



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

Jackson Alves Martins¹, Luciano Soares da Cunha², Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco¹, Sérgio Bezerra Lima Junior¹, Welitom Rodrigues Borges²

Recebido em 05 de setembro de 2012/ Aceito em 10 de novembro de 2012

Resumo

A região costeira do Pecém vem sofrendo diversas transformações associadas ao meio físico com a implantação do Complexo Portuário e suas unidades industriais. A preocupação com as condições geoambientais devido à presença de um contexto hidrogeológico sensível às ações antrópicas justificaram a realização desta pesquisa que teve como objetivo principal caracterizar o contexto hidrogeológico costeiro. As metas dessa pesquisa compreenderam: i) avaliação multitemporal de uso e ocupação; ii) detalhamento da morfologia das unidades quaternárias; iii) aquisição de dados eletromagnéticos no domínio da frequência; iv) obtenção de parâmetros hidrogeológicos de forma direta e indireta. A análise dos dados de sensoriamento remoto do entorno do Pecém em escala de tempo permitiu a visualização do crescimento do processo de urbanização influenciado pela locação do Complexo Portuário, provocando aumento de área impermeabilizada e diminuição da área de recarga do aquífero raso dunas/paleodunas. Em complemento identificou-se: i) porções com erosão e acúmulo de sedimentos na faixa de praia; ii) evolução da área do lagamar do Cauípe com crescente deposição eólica; e iii) início de processo de soterramento da lagoa do Pecém através da migração do campo de dunas móveis com sentido leste-oeste. Os dados geofísicos mostraram zonas condutivas anômalas rasas provocadas pelo avanço natural da interface água doce/água salgada e anomalias em profundidade associadas ao avanço da intrusão salina com fluxo preferencial em zonas fraturadas no topo do embasamento e/ou em ocorrência de paleocanais. Os parâmetros hidrogeológicos corroboraram com os resultados geofísicos com relação às características texturais dos sedimentos arenosos em subsuperfície. Além disso, ressaltaram a alta vulnerabilidade à poluição do sistema dunas/paleodunas. Por fim, as características hidrogeofísicas e de sensores remotos expostas nesta pesquisa apontam como um alerta à manutenção das condições geoambientais para a região do Porto do Pecém, tendo em vista a evolução do crescimento urbano, turístico e industrial evidenciado. Desta forma, a compreensão das variáveis do macroambiente e de como o sistema local funciona são fundamentais para o entendimento da situação atual e das possíveis tendências de mudanças no futuro.

Palavras-Chaves: Aquíferos costeiros, uso e ocupação, geofísica, análise multitemporal.

Abstract

The coastal region of Pecém has been facing several changes in the physical environment caused by the installation of the Port and the related industrial complexes. Concerns about the geo-environmental conditions, for the presence of an hydrogeological context sensitive to human actions, justifies the main purpose of this paper, which is to identify the hydrogeological characteristics of this coastal context. The goals of this research included: i) evaluation of multitemporal use and occupancy;

ii) detailed morphology of the Quaternary blocks; iii) acquisition of electromagnetic data in the frequency domain; iv) direct and indirect measures of hydrogeological parameters. Remote sensing analysis in the area of Pecém allowed a discrete visualization of the population growth influenced by the presence of the port complex which also caused an expansion of the impermeable area and a reduction of the aquifers recharge area (dunes/paleo-dunes). In addition we identified: i) eroded portions and accumulation of sediments on the seashore; ii) development of Lagamar Cauípe area with an increasing of aeolian deposition; and iii) starting of the burying process of the Pecém lagoon through the movement of mobile dunes into east-west direction. The geophysical data showed a shallow area with a conductive anomaly caused by the natural advance of the fresh/salt water interface, and ulterior deeper anomalies related to the saltwater intrusion along fractured zones at the top of the basement and /or in correspondence of paleochannels. The hydrogeological parameters are in agreement with the geophysical results with respect to the textural features of the sandy sediments in the subsurface. Moreover, they highlight the high vulnerability of the pollution of the dunes/paleo-dunes system. Finally, the hydrogeophysical features and the remote sensing analysis done in this study point out the alert on the geo-environmental conditions of the Pecém Port area taking in considering the urban growth and the touristic and industrial increase. Thus, understanding the macro environmental variables and the local system mechanisms is fundamental to comprehend the actual situation and possible future changes.

Keywords: coastal aquifers, use and occupation, geophysics, multitemporal analysis.

¹ Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto – LGPSR-DEGEO-UFC

² Universidade de Brasília - UNB

1. Introdução

O Governo do Estado do Ceará elaborou em 1995 um Plano Diretor para a implantação do Complexo Industrial Portuário do Pecém (CIPP) como forma de solução aos problemas associados ao crescimento econômico do Estado, culminando em 2002 no terminal portuário moderno dotado da infra-estrutura necessária para garantir condições de sustentabilidade a pólos industriais com uma área aproximada de 300km² (CearáPortos 2003).

Por se tratar de uma região com contexto hidrogeológico sensível do ponto vista geoambiental, diversas fontes de contaminação podem atingir o solo e as águas subterrâneas, chegando ao nível freático e se dispersando através de plumas de contaminação que migram em função de vários fatores (hidrogeológicos, topográficos, climáticos, etc), podendo gerar áreas degradadas de difícil e alto custo de recuperação (Nogueira & Augusto, 2004; Cunha, 2009).

Diante deste quadro, é essencial o conhecimento do sistema geoambiental frente à susceptibilidade aos processos de infiltração e

contaminação, justificando assim a realização de pesquisas na área com aplicações de métodos não invasivos. O objetivo deste trabalho é contextualizar do ponto de vista hidrogeológico o meio ambiente costeiro no entorno do Complexo Industrial Portuário do Pecém.

2. Área de Estudo

A área de estudo está inserida no município de São Gonçalo do Amarante, distrito do Pecém, Estado do Ceará. O acesso ao local a partir de Fortaleza é realizado através da rodovia 085 (estruturante/sol poente) e em seguida pela CE-421 (Fig. 1).

Na região predomina o clima quente estável com temperaturas elevadas (média de 26°C), porém de pequena amplitude e forte evaporação (2.300 mm/ano). A pluviometria tem distribuição espacial e temporal irregular, superando a faixa média de 1.000 mm/ano, segundo dados da Fundação Cearense de Meteorologia (FUNCEME, 2009). Os recursos hídricos superficiais compõem a micro bacia do rio

Cauípe (rio e lagamar do Cauípe, o riacho Guaribas e a lagoa do Pecém), possuindo uma área de 296,99 km² e um potencial hídrico de 93,4 x 10⁶ m³/ano segundo Secretaria de Recursos Hídricos (SRH,

2003). De acordo com Souza (1988) duas principais formas de relevo ocorrem na área de estudo: Domínio dos escudos e maciços antigos e o Domínio dos depósitos sedimentares cenozóicos.

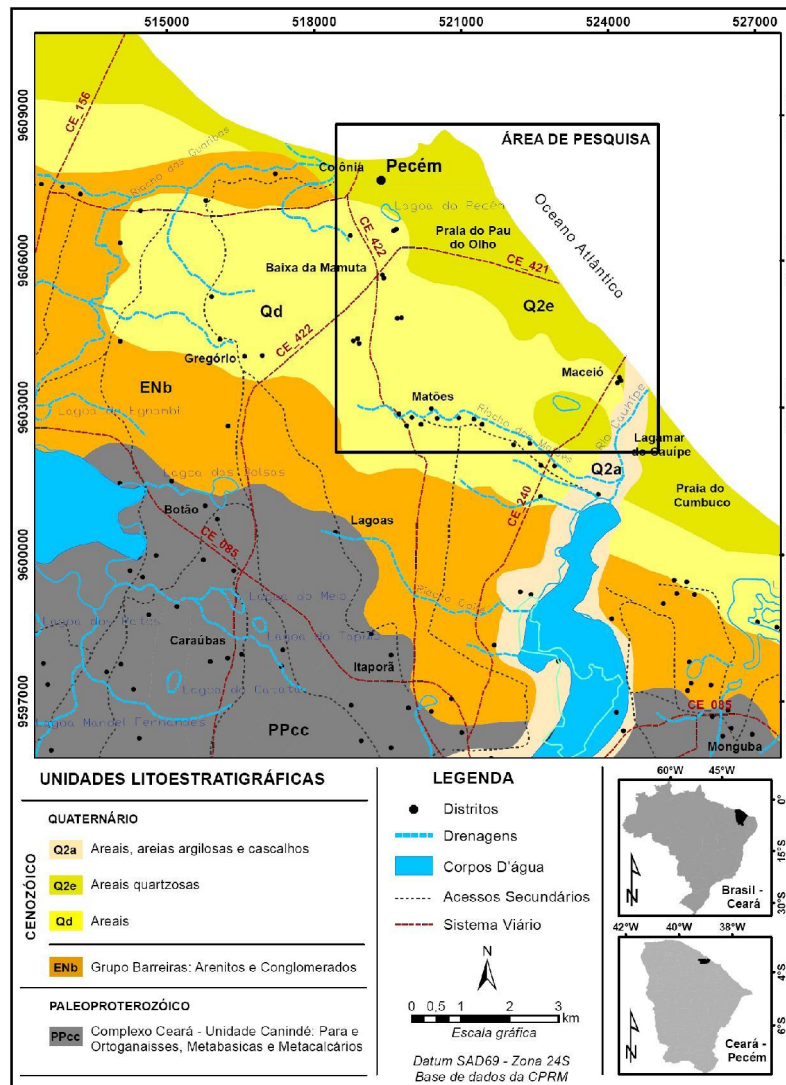


Fig. 1 – Mapa de localização e contexto geológico regional da área de pesquisa.

De acordo com o Mapa Geológico do Serviço Geológico do Brasil (Cavalcante, 2003) a geologia da região compreende um empilhamento estratigráfico formado, da base para o topo, pela unidade Pré-Cambriana (Complexo Gnáissico-Migmatítico (CGM) Ceará / Unidade Canindé - PPcc) representado por paragnaisses, ortognaisses, metabásicas e metacalcários. Segundo Brandão (1995) essa associação CGM recebe na literatura as seguintes denominações: Complexo Caicó (Meunier, 1964), Pré-Cambriano Indiferenciado

(Leal, 1970), Complexo Gnáissico Migmatítico (Lima *et al*, 1980) e Complexo Nordestino (Nascimento *et al*, 1981).

Posteriormente temos as unidades Tércio-Quaternárias: i) depósitos da Formação Barreiras (ENb) representada por arenitos e conglomerados; ii) coberturas colúvio-eluviais; iii) depósitos de praia, flúvio-marinhos, eólicos e fluviais formados pelas areias (Qd), areias quartzosas (Q2e) e por areias, areias argilosas e cascalhos (Q2a). A área de estudo concentra-se sobre os sedimentos inconsolidados

(dunas/paleodunas) na zona de praia, pertencentes ao Quaternário.

3. Materiais e métodos

As aerofotografias de 1968 obtidas pela missão do satélite americano CORONA (CIA – *Central Intelligence Agency*, 2012), assim como as imagens *Quickbird* (2001) e ortofotocarta (2007) foram processadas no *software ERmapper* versão 6.4 com o objetivo de caracterizar o contexto geoambiental da região do Pecém, proporcionando uma visão do avanço do uso e ocupação das unidades Quaternárias e das características do meio

ambiente/paisagem em escala de tempo. Ambas as fotografias aéreas e imagens foram cedidas pelo Instituto de Ciências do Mar LABOMAR/UFC. Maiores detalhes das especificações técnicas do satélite *Quickbird* podem ser encontrados em *DigitalGlobe* (2003) e *Ball Aerospace & Technologies Corp.* (2002) in Kux & Pinheiro (2005).

A etapa de aquisição geofísica de campo no litoral da área de pesquisa ocorreu no mês de fevereiro de 2006. Ao todo foram adquiridos 5.320 metros distribuídos em dois perfis eletromagnéticos no domínio da frequência, cuja localização pode ser visualizada abaixo (Fig. 2)

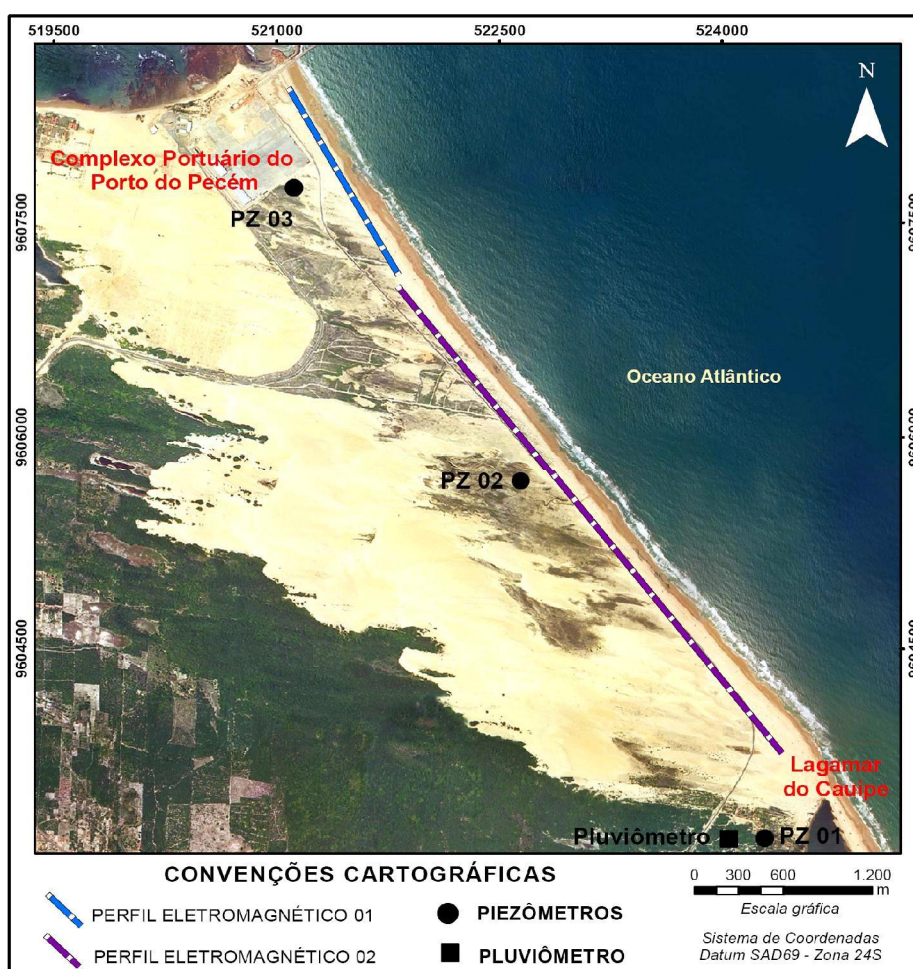


Fig. 2 – Mapa de localização dos perfis EM-34 (01 e 02), da posição do pluviômetro e dos três piezômetros instalados na área de pesquisa, sobre a imagem *Quickbird* (2001).

No perfil 01 (1.320 metros) o espaçamento entre os pontos de medida de condutividade elétrica foi de 40 metros e no perfil 02 (4.000 metros) o espaçamento foi de 80 metros. Em ambos os perfis

foram adquiridos todos os arranjos e distâncias interbobinas disponíveis (Tab. 1). O equipamento utilizado foi o EM34-3XL desenvolvido pela *Geonics Limited*.

Tab. 1 – Relação entre espaçamento inter-bobinas, modo de operação do equipamento e profundidade teórica de investigação do EM-34-3XL (McNeill, 1980).

DISTÂNCIA ENTRE AS BOBINAS (M)	FREQÜÊNCIA (HZ)	PROFUNDIDADE TEÓRICA DE INVESTIGAÇÃO (M)	
		Dipolo Horizontal (DH)	Dipolo Vertical (DV)
10	6.400	7.5	15
20	1.600	15	30
40	400	30	60

Como bibliografia sobre a fundamentação teórica dos métodos eletromagnéticos e especificamente do método EM-34, foram utilizados os trabalhos clássicos de McNeill (1980a e 1980b), Steward & Butnall (1986), Mendes (1987), Goldstein *et al.*, (1990), McNeill (1990), Steward (1990) Costa & Ferlin (1992), Sharma (1997) e Reynolds (1997). Já os aspectos teóricos sobre intrusão salina foram consultados em Henry (1959), Cooper (1964), Khair et al, (1994) e Alley et al, (2000).

A etapa de enquadramento hidrogeológico foi realizada durante o período de um ano, onde foram medidos parâmetros hidrogeológicos, como a profundidade do Nível Estático (NE) e a Condutividade Elétrica (CE) das águas, além dos dados pluviométricos (Fig. 3). Em complemento, foram construídos três piezômetros (PZs) de monitoramento ao longo da faixa de praia estudada e um pluviômetro instalado de modo a atender aos objetivos propostos (ver Fig. 2).

Importante ressaltar que por motivos de viabilidade não foram possíveis a mensuração do NE e CE em alguns meses, evidenciados nos gráficos dos resultados a seguir, mas que no quadro geral não influenciaram na interpretação dos resultados. Nesta etapa foram utilizados GPS Diferencial modelo *Promark 2 Ashtech*, medidor de nível eletrônico de marca *Scame, Jaciri mnj 100m*, condutivímetro portátil digital, modelo *Sammar CD-840*.

Em complemento foram coletadas amostras no ato da construção dos PZs: i) 17 amostras para análises granulométricas (intervalos de um metro) realizadas Laboratório de Oceanografia Abiótica do Instituto de Ciências do mar da Universidade Federal do Ceará (LABOMAR/UFC), seguindo as etapas de preparação, cálculos estatísticos dos parâmetros granulométricos, interpretação dos

resultados, escalas granulométricas, representação gráfica, análise estatística e classificação segundo Folk & Ward (1957) in Suguio & Bigarella (1979); e ii) 6 amostras indeformadas na posição horizontal e vertical no mesmo local dos PZs para determinação da condutividade hidráulica (permeabilidade) dos sedimentos locais. O procedimento de coleta e análise foi realizado de acordo com as sugestões de Cauduro (1984) in Nogueira & Augusto (2004), e o ensaio foi realizado no Laboratório de Solos (LABSOLO/UFC), através do permeâmetro de carga variável. Os parâmetros permeabilidade e capacidade de infiltração no solo foram baseados nos fundamentos teóricos de Feitosa & Manoel Filho (1997), Tucci (2001) e Custódio & Lhamas (1983).

A etapa final consistiu de compilação e integração de todas as informações em ambiente SIG proporcionando interações e fusões de produtos, com geração de gráficos, mapas temáticos, interpretação, discussão dos resultados e confecção final deste trabalho.

4. Resultados

4.1 Método Eletromagnético (EM-34)

Os dados geofísicos foram processados no *software Surfer 9.0*, no qual foram geradas seções eletromagnéticas através da interpolação de valores de condutividade aparente pelo método de krigagem simples. A krigagem é um procedimento de inferência espacial na qual a estrutura de covariância espacial é modelada em uma etapa de análise variográfica anterior aos procedimentos inferenciais e produz resultados de superfícies interpoladas mais suaves (Deutsch & Journel (1992 e 1998); Cressie (1991)). Especificamente, a krigagem simples assume que as médias locais são relativamente constantes e de valor muito semelhante à média da população que é

...



Fig.3 – Fotografias da etapa de aquisição dos parâmetros hidrogeológicos. A – Registro das anotações pertinentes ao piezômetro monitorado; B – Detalhes do medidor de nível; C – Momento da mensuração do pH e condutividade elétrica da água; e D – Medida da altura da “boca” do piezômetro.

conhecida. A média da população é utilizada para cada estimativa local, em conjunto com os pontos vizinhos estabelecidos como necessários para a estimativa.

Desta maneira, as seções EM revelaram os seguintes aspectos (Fig. 4):

Seção EM (Perfil 01) – Esta seção apresentou zonas anômalas condutivas rasas a uma profundidade teórica constante de aproximadamente 20 metros distribuída ao longo dos 400 metros iniciais do perfil. Estes valores de condutividade aparente chegam a ordem de 46 mS/m nesta referida zona anômala subsuperficial. No início do perfil observa-se ainda regiões anômalas mais profundas, chegando a valores de 42 mS/m em profundidades teóricas em torno do 55 metros. Entre a posição 400 e 760 metros temos a ocorrência de uma extensa faixa de baixa condutividade aparente com máximos valores na ordem de 15 mS/m e mínimos chegando a 1 mS/m na posição 600 metros do perfil. Importante ressaltar que esta região pouco condutiva ocorre de maneira concentrada entre as posições 580 a

720 metros e de maneira homogênea em profundidade, desde a subsuperfície até a profundidade máxima teórica alcançada pelo equipamento (60 metros). Na continuidade do perfil, ocorre na posição 820 metros uma zona anômala condutiva centrada com valores de 40 mS/m e em profundidade teórica média em torno de 20 metros. Na porção final do perfil ocorre uma discreta faixa de baixa condutividade aparente em maior profundidade (45 metros) teórica. Esta faixa “resistiva” tem sua maior concentração em profundidades teóricas menores na posição 1080 metros.

As interpretações referentes ao perfil 01 sugerem uma maior presença de concentração de sais dissolvidos no aquífero raso dunas, caracterizando a faixa anômala existente e bem marcada nos 400 metros iniciais. Importante salientar que o início do perfil 01 é bem próximo da interface praia/mar (Fig. 5A) o que corrobora a interpretação de que a interface natural água salgada/água doce encontra-se nesta posição subsuperficial.

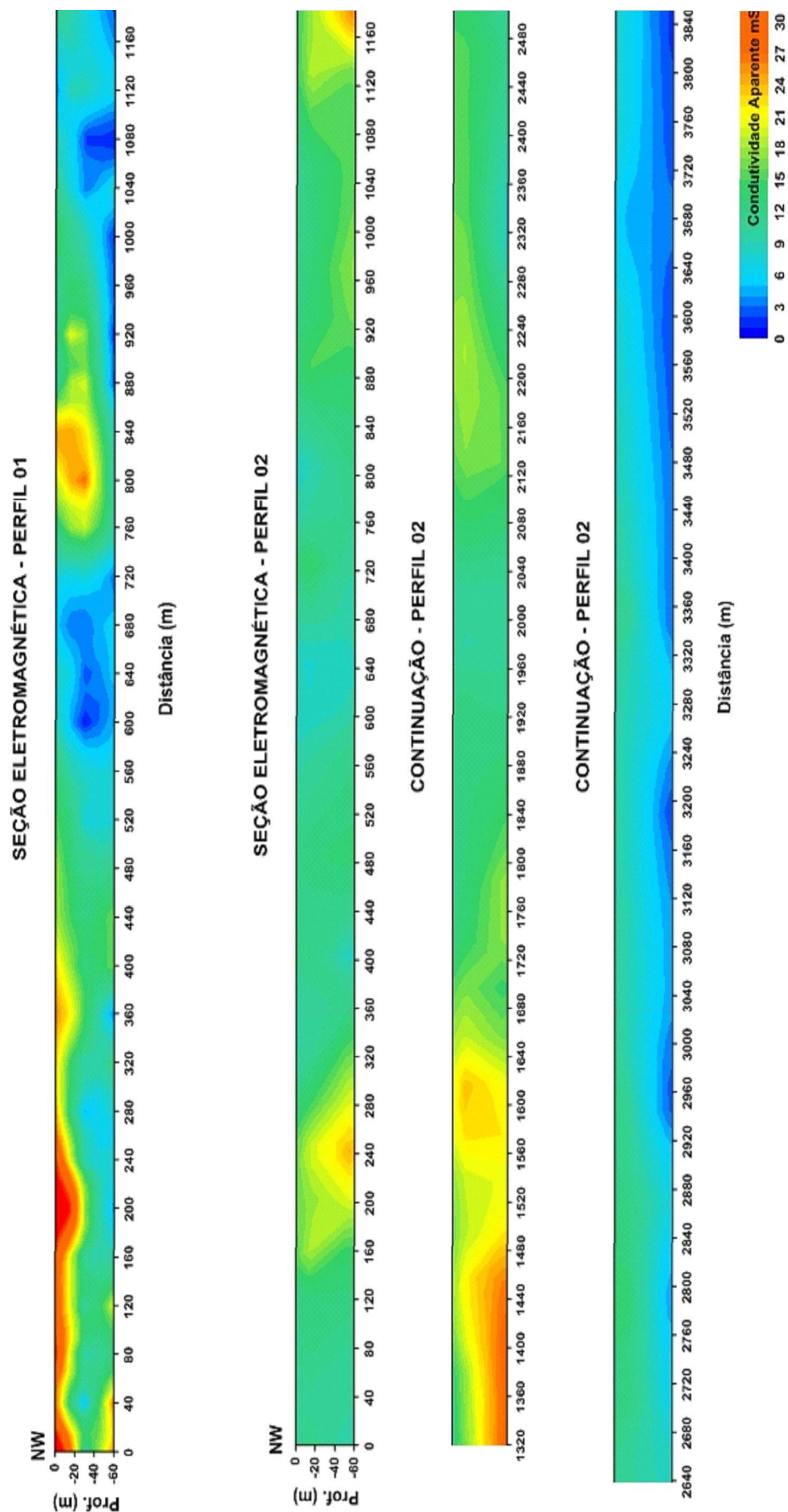


Fig. 4 – Seções eletromagnéticas referentes aos perfis 01 e 02 elaboradas no software Surfer 9.0 (Gridding Method Kriging). No perfil 01 o espaçamento entre as estações de aquisição foi de 40 metros, enquanto que no perfil 02 foi de 80 metros. Em ambas as seções foram utilizadas os seguintes dipolos (arranjos) com suas respectivas profundidades teóricas: DH10 (7,5 metros), DH20 (15 metros), DH40 (30 metros) e DV40 (60 metros). Na elaboração das seções foi usada mesma escala de condutividade (palheta de cores) e mesma escala gráfica de x, y.

A anomalia condutiva presente em maior profundidade sugere o imageamento de porções aquíferas argilosas de baixa resistividade da Formação Barreiras, possivelmente saturadas.

As faixas resistivas observadas principalmente na posição 680 metros do perfil evidenciando baixos valores de condutividade, estão aparentemente associadas à presença de córregos e riachos sazonais perpendiculares à linha de costa e, conseqüentemente, ao perfil (Fig. 5B).

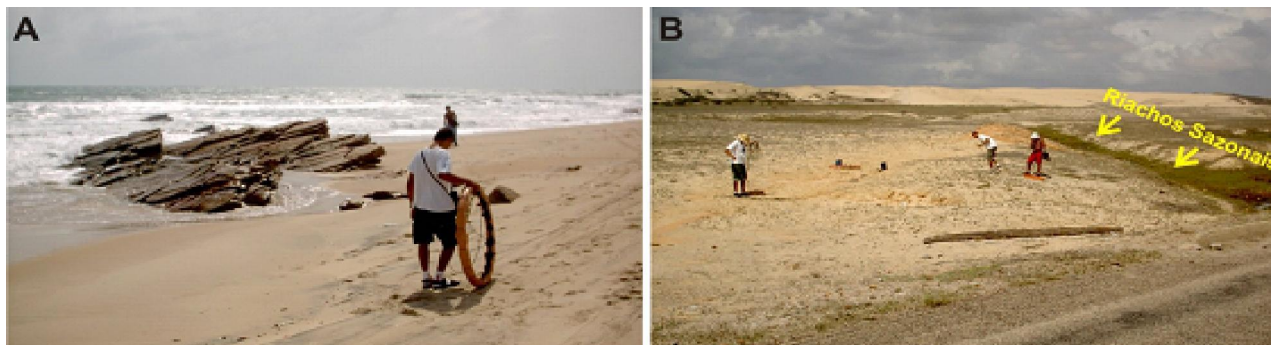


Fig. 5 – Fotografias da aquisição EM indicando: A - detalhes da proximidade com a linha do mar no início do perfil 01; e B - presença de drenagens sazonais perpendiculares à linha de costa e conseqüentemente ao perfil.

destacar: i) presença de duas porções anômalas condutivas, uma centrada na posição 240 metros com valores de condutividade aparente de 24 mS/m (profundidade teórica média de 35 metros) e a outra caracterizada por uma faixa condutiva de aproximadamente 400 metros de extensão com valores de condutividade aparente chegando a 33 mS/m e início na profundidade teórica de 25 metros. Esta faixa condutiva contínua inicia-se na posição 1160 metros e termina na posição 1480 metros, diminuindo sua resistividade a medida que aumenta a profundidade de investigação; ii) uma extensa faixa resistiva medindo aproximadamente 1100 metros, com início na posição 2900 metros e prolongando-se até o final do perfil em direção ao lagamar do Cauípe. Os valores de condutividade aparente nesta zona chegam a 1 mS/m e tem maior predomínio a partir de 35 metros de profundidade teórica.

Diante dos fatos mencionados anteriormente, a seção 02 possibilitou as seguintes interpretações: i) A faixa anômala condutiva extensa na posição média de 1300 metros que se inicia a aproximadamente 25 metros de profundidade é

No restante do perfil destacam-se zonas condutivas e extensas lateralmente, enquanto que em caráter mais profundo ocorre faixa lateral altamente resistiva com profundidade média de 45 metros associada possivelmente a porções mais arenosas aquíferas da Formação Barreiras.

Seção EM (Perfil 02) – Esta seção apresentou baixa resolução lateral devido principalmente ao espaçamento entre as estações de aquisição (80 metros). Desta maneira, podemos

indicativa da presença de possível avanço da interface água salgada / água doce (intrusão salina) motivada pela (a) presença de zonas fraturadas no topo do embasamento, muito provavelmente quartzitos, que condicionam e armazenam um fluxo preferencial de água salgada quando ocorre a movimentação natural da interface água doce/água salgada; e/ou (b) presença de “zonas preferenciais ou mais susceptíveis” associadas à ocorrência de paleocanais; e ii) Os 1000 metros finais do perfil caracterizado por uma faixa resistiva (baixa condutividade) e conseqüentemente uma maior circulação de águas com baixos teores de sais (doce) está possivelmente associada à influência da região do rio/lagamar do Cauípe.

Com relação a uma análise qualitativa dos dados adquiridos no perfil 01, foi elaborado gráfico em função das relações entre os modos, arranjos e frequências de aquisição EM-34 (Fig. 6).

Como apresentado anteriormente (ver Tab. 1), os arranjos Dipolo Horizontal 40 e o Dipolo Vertical 20 investigam teoricamente a mesma profundidade (30 metros) e estão expostos abaixo

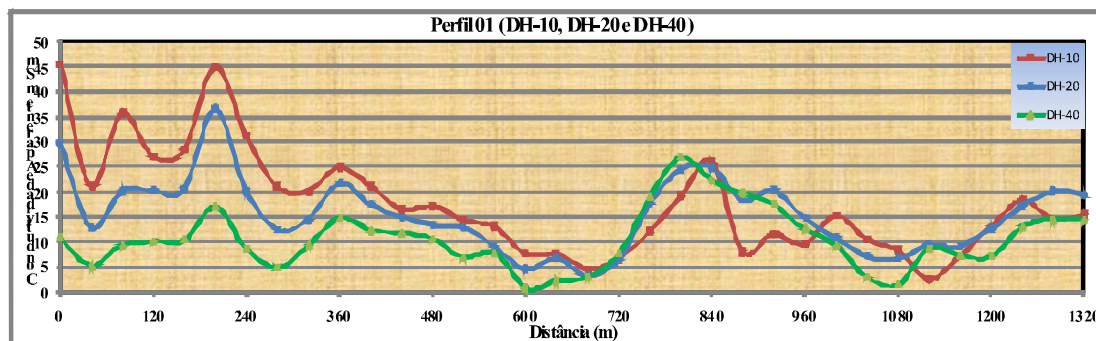


Fig. 6 – Gráfico (dados brutos) do perfil eletromagnético 01, evidenciando a boa correlação dos dados nos modos (DH10, DH20 e DH40). Observa-se o início do perfil com valores de condutividade aparente elevados para os arranjos de investigação mais rasa.

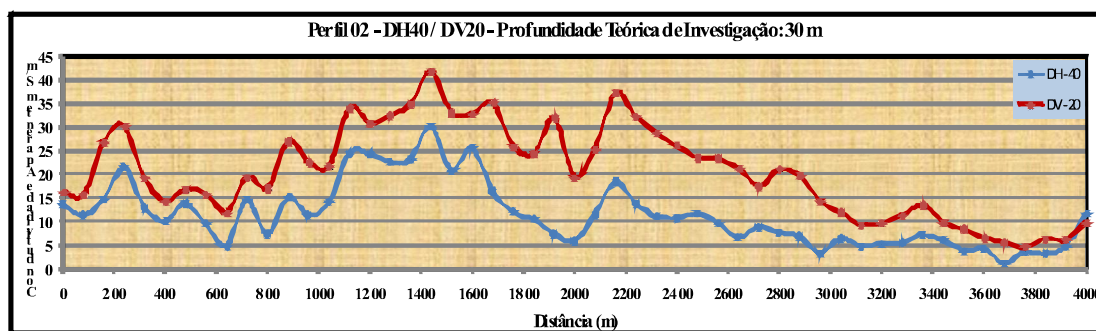


Fig. 7 – Gráfico (dados brutos) do perfil eletromagnético 02, evidenciando a boa correlação dos dados de arranjos diferentes (DH40 / DV20) com mesma profundidade teórica de investigação.

para o perfil 02 (Fig. 7).

O gráfico da relação entre o DH-20 e o DV-10 apresenta boa correlação e semelhante comportamento nos valores de condutividade aparente durante todo o perfil 02. Por outro lado, mesmo com a boa qualidade de aquisição e coerência dos dados obtidos, percebe-se que os valores do arranjo Dipolo Vertical 20 estão acima dos valores do arranjo Dipolo Horizontal 40. Isso evidencia a diferença entre: a profundidade teórica de investigação - sem erro apreciável, dependendo do espaçamento e orientação das bobinas e a profundidade real de penetração - entendida como a real profundidade obtida no levantamento, sendo diretamente controlada pelo meio.

4.2 Enquadramento hidrogeológico

O enquadramento hidrogeológico realizado nesta pesquisa envolveu principalmente o monitoramento e caracterização do aquífero raso

dunas/paleodunas e suas interações com o meio local através de parâmetros como: i) condutividade hidráulica (permeabilidade) em amostras indeformadas; ii) análise granulométrica das amostras a cada metro de profundidade oriundas da construção de três piezômetros de monitoramento; iii) monitoramento anual de nível estático e condutividade elétrica da água nos piezômetros instalados; e iv) obtenção do quadro chuvoso anual em pluviômetro alocado na área de pesquisa.

A distribuição da condutividade hidráulica vertical e horizontal foi homogênea nos sedimentos eólicos arenosos predominantes na área de estudo, com valores da ordem de 10-1 cm/s.

Desta maneira ficam evidenciados os altos valores de condutividade hidráulica das três amostras analisadas, refletindo as características do material formado por areias homogêneas tanto no tamanho quanto no arranjo dos grãos típicos de depósitos eólicos. As colocações acima conduzem

a um material que proporciona fácil recarga do aquífero dunas raso em condições naturais. Em contrapartida, este fato alerta para possíveis contaminações deste aquífero através da susceptibilidade a infiltrações, no caso de vazamentos superficiais relacionados as atividades portuárias e seu complexo industrial.

De forma a identificar a distribuição granulométrica vertical dos sedimentos quaternários na área de pesquisa foram realizadas 17 análises granulométricas sendo distribuídas em intervalos de um metro. A tabela abaixo (Tab. 2) apresenta a relação dos pontos e profundidades amostrados e os resultados obtidos segundo a Classificação de Folk & Ward (1957) *in* Suguio & Bigarella (1979).

Outra forma utilizada na etapa de análise dos resultados é a visualização gráfica da distribuição granulométrica dos sedimentos através de curvas de frequência acumulada. Cada ponto desta curva corresponde a uma determinada granulometria sendo

que o eixo das ordenadas representa os valores retidos e, ao longo do eixo das abscissas está representada a escala de frequência de 0 a 100%. Nesta pesquisa, para efeito comparativo, uma curva-padrão que compreende um intervalo onde se enquadram todos os sedimentos provenientes de dunas foi incorporada como base para plotar os resultados obtidos (Fig. 8A, B e C).

Com relação aos piezômetros 01 e 02, os resultados das análises granulométricas referentes às amostras das profundidades mais rasas ficaram em grande parte dentro do intervalo e com boa correlação com a curva-padrão. As mesmas foram classificadas como areia média e grossa. Praticamente, apenas as amostras 5M (PZ01) e 6M (PZ02) ocorreram fora do intervalo onde se enquadram sedimentos quaternários provenientes de dunas (curva-padrão), onde são vistos (Tab. 2) apresentando grau de seleção pobremente selecionado.

Tab. 2 – Resultados obtidos para a análise granulométrica nas amostras dos piezômetros de monitoramento 1,2 e 3. Obs. Silte (% silte) não foi detectado em nenhuma amostra.

Amostra	Cascalho (%)	Areia (%)	Lama (%)	Argila (%)	F&W-Média	F&W-Média na	F&W-Grau Seleção
PZ01 1M	0	99,67	0,3257	0,33	Areia Média	Areia Média	Moderadamente selecionado
PZ01 2M	0	99,83	0,169	0,17	Areia Média	Areia Média	Bem selecionado
PZ01 3M	0	100,19	-0,1919	-0,19	Areia Média	Areia Média	Moderadamente selecionado
PZ01 4M	0	99,93	0,0707	0,07	Areia Média	Areia Média	Bem selecionado
PZ01 5M	7,2814	92,75	-0,0361	-0,04	Areia Grossa	Areia Média	Pobremente selecionado
PZ02 1M	0	100,42	-0,4245	-0,42	Areia Média	Areia Média	Moderadamente selecionado
PZ02 2M	0	99,73	0,2724	0,27	Areia Média	Areia Média	Moderadamente selecionado
PZ02 3M	2,0849	97,05	0,8692	0,87	Areia Média	Areia Média	Moderadamente selecionado
PZ02 4M	9,9641	89,95	0,0835	0,08	Areia Grossa	Areia Grossa	Pobremente selecionado
PZ02 5M	7,3664	92,63	-0,001	0	Areia Grossa	Areia Grossa	Pobremente selecionado
PZ02 6M	6,6422	93,27	0,0882	0,09	Areia Média	Areia Média	Pobremente selecionado
PZ03 1M	0	99,84	0,1637	0,16	Areia Grossa	Areia Grossa	Bem selecionado
PZ03 2M	0	99,99	0,0073	0,01	Areia Média	Areia Média	Muito bem selecionado
PZ03 3M	0	99,91	0,0888	0,09	Areia Média	Areia Média	Bem selecionado
PZ03 4M	0,6114	98,8	0,5843	0,58	Areia Média	Areia Média	Moderadamente selecionado
PZ03 5M	0	99,42	0,5755	0,58	Areia Média	Areia Média	Moderadamente selecionado
PZ03 6M	0	99,22	0,7819	0,78	Areia Média	Areia Média	Moderadamente selecionado

Tanto pela análise da tabela 2 quanto pelas Curvas de Frequência Acumulada (ver Fig. 8) é possível identificar para os sedimentos provenientes do piezômetro de monitoramento 02 que a distribuição granulométrica predominante verticalmente é de areia média a grossa com conteúdo de argila menor que 1,0% e o teor de cascalho chegando a aproximadamente 10,0%, podendo estar associado à presença de paleocanais do rio Cauípe e conseqüentemente um alto conteúdo deste material.

Os níveis classificados como areia grossa, presentes nos perfis dos poços 02 e 03, podem ser associados à variação lateral granulométrica entre sedimentos arenosos médios e grossos devido a diferença de energia na deposição de material na faixa de praia, onde estes poços estão localizados.

Os dados pluviométricos caracterizaram o período chuvoso se iniciando em janeiro, tendo a máxima de chuvas em abril, onde foram registrados valores de 345 mm, e o fim do período em julho. Em setembro registrou-se uma taxa pluviométrica

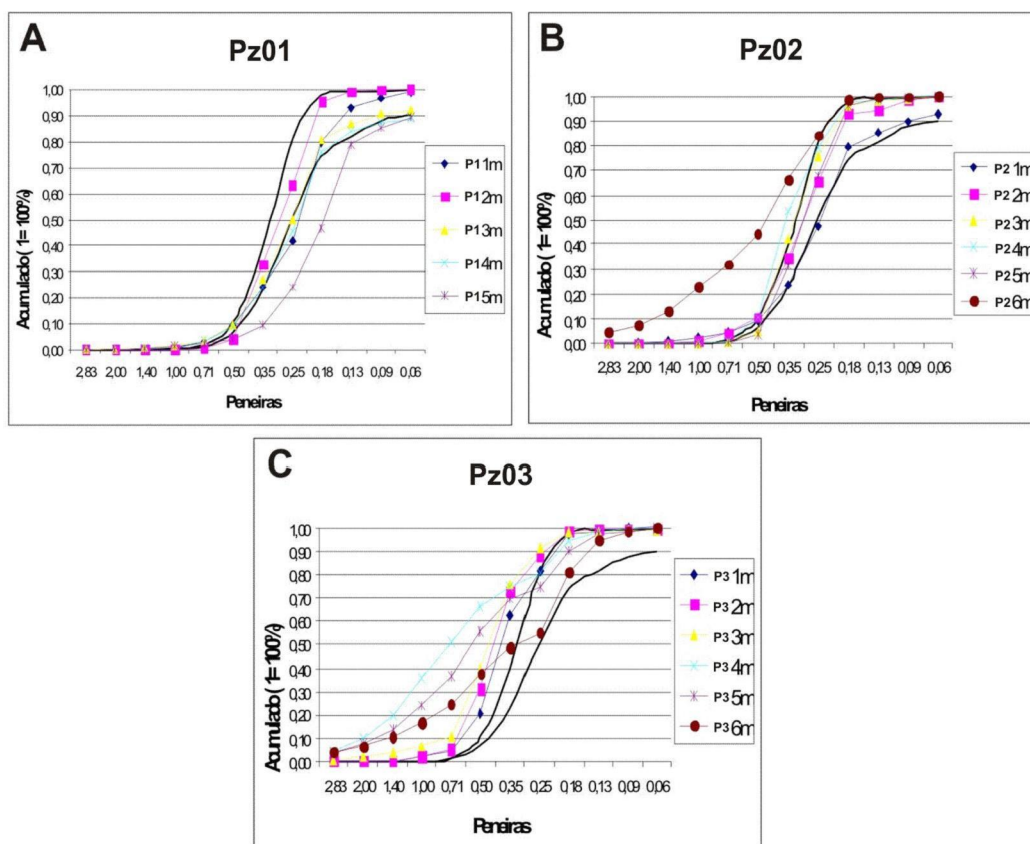


Fig. 8 – Distribuição granulométrica das amostras referentes aos piezômetros: A-PZ01, B-PZ02 e C-PZ03. A curva-padrão encontra-se em intervalo de cor preta.

de 50 mm e nos meses seguintes ocorreu o período mais seco com valores próximos a 2 mm (Fig. 9).

A variação do nível estático apresenta boa correlação com os dados pluviométricos da região. Observam-se as menores profundidades do nível estático a partir do mês de fevereiro, com o início das chuvas na região. Após o mês de julho, percebe-se o início do rebaixamento do nível estático, chegando as maiores profundidades nos meses de novembro/dezembro, correspondendo com o período menos chuvoso (Fig. 10). Os três piezômetros apresentaram a mesma variação de profundidade durante o decorrer dos meses, dentro do período anual pesquisado.

O piezômetro 02 revelou a menor variação de profundidade, ficando no intervalo de 2,3 a 2,85 metros, sendo esta a máxima profundidade atingida referente aos meses novembro/dezembro.

A variação do nível estático do aquífero raso dunas em função da recarga (pluviometria) na área evidenciou a capacidade de infiltração dos

sedimentos eólicos vistos anteriormente nos ensaios de condutividade hidráulica e análise granulométrica.

Vale a pena ressaltar novamente o caráter raso do aquífero e características dos sedimentos superficiais gerando, conseqüentemente, vulnerabilidade do mesmo aos agentes contaminantes e possíveis infiltrações.

As medidas obtidas no monitoramento para Condutividade Elétrica (CE) da água ficaram variando entre 0,08 até 0,24 mS/cm (Fig. 11). Estes valores encontram-se abaixo dos limites recomendados pela Organização Mundial de Saúde (OMS) para consumo humano (1,5 mS/cm). Esta colocação se dá através da relação entre CE com Sólidos Totais Dissolvidos (STD) na água, comumente utilizada por diversos autores, por exemplo, (Souza, 2002).

O comportamento dos valores de condutividade elétrica das amostras de água dos 3 piezômetros é homogêneo, com valores decrescendo com início das chuvas a partir de abril devido à

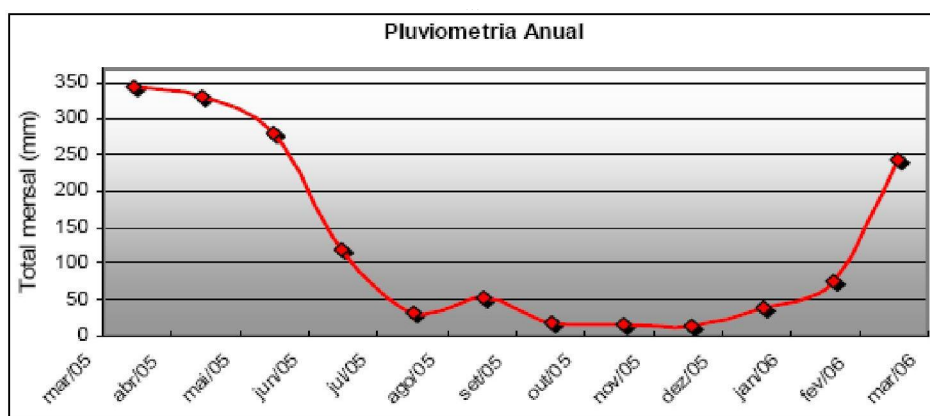


Fig. 9 – Gráfico dos dados pluviométricos levantados durante um ano (03/2005 até 03/2006), evidenciando 2 períodos distintos: chuvoso e seco.

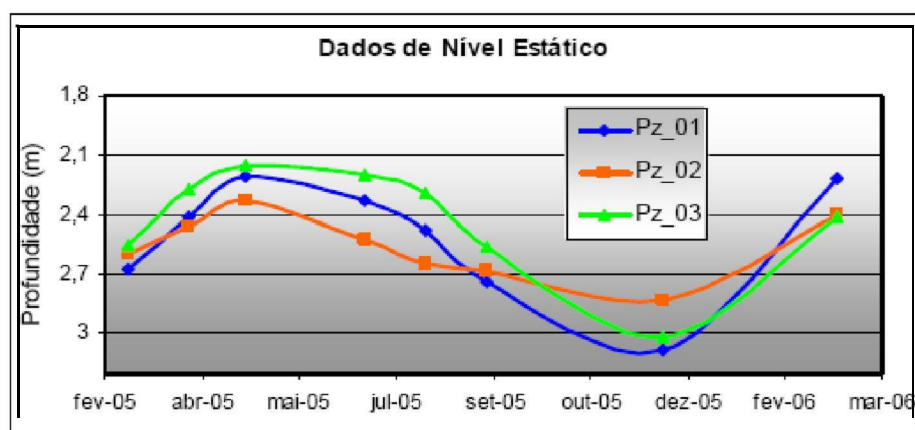


Fig. 10 – Gráfico de variação anual do Nível Estático para os 3 piezômetros inseridos na área de pesquisa, apresentando uma variação homogênea entre ambos.

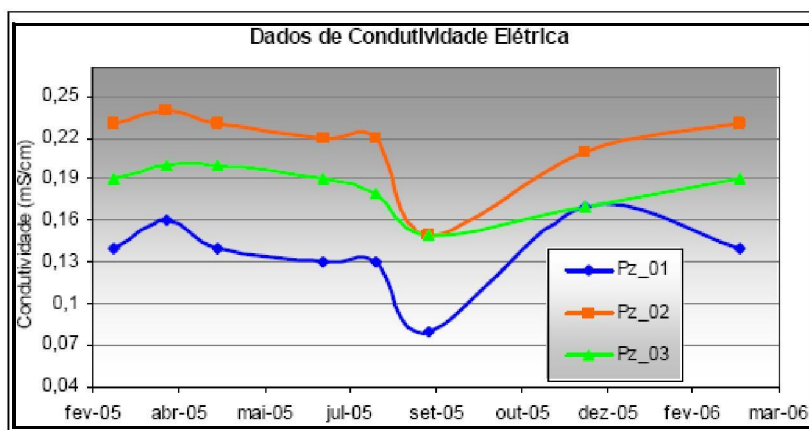


Fig. 11 – Gráfico da variação anual dos valores de Condutividade Elétrica (CE) da água, apresentando valores dentro dos limites recomendados pela OMS.

diluição do teor de sais causada pela infiltração dessas águas. No mês de setembro ocorre uma queda nos valores sem que haja quantidades significativas de chuva nesse período, mas de alguma forma este mês se destaca entre os meses menos chuvosos com alguma precipitação, como evidenciado no gráfico de dados pluviométricos (ver Fig. 9).

Ao relacionar os três piezômetros no gráfico acima, fica visível valores de CE mais elevados no piezômetro 02, em todo o período de monitoramento, variando de 0,16 a 0,24 mS/cm. Como observado (ver Fig. 2), o piezômetro 02 é o mais próximo da influência marinha e está localizado na posição da anomalia condutiva presente no perfil eletromagnético 02. O piezômetro 01 apresentou valores de 0,08 a 0,17 mS/cm, caracterizando as amostras com menores valores de CE, sendo possivelmente interpretado como influência das águas doces do rio/lagamar do Cauípe devido sua proximidade.

4.3 Sensoriamento Remoto

As principais características morfológicas no entorno do Porto do Pecém observadas nos produtos de sensoriamento remoto em escala multitemporal ao longo de aproximadamente 40 anos (fig. 12) foram: i) linha de costa com direção sudeste-noroeste e sensível inflexão para sul nas proximidades do lagamar do Cauípe; ii) variação da linha de costa com locais de erosão da faixa de praia e outros apresentando acúmulo de sedimentos; iii) maior atuação da deposição de sedimentos eólicos na foz do rio Cauípe provocando barramento sazonal do seu curso natural e evolução na área do lagamar do Cauípe; iv) início de processo de soterramento da lagoa do Pecém através da migração do campo de dunas móveis com sentido leste-oeste; v) aumento considerável de acessos e estradas promovendo o turismo local e facilitando a presença de ação antrópica na área; vi) crescimento do processo de urbanização influenciado pela locação do Complexo Portuário do Pecém; vii) aumento do uso e ocupação do solo (degradação) incluindo processos industriais provocando aumento da impermeabilização de áreas de dunas e diminuição

da recarga do aquífero raso dunas/paleodunas; viii) acréscimo da presença de vegetação rasteira na faixa de dunas entre o lagamar do Cauípe e Porto e nas dunas situadas na margem esquerda do rio Cauípe (sudeste da área).

Diante dos fatos citados, entende-se como processos naturais os relacionados ao aumento da vegetação rasteira nas dunas e a migração destes sedimentos eólicos.

Em contra partida os processos de uso e ocupação desordenada do solo, principalmente em área de dunas, provocados pelo crescimento turístico e industrial da região geram diversos problemas de ordem geoambiental, como: i) erosão e acúmulo de sedimentos nas faixas de praia (ver Fig. 12), especificamente, erosão na porção entre o lagamar do Cauípe e o Porto, e engorda na porção entre o Porto e a localidade de Colônia (extremo noroeste da área); ii) aumento de possibilidades de contaminações das águas subterrâneas, seja por infiltrações de derivados do petróleo, seja por sua exploração excessiva e avanço da cunha salina; e iii) diminuição (impermeabilização) de áreas de recarga do aquífero raso evidenciado na porção extremo noroeste da área (localidade de colônia).

5. Discussões e considerações finais

A partir das correlações estabelecidas entre os aspectos geofísicos, hidrogeológicos e da análise multitemporal por sensores remotos da região costeira do entorno do Porto do Pecém, foi possível fazer as seguintes considerações:

i) A interpretação dos resultados dos parâmetros hidrogeológicos (nível estático e condutividade elétrica da água) revelaram um sistema aquífero dunas/paleodunas com baixo teor de sais e caráter raso, enfatizando a boa correlação entre a precipitação, a variação da profundidade do nível estático e a diluição do teor de sais. O período chuvoso ficou bem marcado entre fevereiro e junho, com o restante do ano praticamente sem precipitação. Os ensaios de permeabilidade e análise granulométricas, evidenciaram altos valores de condutividade hidráulica tanto nas amostras verticais como horizontais, além de grãos arenosos bem

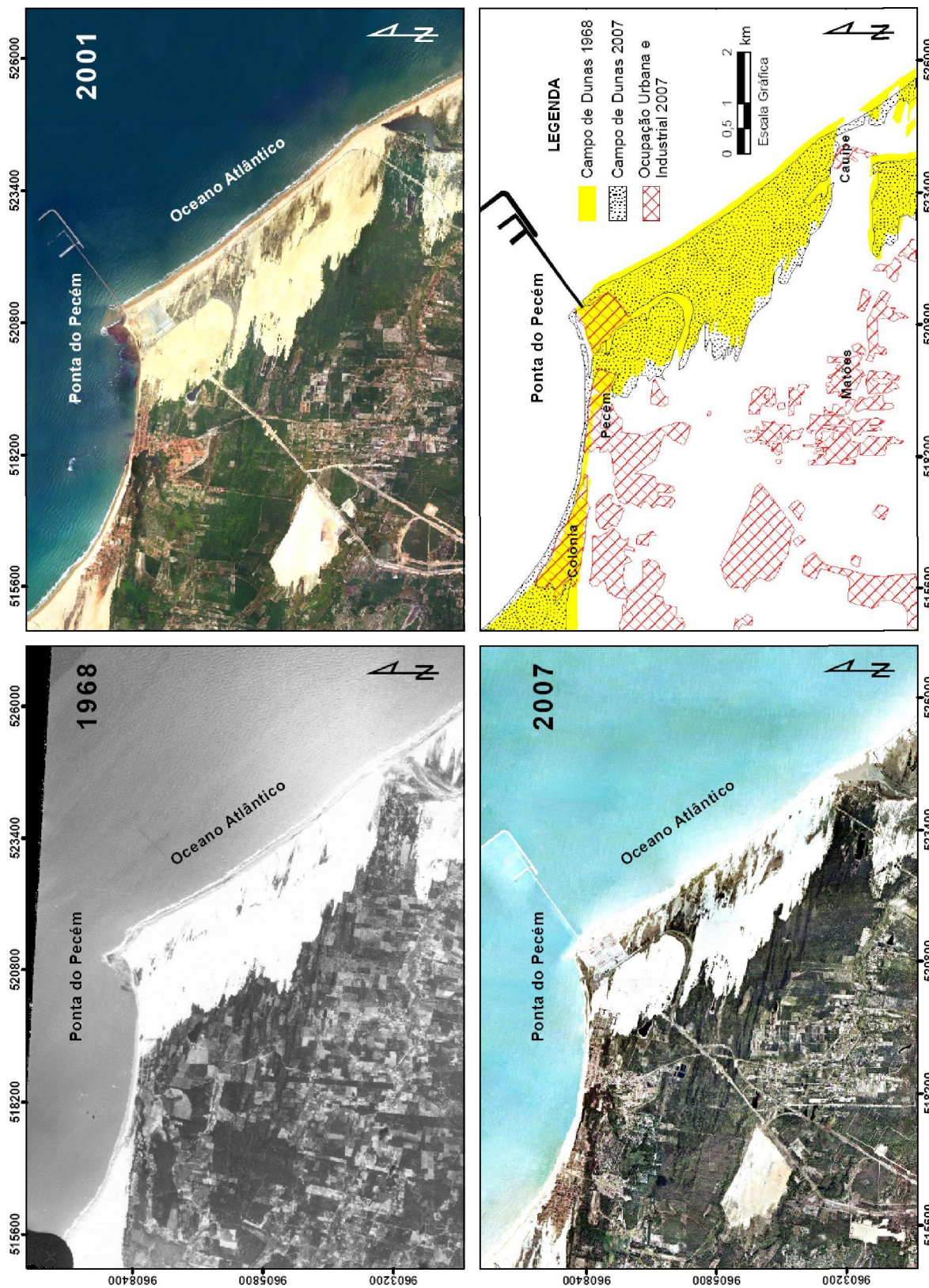


Fig. 12 – Imagens orbitais (Quickbird – 2001 e Ortofotocarta – 2007) e aerofotografia (1968) da evolução multitemporal geoespacial do entorno do Porto do Pecém, mais produto vetorizado evidenciando a diminuição do campo de dunas móveis e crescimento de uso e ocupação do solo ao longo deste período.

selecionados característicos de ambiente eólico. Estas interpretações acima mencionadas apontam para uma região com contexto hidrogeológico muito susceptível a contaminações, através de vazamentos e infiltrações de materiais manuseados no Porto e seu entorno, além de destacar a futura implantação de refinarias e siderúrgicas.

ii) O processamento e interpretação dos dados eletromagnéticos mostraram zonas condutivas anômalas rasas provocadas pelo avanço natural da interface água doce/água salgada e anomalias em profundidade associadas ao avanço da intrusão salina com fluxo preferencial em zonas fraturadas no topo do embasamento e/ou em ocorrência de paleocanais. Estratos arenosos saturados da formação Barreiras, muitas vezes em caráter pouco mais profundo, justificam faixas laterais altamente resistivas geralmente com profundidade média de 45 metros, como visto nas proximidades do rio/lagamar do Cauípe. Apesar da avaliação qualitativa dos dados geofísicos apresentar boa correlação entre arranjos e modos de aquisição, a equidistância entre as estações de 80 metros no perfil 2, como exemplo, comprometeu relativamente a resolução lateral das informações interpoladas e conseqüentemente a caracterização dos estratos geoeletricos.

iii) A análise multitemporal das aerofotografias e imagens orbitais mostrou o crescimento do uso e ocupação em todo o entorno do Pecém, com ênfase em área de dunas móveis. A ocupação desordenada diminuindo a área deste importante ambiente de recarga do aquífero raso costeiro influencia diretamente na dinâmica hidrogeológica natural da região. Junto a este avanço urbano na faixa de praia deve-se mencionar a eventual exploração sem controle dos recursos subterrâneos, podendo acarretar o desequilíbrio da interface água doce/água salgada e a contaminação destes por intrusão salina. Outro fator importante que merece destaque é o aumento de pólos industriais na região e os riscos de vazamentos que poderão ocorrer. Complementando as informações oriundas do processamento digital das imagens foram observados nos últimos 40 anos o aumento da área do lagamar do Cauípe e início do soterramento da lagoa do Pecém, além da variação da linha de costa

por acumulo e erosão de sedimentos. Vale ressaltar que estes três processos citados acima são interpretados como naturais, envolvendo migração e circulação de sedimentos eólicos/costeiros.

Por fim, as características hidrogeofísicas e de sensores orbitais expostas no presente estudo apontam para um alerta à manutenção das condições geoambientais para a região do Porto do Pecém, tendo em vista os crescimentos urbano, turístico e industrial aqui evidenciado e que se apresentam ainda em evolução. Desta forma, a compreensão das variáveis do macroambiente e de como o sistema local funciona são fundamentais para o entendimento da situação atual e das possíveis tendências de mudanças no futuro.

Referências Bibliográficas

- Alley, W. M., Reilly, T. E. & Frankie, O. L., (2000) – *Sustainability of Ground-Water Resources. Publication team – U. S. Department of the Interior, U. S. Geological Survey, U. S. Geological Survey Circular 1186 – pp6-7.*
- Brandão, R. L., (1995) – Sistema de Informações para Gestão e Administração Territorial da Região Metropolitana de Fortaleza – Projeto SINFOR: Diagnóstico Geoambiental e os Principais Problemas de Ocupação do Meio Físico da Região Metropolitana de Fortaleza. Fortaleza / CPRM.
- Ball, *Aerospace & Technologies Corp. QUICKBIRD*, (2000) - <http://www.ball.com/aerospace/bgis2000.html>.
- Caudoro, F. A., Dorfman, R. & Santalo, J. (1984) – Manual de Ensaio de Laboratório e de Campo para irrigação e Drenagem. Porto Alegre: IPH – UFRGS, s.d. 216p: il.
- Cavalcante, J. C., Ferreira, C. A., Armesto, R. C. G., Medeiros, M. F., Ramalho, R., Braun, O. P. G., Baptista, M. B., Cunha, H. C. S., (2003) - Mapa Geológico do Estado do Ceará / Escala original do mapa 1:500.000 – 1ª versão, Coordenação de Geologia Básica (integração e revisão) - CPRM Fortaleza – Ceará.
- CEARÁPORTOS, (2003) - Companhia de Integração Portuária - Estatística para os exercícios de 2002/2003. Documento eletrônico (www.cearaportos.com.br).
- CIA, (2012) – *Central Intelligence Agency. Homepage* <https://www.cia.gov/library/publications/>

- [additional-publications/corona-between-the-sun-and-the-earth/index.html](#). Acesso em janeiro de 2012.
- Copper, H. H., (1964) – *A hypothesis concerning the dynamic balance of fresh water and salt water in coastal aquifer*; U. S. geological Survey Water-Supply Paper, 1613-C, p. 1-12.
- Costa, A. F. U. & Ferlin, C. A., (1992) – Mapeamento geofísico da contaminação da água subterrânea utilizando o método geofísico Em-34-3. XXXVII Congresso Brasileiro de Geologia – SBG/SP, São Paulo, SP. Bol. Res. Exp., pp. 393-395.
- Cressie, N. A. C. (1991) - *Statistics for Spatial Data*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 900 pp.
- Cunha, L. S., (2009) – Determinação da vulnerabilidade intrínseca a poluição e transporte de contaminação: uma ferramenta para a gestão de recursos hídricos subterrâneos na área do Porto do Pecém, CE – Tese de Doutorado n° 95 – Universidade de Brasília.
- Custódio, E. & Lamas, M. R., (1983) - *Hidrologia Subterrânea*. Ediciones Omega S.A., Barcelona, vol2.
- Deutsch, C. V. & Journel, A. G., (1992) - *GSLIB: Geostatistical Software Library and user's guide*. Oxford University Press, New York, 339p.
- Deutsch, C. V. & Journel, A. G., (1998) - *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide, 2nd edn*. Oxford University Press, New York, 350 pp.
- DIGITALGLOBE, (2003) - *QUICKBIRD Imagery Products – Products Guide*. 54 p. Disponível em: <<http://www.digitalglobe.com>>.
- Feitosa, F. A. C. & Manoel Filho, J., (1997) – Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE.
- Folk, R. L. & Ward, W. C., (1957) - *Brazos River Bar: Study in the Significance of Grain size parameter*. *Journal of Sedimentary Petrology*, Tulsa, 27(1):3-26.
- Funceme, (2009) - Fundação Cearense de Meteorologia – Dados pluviométricos do distrito do Pecém, município de São Gonçalo do Amarante. Sede em Fortaleza. Homepage <http://www.funceme.br>
- Goldstein, N. E., Benson, S. M. & Alumbaugh, D., (1990) – *Saline groundwater plume mapping with eletromagnetics*. In: *Geotechnical and Environmental Geophysics*, Vol. II: *Environ. And Groundwater*, S. H. Ward (Ed.), pp. 16-25.
- Henry, H. R., (1959) – *Salt intrusion into freshwater aquifers*. En: *Journal of Geophysical Resources*, Vol. 64, pp. 1911-1919.
- Khair, K., Aker, A., Haddad, F., Jurdi, M. & Hachach, A., (1994) – *The Environmental Impacts of humans on Groundwater in Lebanon, Air Water and Soil Pollution*, 78, 37-49.
- Kux, H. J. H. & Pinheiro, E. S., (2005) - Dados do satélite *QUICKBIRD* para o mapeamento do uso e cobertura da terra numa seção da Mata Atlântica no Estado do Rio Grande do Sul. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 4509-4516.
- Leal, O., (1970) - Inventário Hidrogeológico Básico do Nordeste. Folha Jaguaribe – NO. Recife: DNPM/CPRM, 1980. 266p.
- Lima, E. de A. M., Wanderley, A. A., Vieira, A. T., (1980) – Projeto Scheelita do Seridó. Relatório Final. Recife: DNPM/CPRM, 266p.
- Mcneill, J. D., (1980a) – *Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers*. TN-6, Geonics Inc., Mississauga, Ontario.
- Mcneill, J. D., (1980b) – *Interpretation procedures for the EM-34*. TN-8, Geonics Inc., Mississauga, Ontario, 10pp.
- Mcneill, J. D., (1990) – *Use of eletromagnetic methods for groundwater studies*. In Ward, S. H. Ed., *Geotechnical and environmental geophysics*, Vol. I, SEG special publication.
- Mendes, J. M. B., (1987) – Técnicas geofísicas aplicadas no mapeamento e monitoramento de poluição de águas subterrâneas. Tese de Doutorado. IG-USP.
- Meunier, A.R., (1964) - *Sucession stratigraphique et passages lateraux dus au metamorphisme dans la Serie Ceara, Antecambrien du Nord-Est Bresilien*. C.R. Acad. Sci. Paris, 259: 3796-3799.
- Nascimento, D. A., Gava A., Pires, J. de L., Teixeira, W., (1981) – Projeto RADAMBRASIL, Folhas SA.24 Fortaleza, V.21, geologia. Divisão de Geologia MME / Secretaria Geral. Rio de Janeiro. 488p. il. 7 mapas.
- Nogueira, M. L. S. & Augusto, V. A., (2004) – Reconhecimento de áreas mais susceptíveis a contaminação por hidrocarbonetos através da caracterização geológica e hidrogeológica na Zona Portuária do Pecém – CE. Relatório de Graduação, Departamento de Geologia – UFC - 5.

Reynolds, J. M., (1997) – *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley & Sons. Inglaterra. 796p.

Sharma, P., (1997) – *Environmental and engineering geophysics*. Cambridge University Press, XXIV, 475p.

Souza, M. J. N., (1988) – Contribuição ao estudo das unidades morfoestruturais do estado do Ceará. Revista de Geologia, DEGEO/UFC. Fortaleza, v.1, p.73-91.

SRH, (2003) - Secretária de Recursos Hídricos. Ações do PROURB. Homepage <http://www.srh.ce.gov.br>

Stewart, M., (1990) – *Rapid reconnaissance mapping of fresh-water lenses on small oceanic islands*. In: *Geotechnical and Environmental Geophysics*, Vol. II: SEG special publication., pp 57-66.

Stewart, M. & Brentall, R. E., (1986) – *Interpretation of VLF resistivity data for ground water contamination studies*. *Ground Water Monitoring Review*, Vol. 6, n°. 1, pp. 71-75.

Sugio, K. & Bigarella, (1979) – *Ambientes fluviais*, Editoras UFSC e UFPR. 2ª Edição, 183p.

Tucci, C. E. M., (2001) – *Hidrologia – Ciência e Aplicação*. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH): Ed. Universidade/UFRGS – 2 ed. Porto Alegre – RS, 495p.