e mínimo.

2016 -2017							
ID	Mínimo (m)	Máximo (m)	$\Delta h(m)$	ID	Mínimo (m)	Máximo (m)	$\Delta h(m)$
DUN001	1,10	4,43	3,33	DUN028	2,60	4,97	2,37
DUN002	4,03	6,19	2,16	DUN030	0,84	3,11	2,27
DUN003	0,15	1,77	1,62	DUN031	4,99	7,57	2,58
DUN005	1,18	2,27	1,09	DUN033	3,60	5,89	2,29
DUN008	2,82	4,89	2,07	DUN034	3,73	5,78	2,05
DUN009	1,43	3,57	2,14	DUN035	4,23	6,17	1,94
DUN011	6,40	8,47	2,39	DUN039	0,11	0,76	0,65
DUN012	2,07	4,39	2,32	DUN040	2,42	2,98	0,56
DUN014	2,55	5,31	2,76	DUN043	9,61	10,23	0,62
DUN018	1,31	2,68	1,37	DUN044	1,01	1,11	0,1
DUN019	3,59	4,90	1,31	DUN045	3,54	5,81	2,27
DUN021	3,47	4,73	1,48	DUN046	1,08	2,62	1,54
DUN023	2,60	3,65	1,05	DUN047	1,29	2,55	1,26
DUN024	2,61	4,98	2,37	DUN048	4,97	6,80	1,83
Média (m)				1,72			

Fonte: Autor, com base em piezômetros da COGERH (2019).

6.3 Precipitação e balanço hídrico por Thornthwaite

6.3.1 Série histórica

Comparando-se os três postos pluviométricos, com a série histórica de 41 anos, concluiu-se que os postos de Paracuru e Caucaia apresentam maiores valores de pluviometria em relação ao posto São Gonçalo, o que é esperado uma vez que a tendência natural de precipitação cai proporcionalmente à entrada rumo ao continente. Esta é uma tendência que pode ser explicada, entre outros fatores, em função de sua localização distanciada do oceano e das contribuições dos grandes rios e estuários, causando no caso e tela, uma redução histórica de 25% do precipitado anua em comparação aos postos litorâneos abordados.

Tabela 8 - Série histórica das precipitações pontuais

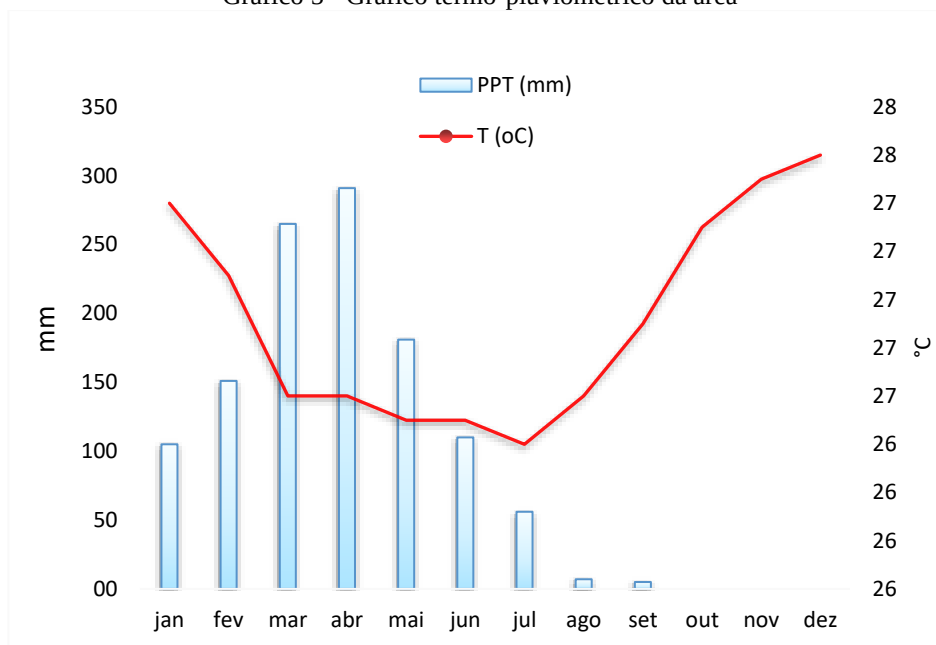
Valores das séries históricas de cada posto (1977-2018) em mm/mês			
Posto Pluviométrico	Paracuru(mm)	São Gonçalo (mm)	Caucaia (mm)
Janeiro	112,80	93,80	128,90
Fevereiro	149,40	149,10	187,50
Março	280,50	226237,00	315,90
Abril	305,70	,70	298,70
Maio	197,50	116,40	161,40
Junho	118,90	74,80	112,60
Julho	61,30	39,50	53,40
Agosto	6,80	4,30	12,40
Setembro	5,30	3,70	8,90
Outubro	1,10	2,20	3,40
Novembro	1,20	1,50	2,60
Dezembro	18,30	18,10	25,70
	1258,80	967,80	1311,40

Fonte: Autor, com base em dados FUNCEME 2019

Objetivo principal do balanço, a infiltração efetiva calculada corresponde à disponibilidade da água de precipitação que infiltrou e, portanto, é mensurada como a recarga subterrânea. As estimativas de recarga nessa natureza são modelos de hipóteses simplificadas, sobretudo por desconsiderar o *run off* da bacia e as contribuições laterais de outros corpos d'água. Inicialmente, com o uso do programa CELINA (2007), as temperaturas encontradas são iguais às do quadrante

sudeste, isso se deve ao fato da escala de interpretação do programa ser voltada para áreas regionais (GRÁFICO 7).

Gráfico 5 - Gráfico termo-pluviométrico da área



Fonte: Elaborado pelo autor com dados da FUNCEME (2019) e Programa CELINA (2019).

Na área, há um predomínio das precipitações durante os meses de março e abril, tendo as menores temperaturas em julho e as maiores em dezembro. Os índices térmicos e a ETP encontrada complementam os dados usados no balanço. A infiltração efetiva ocorre juntamente aos meses mais chuvosos, de março à maio, mesmo havendo nestes meses as mais altas precipitações, os valores de capacidade de campo já foram superados pelas primeiras chuvas, em janeiro e fevereiro, o que favorece uma infiltração, sendo a evapotranspiração real menor que a precipitação (TABELA 11). Uma vez que existe variação espacial da infiltração em função da área de exposição de cada aquífero, foi elaborado um balanço por cada um dos aquíferos da área.

i. Aquífero Dunas

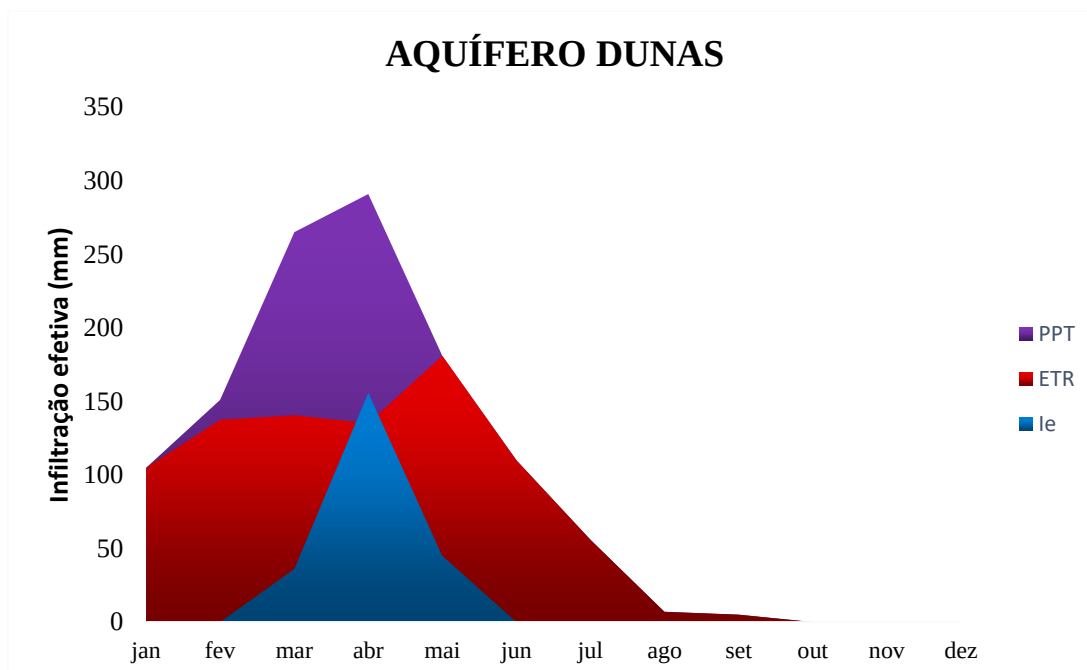
Uma vez evidente maior porosidade, bem como possuindo menor disponibilidade de áreas construídas, uma parcela considerável do aquífero recebe a água precipitada em forma infiltração, com baixo deflúvio, sobretudo em chuvas contínuas, de saturação constante. Dito isto a CAD do aquífero foi considerada como 75, um valor estimado médio para distribuição de solos expostos e a parcela de área ocupada na região pertencente ao aquífero. O balanço hídrico foi executado conforme o método de Thortwaite, usando dados previamente comentados (TABELA 11).

Tabela 9 - Balanço hídrico da série histórica para o aquífero Dunas

MÊS	T(média)	Im	Kn	ETP	PPT	PPT-ETP	C	ETR	Ie
	(°C)	(mm)		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
jan	27,40	12,83	1,06	159,90	105,00	-54,88	0,00	105,00	0,00
fev	27,10	12,62	0,95	137,50	151,00	13,46	13,46	137,54	0,00
mar	26,60	12,27	1,04	140,50	265,00	124,50	75,00	140,50	36,05
abr	26,60	12,27	1,00	135,10	291,00	155,91	75,00	135,09	155,91
mai	26,50	12,20	1,02	135,90	181,00	45,12	75,00	181,00	45,12
jun	26,50	12,20	0,99	131,90	110,00	-21,88	0,00	110,00	0,00
jul	26,40	12,13	1,02	134,00	56,00	-77,98	0,00	56,00	0,00
ago	26,60	12,27	1,03	139,10	7,00	-132,15	0,00	7,00	0,00
set	26,90	12,48	1,00	140,80	5,00	-135,85	0,00	5,00	0,00
out	27,30	12,76	1,05	156,20	1,50	-154,74	0,00	1,50	0,00
nov	27,50	12,90	1,03	157,50	1,20	-156,28	0,00	1,20	0,00
dez	27,60	12,97	1,06	164,30	18,50	-145,77	0,00	18,50	0,00
Im total=		149,90			1171,00			877,13	237,08

Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados da FUNCEME (2019) e Programa CELINA (2019).

Desta forma, a precipitação média da série histórica do balanço na região, demonstra um *superavit* hídrico e uma infiltração efetiva (GRÁFICO 8) entre os meses de março, abril e maio, conforme a série histórica, esses valores são em média de 237,00 mm.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados da FUNCEME (2019).

ii. Aquífero Barreiras

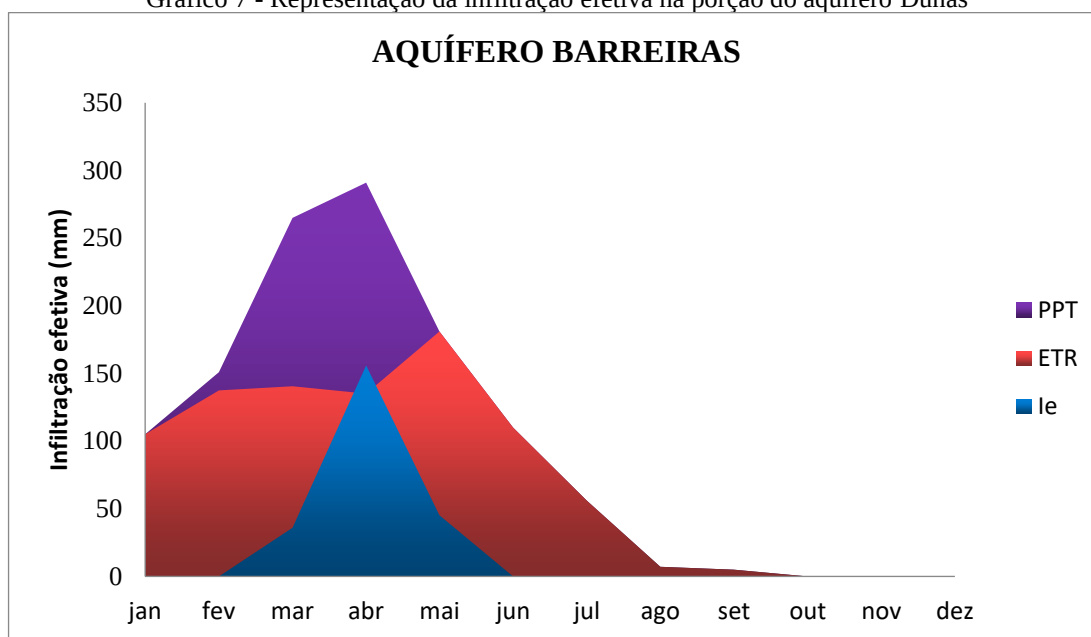
Diferentemente do aquífero Dunas, o Barreiras possui menor porosidade, bem como possuindo maior percentual de áreas construídas, é praticamente todo vegetado e seu solo, tende a reter mais água do que infiltra, diminuindo consideravelmente a parcela de infiltração, facilitando o escoamento superficial. Dito isto a CAD do aquífero foi considerada como 250, um valor estimado médio para as condições anteriormente expostas, gerando o produto de balanço histórico visto abaixo (TABELA 12)

Tabela 10 - Balanço hídrico da série histórica de precipitação para o aquífero Barreiras.

MÊS	T(média) (°C)	Im (mm)	Kn	ETP (mm)	PPT (mm)	PPT-ETP (mm)	C (mm)	ETR (mm)	Ie (mm)
jan	27,40	12,83	1,06	159,90	105,00	-54,88	0,00	105,00	0,00
fev	27,10	12,62	0,95	137,50	151,00	13,46	13,46	137,54	0,00
mar	26,60	12,27	1,04	140,50	265,00	124,50	124,50	140,50	0,00
abr	26,60	12,27	1,00	135,10	291,00	155,91	250,00	135,09	30,41
mai	26,50	12,20	1,02	135,90	181,00	45,12	250,00	181,00	45,12
jun	26,50	12,20	0,99	131,90	110,00	-21,88	0,00	110,00	0,00
jul	26,40	12,13	1,02	134,00	56,00	-77,98	0,00	56,00	0,00
ago	26,60	12,27	1,03	139,10	7,00	-132,15	0,00	7,00	0,00
set	26,90	12,48	1,00	140,80	5,00	-135,85	0,00	5,00	0,00
out	27,30	12,76	1,05	156,20	1,50	-154,74	0,00	1,50	0,00
nov	27,50	12,90	1,03	157,50	1,20	-156,28	0,00	1,20	0,00
dez	27,60	12,97	1,06	164,30	18,50	-145,77	0,00	18,50	0,00
149,90				1171,0			877,13	75,53	

Desta forma, a precipitação média da série histórica do balanço na região, demonstra um superavit hídrico e uma infiltração efetiva (GRÁFICO 9) entre os meses de março, abril e maio, conforme a série histórica, esses valores são em média de 75 mm.

Gráfico 7 - Representação da infiltração efetiva na porção do aquífero Dunas



6.3.1 Ano do modelo (2017)

Para ter uma estimativa média de precipitação *versus* infiltração foi analisado inicialmente o percentual histórico de infiltração da série pluviométrica, o que representou cerca de 20% no aquífero Dunas e 6% no aquífero Barreiras. A princípio o aquífero Paleodunas foi estimado como tendo infiltração similar ao dunas. Também se salienta que estes valores foram calibrados usando o modelo numérico bem como uma estimativa de infiltração por área de ocorrência espacial de cada aquífero.

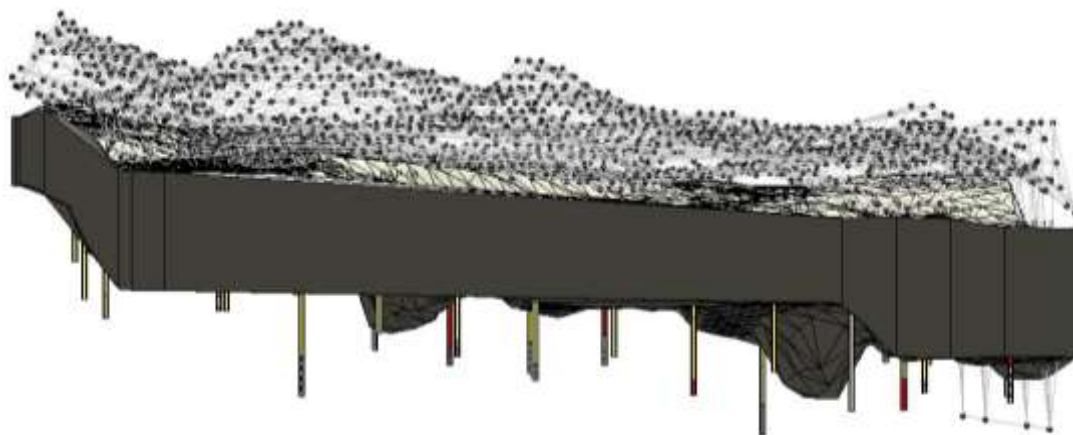
6.4 Modelo geológico conceitual

6.4.1 Modelo de área reduzida

Para o modelo tridimensional de área reduzida foi escolhida a região do da Bateria de poços do CIPP, dos quais dispunha-se de perfis construtivos e conhecimento prévio da área.

Nessa modelagem, executada com o uso do software GMS Aquaveo DEMO, os perfis litológicos são interligados por um processo de reconhecimento de materiais, cruzando dados de forma que se permite gerar os diversos horizontes geológicos da área em questão. O plano criado entre o modelo digital de elevação em forma de nuvem de pontos e as cotas individuais dos poços, bem como suas espessuras de camadas, permitem a visualização do comportamento 3D da geologia local (Figura 40).

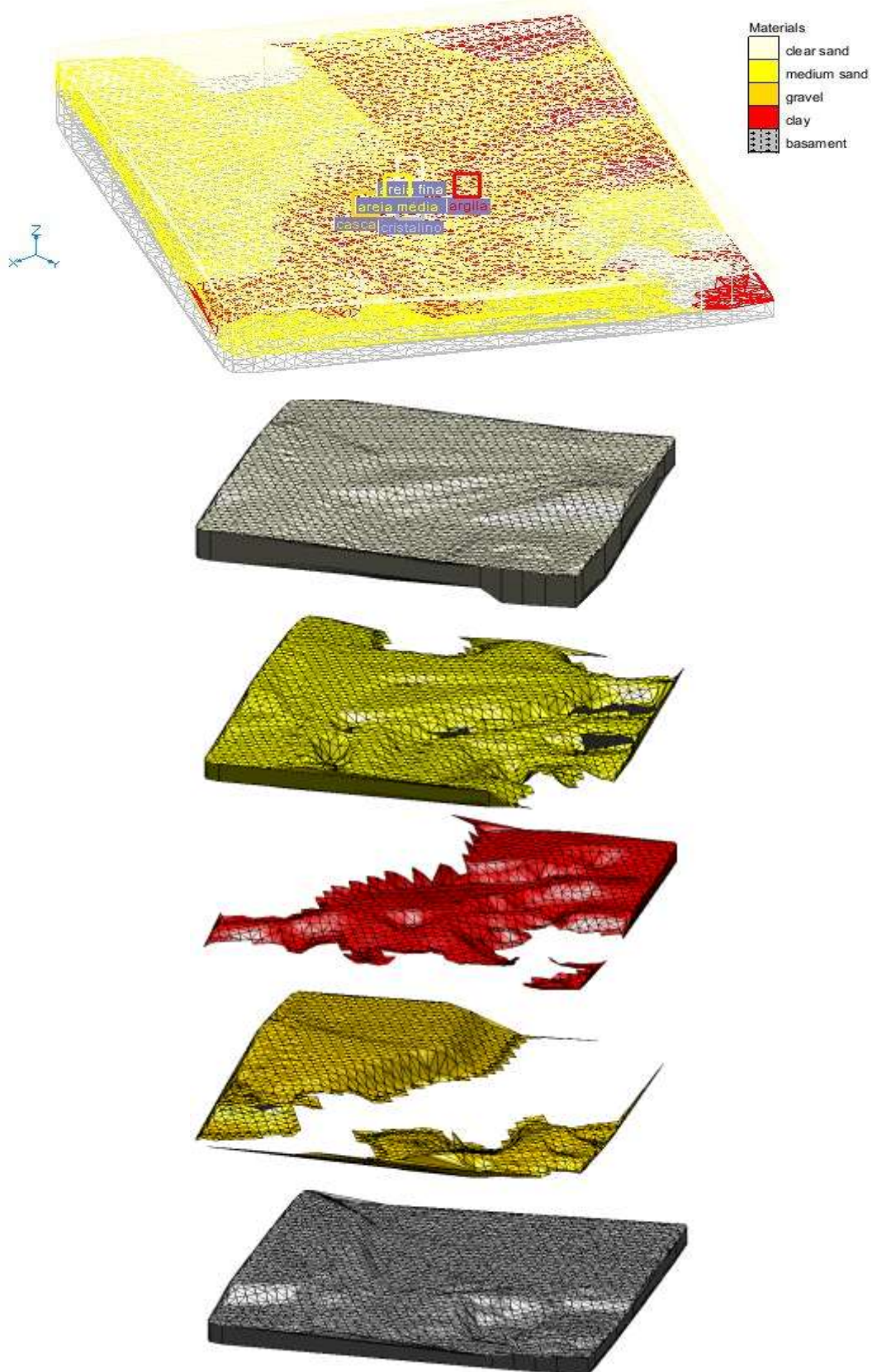
Figura 21 - Modelo digital de elevação, sotoposto por a camada dunas e poços construído



Fonte: Autor, 2019.

Neste modelo, a visualização das premissas básicas de acamamento sub-horizontal, continuidade de camadas e empilhamento seguindo à estratigrafia (Figura 41) foi observado de maneira mais adequada, o que permitiu usar algumas destas premissas para a criação dos modelos geológicos em áreas maiores, suavizando algumas das complexidades destes.

Figura 22 - Camadas geológicas sobrepostas em bloco diagrama



Fonte: Autor, 2019.

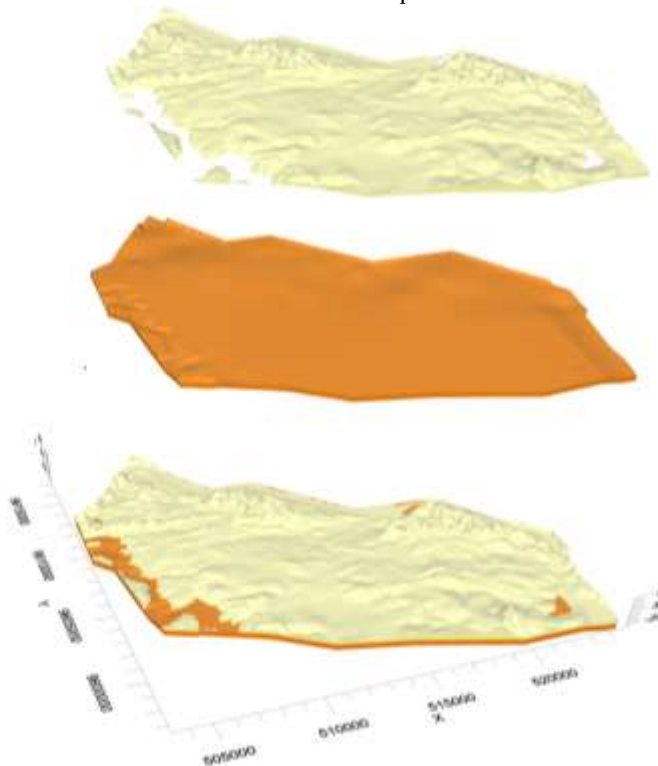
6.4.2 Modelo geológico simplificado da área

Com base nos dados adquiridos através da eletrorresistividade, tal qual preconizado, as interpretações das camadas mostram basicamente um sistema composto por quatro camadas sendo estas: Dunas não saturada, dunas saturada, Formação Barreiras e Cristalino.

O aquífero é definido como livre, de caráter sedimentar e com ligação direta entre o mesmo e a rede de drenagens presente na área. A região é composta basicamente por campos dunares, Fm. Barreiras e rochas do embasamento cristalino.

A princípio, o modelo de camadas foi disposto de forma a considerar tão somente os aquíferos dunas e barreiras (Figura 41), visando observar melhor a interdigitação das camadas.

Figura 23 - Modelo tridimensional dos aquíferos sedimentares na região



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

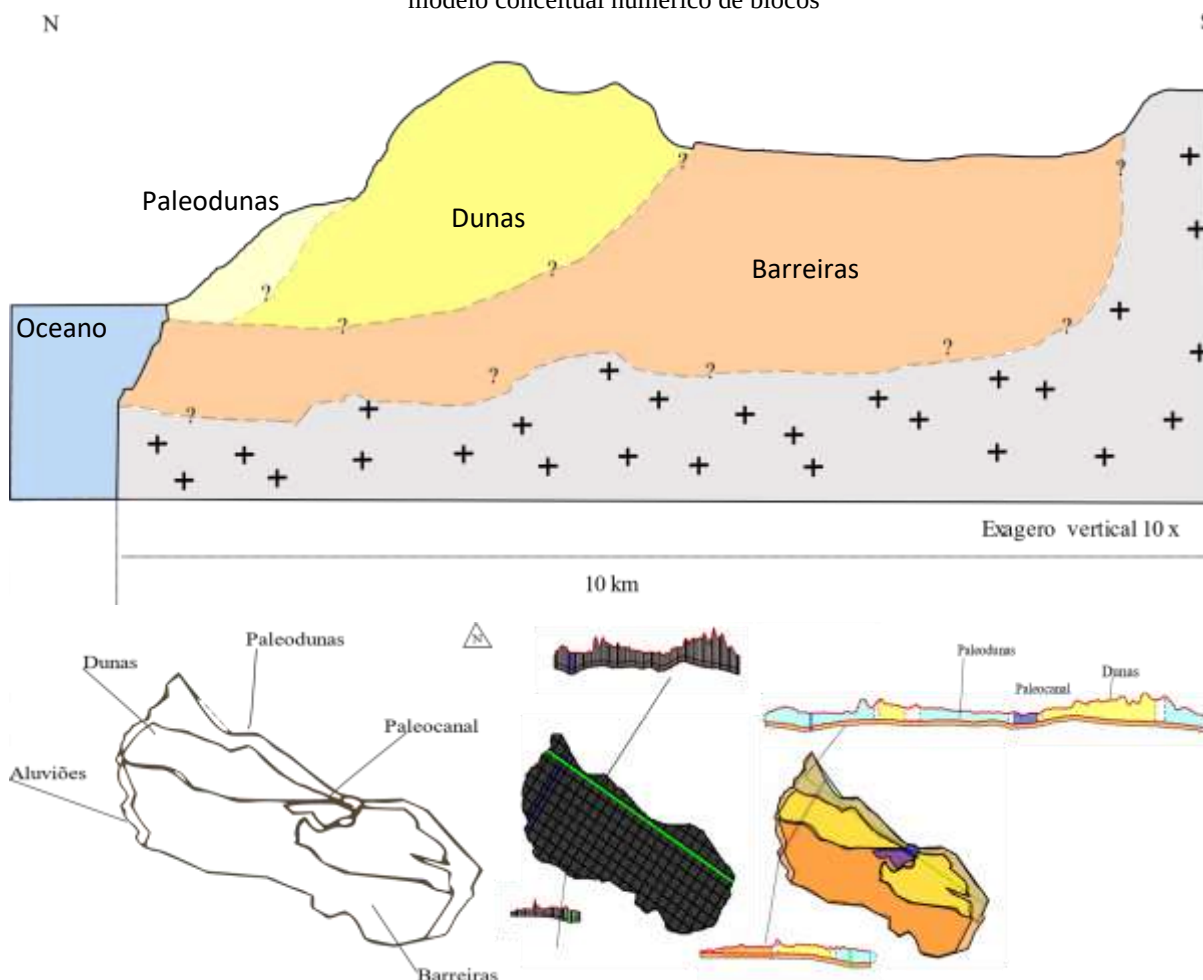
O modelo conceitual foi ajustado com base no mapa de domínios hidrogeológicos da CPRM 2003 e na tentativa de esquematizar uma deposição por estratigrafia de sequências tornando-a numa hipótese simplificadora.

Desta forma, buscou-se um modelo que contemplasse os princípios da estratigrafia, como continuidade lateral e gradualismo, em consenso à uma deposição diferencial correlacionada à mudança de depocentro, forma de arraste de grãos e morfologia. Basicamente,

a Fm Barreiras acomodou-se na região seguindo sua deposição em forma de paleocanais, tendo maiores níveis rumo ao continente onde o cristalino aflora e menores na região da plataforma continental. Este espaço deixado entre o nível de base da bacia e o topo da formação barreiras na faixa litorânea facilitou a deposição de sedimentos eólicos submetidos por arraste e saltação até serem barrados na zona de já mapeada pela CPRM, que viria a compor os aquíferos paleodunas e dunas.

Com base na análise prévia, percebeu-se que a utilização de um modelo de três camadas equivalentes na qual na porção mais à norte, no limite com o Oceano Atlântico, encontra-se o aquífero paleodunas, seguido por; Aquífero dunas, enquanto, sotoposta à estes e disposta lateralmente (em corte) rumo ao sul, se trata uma camada predominantemente representativa do aquífero barreiras (Figura 24).

Figura 24 - Representação em corte do modelo conceitual geológico de hipótese simplificadora e adaptação para modelo conceitual numérico de blocos



Fonte: Autor.

6.5 Condutividade hidráulica e porosidade efetiva

Em função da grande complexidade de atribuir valores representativos de condutividade hidráulica, foi efetuada uma comparação dos valores obtidos por meio de consulta bibliográfica e aqueles resultantes da correlação indireta com a eletroressistividade, no aquífero dunas, os valores encontrados ficam entre $3,33 \text{ E-4}$ e $3,64 \text{ E-3 m/s}$, enquanto o barreiras, ficou restrito à um único valor compilado de 3.36E-05 m/s .

Desta forma com média representada em 22% no Dunas e 14% no Barreiras, os valores foram adquiridos utilizando-se a relação empírica de *Biecinsk*, com base nos valores de condutividade hidráulica já abordados (Tabela 13)

Tabela 11 - Valores de referência das variáveis hidrogeológicas

	Método para obtenção dos valores K	K (m/s)	Sy (%) por Bielinsk
Dunas	Tratamento estatístico de dados geofísicos (Autor)	3.64E-03	27
	Bibliografia de pesquisas em áreas similares	3.33E-04	19
	COGERH, 2016 (separadamente)	1.20E-03	21
	Estimativa média	7.67E-04	22
Barreiras	Bibliografia de pesquisas em áreas similares	3.36E-05	14

Para a porosidade efetiva, os valores foram aferidos com os catalogados por Driscoll (1987) em função da ocorrência de materiais com propriedades físicas similares aos da região (Tabela 14). Essa iniciativa torna-se importante para uma análise comparativa com os valores obtidos por correlação da fórmula de *Bielinsk*.

Tabela 12 - Porosidades efetivas baseadas em valores encontrados por Driscoll (1987)

Litologia	Sy(%)	Correspondente local	Sy (%) médio de referência
Argila	1 - 10	Fm. Barreiras (Argilosa)	5
Areia	10 – 30	Fm. Barreiras/Dunas	15
Cascalho	15 – 30	Dunas	25
Arenito	5 – 15	Fm. Barreiras	7,5

A grande amplitude de valores na Fm. Barreiras se explica em função da heterogeneidade dos horizontes litológicos, onde Dunas e Paleodunas possuem melhores condições para fluxo e camadas argilosas e horizontes lateríticos. Salienta-se que a Formação Barreiras possui uma trama deposicional complexa, oferecendo, por exemplo, em alguns lugares paleocanais arenosos e cascalhosos que possuem altíssima condutividade hidráulica.

Para fins de uso geral da hipótese simplificadora, inicialmente partindo das grandezas médias abordadas, durante a fase de ajuste e calibração do modelo escolheu-se usar uma abordagem generalista em que se procurou fixar a ordem de grandeza da condutividade hidráulica na camada do aquífero Dunas em valores de $10E-4$ cm/s e $10E-4$ à $10E-5$ cm/s, para a camada do aquífero Barreira uma vez que isto encontra-se em consonância com os valores apresentados e a natureza das formações geológicas. Para as formações aluvionares e o aquífero Paleodunas, foram usados valores próximos aos do aquífero Dunas.

6.6 Hidrodinâmica do sistema-aquífero

6.6.1 Pacotes e Condições de Contorno do modelo para calibração

Para o modelo numérico foram usados os seguintes pacotes do *software* ModelMuse: RCH (Recharge), FHB, (Heads in FHB, Flow in FHB), DRAIN; Bem como os pacote de pós processamento HOB e Zone Budget. O uso de cada pacote se deu em função de uma condição de contorno específica, sendo assim, suas atribuições à mecânica do processo serão discutidas. Todas simulações usaram o passo de metro e segundos como unidades de comprimento e tempo, em ordem.

Primeiro, o pacote Recarga foi usado para simular um fluxo especificado distribuído na parte superior do modelo em da superfície do sistema aquífero. Sua função foi oferecer entrada de massa para o balanço. No MODFLOW, essas taxas são multiplicadas pela área horizontal das células às quais são aplicadas para calcular as taxas de fluxo volumétricas. Sua entrada se deu como objeto/polígono recobrimdo toda superfície da área.

O pacote FHB, ou em tradução literal “Fluxo e Limite de Cabeçote” permite ao usuário definir cargas e fluxos especificados de forma independente dos períodos de tensão e etapas de tempo no modelo. Este pacote foi usado na parte extrema do modelo para não permitir a entrada de água do cristalino à sul, sobretudo nas áreas não aflorantes, das quais já se disponha do pacote. Para fluxos especificados, a taxa de fluxo para uma etapa do tempo será a vazão média especificada para a etapa do tempo, nesse caso foi definido fluxo nulo (igual à zero) para a borda oeste ao sul da área, como condição de contorno cristalino. Para as cargas especificadas, o valor foi interpolado no final do intervalo de tempo.

Cargas especificadas no pacote FCH, foram aplicadas para as maiores drenagens que tendem a permanecer constantes ao longo do tempo, em condições pseudo-permantentes, sendo estas representadas por a Lagoa do Gereraú, cuja carga ficou definida em 16 mca.

Embora ocorram outras drenagens na área, como o Riacho Paú, estas ocorrem em sua maioria, de acordo com observações de campo, de forma sazonal, o que evidencia um aspecto transiente das mudanças do nível de base do aquífero e drenança, por isso, não permitindo seu uso em um modelo estacionário, dessa forma apenas os dois grandes rios (Anil e Cauípe) foram considerados no *input* do modelo, para esses e para o oceano fora utilizado uma condição de drenança com o módulo *Drain*. Inicialmente o limite norte no contorno com oceano embora possível de simular com carga conhecida igual à zero e, este cenário foi experimentado, estimou-se um melhor cenário com a utilização do módulo *Drain*, que equivale à uma condição do tipo 3, atribuindo uma drenança à toda carga acima do limite especificado e assim encontrando um fluxo que pode ser atribuído uma vazão, para o caso em tela, foi colocado um dreno com cota máxima igual à zero, assim, toda carga acima do nível do mar poderia ser drenado por este. Essa mesma lógica foi usada para os dois rios, usando cota de dreno igual à -2 metros abaixo da superfície do terreno.

Ademais, ressalta-se a utilização de uma camada com condutividade hidráulica diferencial, na parte central onde localiza-se a região da “Barra do Guaríbas” e Sede Distrital do Pecém. O uso desta camada, vai de encontro com as observações de campo, trabalhos pretéritos, consulta bibliográfica, sobretudo como preconizado por Martins *et al* (2012). Sua utilização tornou-se imprescindível no ajuste das cargas como será discutido a parte.

Os pacotes de pós processamento foram importantes para a calibração bem como obtenção das taxas de transferência hídrica entre as camadas. Essa última funcionalidade foi alcançada através da aplicação do pacote Zone Budget, criando zonas de balanço nas camadas aquíferas e a zona do Paleocanal. Também se utilizou as zonas de balanço nos principais exutórios do sistema aquífero de forma que se tornou possível diferenciar as vazões como será tratado logo a diante.

6.6.2 Calibração do modelo com base na análise das cargas hidráulicas

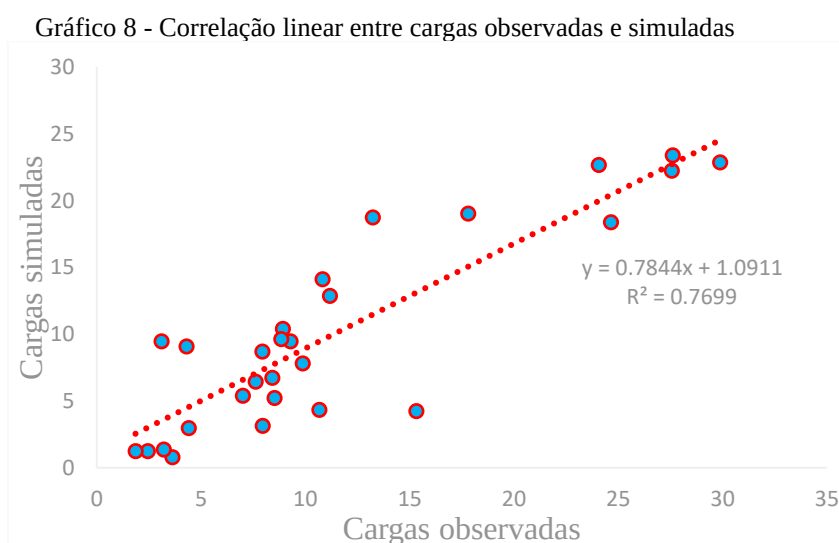
O modelo foi calibrado comparando as cargas hidráulicas (“cabeças de águas subterrâneas”) observadas com os níveis previstos dos poços simulados dentro da área abordada pelo modelo, inseridas com a condição de poços de observação HOB.

A aceitabilidade da calibração de um modelo geralmente é uma medida subjetiva, pois cada modelo tem objetivos diferentes e deve ser calibrado para diferentes condições. No entanto, existem alguns métodos geralmente aplicados para avaliar e interpretar a calibração do modelo usando medidas qualitativas e quantitativas.

Para a calibração do modelo, os parâmetros de recarga e condutividade hidráulica (K) foram modificados para a aproximação dos valores observados no mapa potenciométrico (GRÁFICO 8) e ajuste aceitável de RMSR. Este último método, embora seja uma forma de diminuir as incertezas da calibração, não deve ser levado estritamente como um fator único numérico, o bom senso do ajuste depende sobretudo do conhecimento hidráulico real da área, desenvolvido durante o modelo conceitual, o valor deste, para o modelo foi de 4,35.

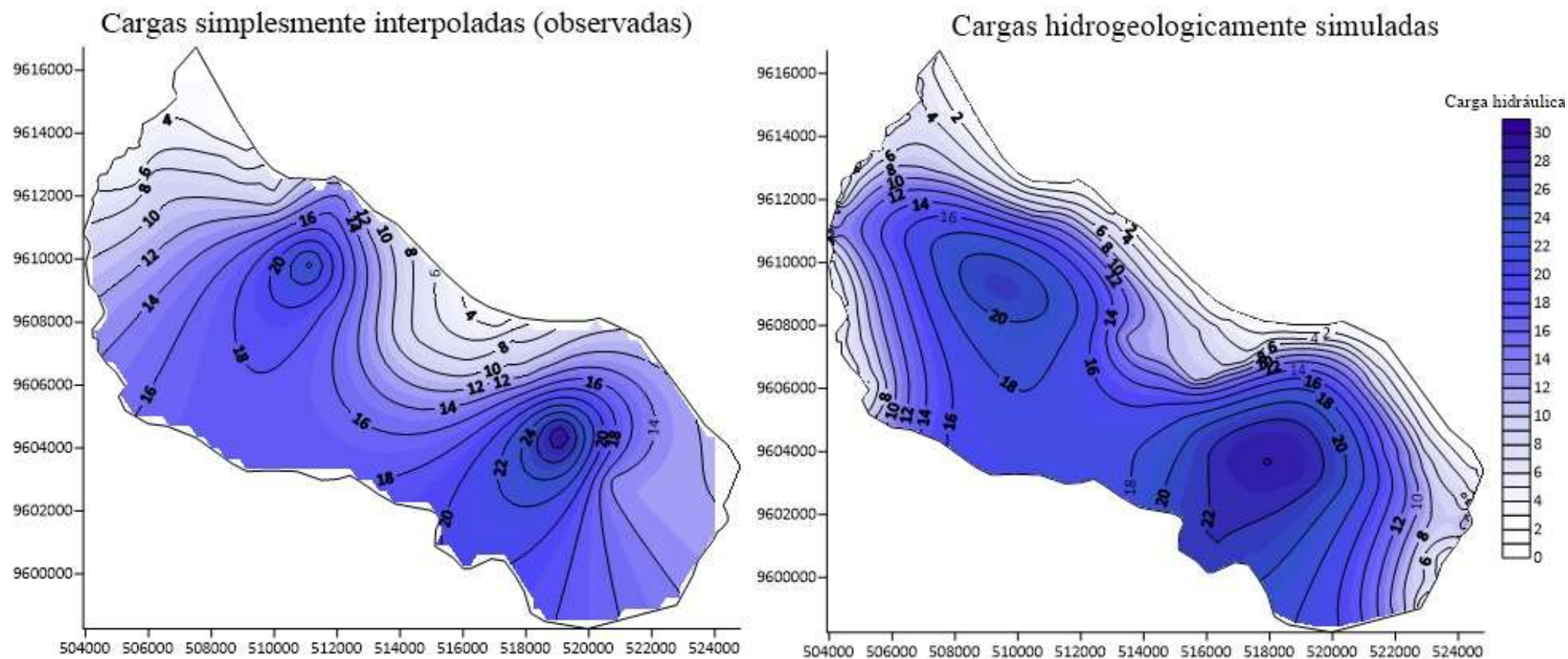
É possível analisar ainda o espalhamento dos valores e a tendência do ajuste conforme a reta de regressão gerada. Para averiguar a melhorar a calibração, usou-se o critério de associação entre cargas observadas e simuladas, ou seja, as elevações modeladas da carga hidráulica deveriam corresponder elevações observadas da mesma até um nível aceitável de precisão.

Tendo isto, o modelo ajustado em valores de K e recarga de acordo com a calibração, apresentou um coeficiente de correlação em cerca de 77% (Gráfico 10), o valor de ajuste linear é considerado razoável dada a aceitação de um modelo regional, dos quais os valores de topografia dos poços foram extraídos de forma indireta.



Em complemento à análise de sensibilidade de ajuste linear, foi feita uma indução na morfometria das mudanças de cargas com base no observado do mapa potenciométrico conceitual de fluxo gerado por kriggagem com as cargas monitoradas. A principal intenção destes ajustes foi executar, através da interação de K e recarga, uma subida das maiores cargas para os níveis correspondentes às dunas de maiores altitudes ao norte, assim provocando um contínuo processo de mudanças nas condições naturais para que a simulação fosse adequada e representativa dos processos locais (Figura 26).

Figura 25 - Comparativo entre o modelo observado e o simulado através da morfologia dos mapas potenciométricos



Fonte: Autor, com uso de softwares Sufer e Model Muse

Vale salientar que para o ajuste das cargas, a recarga ínfima na região do aquífero Barreiras foi essencial de aplicação, sendo assim, o impacto desta observação será discutido adiante. Os valores usados para o ajuste mostram as seguintes condições para os aquíferos (Tabela 13):

Tabela 13 - Valores utilizados no modelo numérico calibrado e respostas obtidas

	K (m/s)	Área da Unidade (m²)	Recarga (m³/s)	Recarga (m³/ano)	Total precipitado (m³/ano)	Infiltração da precipitação anual - Recarga efetiva (%)	Sy (%)
Dunas	1,25E-4	5.64E+07	1.35E-08	2.38E+07	6.61E+07	36	20
Paleodunas	1,50E-4	2.70E+07	8.09E-09	6.15E+06	3.16E+07	19	19
Barreiras	8,80E-5	8.46E+07	8.90E-10	3.42E+06	9.91E+07	3	16
Aluviões	1,80E-4	6.45E+05	9.71E-09	7.20E+04	7.56E+05	10	18
Paleocanal	9.00E-04	4.72E+06	8.90E-10	3.72E+05	5.53E+06	7	25
Área (m²)	1.79E+08						
PPT(m/ano)	1.17E+00						
PPT x Área (m³/ano)	2.09E+08						
Recarga (m³/ano Infiltrado)	3.38E+07						
Recarga (%Infiltrado)	16						

Embora a ocorrência do Paleocanal como meio hidraulicamente mais condutivo possa levar a uma associação proporcional de infiltração, sua ocorrência em área úmida, densamente ocupada, vegetada e com pequeno manto de cobertura argilosa valida sua baixa permeabilidade percentual em relação aos valores de precipitação anual.

6.6.3 Zonas de Balanço e Fluxo subterrâneo

Para o modelo, o volume de água que entra nos sistemas aquíferos da bacia é atribuído principalmente pela recarga de chuvas, com parte da entrada no sistema podendo ser atribuída às condições de manutenção de carga no leito dos rios e oceano como será explicado adiante. Isso encontra-se em consonância com que fora exposto anteriormente, bem como por Cavalcante (1998): “A precipitação pluvial constitui a principal fonte de recarga para o sistema Dunas”. De acordo com este autor, o sistema funciona também como aquífero de transferência em relação à alimentação das estruturas subterrâneas subjacentes, a exemplo do sistema aquífero Barreiras. Nesta abordagem, o termo recarga foi usado para se referir à precipitação subtraído evaporação.

A simulação mostra (Tabela 14) que o sistema de fluxo em regime estacionário conserva a massa. Esse resultado é esperado para uma simulação em estágio estacionário, uma vez que

o balanço é considerado apenas a lei de conservação de massa sem considerar assim a reserva hídrica.

Tabela 14 - Valores adquiridos para o modelo simulado

Componentes do modelo	Entrada (m ³ /ano)	Saída (m ³ /ano)
Carga Constante	0,00E+00	4,13E+05
Drenos	0,00E+00	3,32E+07
Recarga	3,38E+07	0,00E+00
Total	3,38E+07	3,36E+07
Percentual de discrepância	0%	

O percentual de 0% de discrepância mostra q matematicamente o modelo apresenta valores absolutos de referência no balanço hídrico em regime estacionário.

De modo geral, o modelo considerou que a infiltração ocorre de maneira diferencial, isso é, quase todo o quantitativo de recarga ocorre em área correspondente apenas à 1/2 do total, das quais dispõe-se de um sistema Dunar aflorante, de maior altitude e, portanto, de maior superfície de ocorrência.

As taxas de transferência d’água entre as zonas aquíferas foi computada através das zonas de balanço criadas, sendo em ordem: Paleodunas, Barreiras Inferior, Barreiras Superior, Dunas e Paleocanal, respectivamente atribuídas às zonas 1 a 5. Uma zona 0 foi atribuída de maneira autônoma pelo ModelMuse contudo, ela representa uma zona de descolamento entre os objetos que se atribuiu as zonas de balanço, equivalente ao volume das células inativas e para fins de correlação, serão atribuídas como zona “sombreada” ou de erro, excluindo-as do total.

Os valores, em termos absolutos por ano, mostram que as maiores entradas ocorrem de fato atribuídas às taxas de recarga direta no Dunas (2,38 E7 m³/ano) e as transferências entre as camadas alimentando as diversas formações, com destaque para a Fm. Barreiras inferior, que recebe 8,23 milhões m³/ano do Dunas e 2,90 milhões do Barreiras Superior (aflorante). Em relação às saídas, os drenos atribuídos mostram uma vazão total de escoamento para o mar e rios de 33,7 milhões m³/ano (Tabela 15).

Tabela 15 – Taxas de transferência hídrica por zonas de contribuição

	VALORES DE FLUXO ENTRE CAMADAS (CONTRIBUIÇÃO) - ZONAS DE BALANÇO - M³/ANO				
	PALEODUNAS	BARREIRAS INFERIOR	BARREIRAS SUPERIOR	DUNAS	PALEOCANAL
	ENTRADA	ENTRADA	ENTRADA	ENTRADA	ENTRADA
CARGA CONSTANTE	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
DRENOS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
RECARGA	6.15E+06	0.00E+00	3.44E+06	2.38E+07	3.72E+05
FLUXOS ESPECIFICADOS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CELULAS INATIVAS	1.95E+06	8.93E+04	7.45E+05	3.38E+05	7.63E+05
DO PALEODUNAS	0.00E+00	1.77E+06	3.76E+05	1.01E+06	1.02E+05
DO BARREIRAS INFERIOR	2.53E+06	0.00E+00	1.11E+06	2.70E+05	6.23E+05
DO BARREIRAS SUPERIOR	1.23E+05	2.90E+06	0.00E+00	8.15E+05	3.31E+06
DO DUNAS	1.04E+07	8.23E+06	5.28E+06	0.00E+00	2.56E+05
DO PALEOCANAL	4.88E+05	2.93E+05	4.04E+05	2.82E+05	0.00E+00
ENTRADA TOTAL	2.16E+07	1.33E+07	1.14E+07	2.65E+07	5.43E+06

	PALEODUNAS	BARREIRAS INFERIOR	BARREIRAS SUPERIOR	DUNAS	PALEOCANAL
	SAÍDA	SAÍDA	SAÍDA	SAÍDA	SAÍDA
CARGA CONSTANTE	0.00E+00	0.00E+00	4.13E+05	0.00E+00	0.00E+00
DRENOS	1.82E+07	8.59E+06	2.67E+06	0.00E+00	3.75E+06
RECARGA	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
FLUXOS ESPECIFICADOS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CELULAS INATIVAS	1.80E+05	1.31E+05	1.10E+06	2.44E+06	2.13E+05
DO PALEODUNAS	0.00E+00	2.53E+06	1.23E+05	1.04E+07	4.88E+05
DO BARREIRAS INFERIOR	1.77E+06	0.00E+00	2.90E+06	8.23E+06	2.93E+05
DO BARREIRAS SUPERIOR	3.76E+05	1.11E+06	0.00E+00	5.28E+06	4.04E+05
DO DUNAS	1.01E+06	2.70E+05	8.15E+05	0.00E+00	2.82E+05
DO PALEOCANAL	1.02E+05	6.23E+05	3.31E+06	2.56E+05	0.00E+00
SAÍDA TOTAL	2.16E+07	1.33E+07	1.13E+07	2.66E+07	5.43E+06

Fonte: Autor, 2020.

Os valores resultantes das entradas e saídas foram transformados em termos percentuais (Tabela 16). Considerando o comprimento da ocorrência das zonas de saída, percebe-se que o Paleocanal Barra do Guaribas possui uma vazão específica de escoamento natural 3 vezes superior que as demais formações que compõe a zona costeira (Tabela 16).

Tabela 16 – Vazões de escoamento por zona de saída do modelo

Zonas de saída do modelo	Vazão total (m³/ano)	Comprimento aproximado (m)	Vazão específica por unidade de área (m³/m/a)
Faixa costeira (sem contabilizar o Paleocanal)	2,24E+07	2,27E+04	9,87E+02
Paleocanal (para oceano)	3,67E+06	1,25E+03	2,95E+03
Rio Anil	4,82E+06	9,70E+03	4,97E+02
Rio Cauípe	2,22E+06	5,11E+03	4,35E+02
Lagoa do Gereraú	4,56E+05	8,25E+02	5,53E+02
Entrada Total	3,38E+07		
Saída Total	3,36E+07		

Fonte: Autor, com base no modelo numérico.

As trocas de massa entre as camadas aquíferas, ou unidades hidrogeológicas, estão também representadas nas figuras 26 e 27, as quais permitem visualizar, nessa ordem, entradas e saídas e comparar de maneira visual no eixo de valores y.

Figura 26 – Entradas em m³/s no modelo

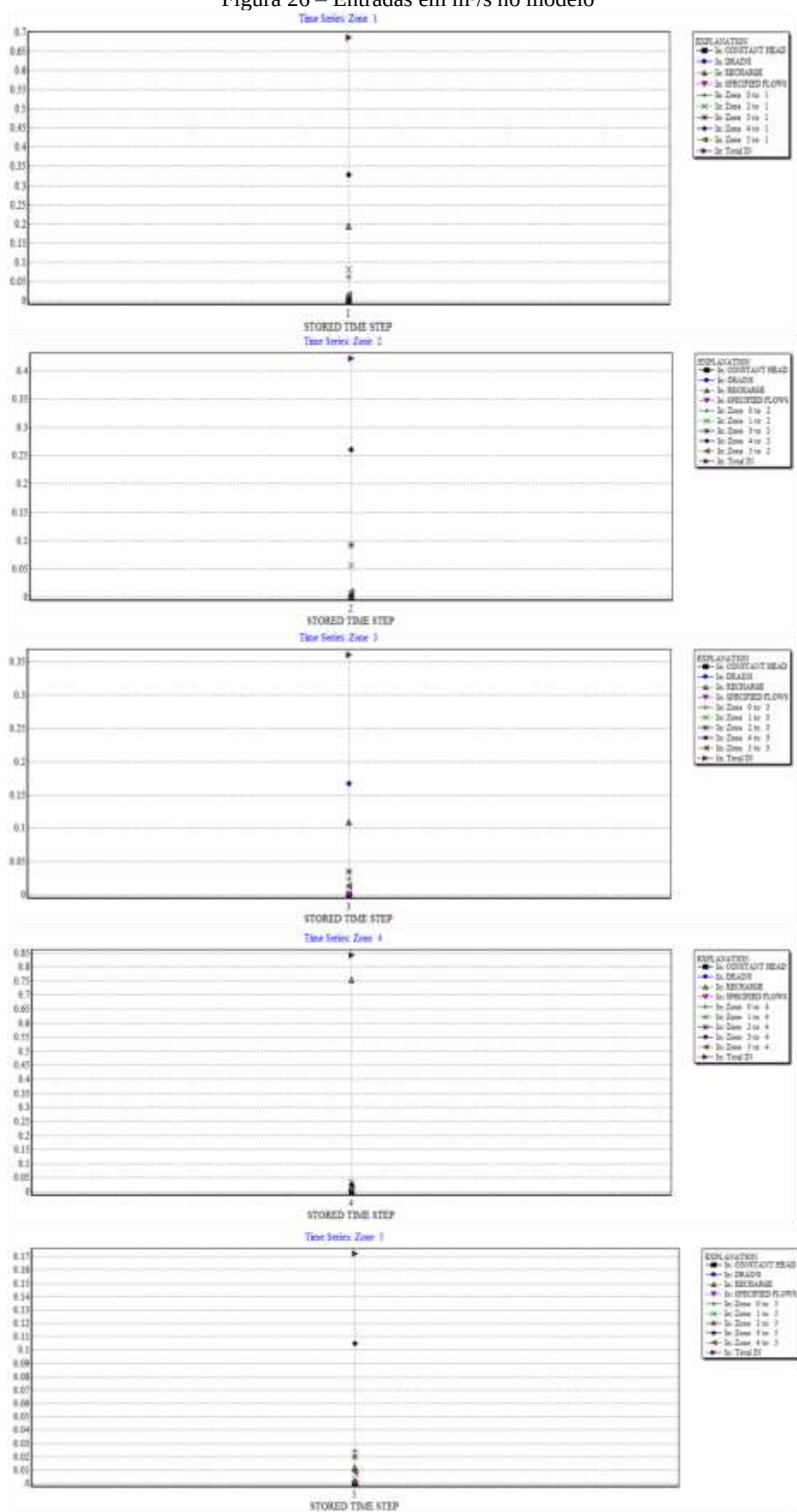
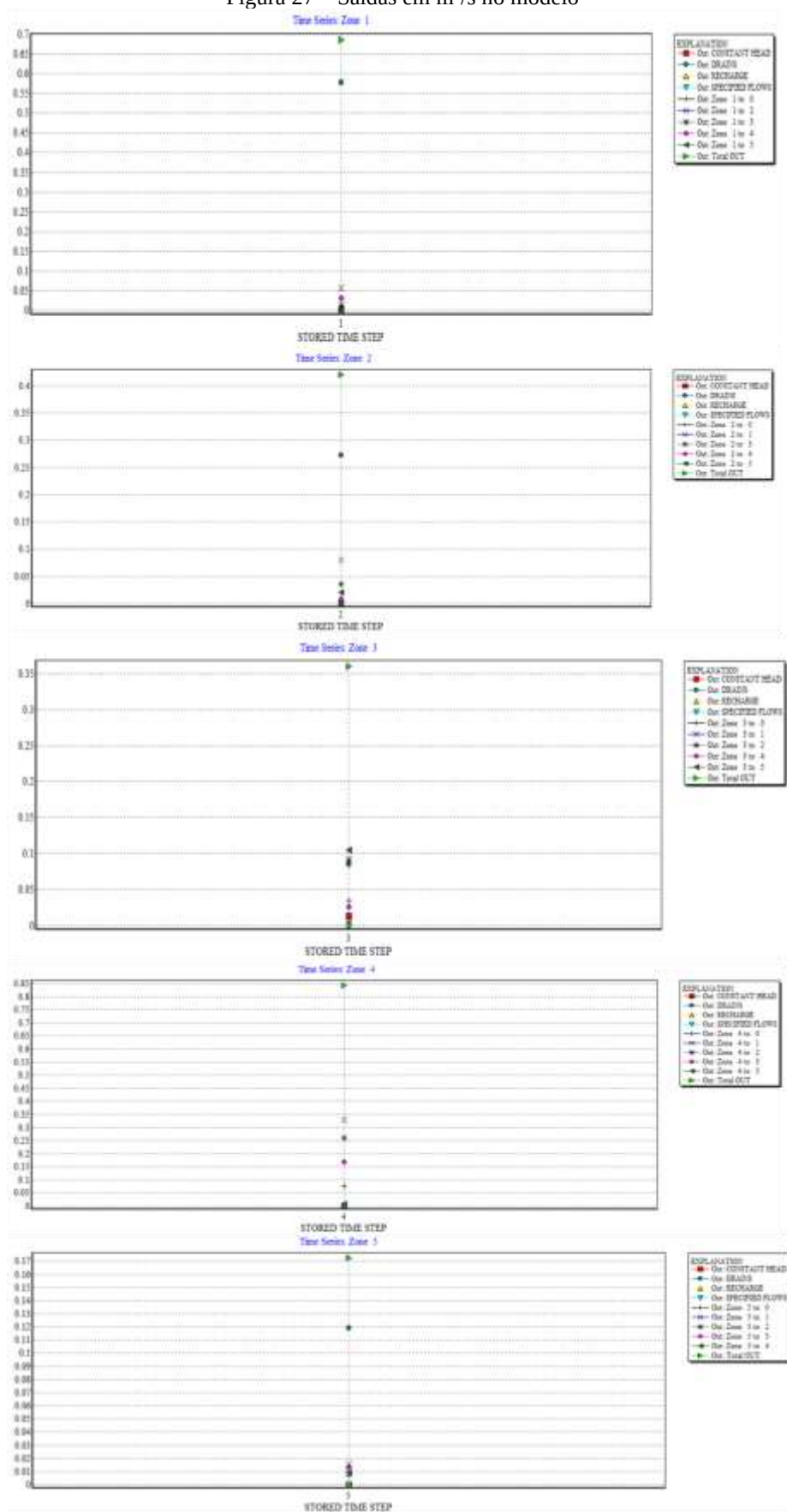


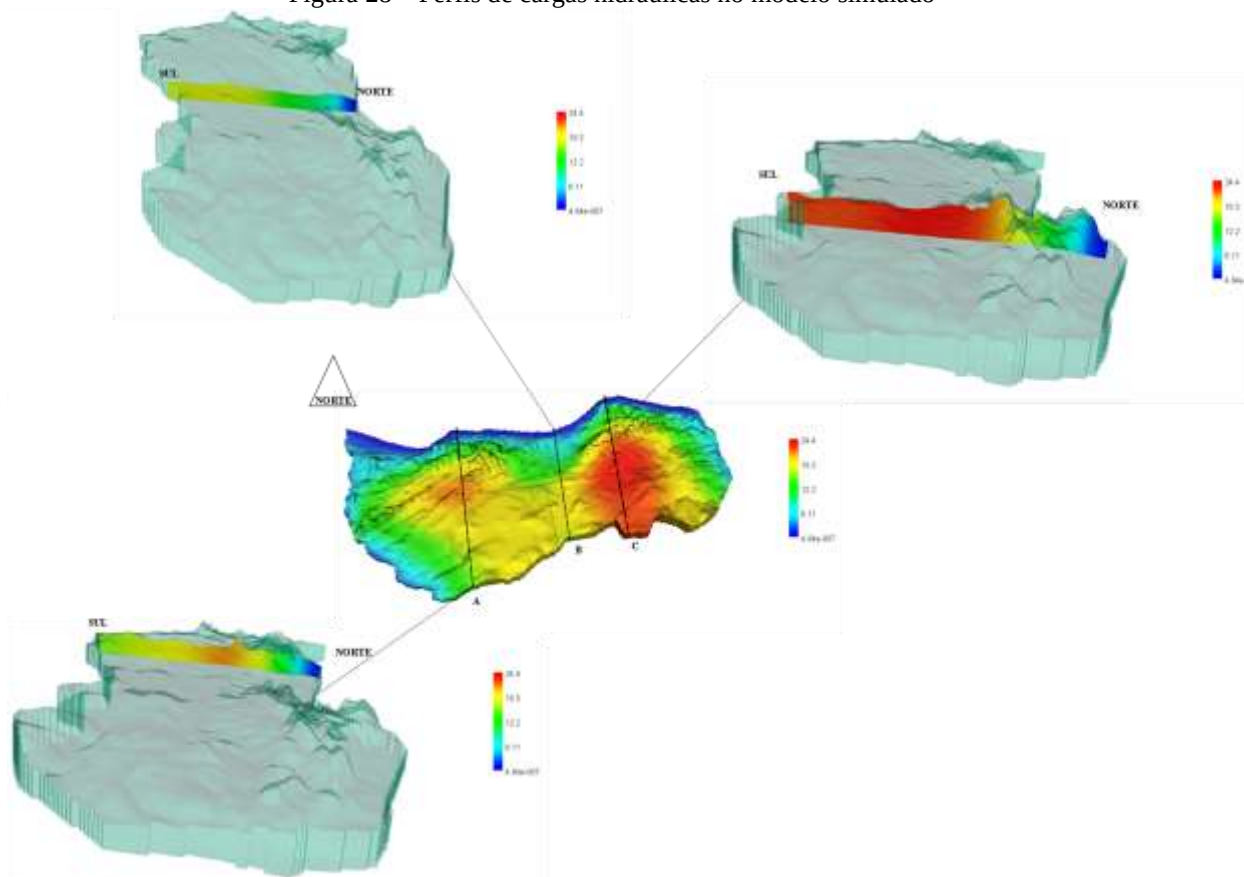
Figura 27 – Saídas em m³/s no modelo



O modelo simulado apresenta um fluxo cuja principal zona de recarga ocorre parte central e a distribuição ocorre quase que de forma radial para toda área. Para melhorar a visualização dos processos o mapa foi enumerado com zonas importantes do processo de recarga, descarga e outros fatores que podem influenciar a dinâmica do aquífero.

As maiores cargas ocorrem de fato nas áreas das comunidades do Siupé e Matões, como pode ser observado nos cortes transversais aos perfis de carga hidráulica (Figura 28) que variam entre 24,4 mca e valores matematicamente similares à 0 mca.

Figura 28 – Perfis de cargas hidráulicas no modelo simulado



Fonte: Autor, 2020.

Quanto ao sentido do fluxo, inicialmente, pode-se esperar que após infiltrado no aquífero dunas ao norte nas regiões do Siupé, onde também funciona a bateria de poços Siupé/COGERH e Matões (1 e 2 respectivamente), parte segue para o Oceano Atlântico, com deslocamentos em oeste e leste através do aquífero dunas e barreiras onde funcionam as intersecções com as grandes drenagens, onde ocorre a descarga nessas, sendo um importante fator de perenização por contribuição do aporte hídrico no Lagamar do Cauípe (3) e Rio Anil (4). Parte do fluxo continua seguindo para sul, onde à sudeste encontra o cristalino que o refrata

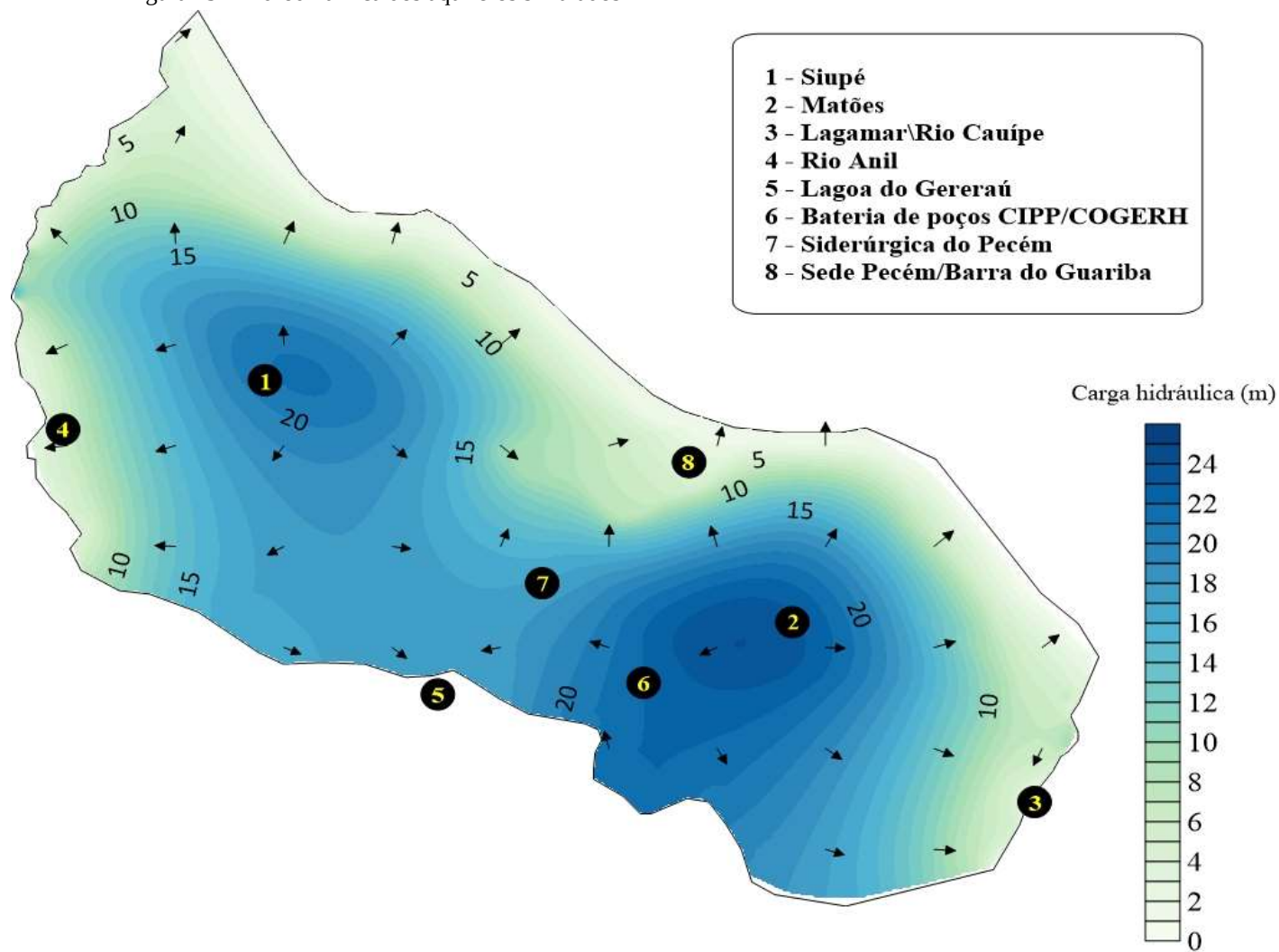
para o Lagamar do Cauípe, outra parte, à sudoeste segue fluxo similar, embora uma drenagem local ajude à manter as cargas afastadas do contato com o cristalino, impulsionando esta recarga antes de chegar nessa região.

A dinâmica desta massa d’água passa ainda por a região central também, na Lagoa do Gereraú (5), ela infiltra em uma brecha do cristalino favorecida pela topografia, funcionando este corpo d’água como uma lagoa de controle de cheias natural, este fluxo, em menor escala devolve a água para o sistema na forma de evapotranspiração, fazendo com que não ocorram grandes variações no nível da lagoa ao longo do ano. A região em que se situa a bateria de poços CIPP/COGERH e a siderurgia local (6 e 7 respectivamente) também recebem contribuição da massa de água vindo destas zonas de direção norte-oeste.

O encontro entre as duas massas d’água evidenciado na parte central gera uma zona de descarga preferencial nessa direção, desaguando na sede distrital do Pecém, bem como na região portuária, que, apesar de receber um grande volume, não tende a formar um lagamar, pois a proximidade das cargas observadas evidenciam um fluxo muito acelerado nessa região. É possível que as boas vazões e, sua proximidade com a superfície, tenham facilitado as instalações das primeiras residências na região.

Com base nestes resultados demonstrados no modelo 2D (Figura 29), em que as representações em valores simulam uma morfologia, considera-se que o modelo é compatível realisticamente a elevação das águas subterrâneas e a direção do fluxo, uma vez que há um padrão de cargas compatíveis com a topografia e as direções de fluxo condizem com o esperado em um aquífero poroso, livre e costeiro.

Figura 29 - Hidrodinâmica dos aquíferos simulados



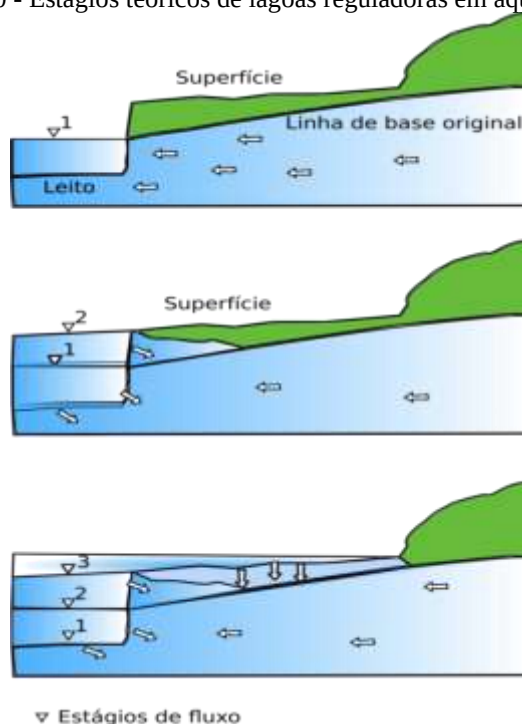
Fonte: Autor, com uso de softwares Sufer e ModelMuse.

Quanto a dinâmica das interações dos lagos com as águas subterrâneas é complexa devido a grandes e rápidas mudanças induzidas por diferentes atores. As condições de equilíbrio dependem principalmente não das forças motrizes naturais, mas do equilíbrio temporalmente variável entre a entrada de massa d'água e a saída regulada. Desta forma, a manutenção de cargas pode ser considerada uma condição de entrada e saída de água no sistema. Esta dinâmica mais complexa de entrada e saída pode ser visto na condição imposta no Lagoa do Gereraú como será discutido a seguir.

A Lagoa serve como um dreno de tendência natural para acumulação de água subterrânea e superficial. A medida em que há um acréscimo de ganho d'água há também uma perda do para parte do aquífero, numa continua relação de ganhos e perdas. Se o aumento no estágio do fluxo for suficiente para fazer a água verter às margens e inundar grandes áreas da superfície da terra, uma recarga generalizada no lençol freático poderá ocorrer em toda a área inundada, situação similar pode ser vista se esse equilíbrio de cargas for rompido por uma alteração no nível do freático nas adjacências, como por exemplo, um rebaixamento adicional local pode ocasionar a inversão de fluxo no sentido Lagoa/Oceano (Figura 30).

Esta última situação embora hipotética, parece sensivelmente irreal, pois, imaginando que a evaporação da região em ETP é em torno de 1,1 m /ano por unidade de área, como visto no balanço hídrico, o fluxo local do aquífero seria responsável por algo em torno de 1/7 do volume retirado por evaporação. Em função deste paradoxo, ventila-se duas possibilidades: a ETP na área da Lagoa do Gereraú é menor que a média local, hora por presença de macrófitas aquáticas ou mesmo, efeito de proteção à evapotranspiração causado pela reflectância do espelho água, provavelmente super saturado em uma solução salina. Ainda ocorre a possibilidade de uma recarga externa, vinda por escoamento superficial no qual a lagoa serviria de exutório natural, contudo, por não haver sustentação de grandes massas de água, canais ou rios perenes, essa hipótese é pouco sustentada, uma vez que a lagoa permanece sob grande parte do tempo com as cargas estáticas, ao menos na parte norte em próxima ao limite com o aquífero.

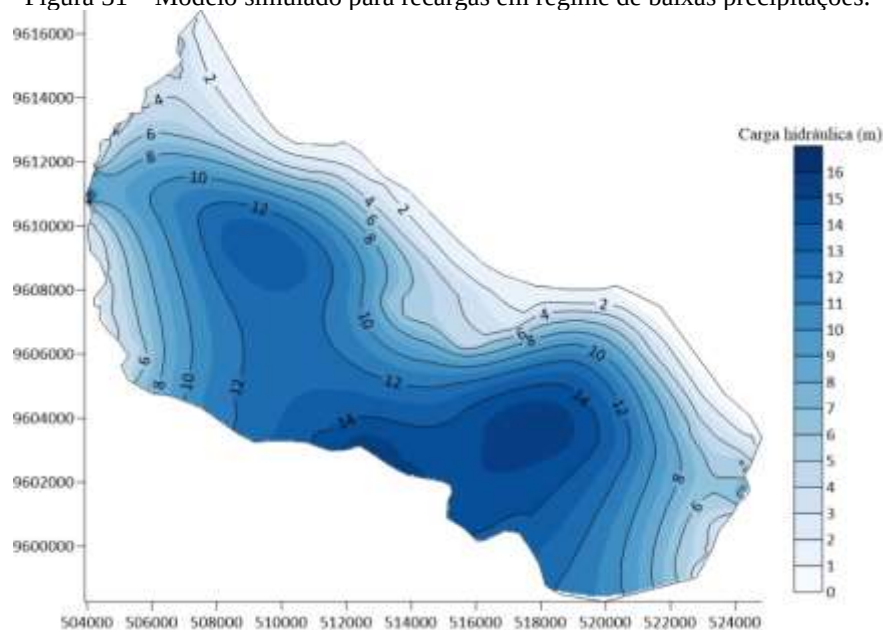
Figura 30 - Estágios teóricos de lagoas reguladoras em aquífero livre



Fonte: Autor, 2020.

Para anos de baixas precipitações, foi simulado um cenário com as recargas efetivas sendo a metade das aplicadas em 2017 e, mantendo-se as condições de contorno constantes. Nesse cenário, imaginando sobretudo uma condição de manutenção da carga ora levantada para a Lagoa do Gererarú, esta passa funcionar como possível fonte de recarga do aquífero, o que, embora pouco provável, possa causar uma salinização localizada no aquífero (Figura 31).

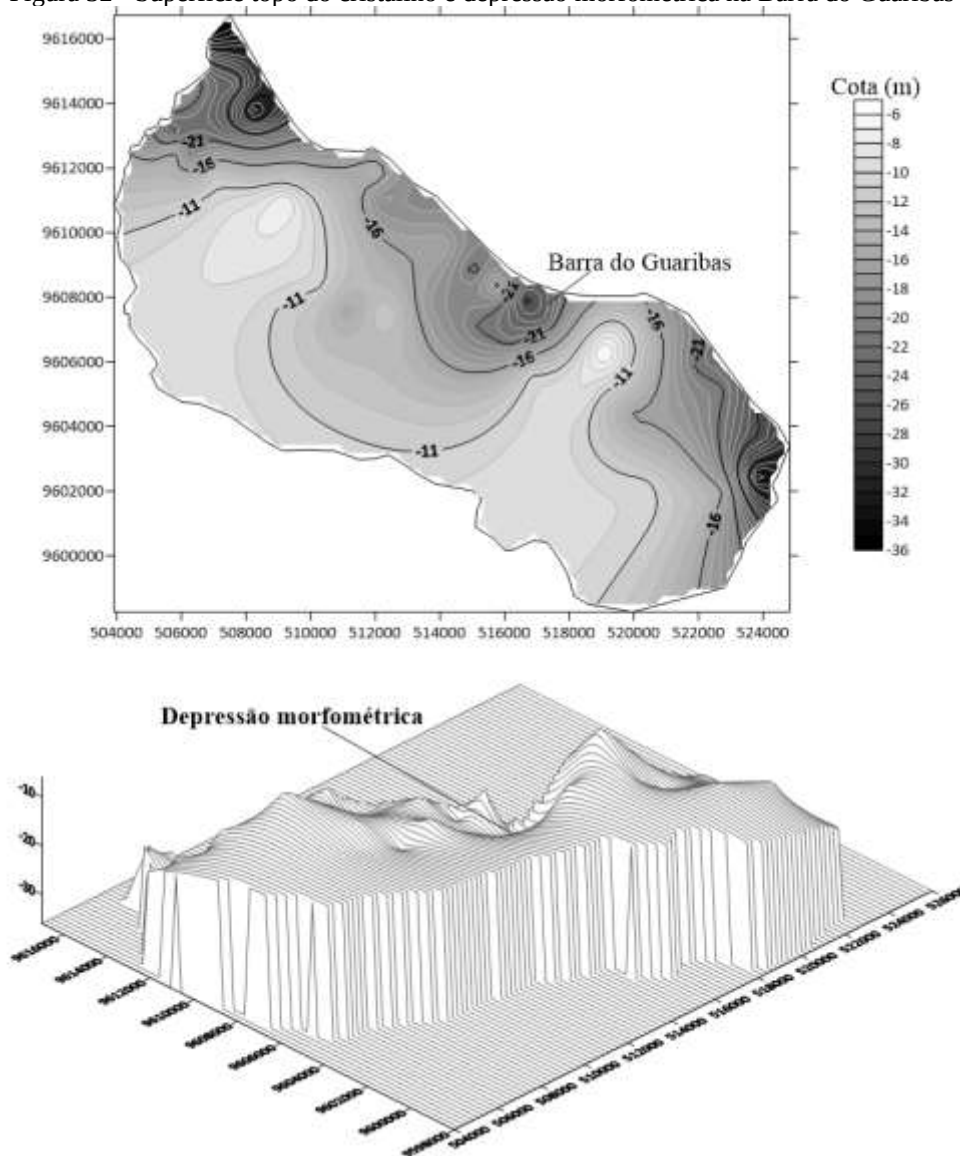
Figura 31 – Modelo simulado para recargas em regime de baixas precipitações.



6.6.4 Hipótese adicional :Deposição do “Paleocanal Barra do Guaribas”.

A princípio, a análise da superfície das cotas de topo da camada cristalina (Figura 32) mostram valores razoavelmente planos, forma de platô, que varia entre -11 m e -16 m, dois altos estruturais, com cotas próximas à -6 m, nas regiões em que sobrepostos estão: Siupé e Matões. Não obstante, existem três depressões bem formadas, sendo estas as regiões estuarianas dos rios Anil e Cauípe e a região da Barra do Guaribas. Esta última, despertou maior interesse, em função de sua posição geográfica, importância estratégica, uma vez que nessa área situa-se a Sede Distrital do Pecém e complexo portuário homônimo.

Figura 32 - Superfície topo do cristalino e depressão morfométrica na Barra do Guaribas



Fonte: Autor, com base em dados fornecidos por COGERH, 2018.

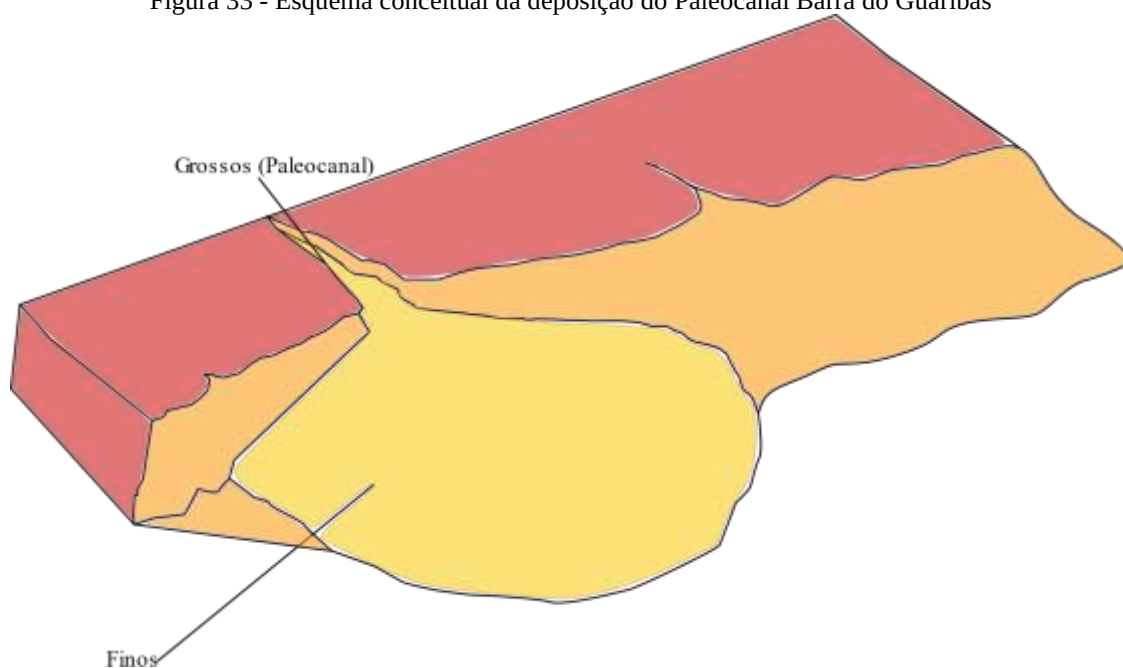
Os sistemas aluviais são frequentemente excelentes aquíferos. A triagem natural de sedimentos por água corrente geralmente resulta em depósitos de sedimentos grossos com alta permeabilidade e porosidade. Existem três tipos básicos de depósitos aluviais: Leques aluviais, deltas e depósitos de várzea / vale do rio.

Segundo Suguio (2003), os sedimentos fluviais são, comumente, bimodais, exibindo assimetria positiva em termos granulométricos, especialmente, os sedimentos de paleocanais. Em uma sequência vertical de depósitos fluviais, verifica-se, portanto, uma tendência à granodecrescência ascendente, ou seja, de afinamento rumo ao topo nos tamanhos das partículas, que pode repetir por várias vezes. A Fm. Barreiras, segundo amplamente visto na literatura, trata-se de um sistema de deposição de rios meandrantess, em partes de leito cascalhoso.

A ocorrência depressões morfométricas (Figura 32), evidenciadas na geofísica, embora não se tenha certeza se de natureza tectônica (dúctil ou rúptil) ou formada por processos erosivos, mostram a existência de espaço para acomodação de sedimentos. De toda maneira, o espaço gerado e o estreitamento em forma de vale, condicionando a acomodação dos sedimentos da Fm. Barreiras com dinâmica similar à encontrada hoje por meio de rios e riachos que utilizam suas redes de drenagem, como o rio Paú, evidenciaram a possibilidade da deposição de material detrítico, de textura grossa, diferenciado na região

Imagina-se que na deposição da Fm Barreiras, rios meandrantess e anastomosados, tendiam provocar um fluxo de correnteza e, em superfície relativamente plana, desprezando a rugosidade no platô central da área, tendiam a depositar sedimentos sob condições de fluxo tranquilo. Ao enfrentar uma quebra na topografia, que tornaria o fluxo turbulento, as partículas finas seguiam em movimento, sem haver deposição, assim facilita-se a sedimentação do material de maior granulometria, como a deposição de um canal predominantemente cascalhoso. Essa situação, tendo em vista o gradiente gerado pelas diferenças de cota entre -16 e -21 m evidencia a possibilidade de geração de um paleocanal com condutividade hidráulica diferencial na Fm. Barreiras, sobretudo na região da Barra do Guaribas (Figura 33), o que ficou também aventado pelo ajuste fino do modelo numérico de fluxo.

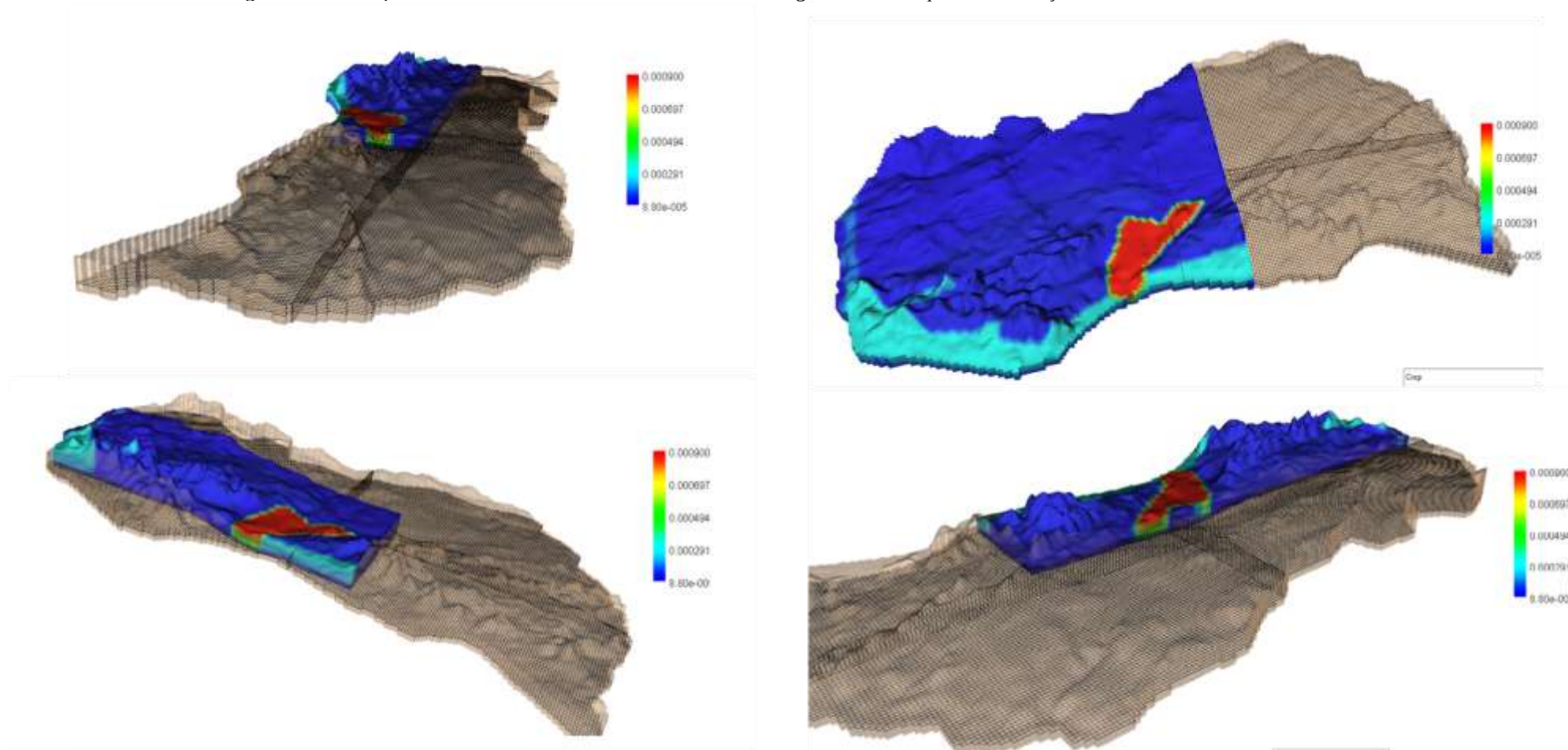
Figura 33 - Esquema conceitual da deposição do Paleocanal Barra do Guaribas



Fonte: Autor

Para a representação desta face de deposição no modelo foi utilizado um valor de condutividade hidráulica superior as demais camadas, de modo que sua ocorrência estivesse dentro da mesma ordem de grandeza citada por Martins *et al* (2012). Assim, um objeto atribuído como uma inomogeneidade do aquífero, desenhado dentro dos espaços deixados pela superfície do cristalino em relação às camadas sotopostas, preenchendo o paleovale (Figura 34).

Figura 34 – Destaque em cortes da camada Paleocanal como inomogeneidade do aquífero em função da alta condutividade hidráulica.



Fonte: Autor, com software ModelView

6.6.5 Cálculo da carga máxima e mínima

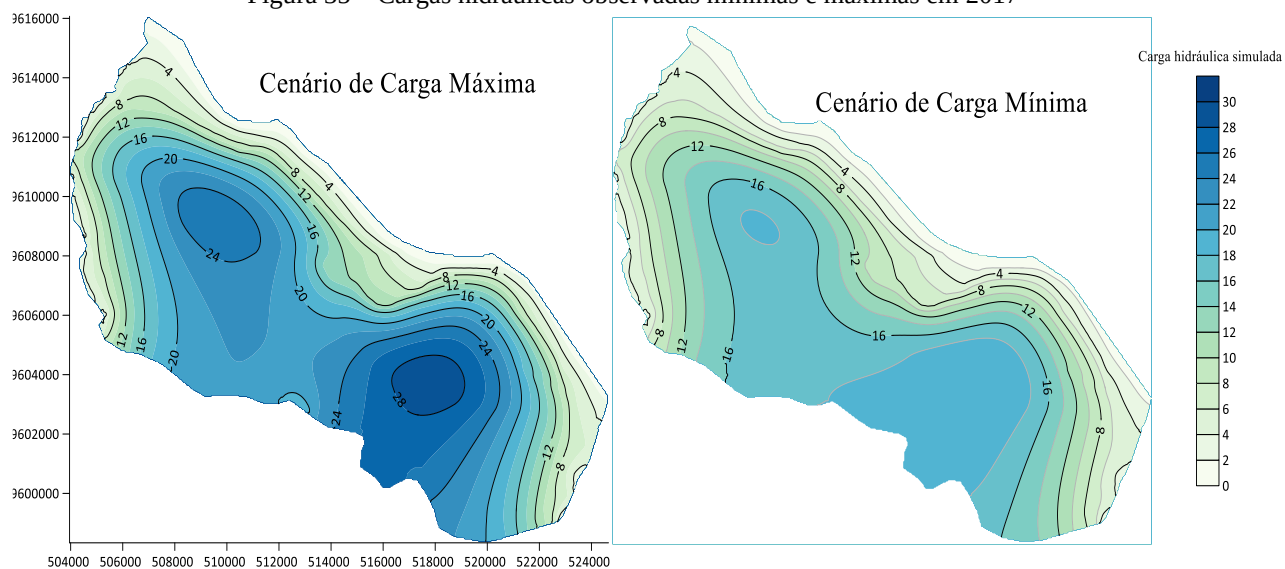
Os modelos em cenário limítrofe foram calibrados acrescentando 25% e decrescendo na mesma proporção os valores calibrados do modelo numérico. Assim o RMS ficou de 4,53 para o cenário da carga máxima observada e 4,62 para o cenário do mínimo observado. Esses valores representaram também mudanças nos fluxos gerais do aquífero, mostrando vazões diferenciadas (Tabela 18)

Tabela 17 – Comparativo dos valores de vazão nos modelos simulados

	Lagoa do Gereraú		Oceano		Anil		Cauípe		Saída total
	m ² /s	m ² /ano	m ² /s	m ² /ano	m ² /s	m ² /ano	m ² /s	m ² /ano	
Máx	2.23E-02	7.02E+05	1.10E+00	3.47E+07	2.10E-01	6.62E+06	1.03E-01	3.24E+06	4.53E+07
Med	6.64E-03	2.09E+05	8.41E-01	2.65E+07	1.54E-01	4.85E+06	7.10E-02	2.24E+06	3.38E+07
Min	0.00E+00	0.00E+00	6.98E-01	2.20E+07	1.25E-01	3.93E+06	5.84E-02	1.84E+06	2.78E+07

Dessa forma, a abordagem das cargas máximas e mínimas permitiu calibrar o modelo em todas regiões, incluindo aquelas que não haveriam dados para observação, procedimento que se mostra substancialmente mais eficaz que a interpolação simples. As superfícies potenciométricas simuladas foram representadas na figura 35.

Figura 35 – Cargas hidráulicas observadas mínimas e máximas em 2017



Fonte: Autor, 2020

Os valores obtidos através do comparativo dos cenários limítrofes mostram algumas evidências importantes que permitiram sustentar a argumentação do método:

- As subtrações dos valores entre as máximas e mínimas deveriam dar 14,3 m, entretanto o modelo calibrado mostra 13,6 m, assim mostrando que temos um período de escassez mais longo que o período de chuvas, o que é conceitualmente compatível.

- A Lagoa do Gereraú, no modelo de menor recarga mostra vazão nula para o dreno, o que evidencia que esta pode secar durante parte do ano, ou em anos de precipitações muito baixas, como foi anteriormente ventilado.
- Os altos valores das cargas evidenciadas sobretudo nos dois grandes picos das regiões de recarga explicam os elevados valores de diferença de nível, variando em torno de 9 e 7 metros nesses locais. Dessa forma temos uma diferença entre as cargas máximas médias e cargas mínimas médias, mostrando uma variação de 4,6 metros, que é substancialmente menor nas áreas próximas ao Oceano e os rios, sendo em torno de 1,1 e 1,6.

6.6.6 Reserva renovável estimada

Para o balanço da reserva renovável foram consideradas as variáveis de porosidade média ponderada pela área e valor de variação anual das cargas médias, que vez que se considera a reserva renovável o volume de água da zona de flutuação (anual ou sazonal) no nível de saturação. Correspondem assim, ao volume de realimentação anual ou estacional, indicando suas condições de recarga no aquífero.

Enquanto a variação de massa medida pela variação do nível potenciométrico temos:

Δh (2017) = 4,6 metros;

- $R_r = \Delta h \times \text{Área} \times S_y = 4,6 \times 1,79 \times 10^8 \times 0,15 = 123 \text{ milhões de m}^3/\text{ano}$

Para efeito de segurança, assim como feito por Cogerh (2016) considerando a ausência de mapeamento geológico de detalhe e a possível inclusão de rochas cristalinas ou outras formações pouco armazenadoras usou-se um fator de segurança 65% da reserva do modelo, assim temos uma

- $R_r \times 0,65 = 80,00 \text{ milhões de m}^3 \text{ de reserva renovável estimada.}$

Dessa forma, os valores calculados podem ser comparados com áreas correlatas de afloramento dos aquíferos em questão (Tabela 18).

Tabela 18 – Valores comparativos de reserva renovável em aquíferos costeiros correlatos

	Referência	Área (m²)	Reserva renovável (m³/ano)
Autor	Limitado entre os rios Cauípe e Anil, Pecém, CE,	178,599,688.00	80,000,000.00
Cogerh, 2014	Entre as Praias de Paracuru e Pecém, CE	161,492,500.00	85,900,000.00
Quezado e Cavalcante	Fortaleza, CE	47,780,000.00	17,500,000.00

7. CONCLUSÕES

O modelo numérico do estudo apresentou um ajuste adequado após calibração, atendendo as premissas básicas impostas como: As entradas e saídas consideram a recarga e escoamento natural respectivamente como condições de balanço, sem a exploração do aquífero por poços profundos visando simular um cenário mais próximo da condição *in natura*; a simulação numérica das superfícies de cargas máximas e mínimas, são situações extremas dentro do ano, assim como situações de média representam de maneira genérica a taxa de entendimento e circulação das camadas aquíferas como zonas de transferência, dada a limitação de atender certas questões com um modelo em regime estacionário; A reserva renovável foi adquirida com base nas flutuações de nível na série temporal estudada.

A avaliação do modelo de fluxo mostra que o aquífero Dunas atua como principal meio de recarga, estimada em 420 mm/ano (aproximadamente 39% do precipitado), em comparação aos demais aquíferos, Barreiras com 40 mm/ano (3%), Paleodunas com 230 mm/ano (19%), os aquíferos aluvionares com 110 mm (10%) e o Paleocanal Barra do Guaribas com 80 mm (7%). O maior percentual de recarga no Dunas deve-se, entre outros fatores, à porosidade efetiva (em torno de 22%), baixo grau de compactação e a manutenção de áreas nativas. Sendo assim, sua sustentabilidade, possui importância para a manutenção das recargas nos aquíferos Barreiras e Paleodunas, bem como para os rios Anil e Cauípe, que recebem uma importante contribuição vindo deste sistema aquífero, atuando assim, como um importante regulador dos recursos hídricos locais.

As cargas armazenadas no aquífero Dunas provocam sistemas de fluxos médios preferenciais em toda região, para as principais frentes de escoamento subterrâneo. De modo geral o aquífero tem como vazões médias escoadas: (a) Para o oceano, com vazão de aproximadamente 26,1 milhões de m³/ano; (b) Rio Anil, aproximadamente 4,82 milhões de m³/ano; (c) Rio Cauípe, em torno de 2,22 milhões de m³/ano. Ao separarmos a vazão drenada pelo Paleocanal (e) das demais camadas que tem como saída o mar, temos uma drenagem com cerca de 3,67 milhões de m³/ano.

A lagoa do Gereraú, por sua vez, funciona ainda como bacia natural de contenção de cheias, numa pequena brecha, com aproximadamente 1 km de extensão, entre o cristalino e o sedimento com vazão de contribuição do aquífero na ordem de 456.349 m³/ano. Assim como ocorre similarmente com a lagoa supracitada, o Paleocanal Barra do Guaribas, regula a velocidade de escoamento, acelerando o fluxo e, prevenindo a formação de áreas alagadas na Sede distrital do Pecém.

Vale ainda ressaltar que diversas drenagens como, por exemplo, os Riacho Paú e Guaribas são, possivelmente, geradas por conta do afloramento de nível do aquífero e tem sua exumação evidenciada em uma topografia que foi esculpida ao longo dos anos, facilitada por uma deflexão

das condutividade hidráulicas diferentes entre os aquíferos Dunas ($1,25 \times 10^{-4}$ m/s) e Barreiras ($8,80 \times 10^{-5}$ m/s).

O modelo geológico conceitual permitiu apresentar uma discussão baseado na Lei de Fácies de Walter e a Estratigrafia de Sequências. Esse entendimento foi fundamental para o embasamento do modelo conceitual e a simplificação em dois blocos, essencialmente. Dunas, com área de $56.434.520 \text{ m}^2$ e Barreiras, com área de $84.595.548 \text{ m}^2$, possuindo propriedades hidrodinâmicas distintas entre si e demais objetos usados para simular Paleodunas, com área de $26.978.593 \text{ m}^2$, o Paleocanal com $4.722.307 \text{ m}^2$ e os aquíferos aluvionares, que juntos ocupam 645.439 m^2 . Nesse sentido, os ajustes de recarga e porosidade efetiva puderam ser corretamente ponderados com as áreas acima expostas.

Atendo-se ao conceito de reservas renováveis como variação de nível anual e dada a limitação dessa abordagem sobretudo em modelos estacionários, obteve-se uma reserva renovável por variação de nível das superfícies simuladas equivalente a 97,6 milhões de m^3/ano , o que sinaliza um valor muito similar ao encontrado por Cogerh (2016) com 85,9 milhões, para área correlata.

Para os futuros trabalhos, a fim de concluir este complementar este com mais afirmações e levantar novos caminhos, recomenda-se:

- Elaborar um modelo em transiente com as observações adequadas por este trabalho;
- Definir áreas de maior e menor interesse para captações futuras, bem como buscar melhores evidências da ocorrência ou não do Paleocanal Barra do Guaríbas;

8 . REFERÊNCIAS

ALENCAR NETO, Mariano da Franca, *Interpolação por splines para modelação de inomogeneidades no método de elementos analíticos: implementação por programação orientada a objetos. Tese de Doutorado*. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2008.

ANDERSON, Mary P, WOESSNER William W, HUNT Randall J., *Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective Transport*, Elsevier, 602 P. 2015

BIECÍŃSKI P. A., 1960: Nowyj mietod opriedielenija wodootdaczy wodonośnych płastow. *Gidrotiech. i Mielioracyja* 6. Sofija.

BRAGA, A. C. D. O., 2016 – Geofísica aplicada: métodos geoeletricos em hidrologia. Oficina de Textos – São Paulo.

BRASIL, Diário Oficial da União (D.O.U.). Decreto Nº 24.643, de 10 de julho de 1934. Código de Águas. In VIEIRA, Jair Lott. Código de Águas - Decreto Nº 24.643 de 10.7.1932 / Agência Nacional de Águas - Lei nº 9.984. Bauru, SP: EDIPRO, 3ª Ed. 2002.

CASTANY, G. 1975. *Prospecção e Exploração de Águas Subterrâneas*. Editora Omega S. A. Barcelona. Espanha. 738pp.

CASTRO, M. A. H.; RIBEIRO, L. F. (Org.) ; RIGHETTO, Antonio Marozzi (Org.) . *Engenharia de Águas Urbanas*. 1. ed. Fortaleza-CE: Expressão Gráfica Editora, 2013. v. 100. 349p

.

CAVALCANTE, I.N. 1998. *Fundamentos para o uso integrado dos recursos hídricos na Região Metropolitana de Fortaleza, Ceará. Tese de Doutorado*. Inédita. IG/USP. São Paulo – SP.160p.

CLEARY, R. W. Águas subterrâneas. Princenton Groundwater Inc.: Clean Environment Brasil, 1989. 117 p.

COGERH (2009). Companhia de Gestão de Recursos Hídricos. Plano de Monitoramento e Gestão dos Aquíferos da Bacia do Araripe. Fortaleza, 272p.

COGERH (2019). Companhia de Gestão de Recursos Hídricos. Banco de dados. Enviado por e-mail. MARÇO 2019.

COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS / SECRETARIA DOS RECURSOS HÍDRICOS. Avaliação hidrogeológica quali-quantitativa do campo de Dunas Pecém/Paracuru, no Estado do Ceará. Relatório Final. Fortaleza, 2008. 84p.

CUSTÓDIO, E. & LLAMAS, M. 1976. Hidrologia Subterrânea. Editora Omega S. A. Casanova. Barcelona. Espanha. 220p.

DARCY, H. Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon - Appendice D. Paris:Dalmont, 1856.

DINIZ, J.A.O. & FEITOSA, F. A. C. Histórico da atuação dos órgãos públicos de pesquisa de água subterrânea na região nordeste do Brasil. XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, São Luiz do Maranhão, 2010. Anais do congresso.

DRISCOLL, G. 1987. Groundwater and wells. 2 Ed. St Paul; Johnson Division. 1088p.

DUPUIT, A.J.E.J. (1863). Etudes théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables. 2^{ed}. Dunod, Paris. 364 p.

FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M. 2001. Hidrogeologia: Conceitos e aplicações. CPRM Serviço. Geológico Nacional, 412p.

FEITOSA, Fernando Antônio Carneiro; MANOEL FILHO, João; FEITOSA, Edilson de Castro; DEMETRIO, José Geilson Alves. (Ed.). Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM/ LABHIDRO, 2008. 812p.

FORCHHEIMER P (1901B). Wasserbewegung durch Boden [Movement of water through soil]. Z Ver Dtsch Ing 50:1781–1788.

FREEZE, R.A., AND CHERRY, J.A., 1979, Groundwater: Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 604 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Relatório de Qualidade do Meio Ambiente – RQMA: Brasil 2013 / Diretoria de Qualidade Ambiental. – Brasília: Ibama, 2013. 268 p. Marcia Trindade Jovito. Sao Paulo, SMA/CPLA, 2010.

ISRAELSEN, O. T.; HANSEN, V. E. Irrigation principles and practices. 3. ed. New York: J. Wiley, 1967. 447 p.

MACHADO, J. L. F. *Água Subterrânea: Uma Visão Histórica*. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2005, Anais.

MANOEL FILHO, J. *Água Subterrânea: Histórico e Importância*. In: FEITOSA, F.A.C. e MANOEL FILHO, J. Hidrogeologia. Fortaleza : CPRM/REFO-LABHID/UFPE, 2000, 391p.

MARINHO, J. M.; CORDEIRO, W.; VASCONCELOS, S.M. S. & SOUZA, M. L. Estudos hidro-estratigráficos da Bacia do Araripe, Ceará, utilizando eletroresistividade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 12, 2002, Fortaleza. Anais. 1 CD ROM.

MARTINS, J.A; CUNHA, L.S DA; CASTELO BRANCO, R.M.G. ; LIMA JÚNIOR, S.B; BORGES, W.R. Caracterização hidrogeofísica e sua aplicação no planejamento de uso e ocupação de regiões costeiras. Estudo de caso da área de influência do Porto do Pecém - CE, Revista de Geologia. UFC. 2012.

MORAIS, João Bosco Andrade de. *Fundamentos hidrogeológicos do aquífero Dunas para a gestão dos recursos hídricos da Região Metropolitana de Fortaleza/Ceará*. 2011. 96p. *Dissertação (Mestrado em Geologia)* - Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

MORAIS, João Bosco Andrade de. Vulnerabilidade e riscos à poluição / contaminação das águas subterrâneas na área do complexo industrial portuário do Pecém (CIPP) – Estado do Ceará / João Bosco Andrade de Moraes. – 2016. Tese de Doutorado.

QUESADO Jr N & CAVALCANTE IN. 2000. Hidrogeologia do Município de Fortaleza, Ceará - Brasil. In: 1st Joint World Congress on Groundwater, Fortaleza, 15 pp.

R. W. HEALY AND P. G. COOK, “Using Groundwater Levels to Estimate Recharge,” Hydrogeology Journal, Vol. 10, No. 1, 2002, pp. 91-109.

THIEM, A. (1870). Die Ergiebigkeit artesischer Bohrlocher, Schachtbrunnen und Filtergallerien. Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung.

TUCCI, C.E.M. (1998) Hidrologia: Ciência e Aplicação, 2ª Edição. Porto Alegre: EDUSP/ABRH. 943p.

VASCONCELOS, S. *et al.* (2013). Estimativa da Reserva Renovável dos Sistemas Aquíferos da Porção Oriental da Bacia Sedimentar do Araripe. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, [s.l.], v. 18, n. 1, p.99-109, 2013. Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH

ANEXOS

ANEXO A - VALORES DO MONITORAMENTO PIOZEMÉTRICO

Cod	X	Y	COTA	Jan-17	Fev/2017	Mar-17	Abr/2017	Mai/2017	Jun/2017	Jul/2017	Ago/2017	Set/2017	Out/2017	Nov/2017	Dez/2017	Média	Carga
DUN001	508289	9612299	11.492	3.13	3.12	2.12	1.1	1.56	1.29	1.87	2.73	2.63	3	4.03	4.13	2.56	8.93
DUN002	511586	9608327	22.876	5.99	5.67	5.03	4.03	4.24	4.46	4.65	4.87	5.13	5.29	5.55	5.82	5.06	17.82
DUN003	516177	9606670	9.383	1.47	1.09	0.61	0.15	0.51	0.71	0.83	0.95	1.09	1.21	1.36	1.52	0.96	8.42
DUN004	515170	9607058	6.614	4.25	3.83	2.95	1.93	2.37	2.7	2.99	3.31	3.65	3.97	4.2	4.39	3.38	3.24
DUN005	515898	9606310	12.531	3.56	3.23	2.27	1.18	1.64	2	2.48	2.56	2.85	3.09	3.28	3.57	2.64	9.89
DUN006	516181	9607593	10.173	6.58	6.54	6.02	5.13	5.19	5.53	5.83	6.09	6.4	6.65	6.81	7.02	6.15	4.02
DUN008	517453	9607439	10.595	3.69	3.41	2.53	1.43	1.5	1.67	1.97	2.27	3.29	3	3.14	3.37	2.61	7.99
DUN009	517918	9606411	18.095	7.91	7.72	7.33	6.59	6.67	6.79	6.9	7.05	7.22	7.78	7.5	7.78	7.27	10.83
DUN010	519062	9604306	35.9075	8.78	8.58	7.97	6.4	6.08	6.18	6.39	6.63	6.91	7.04	7.55	6.84	7.11	28.80
DUN011	519068	9604752	30.725	4.5	4.42	3.54	2.07	2.12	2.29	2.42	2.73	2.99	3.23	3.45	3.66	3.12	27.61
DUN012	518675	9604318	33.095	7.23	7.14	6.23	4	3.95	4.33	4.58	4.92	5.34	5.51	5.98	6.24	5.45	27.64
DUN014	519382	9603312	27.587	4.59	4.33	3.88	2.28	2.5	2.52	2.98	2.96	3.8	3.5	4.07	4.43	3.49	24.10
DUN015	519618	9602839	23.72	2.11	2.03	1.75	1.48	1.71	1.79	1.86	1.91	1.97	2.03	2.05	1.88	1.88	21.84
DUN017	520123	9602964	17.844	2.53	2.42	2.16	1.31	1.69	2.37	2.47	2.45	-0.22	-0.22	2.42	2.44	1.82	16.03
DUN018	520765	9602908	17.687	4.83	4.72	4.12	3.59	4.07	4.22	4.37	4.49	4.58	4.69	4.75	4.8	4.44	13.25
DUN019	517161	9608095	4.0325	1.81	1.37	0.89	0.59	0.87	1.24	1.77	1.73	2.07	1.87	1.77	2.34	1.53	2.51
DUN021	516202	9608606	6.845	4.05	3.56	2.67	2.12	2.38	2.92	3.14	3.35	3.48	3.57	3.73	3.43	3.20	3.65
DUN022	516859	9608360	5.907	3.63	3.4	2.86	2.6	2.91	2.11	3.3	2.44	2.53	2.65	2.37	2.61	2.78	3.12
DUN023	514444	9607548	11.994	4.98	4.69	3.77	2.61	2.9	3.31	3.63	4	4.32	4.67	4.76	4.99	4.05	7.94

Cod	X	Y	COTA	Jan-17	Fev/2017	Mar-17	Abr/2017	Mai/2017	Jun/2017	Jul/2017	Ago/2017	Set/2017	Out/2017	Nov/2017	Dez/2017	Média	Carga
DUN024	513937	9607665	11.385	2.84	2.43	1.45	0.56	1.17	1.73	1.84	2.16	2.43	2.64	2.7	2.84	2.07	9.32
DUN028	505812	9612708	8.72	6.52	6.3	5.43	4.84	4.99	5.06	5.09	5.26	5.55	5.71	6.15	6.41	5.61	3.11
DUN029	508432	9611708	16.22	3.19	3.92	-0.55	0.84	1.01	1.35	1.54	1.77	2.82	2.32	2.6	3.19	2.00	14.22
DUN030	505354	9609396	10.595	7.7	7.67	5.58	4.99	5.22	5.09	5.76	5.76	6.46	6.86	7.14	7.28	6.29	4.30
DUN031	508419	9613032	9.985	4.22	3.79	2.89	2.03	2.16	2.21	2.34	2.63	2.96	3.31	3.52	3.67	2.98	7.01
DUN032	508507	9613667	5.907	5.92	6	0.00	3.6	3.9	4.24	4.55	4.89	5.09	5.49	5.64	5.8	4.58	1.32
DUN033	508469	9614387	6.845	5.78	5.33	4.08	3.73	4.12	4.52	5.2	5.41	5.39	5.52	5.05	6.06	5.02	1.83
DUN034	507826	9615355	8.72	6.2	5.89	4.77	4.23	4.7	5.11	5.39	5.56	5.79	5.99	6.08	6.17	5.49	3.23
DUN035	509073	9613156	6.845	3.24	2.71	2	1.16	1.47	1.88	2.17	2.67	2.7	2.9	3.05	3.21	2.43	4.42
DUN036	509433	9612663	8.468	4.35	3.95	2.58	1.54	1.87	2.23	2.57	6.24	3.39	3.71	5.89	5.13	3.62	4.85
DUN037	510864	9612424	14.345	3.04	2.72	2.38	1.96	2.16	2.3	1.93	1.8	1.96	2.05	3.73	3.94	2.50	11.85
DUN039	513112	9611113	13.478	2.96	2.74	2.53	2.42	2.67	2.78	2.84	2.88	2.9	2.93	2.96	3.02	2.80	10.68
DUN040	511979	9611785	17.255	2.76	2.21	1.46	0.94	1.25	1.49	1.51	1.9	2.12	2.34	2.51	2.63	1.93	15.33
DUN041	511173	9612069	17.1575	1.23	0.78	0.38	0.15	0.33	1.78	0.55	0.69	0.7	0.91	1.03	1.23	0.81	16.34
DUN043	509904	9612055	8.72	1.14	1	1.04	1.01	1.06	1.14	1.18	1.08	1.11	1.19	1.18	1.12	1.10	7.62
DUN044	509649	9612345	13.4075	5.94	5.75	4.81	3.54	3.7	4.04	4.35	4.67	4.97	5.25	5.69	5.72	4.87	8.54

ANEXO B – VARIÁVEIS HIDRODINÂMICAS INDIRETAMENTE (GEOFÍSICA) OBTIDAS

x	y	k(m/s)	k/dia(m/d)	Sy
498709	9623028	3.36E-05	2.90304	14%
499353	9623973	1.76E-05	1.52	12%
500371	9623871	1.16E-05	1	12%
501264	9623537	9.89E-05	8.54	16%
502045	9622912	1.93E-05	1.66	13%
502735	9622186	1.05E-05	0.91	12%
503498	9619562	3.42E-06	0.3	10%
504551	9619212	2.46E-06	0.21	9%
504600	9618145	5.86E-06	0.51	11%
505742	9612441	3.42E-06	0.3	10%
506652	9616943	4.83E-07	0.04	7%
506595	9616091	2.92E-05	2.53	13%
507460	9615596	2.49E-05	2.15	13%
507647	9614609	0.00023997	20.73	18%
508228	9613727	8.74E-05	7.55	16%
508270	9612802	0.001086517	93.88	22%
509415	9612626	0.000246075	21.26	18%
510121	9612111	0.004564494	394.37	27%
511175	9612012	1.28E-05	1.1	12%
512017	9611849	1.37E-06	0.12	9%
512208	9611057	0.005832323	503.91	28%
513449	9610589	0.042541202	3675.56	38%
514078	9609564	1.16E-05	1	12%
515055	9608862	0.007100187	613.46	29%
515787	9608383	1.10E-05	0.95	12%
519309	9607019	0.000285303	24.65	18%
522655	9605081	0.000157371	13.6	17%
523735	9604403	1.54E-05	1.33	12%
523765	9602452	0.000246075	21.26	18%
522616	9601966	0.000744827	64.35	21%
521609	9602521	0.000548974	47.43	20%
520010	9603257	0.013739132	1187.06	32%
519982	9604317	0.009939001	858.73	31%
518870	9603561	0.008184999	707.18	30%
519147	9604617	0.040836317	3528.26	38%
518446	9604827	0.000560615	48.44	20%
516163	9606644	0.003011577	260.2	26%
515124	9607053	0.000674311	58.26	21%
513764	9607805	0.000233983	20.22	18%
512344	9607487	0.018410104	1590.63	34%
511133	9607602	0.005134826	443.65	28%
509177	9607575	0.001968083	170.04	24%
509177	9610221	0.000200474	17.32	18%
509204	9610989	0.000526259	45.47	20%
505547	9613016	0.005832323	503.91	28%
504505	9614391	0.000361385	31.22	19%
504761	9615980	6.97E-05	6.03	15%