



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE  
INSTITUTO DE OCEANOGRAFIA  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM  
OCEANOGRAFIA FÍSICA, QUÍMICA E GEOLÓGICA



# VARIAÇÕES DA PERMEABILIDADE AO ÓLEO EM PRAIAS ARENOSAS DO SISTEMA PATOS GUAÍBA, RS, BRASIL

ELAINE BARONI DE OLIVEIRA

Rio Grande, 2016



ESTUDOS AMBIENTAIS NAS ÁREAS DE ATUAÇÃO  
DA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE  
INSTITUTO DE OCEANOGRAFIA  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA FÍSICA,  
QUÍMICA E GEOLÓGICA

**VARIAÇÕES DA PERMEABILIDADE AO ÓLEO EM PRAIAS  
ARENOSAS DO SISTEMA PATOS GUAÍBA, RS, BRASIL**

ELAINE BARONI DE OLIVEIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica do Instituto de Oceanografia da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial à obtenção do título de mestre.

Orientador: Dr. João Luiz Nicolodi

**Rio Grande, 2016**

## O que é ser um Oceanólogo?

*É sentir a areia sobre os pés...*

e imaginar qual o tamanho do grão  
qual a esfericidade e o arredondamento do sedimento.  
pensar no processo envolvido na formação da areia,  
e no tempo necessário para aquele grão estar ali.

*É olhar a onda...*

e calcular a altura e o período  
entender as formas como ela está modificando a costa.  
verificar o padrão de refração da ondulação  
e, automaticamente, imaginar o fundo do perfil.

*É sentir o vento nos cabelos...*

e pensar de onde ele veio  
qual o efeito sobre o oceano  
qual corrente ele está gerando  
e em como ele está influenciando localmente a superfície do mar

*É olhar um navio no horizonte...*

e lembrar de cada trabalho em alto mar  
questionar quais equipamentos estarão sendo usados  
qual pesquisa estará sendo realizada  
e desejar também poder estar embarcado lá

Ser oceanólogo é...

enxergar o mundo com outros olhos  
é ver o oceano como uma fonte de mistérios e processos  
é venerar esse imensidão pouco conhecido e subjugado  
e expor ao mundo a beleza nele contida.

## AGRADECIMENTOS

Em dois anos, muitas coisas acontecem... muita gente aparece e muita ajuda é oferecida. Fica difícil lembrar de todos e escrever para cada um. Por isso, agradeço a todos os que passaram por mim durante estes dois anos... à minha família, aos meus amigos, à família de Pelotas, aos colegas, aos professores, aos vizinhos (de vida e de laboratório), aos atenciosos desconhecidos dos emails e a todos os outros que fizeram parte, mesmo que indiretamente, do meu trabalho.

Entretanto, como este projeto encontrou diversas barreiras ao longo do caminho (obter o óleo e a licença, conseguir a grana, destinar o resíduo... etc), alguns agradecimentos especiais são indispensáveis...

Primeiramente à Agência Nacional do Petróleo, via Programa de Recursos Humanos (PRH-27) pela concessão da bolsa de pesquisa, assim como ao Griep e à Isabel por todo o apoio. Ao Laboratório de Oceanografia Geológica (LOG) e a todos os professores e funcionários, por toda a infraestrutura, dicas e logística. Ao PPGOFQG pela ajuda, estrutura, professores...

À Refinaria de Petróleo Roberto Pasqualini (REFAP) pela disponibilização do óleo e por todo o apoio e disposição ao longo deste projeto. Ao professor João Sarkis, pelos contatos e pela ajuda na obtenção do óleo, que possibilitou a continuação deste projeto.

À Fazana Ahmed, pela atenção e disponibilização da macro para cálculo da permeabilidade. Ao Christian Serpa, pelo trado para o lençol freático. Ao Lauro Calliari pelo penetrômetro para o ensaio de compactação.

Ao Filipe, por ser tão prestativo e calmo me explicando programação e me ajudando a encontrar as soluções estatísticas no R. Obrigada por me disponibilizar seu tempo escasso (haha)!

Ao grupo das Cartas SAO: João, Lelo, Marília, Chayonn e Vanessa pelas risadas, questionamentos, discussões, pirações... e tudo o mais ao longo do projeto. Para vocês três palavras: Fé, foco e força!!!

À minha equipe de apoio experiente e treinada: ao frentista, ao coveiro, aos intelectos e aos fotógrafos oficiais. Obrigada pelo apoio psicológico e braçal na saída, por admirar comigo a beleza das gotas, por sujarem suas roupas, por dividirem tão bem e por se oferecerem tão prontamente a me ajudar. Podem contar comigo para o que der e vier!

Batendo recordes na lista de agradecimentos, ao meu orientador João Nicolodi, pelas ideias, críticas, sugestões, conversas, risadas, saídas de campo e por todo o apoio ao longo destes últimos anos... Foi um prazer ter trabalhado ao seu lado!

Por fim, ao oceano, à curiosidade e à paixão pela ciência e pelo mundo, que nos fazem continuar a procurar respostas e admirar o desconhecido...

## SIGLAS

**ANP:** Agência Nacional do petróleo

**API:** American Petroleum Institute

**CETESB:** Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

**CLC/69:** Convenção Internacional sobre Responsabilidade Civil em Danos Causados por Poluição por Óleo

**CONAMA:** Conselho Nacional do Meio Ambiente

**CV:** Coeficiente de Variação

**DR:** densidade relativa

**IBAMA:** Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

**IBGE:** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

**ISL:** Índice de Sensibilidade do Litoral

**ISLF:** Índice de Sensibilidade do Litoral Fluvial

**MARPOL 73/78:** Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição Causada por Navios

**MMA:** Ministério do Meio Ambiente

**MPD Infiltrometer:** Modified Philip Dunne Infiltrometer

**NAVFAC:** Naval Facilities Engineering Comand

**NOAA:** National Oceanic and Atmospheric Administration

**OPR/90:** Convenção Internacional sobre Preparo, Resposta e Cooperação em Caso de Poluição por Óleo

**PEI:** Plano de Emergência Individual

**PRH:** Programa de Recursos Humanos

**REFAP:** Refinaria Alberto Pasqualini

**RP:** Resistência à Penetração

**RS:** Rio Grande do Sul

**SAO:** Sensibilidade Ambiental ao Óleo

**K:** condutividade hidráulica

**e:** índice de vazios

**emax:** índice de vazios máximo

**Cu:** coeficiente de uniformidade

**n:** coeficiente de porosidade

**d<sub>10</sub>** ou **d<sub>ef</sub>:** diâmetro efetivo do grão

**θ** ou **w:** teor de umidade

**Gs:** densidade relativa dos grãos

**γ<sub>w</sub>:** peso específico da água

**γ<sub>d</sub>:** peso específico seco

## RESUMO

A permeabilidade, ou seja, a facilidade com que um fluido escoar através de uma matriz sedimentar porosa, determina a infiltração e, conseqüentemente, o tempo de permanência do fluido (óleo) no substrato. Quanto maior o tempo de permanência do óleo em um sítio, maior será a interação com o meio, maior será o dano causado no ambiente e mais difícil será sua recuperação. Portanto, a permeabilidade é um dos principais parâmetros que determinam a sensibilidade ao óleo de um substrato durante derramamentos. Porém, por ser dependente das características do meio, a taxa de infiltração sofre variações de acordo com as modificações no ambiente e com as características sedimentológicas do ambiente no qual este óleo foi depositado. Estas variações, no entanto, não são enquadradas nas definições de sensibilidade existentes, por não serem conhecidas ou detalhadas. O conhecimento de tais oscilações é necessário para o aperfeiçoamento dos métodos existentes e para melhor compreensão do comportamento do óleo em diferentes substratos. Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho é determinar as variações da permeabilidade do petróleo grau API 33 em praias arenosas do Sistema Patos-Guaíba/RS. Para isto foram realizados testes de permeabilidade com petróleo (grau API 33) em seis pontos para cada praia estudada através do permeômetro modificado de Philip (MPD). Ainda em campo foram anotados o grau de compactação do substrato, a profundidade do lençol freático e a coleta de sedimentos para análise granulométrica e morfométrica em laboratório. O valor de condutividade hidráulica foi calculado a partir de um conjunto de equações *in situ* e empíricas, a fim de verificar qual melhor enquadrar os resultados de permeabilidade lagunares. Os resultados obtidos mostram que a permeabilidade em praias lagunares é majoritariamente governada pelo tamanho do grão, pelo grau de arredondamento da amostra, pela compactação do solo e pela profundidade do lençol freático. Fatores que potencializam a permeabilidade incluem o grau de seleção, a distribuição vertical dos sedimentos e o percentual de cascalho. O aumento da permeabilidade com a diminuição do grau de seleção se mostrou uma característica importante em praias lagunares pois, segundo estudos pretéritos, terrenos com pobre seleção, permitem que os interstícios intergranulares sejam preenchidos por argila e silte, obstruindo os poros e reduzindo a permeabilidade. A partir destes resultados conclui-se que a permeabilidade em sistemas lagunares é governada, principalmente, pelos mesmos parâmetros que as praias oceânicas: tamanho do grão, pelo arredondamento do sedimento e pelo grau de compactação do substrato. No entanto, a permeabilidade em sistemas lagunares apresenta uma ordem de grandeza maior. Esta diferença está relacionada à polimodalidade dos ambientes lagunares, ao arranjo das partículas, à baixa mobilidade do sistema e à alta heterogeneidade do pacote sedimentar. Tais características, inerentes das praias lagunares, mesmo modificando o comportamento do fluido e aumentando a permeabilidade do sistema, não são consideradas nos atuais métodos de definição da sensibilidade ao óleo. Para que a permeabilidade real do sistema seja considerado na definição da sensibilidade do ambiente, as características citadas devem ser consideradas pelo pesquisador em campo. Para isto sugere-se a adoção de uma diretriz incluindo: análise granulométrica da área; coleta e análise de testemunho para verificação da estrutura vertical; medição do grau de compactação do sedimento e da profundidade do lençol freático. Quanto aos resultados da aplicação de equações para cálculo da condutividade hidráulica, percebemos que as equações que utilizam parâmetros obtidos em campo se demonstraram eficazes em medir a permeabilidade. Já as equações empíricas, que utilizam parâmetros secundários, oriundos da granulometria, apresentaram resultados insatisfatórios, já que os mesmos apresentaram grande variabilidade, se afastando da validação. A única exceção com resultados satisfatórios é a equação de Hazen (1911) sendo a equação indicada para prever a permeabilidade das praias arenosas da Lagoa dos Patos.

Palavras-chave: Permeabilidade, condutividade hidráulica, sensibilidade ao óleo, MPD permeômetro, ISL; Praia arenosa; praia lagunar

## ABSTRACT

The permeability is the facility which a fluid flows through the porous of a sediment deposit, that determines the vertical seepage and, consequently, the residence time of the fluid (oil) into the soil. The higher the permeability of the oil in the environment, higher will be the interaction with the site, higher will be the damages and more difficult will be the recovery of the local. Therefore, the permeability is one of the most important parameters to determinate the sensitivity to oil spill of an environment. However, for being dependent of the local characteristics, the seepage changes according to the modifications in the environment and with the sediment characteristics where this oil was spilled. These variations, on the other hand, are not included in the existing sensitivity definition methods, as they are not known or detailed. Knowledge of these oscillations is necessary to the improvement of the existing methods and to better understand the oil behavior in different environments. Within this context, the goal of this study is to determinate the variations of the oil permeability in sandy beaches of the Patos-Guaíba System in RS. The methodology involved permeability tests with oil (API 33) in six points for each beach studied, using the Modified Phillip Dunne Permeameter (MPD). In field were measured: penetration resistance, depth of the water table and sediment sample for granulometric and morphometric analysis in laboratory. The hydraulic conductivity was calculated from in situ and empiric equations, in order to verify which one better represent the lagoon beach permeability. The results show that the permeability in lagoon beaches is mostly driven by the diameter and roundness of the grain, the compaction of the soil and by the depth of water table. Factors that enhance the permeability include: sorting of the package, vertical distribution of the sediments and percentage of gravel. The increase of the permeability with the decrease of the sorting package it showed an important characteristic in lagoon beaches because, according preterit studies, substrates with low sorting allows the porous to be filled with silt and clay, blocking the infiltration. The results obtained shows that permeability in lagoon systems is guided, mostly, by the same parameters that the oceanic beaches: diameter and roundness of the grain, and compaction of the substrate. However, the permeability in lagoon system is an order of magnitude higher than the ocean. This difference is related to polimodal distribution, to the package of the sediment, to the low mobility and to the high heterogeneity of the vertical distributions of the sediments of the Lagoon. These characteristics, inherent in lagoon beaches, even modifying the oil behavior and increasing permeability, are not included in the current oil sensitivity definition methods. In order to consider the real permeability in oil sensitivity of the environment, the cited characteristic should be considered by the researcher. For this it suggests the adoption of a tutorial including: size analysis of the area; collection and analysis of evidence to verify the vertical structure; measuring the degree of sediment compaction and depth of the water table. The results of the application of hydraulic conductivity equations shows that in situ equations are efficient, while the empiric equations (that uses parameters from the grain size analysis) have unsatisfactory results, as they showed great variability. The only exception with satisfactory results is the equation of Hazen (1911), being the only one indicate to predict the permeability of the Lagoa dos Patos beaches.

Keywords: Permeability, Hydraulic Conductivity; Sensitivity to oil; MPD Permeameter; ISL; Sandy Beach; Lagoon Beach

## SUMÁRIO

RESUMO.....	6
ABSTRACT .....	7
SUMÁRIO.....	8
LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE TABELAS .....	13
LISTA DE EQUAÇÕES .....	14
1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	15
1.1. Contextualização.....	15
1.2. Objetivos .....	17
1.2.1. Objetivos específicos:.....	17
1.3. Terminologia Adotada .....	17
2. INTRODUÇÃO.....	19
2.1. Petróleo e Meio Ambiente .....	19
2.2. Índice de Sensibilidade do Litoral.....	25
2.3. Permeabilidade .....	27
3. ÁREA DE ESTUDO .....	33
3.1. Lagoa dos Patos .....	37
3.2. Guaíba.....	40
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	43
4.1. Permeabilidade .....	44
4.1.1. Teste <i>in situ</i> .....	44
4.1.2. Teoria do MPD.....	45
4.1.3. Permeabilidade empírica .....	50
4.2. Sedimento .....	52
4.2.1. Grunulometria e Morfometria .....	52



4.2.2. Estrutura vertical .....	53
4.3. Compactação .....	53
4.4. Lençol freático .....	54
4.5. Análise.....	54
5. RESULTADOS e DISCUSSÕES .....	56
5.1. Sedimentologia.....	59
5.1.1. Estrutura Vertical .....	67
5.1.2. Arredondamento e Esfericidade.....	68
5.2. Permeabilidade .....	70
5.2.1. Padrão Gotas.....	74
5.2.2. Condutividade Hidráulica .....	78
5.2.3. Equações.....	84
5.3. Permeabilidade e Sensibilidade .....	88
6. CONCLUSÕES .....	90
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92
8. ANEXOS.....	103

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Zona física e morfológica típica de praias arenosas. Adaptado de Komar (1998)..18
- Figura 2: Volume em m<sup>3</sup> dos tipos de produtos envolvidos nos acidentes ambientais pertencentes à Classe de Risco 3 – líquidos inflamáveis no Brasil em 2014. Fonte: IBAMA (2014).....22
- Figura 3: Carta de Sensibilidade ao Óleo operacional da Ilha do Mel no Paraná. Os recursos socioeconômicos estão exibidos na forma de ícones ao longo da carta, enquanto os recursos biológicos estão representados como ícones em um retângulo no canto superior esquerdo. O índice de sensibilidade do litoral é apresentado por uma linha, sendo a cor referente à sensibilidade do local. Fonte: Atlas de Sensibilidade Ambiental da Bacia Marítima de Santos. Fonte: MMA (2007 a) ) .....24
- Figura 4: Modelo de soterramento e evolução subsequente do óleo em sedimentos da zona entre marés de uma praia. Adaptado de: Bernabeu et al., (2006) .....28
- Figura 5: Três tipos básicos de plumas de infiltração. A) Terreno homogêneo, pluma em forma de gota; B) Terreno heterogêneo, pluma em forma de lâmpada; C) Terreno heterogêneo com estratificação, pluma irregular. Adaptado de Fussel et al., (1981). .....30
- Figura 6: Localização da área de estudo no estado do Rio Grande do Sul, Brasil.....34
- Figura 7: Geomorfologia da Província Costeira do Rio Grande do Sul. Fonte: Villwock (1984) .....35
- Figura 8: Perfil esquemático transversal dos sistemas deposicionais da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. As barreiras são correlacionadas aos últimos maiores picos na curva isotópica de oxigênio. Fonte: Tomazelli & Villwock, 1998. ....36
- Figura 9: Testemunho com identificação de litofaces e nível de conchas. Adaptado de: Barboza et al., (2006).....39
- Figura 10: Mapa de localização do Lago Guaíba no Rio Grande do Sul. Fonte: Nicolodi et al., (2010).....41
- Figura 11: Organograma estrutural das etapas metodológicas empregadas no trabalho .....43
- Figura 12: Campanha de campo para realização de testes de permeabilidade e coleta de dados. ....44
- Figura 13: Permeâmetro Modificado de Philip (MPD) .....45
- Figura 14: Parâmetros importantes do MPD. Onde  $H_0$  é a altura inicial da água na coluna;  $H(t)$  altura da água no tempo  $t$ ;  $L_{max}$  é a profundidade de inserção do equipamento no solo;  $r_1$  é o raio do cilindro;  $R(t)$  é o raio da frente de umedecimento no tempo  $t$ . ....46
- Figura 15: Posição dos pontos de instalação do MPD. Foram realizados 2 perfis na face de praia. Em cada perfil foram realizados três pontos nomeados de A, B e C. O ponto A foi denominado Ponto linha d'água; o B de Ponto intermediário; e o C Ponto Berma.....48
- Figura 16: Em cada ponto foram inseridos 750 ml de petróleo, sendo anotado, em planilha, o tempo necessário para todo o fluido infiltrar no substrato. Foram anotadas, em planilha, as variações de tempo necessárias para cada variação de cinco milímetros no nível.....48

Figura 17: Gota de infiltração. Foram medidas a altura e largura máxima da gota. ....	49
Figura 18: Remoção do sedimento contaminado. O resíduo foi transportado em baldes até tambores, onde foi armazenado e transportado até o Laboratório de Oceanografia Geológica para destinação final .....	49
Figura 19: Ensaio de compactação com uso de penetrômetro manual (foto a esquerda) ...	54
Figura 20: Instalação do trado e medição da profundidade do lençol freático (distância entre a superfície e o lençol) com auxílio de vara graduada.....	54
Figura 21: Perfil de profundidade do lençol freático para cada praia estudada. A figura mostra que todos os perfis possuem o mesmo comportamento: maiores profundidades na berma, tornando-se mais rasos à medida em que se aproximam da linha d'água.....	57
Figura 22: Profundidade de penetração do penetrômetro no substrato por ponto para o perfil 1.....	58
Figura 23: Trator circulando sobre a face da praia de Arambaré, RS (esquerda). Trilhas dos pneus após a passagem do trator. ....	59
Figura 24: Praia de Arambaré. a) Arambaré Norte; b) Arambaré Sul.....	60
Figura 25: Histogramas de frequência para o ponto A (linha d'água). Os gráficos representam, sequencialmente, Arambaré Norte, Arambaré Sul, Guaíba, Ipanema e Mostardas. ....	63
Figura 26: Histogramas de frequência para o ponto B (intermediário). Os gráficos representam, sequencialmente, Arambaré Norte, Arambaré Sul, Guaíba, Ipanema e Mostardas. ....	64
Figura 27: Histogramas de frequência para a berma. Os gráficos representam, sequencialmente, Arambaré Norte, Arambaré Sul, Guaíba, Ipanema e Mostardas.....	65
Figura 28: Curvas de frequência acumulada para cada ponto da área de estudo .....	66
Figura 29: Camada de sedimentos homogênea. Sem grandes alterações estruturais ou presença de barreiras vegetais. ....	67
Figura 30: Camada de sedimentos heterogênea;. A) camada de rocha na profundidade de 30 cm. B) litoface pleistocênica impermeável em 35 cm; C) Bioturbação provocada por animais e restos vegetais em camadas superficiais. ....	67
Figura 31: Corte estratigráfico da coluna sedimentar. Coluna heterogênea formada pela presença de camadas de sedimentos finos e grossos intercalados na forma de lentes. A linha vermelha representa a gota de infiltração mostrando o acúmulo irregular do petróleo devido ao escoamento diferenciado provocado pela presença de lentes, detalhadas à direita. ....	68
Figura 32: Gráfico com as profundidades da gota (cm) por ponto para cada praia.....	72
Figura 33: Movimento de óleo nos sedimentos praias provocado pelo ciclo de maré. A) Óleo inicialmente concentrado na face de praia; B e C) Migração do óleo para a região superior do perfil durante a maré alta; D e E) Conforme a maré desce, o lençol freático libera óleo na face da praia, enquanto óleo residual é tropeado na zona superior do perfil. Adaptado de McLaren (1985).....	73

Figura 34: Gotas de infiltração encontradas para os ensaios realizados .....	75
Figura 35: Padrões encontrados na pluma de infiltração do petróleo. As linhas vermelhas delimitam a gota. A) Gota retangular ou em forma de lâmpada (espalhamento lateral é superior à infiltração vertical); B) Gota em bulbo ou triângulo (espalhamento igual à infiltração); C) Gota retangular (infiltração superior ao espalhamento); D) Gota irregular. ....	76
Figura 36: Processos envolvidos no intemperismo de uma mancha de óleo. Fonte: CETESB (2007).....	78
Figura 37: Condutividade hidráulica calculada pela teoria de Philip por ponto para as praias da área de estudo. ....	79
Figura 38: Gráficos de dispersão entre a condutividade hidráulica e a) média; b) mediana; c) assimetria; d) curtose; e) grau de seleção; f) % cascalho; g) arredondamento; h) esfericidade; i) compactação; j) profundidade do lençol freático.....	81
Figura 39: Gráficos de correlação entre a condutividade hidráulica do MPD (Ahmed et.al, 2011b) e: a) Caputo (1988); b) Ródio (1965); c) Lei de Darcy (1856). ....	85
Figura 40: Gráficos de dispersão entre a condutividade hidráulica do MPD (Ahmed et.al, 2011b) e: a) Amer & Award (1974); b) Hazen (1911); c) Kothyakhov (1949); d) Chapuis (2004); e) NAVFAC (1974); f) Shahabi et al., (1984) .....	87

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Grupos de óleo e principais características. FONTE: CETESB (2007) ....	19
Tabela 2: Grau API e pontos de corte do petróleo nacional. FONTE: ANP (1998) ..	20
Tabela 3: Índice de Sensibilidade do Litoral (ISL) com as respectivas cores e tipos de costa para cada valor de sensibilidade. Fonte: MMA, 2007b. ....	25
Tabela 4: Índice de Sensibilidade Fluvial da Região Amazônica a Derrames de Óleo. Fonte: Petrobrás, 2007. ....	27
Tabela 5: Índice de Sensibilidade do Litoral Fluvial (ILSF). Fonte: Wally (2015). ....	27
Tabela 6: Resultados de permeabilidade e parâmetros (profundidade do lençol, teor de umidade e compactação) para cada ponto. As letras A, B e C se referem à posição ocupada pelo ponto na praia, A refere-se a ensaio realizado na linha d'água, B no meio da face da praia e C na berma. As letras N e S em Arambaré referem-se a Norte e Sul e estão relacionadas à posição da praia em relação à desembocadura do Arroio que deságua na região. ....	56
Tabela 7: Parâmetros granulométricos obtidos para as praias da área de estudo. As siglas presentes na primeira coluna representam a praia e a localização do ponto onde o ensaio foi realizado. AN representa Arambaré Norte, AS Arambaré Sul, G Guaíba, I Ipanema e MO Mostardas. A última letra da sigla representa a posição do ponto, A na linha d'água, B no meio da face da praia e C na berma. ....	61
Tabela 8: Arredondamento e esfericidade para a área de estudo. ....	70
Tabela 9: Valores de largura e profundidade da gota de infiltração e condutividade hidráulica para cada ponto .....	71
Tabela 10: Valores de condutividade hidráulica encontrados para equações in situ (Caputo, 1988; Ródio, 1965; Lei de Darcy, 1856) .....	84
Tabela 11: Valores de condutividade hidráulica encontrados através da aplicação de equações empíricas .....	86
Tabela 12: Parâmetros utilizados nas equações empíricas da condutividade. Cu é o coeficiente de uniformidade; RF é o fator forma oriundo do arredondamento; emax é o índice de vazios máximo; emin é o índice de vazios mínimo; w é o teor de umidade; e é o índice de vazios e n é a porosidade. ....	87

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Cálculo para grau API. FONTE: CETESB (2007).....	19
Equação 2: Infiltração cumulativa. Fonte: Ahmed et al., (2011a) .....	46
Equação 3: Equação para queda potencial de pressão de capilaridade. Fonte: Nestingen (2007).....	46
Equação 4: Equação para queda potencial de pressão de capilaridade usando a Lei de Darcy (Darcy, 1856).....	47
Equação 5: Equação para cálculo da sucção na frente de umidecimento. Fonte: Nestingen (2007).....	47
Equação 6: Equação usada para cálculo da condutividade hidráulica a partir da diferença de altura. Fonte: Ahmed et.al (2011a) .....	47
Equação 7: Equação usada para cálculo da condutividade hidráulica a partir da diferença de tempo. Fonte: Ahmed et.al (2011a) .....	47
Equação 8: Cálculo para coeficiente de permeabilidade. FONTE: Ródio (1965) .....	50
Equação 9: Cálculo de condutividade hidráulica. Fonte: Caputo (1988) .....	50
Equação 10: Lei de Darcy (1856) .....	50
Equação 11: equação estendida de Hazen (1911) para cálculo da condutividade hidráulica. Onde $d_{10}$ é o diâmetro efetivo, $e$ é o índice de vazios e $e_{max}$ é o índice de vazios máximo.....	51
Equação 12: Equação de Kotyakhov (1949). Onde $d_{10}$ é o diâmetro efetivo e $n$ é a porosidade.....	51
Equação 13: Relação de Amer & Award (1974). Onde $e$ é o índice de vazios; $C_u$ é o coeficiente de uniformidade e $d_{10}$ é o diâmetro efetivo (mm) .....	51
Equação 14: Equação de NAVFAC (1974). Onde $d_{10}$ é o diâmetro efetivo e $e$ é o índice de vazios.....	51
Equação 15: Equação empírica para cálculo da condutividade hidráulica por Sahabi et al., (1984). Onde $C_u$ é o coeficiente de uniformidade, $d_{10}$ é o diâmetro efetivo e $e$ é o índice de vazios. ....	51
Equação 16: Equação empírica para cálculo da permeabilidade por Chapuis (2004). Onde $d_{10}$ é o diâmetro efetivo e $e$ é o índice de vazios. ....	52
Equação 17: Cálculo do índice de vazios da amostra. Fonte: Das (2012) .....	52

# 1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo traz uma contextualização do problema, dos objetivos e da terminologia adotadas no trabalho.

## 1.1. Contextualização

Quando uma praia é atingida durante um derramamento de óleo, programas de limpeza adequados devem ser aplicados. Para a boa execução de tais métodos, são informações cruciais para operações *in situ* ou que envolvam a remoção e reposição de sedimentos: características dos sedimentos costeiros, natureza das interações entre óleo e sedimento (Hayes et al., 1993) e o volume de material contaminado em uma seção da praia. Em relação a este último, pode-se estimar o volume combinando-se a área de cobertura de óleo com a profundidade de contaminação no sedimento, que pode ser obtida através da permeabilidade (Owens, 1988).

A permeabilidade é um dos principais parâmetros que determinam a sensibilidade ao óleo de um substrato durante derramamentos. Este parâmetro determina a infiltração e, conseqüentemente, o tempo de permanência do óleo no substrato. Tempo de permanência, no contexto da sensibilidade ao óleo, é o intervalo entre o primeiro contato do óleo com o substrato, até a completa remoção do mesmo (tanto naturalmente quanto antropicamente). Segundo Stern (2007), quanto maior o tempo de permanência do óleo em um sítio, maior será sua interação com o meio, maior será o dano causado no ambiente e mais difícil será sua recuperação.

Quando o óleo fica posicionado em subsuperfície, em locais com alta permeabilidade, três fatores agravantes prejudicam a resposta a um derramamento. Em primeiro lugar, as bactérias que realizam a degradação são aeróbicas, e a disponibilidade de oxigênio é limitada em subsuperfície (Rowland et al., 2000). A estimativa do volume de sedimentos contaminado é extremamente prejudicada, pois os métodos visuais são ineficientes (Owens, 1988). Como as variações no pacote sedimentar subaéreo são inerentes às praias arenosas, inevitavelmente esse óleo, pouco degradado, será liberado em um ciclo erosivo, causando novamente problemas sociais e ambientais (NOAA, 1992).

Pereira (2005) define a permeabilidade como a facilidade com que um fluído escoar através de uma matriz sedimentar porosa, a qual é quantificada pelo coeficiente de permeabilidade. O coeficiente de permeabilidade considera as características do meio, incluindo porosidade, tamanho, forma, arranjo e distribuição das partículas, além das características do fluído, como viscosidade e massa específica (Cabral et. al, 2000).

A estrutura do pacote sedimentar influencia na direção e tempo de viagem dos fluxos de água. Em terrenos homogêneos, a porosidade total tende a decrescer com a profundidade, acompanhada pelo aumento da densidade aparente, enquanto a existência de descontinuidades (como atividades biológicas, associadas às raízes mortas e animais escavadores) podem aumentar a porosidade (Stern, 2007). Terrenos heterogêneos, por sua vez, tendem a apresentar menor infiltração vertical

e maior espalhamento lateral. Devido a tais variações, o coeficiente de permeabilidade varia de acordo com as diferenças sedimentológicas em cada ambiente.

As variações sedimentológicas ocorrem ao longo das praias oceânicas, lagunares e fluviais por causa das diferenças morfodinâmicas entre os compartimentos. Desta forma, o comportamento do óleo não é igual em praias visualmente semelhantes, sendo necessário, portanto, o conhecimento detalhado desta variável em cada ambiente.

As variações da permeabilidade, provocadas pelas mudanças sedimentológicas do ambiente ao longo do tempo, podem causar diferentes taxas de percolação do fluido, causando problemas quanto à limpeza dos mesmos, além de não corresponder a escalonamentos e classificações de vulnerabilidade pré-existentes para a região (Tsouk et. al, 1985).

A metodologia oficial do Ministério do Meio Ambiente para a definição da sensibilidade ao óleo de uma área (MMA, 2007b) prevê comportamentos específicos para o fluido baseado, principalmente, na estrutura do substrato, sendo a permeabilidade um dos parâmetros decisivos para esta definição. Porém, a permeabilidade dentro desta metodologia é estimada a partir do tamanho do grão que, por sua vez é determinado visualmente pelo pesquisador em um trabalho de campo, desconsiderando qualquer variação (como moda, descontinuidades, distribuição vertical dos sedimentos, etc).

Além disso, o método oficial foi desenvolvido para regiões de mar aberto, consideradas expostas e de alta energia, mas é aplicado em praias oceânicas, lagunares, lacustres e fluviais. Isto implica na generalização do comportamento do óleo, ou seja, pressupõe-se que o óleo infiltre e espalhe da mesma forma em determinado ambiente, independente do compartimento no qual o mesmo está inserido. Porém, devido às variações mencionadas acima, o real comportamento do óleo nem sempre é condizente com o previsto pela metodologia oficial e os esforços para aperfeiçoar o método de definição de sensibilidade atual são, portanto, necessários e justificáveis.

Alguns esforços de adaptação do ISL para o Rio Grande do Sul foram executados no âmbito do projeto de mapeamento de Sensibilidade a óleo da Bacia de Pelotas<sup>1</sup>, coordenado pela FURG e em parceria com a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). São eles: Martins (2013) que definiu uma metodologia para classificar margens lagunares quanto à exposição a energia de ondas e marés, Marques & Nicolodi (2015) que verificaram a influência da heterogeneidade granulométrica no ISL; Marinho (2015), que criou um índice de sensibilidade agregando variáveis biológicas à variáveis geomorfológicas, Wally (2015), que criou um índice de sensibilidade fluvial para a região do Polo Petroquímico de Triunfo e do Delta do Jacuí, no RS e Machado Jr. (2015) que utilizou técnicas de análise multicritério para a elaboração de Cartas SAO na Lagoa dos Patos – RS. O presente trabalho se enquadra nestes esforços de aperfeiçoamento da metodologia de

---

<sup>1</sup> [www.saopelotas.furg.br](http://www.saopelotas.furg.br)



sensibilidade ao óleo, a fim de preencher lacunas encontradas e melhorar o entendimento do comportamento do contaminante no ambiente.

## 1.2. *Objetivos*

Determinar a permeabilidade do óleo em praias arenosas do Sistema Patos-Guaíba no Rio Grande do Sul.

### 1.2.1. Objetivos específicos:

- Determinar os principais parâmetros que governam a permeabilidade em praias lagunares;
- Caracterizar sedimentologicamente as praias da área de estudo;
- Verificar como as variações granulométricas das praias influenciam a permeabilidade;
- Comparar a permeabilidade das praias lagunares com a das praias oceânicas, determinando as principais diferenças encontradas entre os compartimentos, no contexto da sensibilidade ao óleo;
- Comparar as diferenças de condutividade hidráulica obtidas entre os métodos *in situ* e empíricos;
- Determinar as variações entre os dados de permeabilidade obtidos com os previstos pelo método oficial brasileiro de definição de sensibilidade ao óleo, verificando se o comportamento do óleo é condizente com o estipulado;

## 1.3. *Terminologia Adotada*

A terminologia adotada neste trabalho é a apresentada por Komar (1998) e Hoefel (1995) e comumente usada por outros autores (Figura 1):

Zona de arrebentação: é a porção do perfil praiar caracterizada pela ocorrência da quebra da onda, que representa o modo de dissipação energética da mesma sobre a praia.

Zona de surfe: zona intermediária entre a zona de arrebentação e a zona de espraiamento, onde dominam os processos de transporte de sedimentos por correntes de deriva litorânea e correntes de retorno.

Zona de espraiamento: região da praia delimitada entre a máxima e a mínima excursão das ondas sobre a face praiar. Nesta zona as ondas atuam através de um movimento oscilatório, para cima (*swash*) e para baixo (*backwash*) sobre o perfil praiar.

Praia: ambientes sedimentares costeiros formados por areias, cascalho, seixos e ou lama, de composição variada, condicionadas pela interação dos sistemas de ondas incidentes sobre a costa.

Pós-praia: zona que se estende no máximo espraiamento das ondas até o limite das dunas frontais, ou qualquer outra mudança fisiográfica brusca; zona subaérea do perfil praial. Apresenta feições características como bermas, crista-canai, dunas embrionárias, dunas barcanóides e escarpas.

Berma: feição característica de processos de construção sedimentar. Apresenta a forma de um banco.

Face da praia: zona onde ocorrem os processos de espraiamento, fluxo e refluxo das ondas, ou zona de estirâncio. Compreende também a zona intermareal. Apresenta como limite superior a berma e o inferior o degrau.

Cúspides praias: elevações longitudinais rítmicas formadas na face da praia.

Antepraia: porção do perfil sobre a qual ocorrem os processos de refração, difração, dissipação de energia por fricção e empolamento. Apresenta como limite externo o ponto de interação do movimento das ondas sobre o fundo.

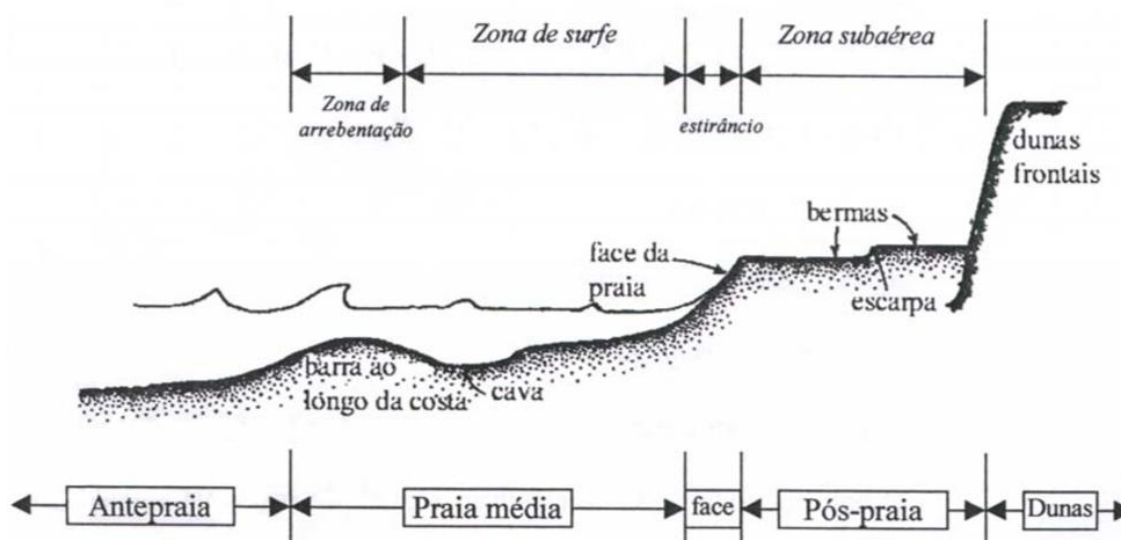


Figura 1: Zona física e morfológica típica de praias arenosas. Adaptado de Komar (1998).

## 2. INTRODUÇÃO

### 2.1. *Petróleo e Meio Ambiente*

A indústria do petróleo tem se afirmado como uma das mais importantes da contemporaneidade, uma vez que o petróleo encontra-se enraizado no cotidiano da sociedade a ponto de tornar-se alvo de embates político-territoriais e geoestratégicos (Matos & Lima-Guimarães, 2012).

O petróleo pode ser definido como uma mistura de moléculas de hidrocarboneto e menores quantidades de outras moléculas orgânicas incluindo tanto óleo quanto gás de hidrocarboneto (Gluyas & Swarbrick, 2013). Já o termo óleo é definido pela Lei Federal 9966 de 28/04/2000 como “qualquer forma de hidrocarboneto (petróleo e seus derivados), incluindo óleo cru, óleo combustível, borracha, resíduos de petróleo e produtos refinados” (Brasil, 2000).

O óleo é dividido em quatro grupos (Tabela 1) de acordo com suas características físicas e químicas, incluindo a densidade relativa, persistência e a viscosidade.

Tabela 1: Grupos de óleo e principais características. FONTE: CETESB (2007)

Grupos de óleo e suas características principais				
Grupo	Densidade Relativa	°API	Meia vida	Viscosidade (15°C)
Grupo I	<0,8	>45	~24h	0,5 – 2,0
Grupo II	0,80 < 0,85	35 a 45	~24h	4
Grupo III	0,85 < 0,95	17,5 a 35	~48h	8
Grupo IV	>0,95	< 17,5	~72h	1500

A densidade relativa ou gravidade específica é a razão entre a densidade do óleo com a da água pura. É uma grandeza adimensional, por se tratar de um quociente de duas grandezas da mesma espécie. A densidade relativa (DR) do óleo é representada internacionalmente como grau API e pode ser calculada pela equação:

Equação 1: Cálculo para grau API. FONTE: CETESB (2007)

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{DR} - 131,5$$

O grau API, de acordo com ANP (1998), pode ser dividido em três classes, em função da fração de componentes leves e pesados e pelo ponto de corte, de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2: Grau API e pontos de corte do petróleo nacional. FONTE: ANP (1998)

Grau API	Pontos de Corte		
	Fração de destilados leves	Fração de destilados médios	Fração de resíduos pesados
Menor que 27	Até 290°C	290°C a 380°C	Acima de 380°C
Igual ou maior que 27 e menor que 36	Até 270°C	270°C a 450°C	Acima de 450°C
Igual ou maior que 36	Até 210°C	210°C a 500°C	Acima de 500°C

A persistência ou meia vida é o tempo de degradação de 50% do óleo na superfície do mar. Os óleos podem ser divididos em não-persistentes (grupo I: produtos refinados) e persistentes (crus e refinados dos grupos II, III e IV).

A viscosidade é a propriedade de resistir ao escoamento. Depende da temperatura ambiente e dos teores de componentes leves do óleo (concentração de componentes aromáticos).

Os óleos pertencentes ao grupo I, incluem os derivados do petróleo, como gasolina, nafta e diesel. Os mesmos são considerados leves, solúveis e voláteis, possuindo assim, rápido espalhamento e evaporação e, portanto, rápida degradação natural. Os mesmos não emulsificam e não são adesivos, porém, possuem elevada toxicidade, comprometendo os recursos (fauna, flora e água) da área onde foram expostos (CETESB, 2007).

Strain (1986), no entanto, afirma que mesmo componentes leves (como os ciclo hexanos) de um óleo podem persistir na zona entremarés de uma praia arenosa por períodos superiores a seis meses. O autor afirma que técnicas de limpeza ativas deveriam ser consideradas quando óleos leves contaminam estes sedimentos. Outro exemplo é descrito por McLaren (1985), que ao verificar a contaminação por óleo leve em uma praia exposta à alta energia de onda nas Ilhas Queen Charlotte no Canadá, encontrou a presença do diesel até 60 dias após o acidente. Além disso, segundo o autor, o derrame não se concentrou na zona supermareal como esperado, mas o foco de concentração ocorreu na face da praia inferior.

Os óleos dos grupos II e III são considerados intermediários e incluem os óleos crus com grau API entre 17,5 e 45. Normalmente são compostos por uma parcela solúvel, que sofre degradação rápida e natural; e uma parcela mais persistente, que muitas vezes, demanda remoção manual. A toxicidade ao meio é moderada a alta, podendo formar emulsificações estáveis. Já os óleos do grupo IV, incluindo pavimento asfáltico, chamados de “pesados”, possuem grau API variando entre 10 e 17,5. São relativamente pouco voláteis, viscosos a semissólidos, adesivos, com toxicidade baixa e podem formar emulsões estáveis. Estes óleos necessitam de intervenção antrópica com remoção manual após o contato com o ambiente (CETESB, 2007).

O conhecimento das características de cada grupo é essencial para o entendimento do comportamento do produto, sua toxicidade ou persistência no ambiente, já que, as estratégias de resposta no caso de um incidente ou derramamento de óleo, são governadas, em grande parte, pelo comportamento do óleo derramado (Owens, 2002).

Incidente de poluição por óleo é definido pela Resolução Conama 293 de 12/12/2001 como qualquer descarga de óleo, decorrente de fato ou ação intencional ou acidental que ocasione dano ou risco de dano ao meio ambiente ou à saúde humana. Derramamento, por sua vez, é caracterizado como qualquer forma de liberação de óleo para o ambiente, incluindo o despejo, escape, vazamento e transbordamento (Brasil, 2001; Gong et al., 2014).

A poluição por óleo, por seu aspecto destruidor, destaca-se como sendo uma das mais agressivas à sociedade. Os impactos de um derramamento de óleo são alarmantes. Quando atinge um solo com relativa permeabilidade, o óleo, ao ser removido, leva consigo camadas superficiais do solo, rica em nutrientes e matéria orgânica. Em solo com alta permeabilidade, este se torna uma frente de propagação do óleo derramado para os lençóis freáticos, fazendo com que as consequências deste derrame atinjam diversos ecossistemas (Matos & Lima-Guimarães, 2012).

Quando um óleo derramado encontra um corpo hídrico, por ser uma substância tóxica, põe em risco a vida de inúmeros seres vivos do ambiente aquático, além de comprometer os múltiplos usos e consumo humano deste recurso. Ao atingir uma zona costeira, compromete ainda a vida de outros ecossistemas, como cenários de manguezais, lagunas, estuários, dentre outros. Além de comprometer a qualidade cênica dos recursos paisagísticos de áreas voltadas para as atividades turísticas, compromete ainda e de forma concreta, a renda e a subsistência de muitos trabalhadores que vivem somente de pesca nestas áreas, impactando adversamente, de modo primário e secundário, não só atividades socioeconômicas, mas também aspectos culturais (Matos & Lima-Guimarães, 2012).

Percebe-se que todos os processos envolvendo o petróleo (incluindo extração, transporte, refino, etc.) expõem o meio ambiente a diversos riscos ambientais. Risco Ambiental pode ser entendido como a possibilidade da ocorrência de dano ao meio ambiente, sendo que o dano, segundo Lyra (1997) representa toda e qualquer forma de degradação que afete o equilíbrio do meio ambiente.

Uma comprovação destes riscos são os diversos derramamentos de grandes (e pequenas) magnitudes que ocorreram ao longo da história e que causaram graves impactos no meio ambiente. Como exemplo destaca-se o acidente envolvendo o Exxon Valdez no Alasca em 1989, onde 37 mil toneladas de óleo foram perdidas, os derramamentos durante a Guerra do Golfo em 1991 onde cerca de 800 mil toneladas de óleo atingiram o mar e o rompimento de um oleoduto em 2000 na Baía de Guanabara que disponibilizou mil toneladas de óleo. No Brasil, o IBAMA (2014) quantificou 744 acidentes envolvendo produtos perigosos em 2014, sendo que 31.3% envolveram líquidos inflamáveis (Figura 2).

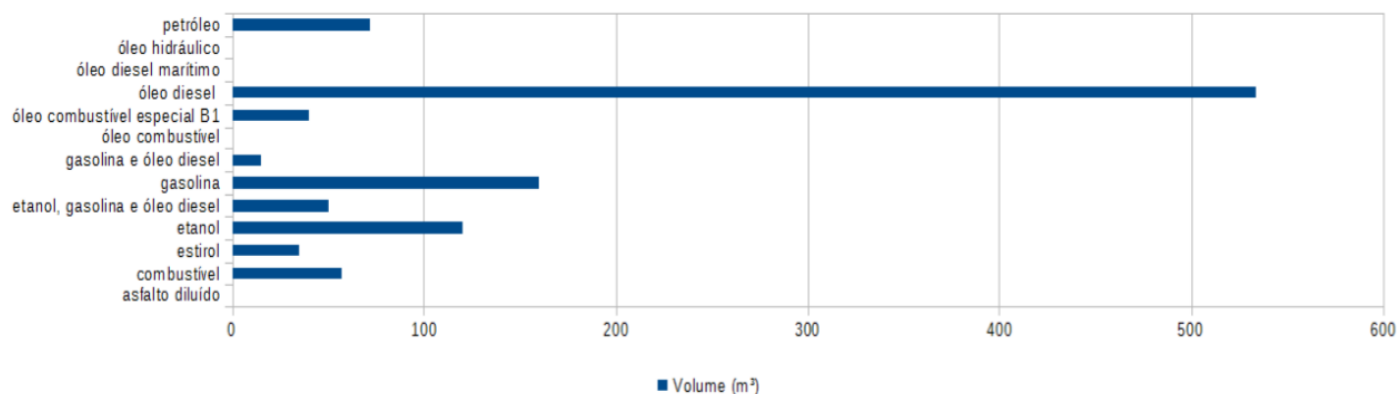


Figura 2: Volume em m<sup>3</sup> dos tipos de produtos envolvidos nos acidentes ambientais pertencentes à Classe de Risco 3 – líquidos inflamáveis no Brasil em 2014. Fonte: IBAMA (2014).

A fim de amenizar os impactos causados por possíveis danos ambientais, surge o princípio da prevenção, que, de acordo com Fortunato & Fortunato Neto (2011), é denominado como a antecipação à prática de ações que possam causar danos ambientais, adotando medidas gerenciais aptas a proteger o meio ambiente. De acordo com os mesmos autores, a prevenção atua com prévio conhecimento das implicações relativas às intervenções antrópicas quando previsível a ocorrência de impactos negativos ao meio ambiente. Assim, a prevenção aplica-se quando não há dúvida alguma de que os danos possam vir a ocorrer.

Ante a impossibilidade de eliminar riscos de acidentes, tanto a indústria como os órgãos públicos necessitam integrar-se e estar preparados para atender situações emergenciais com vazamento de óleo (CETESB, 2007). Para responder rápida e com sucesso a um derrame de petróleo em uma determinada área geográfica, um plano de contingência, incluindo informações e processos para contenção do óleo e limpeza, é requerido (Castanedo et al., 2009).

Dentro deste contexto surgem as convenções e as legislações específicas, como a a Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição Causada por Navios (MARPOL 73/78), a Convenção Internacional sobre Responsabilidade Civil em Danos Causados por Poluição por Óleo (CLC/69) e a Convenção Internacional sobre Preparo, Resposta e Cooperação em Caso de Poluição por Óleo (OPRC/90), para tentar reduzir os riscos de acidentes e os danos causados pelos mesmos.

O Brasil, como signatário destas convenções mantém o compromisso de estabelecer uma estrutura nacional de combate à poluição por óleo, instituindo bases amplas (prevenção, controle e fiscalização) para a proteção do ambiente marinho. Neste sentido, foram criadas a Lei 9966/2000, conhecida como “Lei do Óleo”, que estabelece os princípios básicos a serem obedecidos na movimentação de óleo e outras substâncias nocivas ou perigosas em portos organizados, instalações portuárias, plataformas e navios em águas de jurisdição nacional, o Decreto 4.871/2003 que institui os Planos de Área para o combate à poluição por óleo em águas sob jurisdição nacional e a Resolução CONAMA 398/2008 que estabelece as diretrizes para elaboração do Plano de Emergência Individual (PEI) para incidentes de poluição por óleo (Oliveira, 2014).

Dentro do contexto da prevenção e contingência estabelecidas pela lei, encontram-se as Cartas de Sensibilidade Ambiental ao Óleo (Cartas SAO) como instrumentos oficiais para orientação à resposta em caso de acidentes. A Resolução CONAMA 398/2008 insere as Cartas SAO no conteúdo mínimo dos PEIs para incidentes de poluição por óleo, originados em portos organizados, terminais, dutos e plataformas, bem como suas instalações de apoio. Além disso, determina que a análise de vulnerabilidade e os procedimentos para proteção destas áreas deverão tomar como base as informações disponíveis nas Cartas SAO, elaboradas de acordo com as especificações e normas técnicas aplicáveis (MMA, 2007b).

As Cartas SAO, exemplificada na Figura 3, constituem um componente essencial e fonte primária de informação para o planejamento de contingência e avaliação de danos em casos de derramamento de óleo. Elas representam uma ferramenta fundamental para o balizamento das ações de resposta a vazamentos de óleo, na medida em que, ao identificarem aqueles ambientes com prioridade de preservação e as eventuais áreas de sacrifício, permitem o correto direcionamento dos recursos disponíveis e a mobilização mais eficiente das equipes de proteção e limpeza (MMA, 2007b).

A Carta SAO inclui três tipos de informações principais: a sensibilidade dos ecossistemas costeiros e marinhos, os recursos biológicos e as atividades socioeconômicas presentes no ambiente.

Os recursos biológicos incluem plantas e animais presentes na área que sejam sensíveis ao óleo, assim como as áreas de alimentação, nidificação, reprodução, berçários e rotas de migração. Já as informações socioeconômicas identificam as atividades humanas que possam ser prejudicadas por derramamentos de óleo. Estas atividades incluem áreas de lazer e pesca, aquíferos, sítios históricos e culturais, áreas sob gerenciamento especial (como as unidades de conservação), etc.

A sensibilidade da linha de costa classifica as seções do litoral em habitats, de acordo com suas características geomorfológicas, sensibilidade a derramamentos de óleo, persistência natural de óleo e condições de limpeza/remoção. Esta sensibilidade é classificada de acordo com o Índice de Sensibilidade do Litoral (ISL), adaptado de Gundlach & Hayes (1978).

A Baía de Pelotas, com área de 210.000 km<sup>2</sup>, abrange toda a costa do Rio Grande do Sul estendendo-se até o sul de Florianópolis, e está sendo mapeada no contexto das cartas SAO em projeto coordenado pelo Laboratório de Oceanografia Geológica da FURG em parceria com o Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica (CECO) e Centro de Estudos Costeiros, Limnológicos e Marinhos - CECLIMAR - UFRGS. Os detalhes do projeto podem ser observados em [www.saopelotas.furg.br](http://www.saopelotas.furg.br). O Atlas da Baía Marítima de Pelotas e seu respectivo conjunto de cartas operacionais, táticas e estratégica será lançado em 2016 (Nicolodi, 2015).

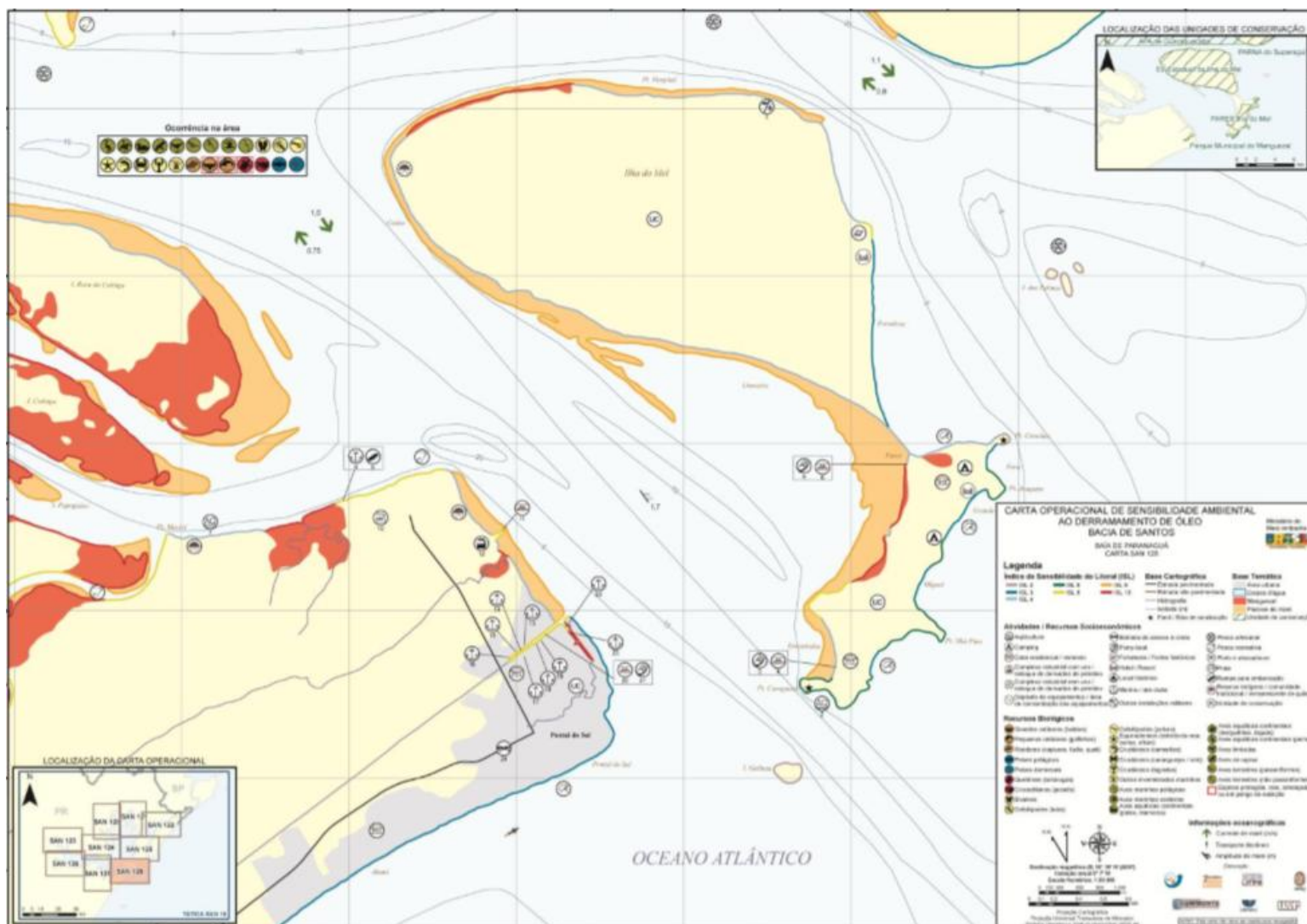


Figura 3: Carta de Sensibilidade ao Óleo operacional da Ilha do Mel no Paraná. Os recursos socioeconômicos estão exibidos na forma de ícones ao longo da carta, enquanto os recursos biológicos estão representados como ícones em um retângulo no canto superior esquerdo. O índice de sensibilidade do litoral é apresentado por uma linha, sendo a cor referente à sensibilidade do local. Fonte: Altas de Sensibilidade Ambiental da Bacia Marítima de Santos. Fonte: MMA (2007 a)



## 2.2. Índice de Sensibilidade do Litoral

O ISL (Tabela 3) é um índice que hierarquiza os ambientes costeiros em relação à sensibilidade relativa a derrames de óleos, potencial de prejuízo ecológico e facilidade de limpeza, em uma escala de 1 a 10, em ordem crescente de sensibilidade. Esta classificação é baseada nas características geomorfológicas do litoral, segundo o grau de exposição da costa à energia de ondas e marés, declividade do litoral e tipo de substrato.

Tabela 3: Índice de Sensibilidade do Litoral (ISL) com as respectivas cores e tipos de costa para cada valor de sensibilidade. Fonte: MMA, 2007b.

COR	ÍNDICE	TIPOS DE COSTA
	ISL 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costões rochosos lisos, de alta declividade, expostos</li> <li>• Falésias em rochas sedimentares, expostas</li> <li>• Estruturas artificiais lisas (paredões marítimos artificiais), expostos</li> </ul>
	ISL 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costões rochosos lisos, de declividade média a baixa, expostos</li> <li>• Terraços ou substratos de declividade média, expostos (terraço ou plataforma de abrasão, terraço arenítico exumado bem consolidado, etc)</li> </ul>
	ISL 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Praias dissipativas de areia média a fina, expostas</li> <li>• Faixas arenosas contíguas à praia, não vegetadas, sujeitas à ação de ressacas (restingas isoladas ou múltiplas, feixes alongados de restingas tipo “long beach”)</li> <li>• Escarpas e taludes íngremes (formações do grupo Barreiras e Tabuleiros litorâneos), expostos</li> <li>• Campos de dunas expostas</li> </ul>
	ISL 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Praias de areia grossa</li> <li>• Praias intermediárias de areia fina a média, expostas</li> <li>• Praias de areia fina a média, abrigadas</li> </ul>
	ISL 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Praias mistas de areia e cascalho, ou conchas e fragmentos de corais</li> <li>• Terraço ou plataforma de abrasão de superfície irregular ou recoberta de vegetação</li> <li>• Recifes areníticos em franja</li> </ul>
	ISL 6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Praias de cascalho (seixos e calhaus)</li> <li>• Costa de detritos calcários</li> <li>• Deposito de tálus</li> <li>• Enrocamentos (“rip-rap”, guia corrente, quebra-mar) expostos</li> <li>• Plataforma ou terraço exumado recoberto por concreções lateríticas (disformes e porosas)</li> </ul>
	ISL 7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planícies de maré arenosa exposta</li> <li>• Terraço de baixa-mar</li> </ul>
	ISL 8	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escarpa / encosta de rocha lisa, abrigada</li> <li>• Escarpa / encosta de rocha não lisa, abrigada</li> <li>• Escarpas e taludes íngremes de areia, abrigados</li> <li>• Enrocamentos (“rip-rap” e outras estruturas artificiais não lisas) abrigados</li> </ul>
	ISL 9	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planície de maré arenosa / lamosa abrigada e outras áreas úmidas costeiras não vegetadas</li> <li>• Terraço de baixa-mar lamoso abrigado</li> <li>• Recifes areníticos servindo de suporte para colônias de corais</li> </ul>
	ISL 10	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deltas e barras de rio vegetadas</li> <li>• Terraços alagadiços, banhados, brejos, margens de rios e lagoas</li> <li>• Brejo salobro ou de água salgada, com vegetação adaptada ao meio salobro ou salgado; apicum</li> <li>• Marismas</li> <li>• Manguezal (mangues frontais e mangues de estuários)</li> </ul>

O grau de energia influencia o tempo de permanência do óleo. Segmentos com alto nível de energia são expostos a grandes ondas e fortes correntes de maré durante todas as estações. Estes ambientes removem rapidamente o óleo, normalmente em períodos de dias ou semanas. Já segmentos com baixa energia são protegidos de ondas e marés, exceto em eventos ocasionais (MMA, 2007b). A remoção natural pode levar um longo tempo, sendo indicada, a remoção manual.

A declividade do substrato determina a extensão da zona intermarés e sua importância principal corresponde ao efeito na reflexão e quebra das ondas. Litorais muito inclinados levam ao rompimento abrupto e reflexão das ondas, com elevadas velocidades de espraiamento e refluxo, e o tempo de permanência do óleo será mínimo, com rápida limpeza natural (MMA, 2007b).

O tipo de substrato afeta a permeabilidade, a mobilidade dos sedimentos e a permanência do óleo. A permeabilidade do substrato estabelece uma correlação direta com a infiltração potencial e, portanto, com a permanência do petróleo. Quanto maiores forem o diâmetro dos sedimentos do substrato, sua esfericidade e uniformidade, tanto mais profunda será a infiltração do óleo (MMA, 2007b).

Entretanto, o fato do método ser uma simplificação, torna a eficácia do mesmo questionável em alguns casos específicos. De acordo com a metodologia padrão, todos os ambientes costeiros devem ser enquadrados neste índice e, como ele é restrito a algumas características, ele pode falhar na sua principal função: a definição de áreas prioritárias. De acordo com Oliveira (2014), a definição de um valor fixo de ISL acaba por engessar a sensibilidade do ambiente, mascarando possíveis variações sazonais e temporais. Além disso, o método foi baseado em um ambiente costeiro, mas o mesmo é aplicado em ambientes dinamicamente diferentes, como lagunas, lagos e rios, que possuem respostas totalmente distintas e não previstas na metodologia oficial. Frente a tais lacunas, esforços vem sendo tomados para o aperfeiçoamento do método.

Um exemplo de adaptação do Índice de Sensibilidade foi realizado pela Petrobrás para a Região Amazônica (Petrobrás, 2007). Como esta região apresenta peculiaridades em relação ao restante do país, a hierarquização dos ambientes foi realizada dando-se um enfoque nas feições fluviais (que sofrem alagamento durante períodos de intensa pluviosidade). O ISL Amazônico, proposto pela Petrobrás pode ser visualizado na Tabela 4.

Tabela 4: Índice de Sensibilidade Fluvial da Região Amazônica a Derrames de Óleo. Fonte: Petrobrás, 2007.

Index	Feição
1	Estruturas artificiais
2	Laje ou afloramento rochoso
3	Corredeira/cachoeira
4	Escarpa/barranco
5	Praia ou banco de areia/seixo exposta
6	Praia ou banco de areia/ seixo abrigada
7	Praia ou banco de lama exposto
8	Praia ou banco de lama abrigado
9	Zona de confluência de rios e lagos
10 a	Banco de macrófitas aquáticas
10b	Vegetação alagada (igapós, várzea, chavascal, campo, etc.)

Outros exemplos incluem adaptações propostas por Castanedo et al., (2009) que propuseram a integração dos aspectos físicos, biológicos e socioeconômicos em um único Índice de Vulnerabilidade ao óleo para a costa de Cantábria na Espanha; Martins (2013), que definiu uma metodologia para classificar margens lagunares quanto à exposição a energia de ondas e marés; Marinho (2015) que criou um índice de sensibilidade agregando variáveis biológicas (como espécies endêmicas ou em extinção) à variáveis geomorfológicas; e Wally (2015) que criou um Índice de Sensibilidade do Litoral fluvial (ISLF) para a região do delta do Jacuí no RS, conforme Tabela 5.

Tabela 5: Índice de Sensibilidade do Litoral Fluvial (ISLF). Fonte: Wally (2015).

ISLF	Tipo de Litoral
1	Muros/ Estruturas verticais
2	Substrato de Declividade Média/ Estruturas de madeira
3	Escarpas
4	Praia Areia Média / Fina
5	Praia Mista / Areia Grossa
6	Entulhos e Resíduos
7	Escarpas Vegetadas
8	Bancos Vegetados
9	Florestas
10	Banhados/ Macrófitos de margem

### 2.3. Permeabilidade

Pereira (2005) define a permeabilidade como a facilidade com que um fluido escoar através de uma matriz sedimentar porosa. O deslocamento mais fácil do fluido no meio poroso aumenta o potencial de vulnerabilidade natural de um ambiente quando o fluido percolante é um contaminante (Caicedo et al., 2010).

Segundo Halmemies et al. (2003) é importante saber como óleos estão espalhando nos solos e as taxas de espalhamento em diferentes solos, porque esta informação irá ajudar os responsáveis a minimizar consequências de um acidente. A taxa e forma de espalhamento podem ser obtidas pela permeabilidade.

A permeabilidade do substrato estabelece uma correlação direta com a infiltração potencial e, portanto, com a permanência do petróleo; quanto maiores forem o diâmetro dos sedimentos do substrato, sua esfericidade e sua uniformidade, tanto mais profunda será a infiltração do óleo (MMA, 2007b). Quanto maior o tempo de permanência do óleo em um sítio, maior será a interação do óleo com o meio, mais difícil será a remoção do contaminante e maior será a quantidade de danos gerados. Entende-se por tempo de permanência o intervalo de tempo entre o primeiro contato do óleo com o meio e o momento em que ele foi completamente removido do sedimento (tanto naturalmente quanto antropicamente). Devido a isto a permeabilidade pode ser considerada uma das características mais relevantes na definição da sensibilidade de um ambiente ao óleo.

Alta permeabilidade indica que o óleo ficará posicionado em subsuperfície e como as variações no pacote sedimentar subaéreo são inerentes às praias arenosas, inevitavelmente esse óleo, pouco degradado, será liberado em um ciclo erosivo, causando novamente problemas sociais e ambientais. Assim, a chegada de pulsos de óleo durante um ciclo acrescivo, por exemplo, pode determinar a existência de camadas intercaladas de sedimento limpo e contaminado, conforme figura 4 (NOAA, 1992).

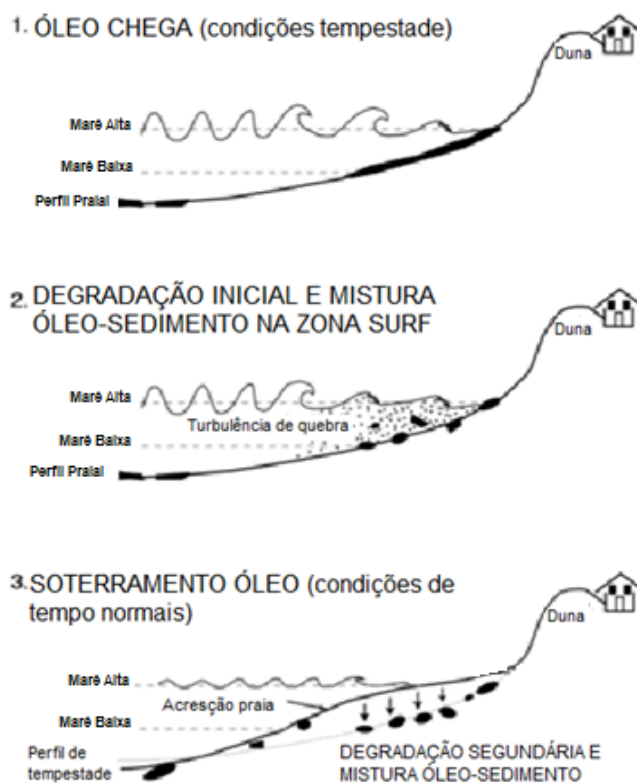


Figura 4: Modelo de soterramento e evolução subsequente do óleo em sedimentos da zona entre marés de uma praia. Adaptado de: Bernabeu et al., (2006)

Hayes et al. (1993) encontraram camadas de areia saturada com óleo, com espessura de 15 a 20 cm, abaixo de uma camada de areia limpa na face de praia da costa da Arábia Saudita após o acidente na Guerra do Golfo em 1991.

A permeabilidade é medida através da condutividade hidráulica. Segundo Souza Pinto (2000) o coeficiente de permeabilidade (K), também chamado de condutividade hidráulica, indica a velocidade de percolação da água quando o gradiente é igual a um. A velocidade de percolação corresponde à vazão dividida pela área.

O coeficiente de permeabilidade pode ser determinado através da realização de ensaios ou através de equações empíricas que relacionam a condutividade hidráulica com algumas características representativas dos sedimentos (Baird & Horn, 1996). Algumas destas equações empíricas incluem a equação de Hazen (1911); a equação de Shahabi et al., (1984) e a equação de Chapuis (2004). Quando realizados ensaios *in situ* ou laboratoriais, o coeficiente de permeabilidade pode ser calculado por diversas equações, incluindo a Lei de Darcy; Ródio (1965) e Caputo (1988).

A condutividade hidráulica é uma medida de grande importância, pois indica a qualidade estrutural do solo, pelo fato de estar diretamente relacionada com a geometria e a continuidade dos poros preenchidos com água (Scherpinski et al., 2010).

De acordo com Caicedo et al., (2010), a condutividade hidráulica é controlada, principalmente, pela quantidade de espaços porosos decorrente das características texturais (granulometria, seleção, empacotamento, esfericidade e arredondamento) e estruturais (estratificação, juntas e fraturas).

Outras características do solo como compactação, relação finos/arenosos, composição química, presença de argila, matéria orgânica e espessura dos horizontes influenciam no tempo de atenuação, permitindo a atuação de mecanismos como, troca iônica, sorção, diluição, etc, que podem diminuir a concentração do contaminante do solo (Domenico & Schwartz, 1990).

A permeabilidade diminui com a diminuição do tamanho dos grãos, pois apesar da diminuição dos diâmetros das partículas, há aumento considerável da capilaridade, desta forma, areias grossas tendem a ser mais permeáveis do que areias finas (Selley, 1998).

Capilaridade é a propriedade física que os fluidos tem de subir ou descer em tubos extremamente finos. Essa ação pode fazer com que os líquidos fluam mesmo contra a força de gravidade ou à indução de um campo magnético. Se um tubo que está em contato com esse líquido for fino o suficiente, a combinação de tensão superficial, causada pela coesão entre as moléculas do líquido, com a adesão do líquido à superfície desse material, pode fazê-lo subir por ele (Caputo, 1988).

Gundlach et al., (1981) comparando a ocorrência de óleo em praias compostas por areia fina com praias compostas por areia grossa e fragmentos de conchas, mostraram uma maior disposição vertical do óleo em praias de areia grossa. Já em

praias de areia fina, ocorre o predomínio da disposição do óleo de uma forma mais superficial resultando em maior espalhamento.

Conforme a estrutura do pacote sedimentar, ou no caso o grau de seleção do mesmo, a pluma de infiltração do óleo (a forma como o óleo se espalha no ambiente) apresentará aspectos distintos. Em pacote sedimentar homogêneo, sem estratificações ou horizontes diferenciados (Figura 5A) e pequenas variações no tamanho e distribuição dos poros, a pluma apresentará forma de gota, predominando a componente vertical regida pela força da gravidade (Stern, 2007).

A pluma de contaminação em forma de lâmpada indica a baixa homogeneidade dos poros (Figura 5B) que gera menor permeabilidade e porosidade e, portanto, diminui a infiltração do produto no sedimento. A componente vertical será menor, enquanto a componente horizontal terá maior influência, dada pela força de capilaridade (Stern, 2007).

Em terrenos com grande heterogeneidade sedimentar (Figura 5C), a infiltração do óleo no sedimento apresentará grande irregularidade na pluma. A existência de camadas com distintas granulometrias e, conseqüentemente, distintas porosidades e permeabilidades, resultarão em deslocamentos irregulares das componentes verticais e horizontais (Stern, 2007).

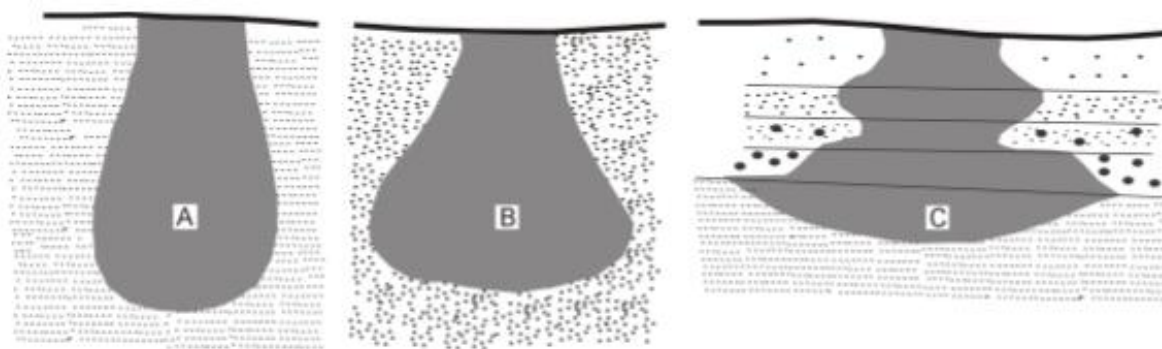


Figura 5: Três tipos básicos de plumas de infiltração. A) Terreno homogêneo, pluma em forma de gota; B) Terreno heterogêneo, pluma em forma de lâmpada; C) Terreno heterogêneo com estratificação, pluma irregular. Adaptado de Fussel et al., (1981).

Pereira & Calliari (2005), ao realizar ensaios de permeabilidade com óleo em praias oceânicas do RS encontraram um formato cônico com tendências retangulares em praias de granulometria fina e tendência circular ou elíptica em praias de granulometria média a grossa.

A esfericidade e arredondamento são parâmetros da forma dos grãos a serem considerados. O arredondamento corresponde ao grau de angulosidade da partícula e a esfericidade é o grau de aproximação da forma de uma partícula a uma esfera. A porosidade pode diminuir com o aumento da esfericidade devido à possibilidade do empacotamento dos grãos poder ser mais compactado do que aqueles com esfericidade menor. Grãos bem arredondados e com alta esfericidade devem empacotar com o espaço mínimo de poros, mas com o aumento da angulosidade dos grãos, o espaço do poro tende a aumentar (Beard & Weyl, 1973).

A trama do sedimento e como seus grãos estão empacotados e orientados estão intimamente relacionados às suas características de porosidade e de permeabilidade. O arranjo de esferas uniformes tem a geometria de um arranjo cúbico mais frouxo, apresentando cerca de 48% de porosidade, e o arranjo romboédrico, mais apertado, com 26% porosidade (Selley, 1998).

Quando o óleo atinge um sedimento poroso, ele é aprisionado lá. Óleo residual persiste na superfície do sedimento e é dirigido lentamente para dentro do sedimento devido à ação da gravidade, das ondas, da chuva e do lençol. O óleo é então redistribuído no sedimento, onde permanece soterrado por mais tempo. Sob estas circunstâncias, abrasão e a dispersão do óleo associada com a ação direta da onda e da maré são reduzidas (Bernabeu, et al., 2006; Allan et al., 2006).

A compactação do solo, por sua vez, causada principalmente pelo tráfego de animais, pessoas e veículos, provoca uma alteração no arranjo das partículas do solo e, conseqüentemente, na permeabilidade: quanto maior a compactação do sedimento, menor a quantidade de poros pelos quais o fluido pode percolar e, conseqüentemente, menor a permeabilidade.

Além das características citadas acima, o óleo só poderá infiltrar em grande volume, em locais com o lençol freático profundo e baixa saturação de água no solo (Caicedo et al., 2010). A água no interstício dos grãos funciona como uma barreira e o óleo, então, irá espalhar lateralmente ao invés de infiltrar verticalmente (Pereira & Calliari, 2005).

Devido às características texturais dos sedimentos, o coeficiente de permeabilidade varia de acordo com as diferenças sedimentológicas em cada ambiente. Abreu *et al.* (2003), por exemplo, encontrou o valor de 62,7% para o coeficiente de variação da condutividade hidráulica em solo saturado, determinada em campo na profundidade de 15 centímetros. Scherpinski et al., (2010), por sua vez, encontraram um coeficiente de variação de 90,83%. O alto valor é justificado pela variabilidade do espaço poroso (parâmetro decisivo para a permeabilidade) que sofre variações de solo para solo e também para o mesmo solo em função das variações estruturais.

Costi (2008) ao realizar ensaios com óleo nas praias oceânicas do RS, verificou que na transição do verão para o outono houve a redução dos valores de infiltração vertical, devido à diminuição do tamanho médio do grão, ao aumento do teor de umidade do sedimento e do grau de seleção da amostra.

As variações da permeabilidade, provocadas pelas mudanças sedimentológicas do ambiente, podem causar diferentes taxas de percolação do fluido, causando problemas quanto à limpeza dos mesmos, além de não corresponder a escalonamentos e classificações de vulnerabilidade pré-existent para a região (Tsouk et al., 1985).

A partir das variações nos coeficientes de permeabilidade horizontais e verticais a permeabilidade pode mudar de direção dentro dos sedimentos dependendo de sua heterogeneidade. Em situações de poros isotrópicos (tamanhos iguais) a permeabilidade é igual em todas as direções. No entanto, sedimentos em ambientes naturais são predominantemente anisotrópicos, isso significa que a permeabilidade

horizontal é diferente da vertical (Rocha et al., 2005). Segundo Chapuis (2012a), a maior parte dos solos naturais possuem propriedades hidráulicas espacialmente variáveis. Isto significa que muitos dados de permeabilidade são necessários para caracterizar a condutividade hidráulica de uma área, sendo que, em muitos casos, os métodos empíricos são recomendados por serem mais baratos e consumirem menos tempo. As equações empíricas, no entanto, nem sempre obtêm valores satisfatórios. Rosas et al., (2014) ao validar algumas formas empíricas para cálculo da condutividade hidráulica, encontrou baixa correlação entre os valores estimados e os medidos de permeabilidade para ambientes deposicionais praias.



### 3. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo engloba cinco praias arenosas do sistema Patos-Guaíba no Rio Grande do Sul. Estes pontos são: Arambaré Norte (452819, 6580432), Arambaré Sul (452250, 6578548), Praia Alegria em Guaíba (469869, 6665665), Ipanema em Porto Alegre (477865, 6665860) e Pontal do Cristóvão Pereira em Mostardas (503033, 6567971) e estão representados na Figura 6. Os pontos a serem amostrados foram escolhidos pela facilidade de acesso, com base nas diferenças granulométricas conhecidas previamente e de forma a enquadrar as margens da Lagoa dos Patos e do Lago Guaíba.

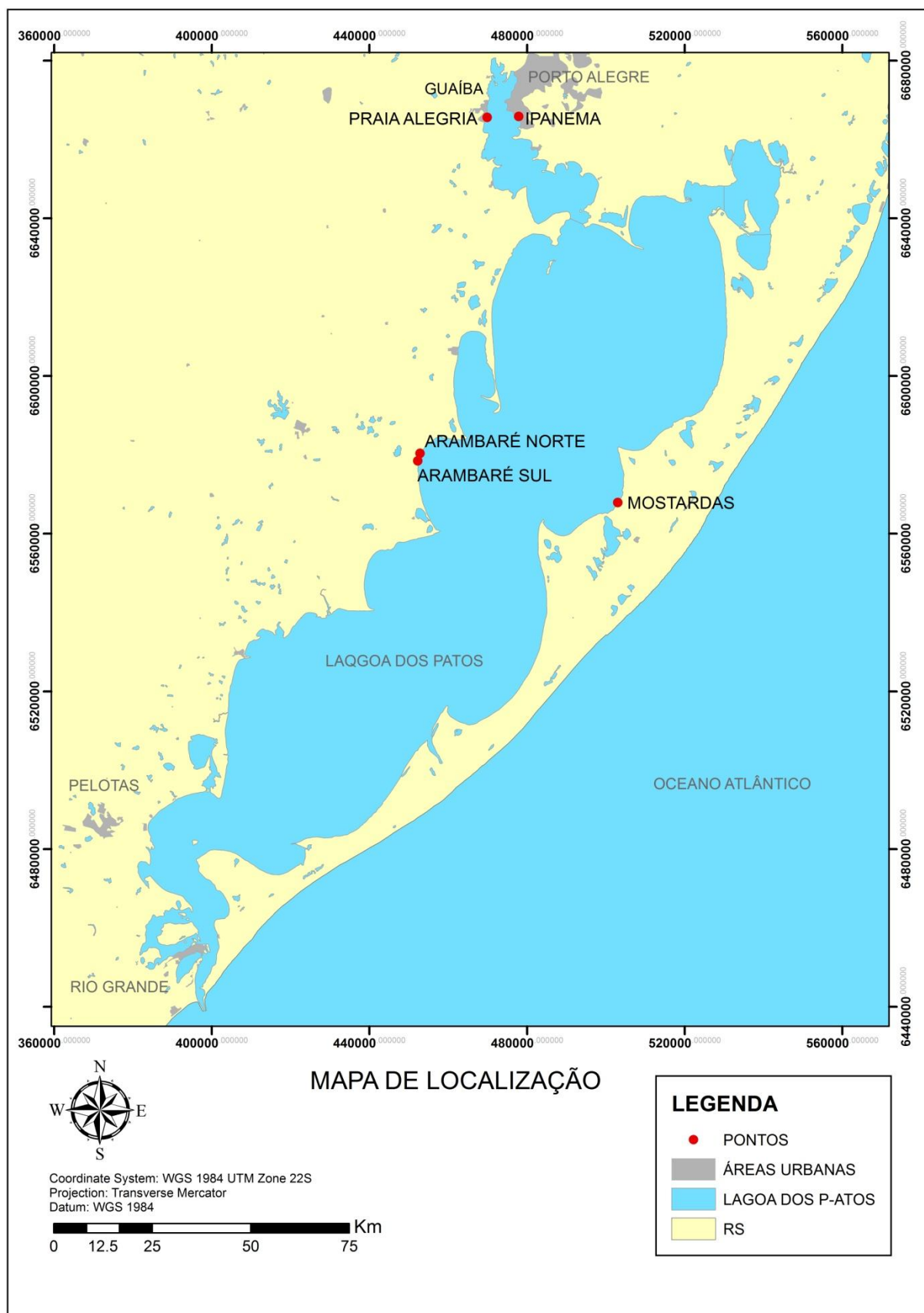


Figura 6: Localização da área de estudo no estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

A província costeira do RS foi compartimentada por Villwock (1984) em duas unidades geológicas: o Embasamento (Terras Altas) e a Bacia de Pelotas (Terras Baixas). O Embasamento é composto pelo complexo de rochas pré-cambrianas do Escudo Sul-rio-grandense e pelas sequências paleozóicas e mesozóicas da Bacia do Paraná. Ancorada no escudo, localiza-se a Bacia de Pelotas, que atua como fonte para a sedimentação clástica terrígena (figura 7).

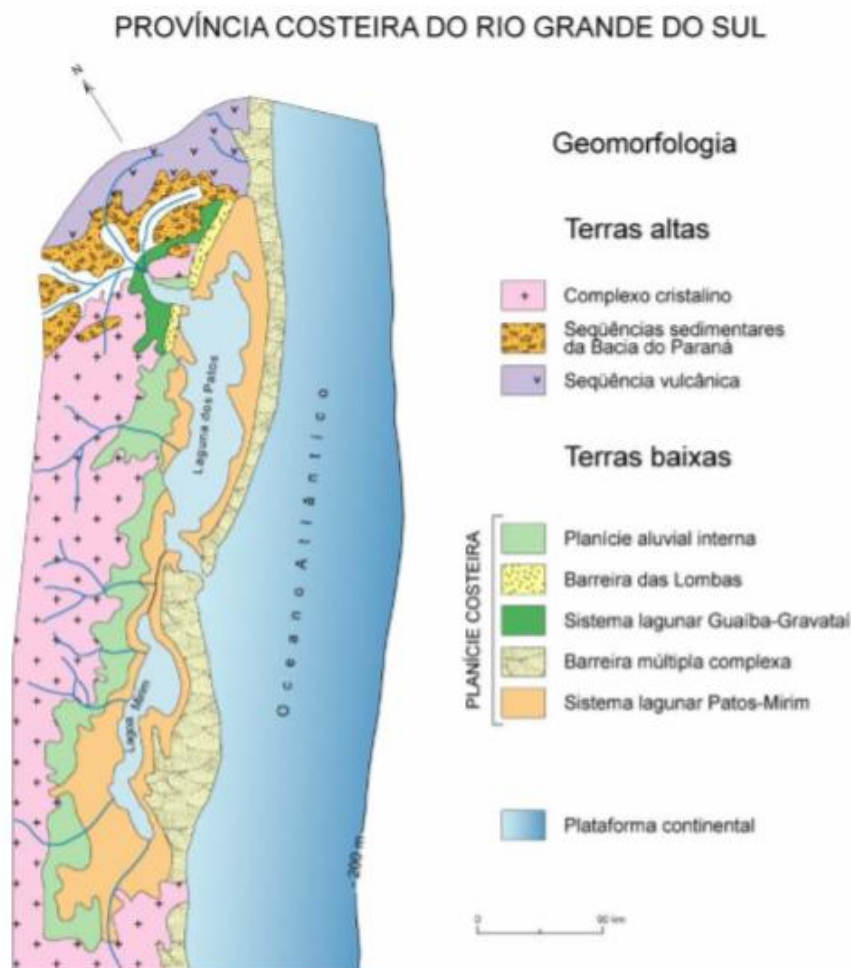


Figura 7: Geomorfologia da Província Costeira do Rio Grande do Sul. Fonte: Villwock (1984)

O sistema Patos-Guaíba está localizado na planície costeira do Rio Grande do Sul. A planície costeira do RS é uma costa retilínea entre as latitudes 29°S e 34°S com uma área aproximada de 33,000 km<sup>2</sup> (Tomazelli et al., 2000).

A planície costeira do RS corresponde a uma feição fisiográfica onde estão expostos os sedimentos da porção superficial da Bacia de Pelotas, ou seja, os sedimentos da cobertura depositados desde o Terciário sob a influência de oscilações glácio-eustáticas do nível do mar e acentuadas variações climáticas (Barboza, 1999).

A geologia e geomorfologia da Planície Costeira foi sintetizada por Villwock, 1984; Villwock et al., 1986; Villwock & Tomazelli, 1995; Tomazelli & Villwock, 2000. Estes trabalhos mostram que a mesma se desenvolveu durante o Quaternário através do

retrabalhamento dos depósitos de leques aluviais acumulados na parte mais interna da planície, junto às terras adjacentes. Estes depósitos foram retrabalhados durante os vários ciclos transgressivos-regressivos glacioeustáticos do Quaternário, levando à geração de pelo menos quatro sistemas deposicionais do tipo laguna-barreira, denominados, do mais antigo ao mais moderno, de sistemas I, II, III e IV (Villwock et al., 1986). Os estudos mostraram que os sistemas I, II e III são de idade pleistocênica, enquanto o sistema IV é de idade holocênica tardia (Figura 8).

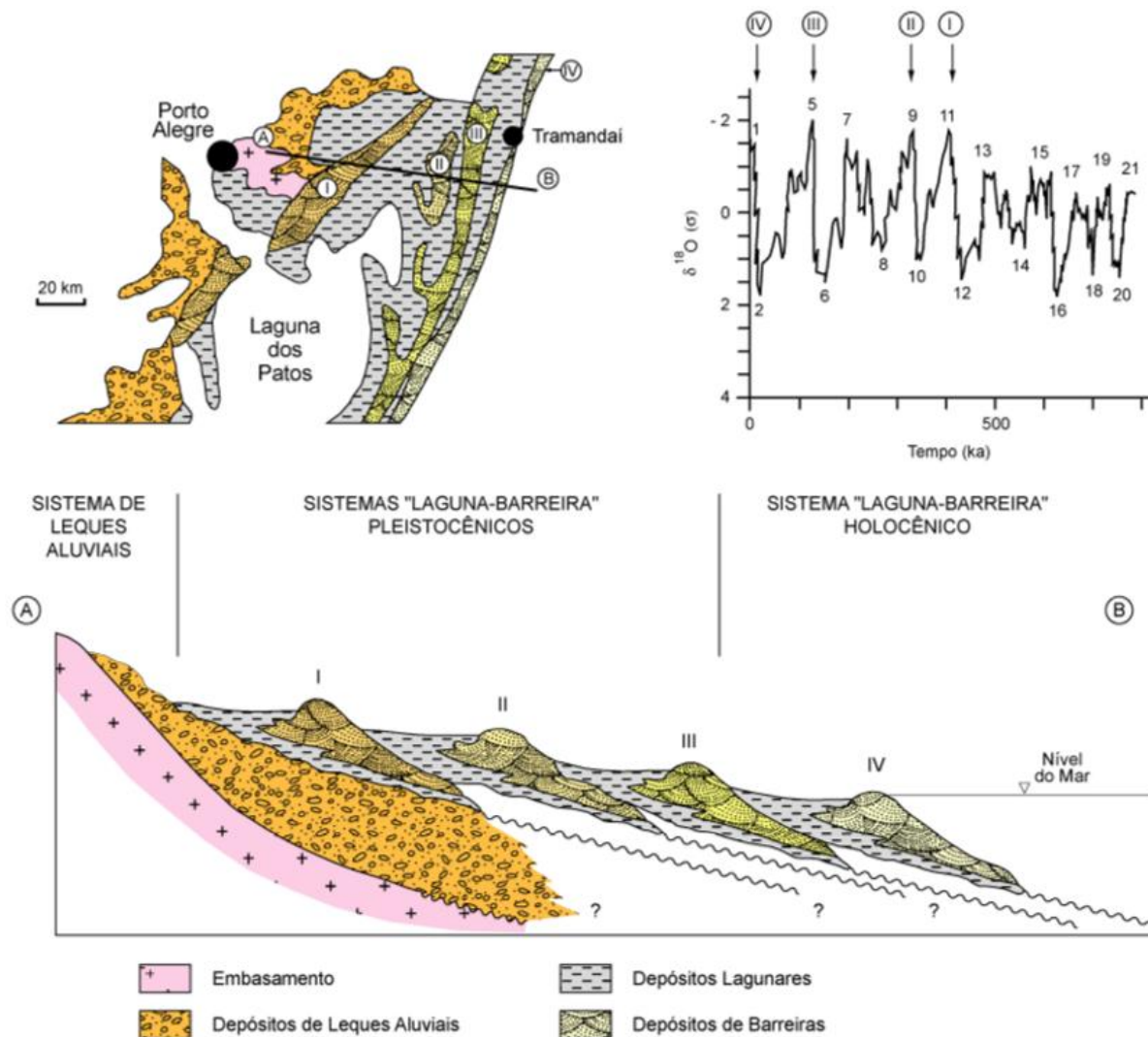


Figura 8: Perfil esquemático transversal dos sistemas deposicionais da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. As barreiras são correlacionadas aos últimos maiores picos na curva isotópica de oxigênio. Fonte: Tomazelli & Villwock, 1998.

A barreira III possui idade pleistocênica, aproximadamente 125 ka. De acordo com Tomazelli (1985) ela é constituída por uma sucessão vertical de fácies arenosas praias e marinho raso recobertas por depósitos eólicos, indicando claramente uma natureza regressiva. Os sedimentos praias são compostos por areias quartzosas, de cor clara, granulometria fina, bem selecionados e com estratificações bem desenvolvidas. As areias eólicas da cobertura apresentam uma coloração avermelhada e um aspecto maciço.

O sistema Laguna-Barreira IV se estende de forma contínua ao longo de toda a linha de costa. Por ser o sistema mais recente, de idade holocênica, preservou uma maior complexidade de subsistemas deposicionais.

A Barreira IV instalou-se no final da última transgressão pós-glacial, há cerca de 5-6 ka (Villwock & Tomazelli, 1998). Ela é constituída essencialmente por areias praias e eólicas provenientes da erosão da Barreira III e de sedimentos disponíveis na plataforma continental interna. As areias possuem composição quartzosa, granulação fina a muito fina (Martins, 1967; Villwock, 1972) e, em certos locais, apresentam expressivas concentrações de minerais pesados (Vilwock et al., 1979; Munaro, 1994; Dillenburg et al., 2004).

A planície costeira é dominada por um regime bimodal de vento de alta energia. Os ventos predominantes são de nordeste (NE) e são mais ativos nos meses de primavera e verão. Os ventos secundários de oeste e sudoeste (W-SW) se tornam mais importantes nos meses de outono e inverno (Calliari et al., 1998; Tomazelli et al., 2000; Motta, 1969).

A costa do RS pode ser classificada como uma costa dominada por ondas (Calliari et al., 1998; Tomazelli & Villwock, 1992), provindas predominantemente de Sudeste e com regimes de micromaré. De acordo com Motta (1969), a ondulação ("swell") e as vagas ("sea") incidentes que entram em águas intermediárias são respectivamente de sudeste e leste-nordeste. A altura significativa de onda é de 1,5 m com períodos de 9 segundos, entretanto, ondas bem maiores acompanham as tempestades e as alturas em águas profundas do quadrante Sul ultrapassam frequentemente os 3,5 m durante os meses de inverno. A altura de onda máxima é de 7 metros e possui período de retorno de 30 anos.

A maré astronômica, predominantemente semidiurna, é insignificante, sendo a média diária anual de 0,47 m. Porém, elevações na ordem de 1,5 m acima da maré prevista já foram observadas por Calliari et al., (1998) e Saraiva et al., (2003) durante eventos de maré meteorológica.

O clima no RS é temperado subtropical com chuvas bem distribuídas ao longo do ano, sendo que os índices de precipitação variam entre 1200 mm e 2500 mm no estado (Rio Grande do Sul, 2002). A penetração de sistemas frontais de latitude média são os principais responsáveis pela maior parte da precipitação ao longo do ano (Nobre et al., 1986). Segundo Reboita (2001), a precipitação não apresenta uma sazonalidade bem definida. A causa desta variação pode estar associada a fenômenos que alteram o clima, tais como, a ocorrência do El Niño, que aumenta a precipitação no sul do Brasil. Por outro lado, a evaporação apresenta uma maior homogeneidade sazonal sendo alta durante os meses de verão e baixa durante o inverno.

### 3.1. *Lagoa dos Patos*

A Lagoa dos Patos (Figura 6) é um dos elementos fisiográficos mais marcantes na planície costeira do Rio Grande do Sul. Consiste em uma laguna de captação da

rede de drenagem da bacia do sudeste do RS e de nordeste da república do Uruguai, tendo como principal tributário o complexo Guaíba, situado ao norte do corpo lagunar. A área total da bacia de drenagem alcança 180.000 km<sup>2</sup>, cujas águas escoam para o oceano Atlântico através do canal de acesso em Rio Grande (Pereira et al., 2009).

Laguna é definida por Phleger (1981) como um corpo de água salobra ou salgada que foi represada por uma barreira arenosa, mas que ainda mantém comunicação com o mar por intermédio de um ou mais canais.

A Lagoa dos Patos está localizada entre 30°S e 32°S de latitude e 50°W e 52°W de longitude. A mesma é conectada com o oceano através de um canal de 22 km de extensão, 2 km de largura e 12 metros de profundidade (Castelão & Möller, 2003).

Toldo Jr. (1994) descreve a Lagoa dos Patos como um corpo d'água costeiro extenso (10000 km<sup>2</sup>), raso (profundidade média de 6 m) e com largura variando entre 10 e 60 km. O comprimento total chega a 240 km, sendo que possui aproximadamente 180 km entre os pontais de Itapuã e da Feitoria, correspondendo ao sistema lagunar, e aproximadamente 60 km de comprimento entre o pontal da Feitoria e o canal de Rio Grande, correspondendo ao sistema estuarino.

Delaney (1965) dividiu geomorfologicamente a Lagoa dos Patos em três regiões: a região estuarina, situada entre a desembocadura da lagoa e a Ponta da Feitoria; a região central, formada pela área entre a Ponta da Feitoria e a entrada da Lagoa do Casamento; e a região superior, formada pela Lagoa do Casamento e pela área do lago Guaíba.

Os sedimentos ao longo do lado oeste da laguna são pobremente selecionados com tamanhos entre areia fina e cascalho, enquanto que na margem leste da Lagoa dos Patos apresentam tamanho predominantemente fino e muito bem selecionado (Martins et al., 1989).

Barboza et al., (2006) a partir da análise de um testemunho na margem leste da Lagoa, exibido na figura 9, dividiram os sedimentos em três fases evolucionárias: a primeira é uma camada de areias eólicas vegetadas e ricas em ferro da barreira pleistocênica, retrabalhada por ondas (criando uma superfície de ravinamento); a segunda camada é caracterizada por areias cinzas com baixo conteúdo orgânico, contendo conchas de *Erodona mactroides* na forma de uma frente de plataforma holocênica; a terceira camada são areias amareladas produzida pelo transporte de sedimentos offshore (Holoceno).

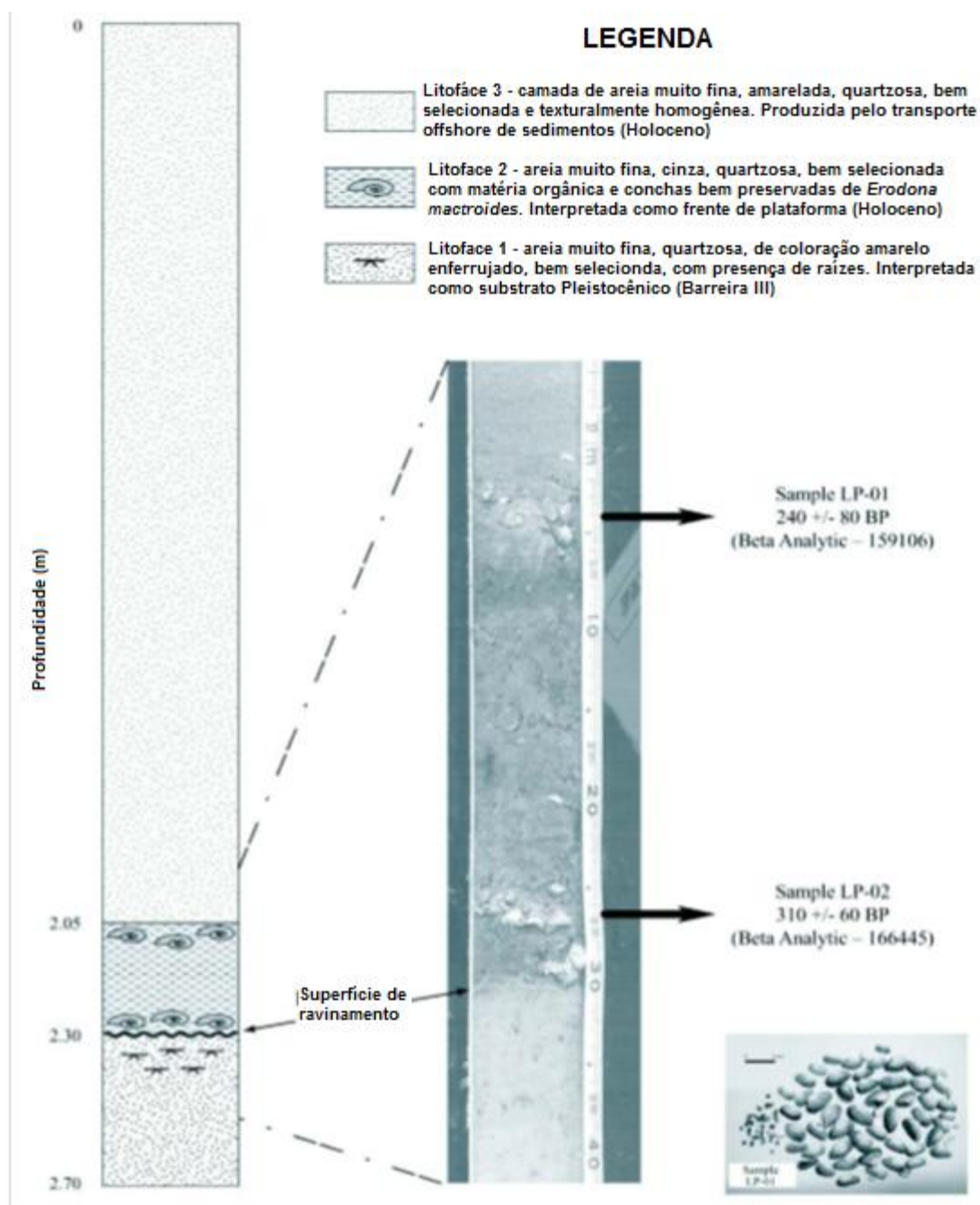


Figura 9: Testemunho com identificação de litofaces e nível de conchas. Adaptado de: Barboza et al., (2006).

A ação do vento (local e remota) é o principal fator de controle da circulação na região. A ação remota do vento causa elevação ou abaixamento no nível da costa, por transporte de Ekman, enquanto o efeito local causa desníveis entre as extremidades da laguna. A combinação do efeito local e remoto se manifesta na produção de desníveis entre a zona costeira e a desembocadura da lagoa favorecendo a descarga fluvial ou a introdução de águas oceânicas (Möller Jr. et al., 2001).

Ventos de NE contribuem para a descarga da lagoa, enquanto ventos do quadrante sul, principalmente SW, produzem efeito contrário, promovendo a entrada de água salgada (Möller Jr. et al., 2001).

Marques & Möller (2008) verificaram que a descarga fluvial no estuário explica mais de 80% da variabilidade dos níveis de água na porção lagunar da Lagoa dos Patos. Portanto, em escalas temporais maiores que um ano, a descarga fluvial pode ser considerada como forçante principal para o controle de processos residuais desta região. De forma que as forçantes que controlam o padrão da variabilidade da descarga serão responsáveis pela manutenção deste ambiente em longas escalas de tempo.

Em suas margens ocorrem diversos esporões arenosos, projetando-se para o interior da lagoa por distâncias aproximadas de 5 a 25 km e com altura média de 1 metro. Segundo Toldo Jr (1994) cada pontal cresce em uma direção distinta, porém se desenvolvem sobre uma superfície submersa rasa de -1m.

Na lagoa o crescimento e propagação da energia de onda é limitada pela baixa profundidade das águas e, principalmente, pelas características incomuns do *fetch* da lagoa, onde os pontais arenosos garantem importante limitação no crescimento da onda, porém, sob condições de ventos fortes, velocidades de vento de 14 m/s ou mais produzem tempestades na lagoa com altura significativa de 1 m e período de 4 s (Toldo Jr et al., 2006). Dados medidos por ondógrafo instalado nas proximidades de São Lourenço do Sul indicam a incidência de ondas com até 1,7 metros no interior da Lagoa dos Patos<sup>2</sup>.

Devido aos ventos de NE prevalecerem no verão e primavera, a direção de ondas dominantes no lado ocidental da laguna é NE e ENE, com média das alturas significativas das ondas entre 0,5 e 0,7 m e períodos entre 2,7 e 3,3 s. No lado oriental da laguna os ventos prevalecentes são de WNW e WSW, durante o inverno e outono, os ventos produzem as maiores alturas máximas na laguna com valores de 1,6 m e período de 4,8 s, enquanto a altura significativa das ondas ficam entre 0,4 e 0,8 m e períodos entre 2,4 e 3,4 s (Baitelli et al., 2009).

### 3.2. Guaíba

Localizado na Bacia hidrográfica de mesmo nome (84763,5 Km<sup>2</sup>), o Guaíba (Figura 10) apresenta 496 km<sup>2</sup> de superfície espalhados por 50 km de extensão, 19 km de largura máxima e 4 m acima do nível do mar. A profundidade média é de 2 m, atingindo o máximo próximo a Ilha do Junco, em Itapuã com 48 m. Outra característica da morfologia do Guaíba é a existência de um estreito canal de navegação com profundidades entre 4 e 8 m (DNAEE, 1983).

O canal principal que atravessa o Guaíba desaparece no leito da Lagoa dos Patos por soterramento (a deposição de sedimentos preencheu o canal cobrindo-o com

---

<sup>2</sup> Ver em REDE ONDAS: <http://redeondas.herokuapp.com/dados/1-rio-grande>



uma camada de lama de mais de 6 m de espessura em um processo contínuo de sedimentação registrado nos últimos milhares de anos). No entanto, ao longo de todo este tempo, o Guaíba, com o vigor de seus escoamentos, restringiu a deposição da lama, preservando a forma do canal principal (Toldo Jr. & Almeida 2009).

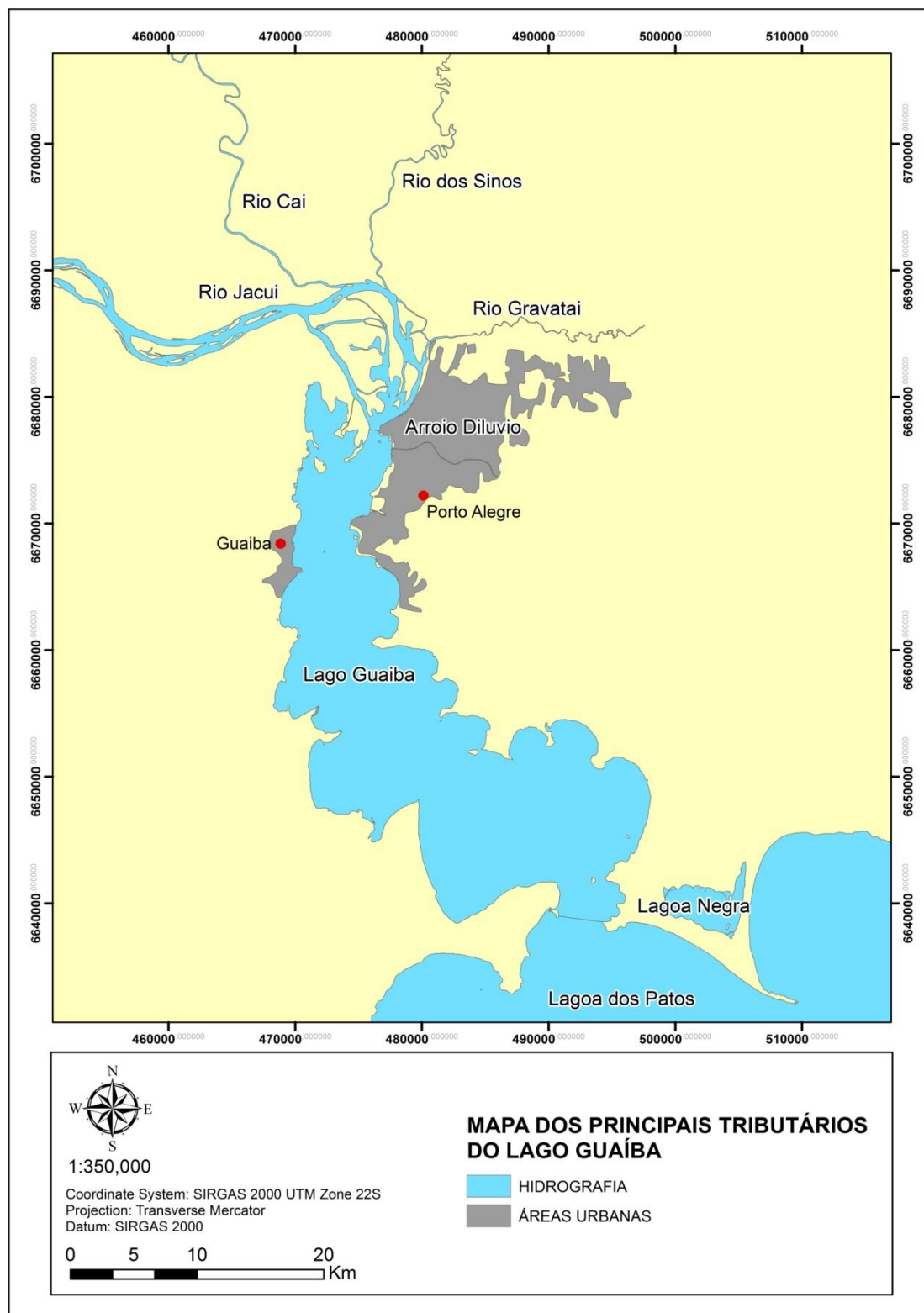


Figura 10: Mapa de localização do Lago Guaíba no Rio Grande do Sul. Fonte: Nicolodi et al., (2010)

O Guaíba é definido por Menegat et al., (1999) como um lago devido a cinco fatores. Primeiro, os rios que desembocam nele formam um delta, este tipo de depósito sedimentar ocorre quando um volume de água confinado por canais encontra um grande corpo de água; segundo: cerca de 85% de suas águas possuem alto tempo de residência; terceiro: o escoamento da água é bidimensional, formando áreas com velocidades diferenciadas, típicas de um lago; quarto: os depósitos sedimentares das margens possuem geometria e características de sistema lacustre e por fim, a vegetação da margem é de mata de restinga, identificadoras de cordões arenosos lacustres ou oceânicos.

Lago é definido por Tomazelli & Villwock (1991) como lagoas costeiras que não possuem conexão direta com o mar e que apresentam características de água doce.

Os sedimentos das Terras Altas são transportados para o Guaíba, principalmente através dos rios Jacuí, Sinos, Taquari e Gravataí. O regime fluvial dos tributários perde competência como agente transportador ao ingressar na ampla bacia deposicional do Guaíba, sendo que os sedimentos mais grosseiros são ali retidos, dando origem ao delta do Jacuí, enquanto os sedimentos finos ingressam no lago como plumas de material em suspensão (Nicolodi, 2007).

O regime hidrodinâmico do sistema lagunar, no qual se insere o Guaíba, é complexo, tanto na época das cheias como na época de estiagem. As relações de causa e efeito dos diversos fatores que intervêm no escoamento do Guaíba, em especial, a forte influência da ação dos ventos, mostram que o lago não é só um canal de extensão dos seus tributários, mas um tipo de reservatório, intimamente ligado à Lagoa dos Patos (Nicolodi et al., 2010).

A variação de nível (relacionadas ao escoamento e represamento ou inversão do fluxo) é a principal força para a geração de correntes no Guaíba. As oscilações diárias no nível são causadas pelas variações na velocidade do vento e apresentam características relativamente regulares, sendo que em períodos normais, ventos de aproximadamente 7m/s podem produzir oscilações superiores a 50 cm (Nicolodi, 2007). As ondas acompanham os padrões de direção e intensidade do vento, atingindo os valores máximos aproximadamente entre 1 e 2 horas após os picos de velocidade dos mesmos (Nicolodi, 2007).

Pode-se dizer que as ondas incidentes no Guaíba têm potencial para gerar turbulência junto ao fundo em diferentes situações. Entretanto, a profundidade máxima não excede a 1,9 m, para ventos do quadrante sul.

No Guaíba, os escoamentos acompanham os gradientes dos terrenos submersos, numa direção preferencial para sudeste e com velocidades registradas entre 0.2 e 0.3 m/s, durante todo o ano. A vazão média anual dos rios afluentes é de 1483 m<sup>3</sup>/s e o tempo de residência é de dez dias (Toldo Jr. & Almeida, 2009).

Segundo Delaney (1965), as praias que ocorrem na região do Guaíba têm uma composição quartzo-feldspática, resultado da influência do complexo cristalino e das formações plio-pleistocênicas e holocênicas, sendo que o material fino (silte e argila) é originado da decomposição dos dois grupos de rochas, por intemperismo físico e químico.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

As etapas metodológicas utilizadas na pesquisa estão representadas no organograma exposto na Figura 11 abaixo.

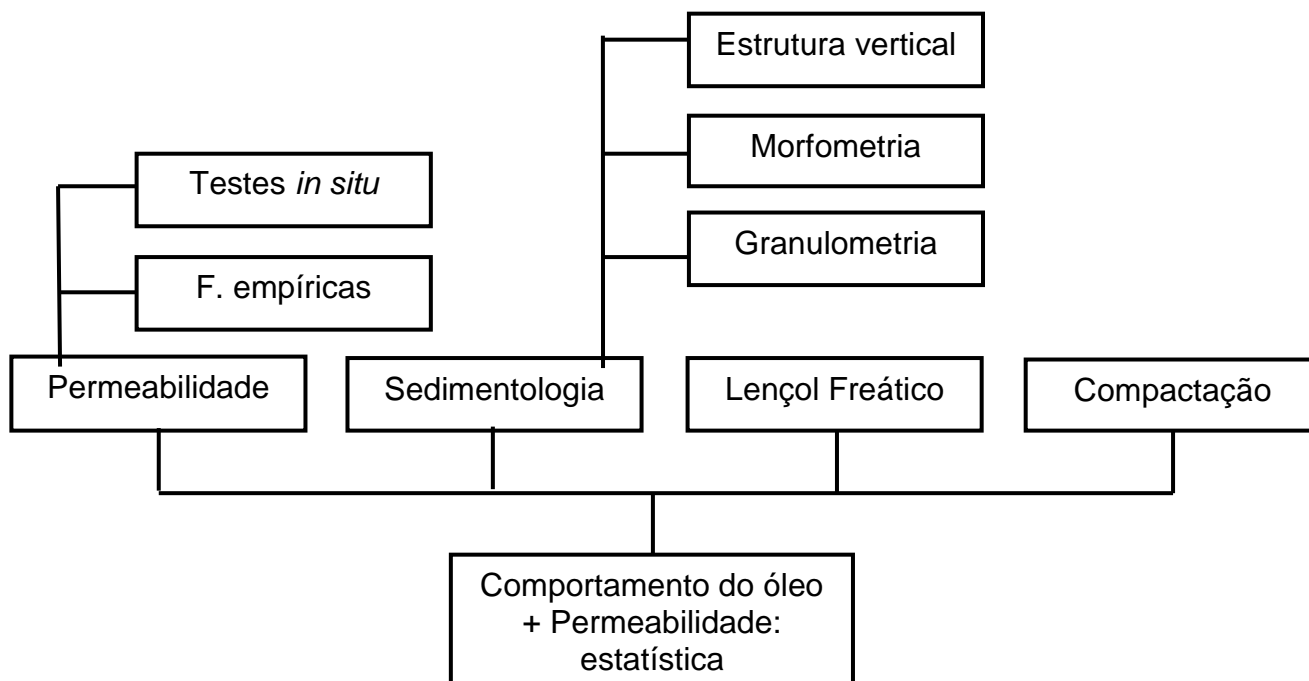


Figura 11: Organograma estrutural das etapas metodológicas empregadas no trabalho

Os ensaios de permeabilidade, compactação e lençol freático foram realizados durante uma saída de campo piloto, realizada no Cassino, para capacitação da equipe envolvida. Em junho de 2015 foi realizada uma campanha de campo (Figura 12) para realização dos testes e coletas de sedimento para cada praia. A metodologia de cada teste será descrita a seguir.



Figura 12: Campanha de campo para realização de testes de permeabilidade e coleta de dados.

## 4.1. Permeabilidade

### 4.1.1. Teste *in situ*

Os testes de permeabilidade foram realizados com o auxílio do infiltrômetro modificado de Philip, conhecido como MPD. O MPD é um infiltrômetro de decaimento de nível constituído por um cilindro transparente (constituído por vidro, plástico ou acrílico) de 10 cm de diâmetro com as duas extremidades abertas e por uma base de aço de 5 cm. Uma fita métrica é acoplada na parte externa do equipamento, conforme Figura 13.



Figura 13: Permeômetro Modificado de Philip (MPD)

As vantagens deste método, de acordo com Asleson et al., (2009) incluem: baixo preço, fácil manuseio, transporte fácil, pequeno volume de fluido necessário para a realização do ensaio e preservação da infiltração superficial.

Por ser um permeômetro de decaimento de fluido, o princípio de funcionamento do equipamento baseia-se nas medições da variação de altura da coluna do fluido ao longo do tempo.

#### 4.1.2. Teoria do MPD

O modelo matemático do MPD (Figura 14) é uma modificação do permeômetro de furo de Philip (Philip, 1993). O modelo, de acordo com Ahmed et al., (2011a) possui algumas considerações, incluindo: sedimentos homogêneos e isotrópicos; frente de umedecimento Green-Ampt nítida; frente de umedecimento com geometria esférica pela subtração da componente gravitacional do fluxo.

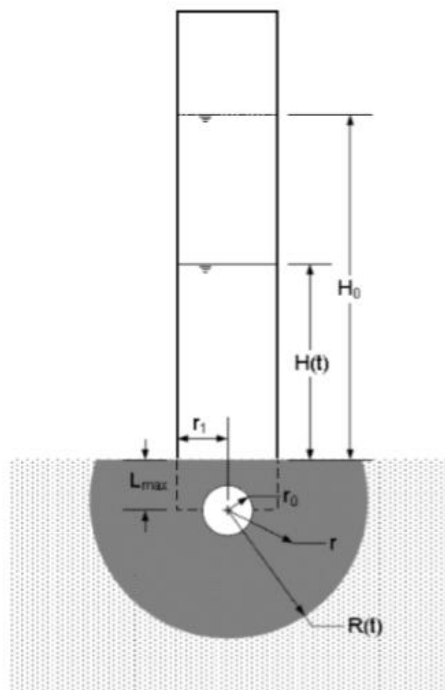


Figura 14: Parâmetros importantes do MPD. Onde  $H_0$  é a altura inicial da água na coluna;  $H(t)$  altura da água no tempo  $t$ ;  $L_{max}$  é a profundidade de inserção do equipamento no solo;  $r_1$  é o raio do cilindro;  $R(t)$  é o raio da frente de umedecimento no tempo  $t$ .

A equação para a infiltração cumulativa é exibida na Equação 2:

Equação 2: Infiltração cumulativa. Fonte: Ahmed et al., (2011a)

$$i(t) = \frac{\pi}{3} (\theta_f - \theta_i) (2R(t)^3 + 3R(t)^2 L_{max} - L_{max}^3 - 4r_0^3)$$

Onde  $\theta_f$  e  $\theta_i$  são o percentual de umidade final e inicial do solo, medidos a partir da diferença de peso entre o sedimento úmido e seco antes e após o teste. Seguindo a mesma análise feita por Philip (1993), a queda de pressão-capilaridade ( $\Delta P(t)$ ) da fonte esférica até a frente de umedecimento se torna (Equação 3):

Equação 3: Equação para queda potencial de pressão de capilaridade. Fonte: Nestingen (2007).

$$\Delta P(t) = \frac{\pi^2}{8} \left\{ (\theta_f - \theta_i) \frac{[R(t)]^2 + [R(t)]L_{max}}{K_{sat}} \frac{dR}{dt} - 2r_0^2 \right\} \times \frac{\ln \left[ \frac{R(t)[r_0 + L_{max}]}{r_0[R(t) + L_{max}]} \right]}{L_{max}}$$

$\Delta P(t)$  usando a Lei de Darcy, segundo Nestingen (2007) seria:

Equação 4: Equação para queda potencial de pressão de capilaridade usando a Lei de Darcy (Darcy, 1856)

$$\Delta P(t) = C - H(t) - L_{max} + \frac{L_{max}}{K_{sat}} \frac{dH}{dt}$$

Onde C (Equação 5) é a sucção da frente de umedecimento para o solo não saturado e é calculada por:

Equação 5: Equação para cálculo da sucção na frente de umedecimento. Fonte: Nestingen (2007).

$$C = \int_{h=h(\theta_0)}^{h=0} K(h)dh$$

A partir das equações 3 e 4 obtêm-se as Equações 6 e 7:

Equação 6: Equação usada para cálculo da condutividade hidráulica a partir da diferença de altura. Fonte: Ahmed *et.al* (2011a)

$$dH = \frac{K_{sat}}{L_{max}} \left[ \frac{\pi^2}{8} \left\{ \Delta\theta \left( \frac{R(t)^2 + R(t)L_{max}}{\bar{K}_{sat}} \frac{dR}{dt} \right) - 2r_0^2 \right\} \frac{\ln \left\{ \frac{R(t)(r_0 + L_{max})}{r_0(R(t) + L_{max})} \right\}}{L_{max}} - C + H + L_{max} \right] dt$$

Equação 7: Equação usada para cálculo da condutividade hidráulica a partir da diferença de tempo. Fonte: Ahmed *et.al* (2011a)

$$dt = \frac{\frac{\pi^2}{8} (\Delta\theta) \frac{R(t)^2 + R(t)L_{max}}{K_{sat}L_{max}} \ln \left\{ \frac{R(t)(r_0 + L_{max})}{r_0(R(t) + L_{max})} \right\} dR - \frac{L_{max}}{\bar{K}_{sat}} dH}{C - H(t) - L_{max} + \frac{\pi^2}{4} \frac{r_0^2}{L_{max}} \ln \left\{ \frac{R(t)(r_0 + L_{max})}{r_0(R(t) + L_{max})} \right\}}$$

Para maior acurácia na computação da condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) e da sucção do solo  $C$ , os pontos médios entre dois dados consecutivos de altura e tempo observados são interpolados usando aproximação *cubic spline*. A Equação 6 e a diferença interpolada do ponto de altura médio foram usadas para determinar os valores de  $K_{sat}$  e  $C$ , assim como a Equação 7 e a diferença interpolada do ponto de tempo médio. A solução é dada minimizando a raiz quadrada média (rms) da diferença entre a altura interpolada e a altura prevista ( $dH$ ) e entre o tempo interpolado e o previsto ( $dt$ ), ajustando os valores de  $K_{sat}$  e de  $C$ .

A instalação do MPD foi realizada na face da praia das praias de estudo. Foram realizados seis testes por praia, em dois perfis perpendiculares, nomeados de 1 e 2.

O ponto A está localizado próximo à linha d'água, o ponto C está localizado sobre a berma e o ponto B no intermédio, conforme Figura 15. Ressalta-se que os ensaios foram levados a cabo com a autorização do órgão ambiental competente, sendo que a autorização de número 127/2015-DL está disponível no Anexo 1.

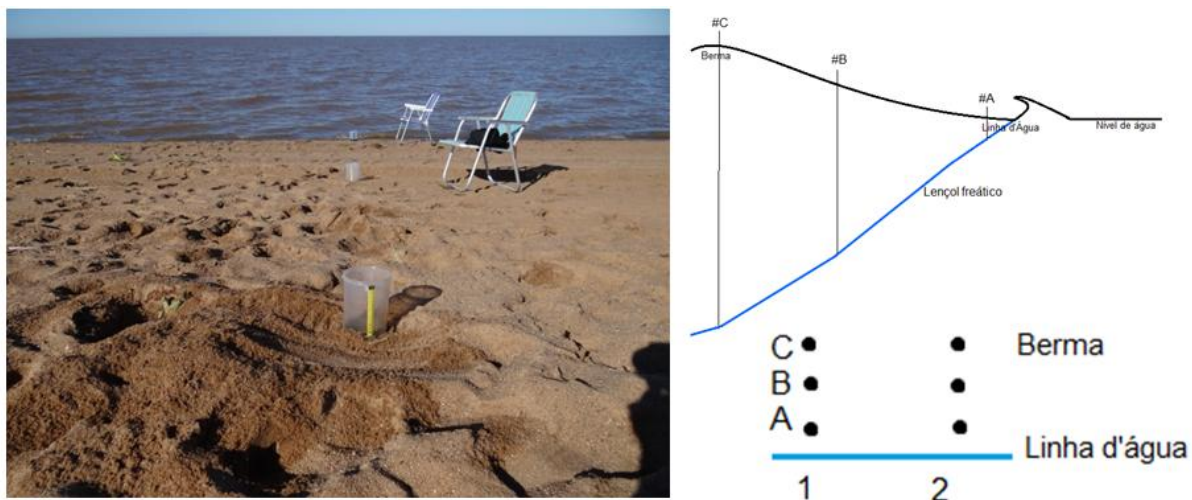


Figura 15: Posição dos pontos de instalação do MPD. Foram realizados 2 perfis na face de praia. Em cada perfil foram realizados três pontos nomeados de A, B e C. O ponto A foi denominado Ponto linha d'água; o B de Ponto intermediário; e o C Ponto Berma.

Os ensaios usaram como fluido percolante, petróleo cru, com grau API 33,54, cedido pela Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP), cuja ficha técnica encontra-se no Anexo 2. Em cada teste foram colocados, aproximadamente, 750 ml de petróleo. Após colocar o petróleo no tubo, foram realizadas as leituras de tempo e altura (foi anotado o tempo necessário para que o fluido desça 1 cm, 1.5 cm, 2 cm, e assim sucessivamente, até que todo o petróleo tenha infiltrado no sedimento), conforme Figura 16.



Figura 16: Em cada ponto foram inseridos 750 ml de petróleo, sendo anotado, em planilha, o tempo necessário para todo o fluido infiltrar no substrato. Foram anotadas, em planilha, as variações de tempo necessárias para cada variação de cinco milímetros no nível.



Após a infiltração total do petróleo, o equipamento foi retirado e foi realizado corte estratigráfico para posterior captura de imagem. A pluma de infiltração (correspondente à gota formada pelo líquido na areia) foi fotografada e medida, conforme Figura 17.



Figura 17: Gota de infiltração. Foram medidas a altura e largura máxima da gota.

Após cada teste, a areia contaminada foi removida e acondicionada em tambores com tampa (Figura 18). Os tambores foram transportados até o Laboratório de Oceanografia Geológica da Universidade Federal do Rio Grande, onde foram armazenados junto à base do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo (PRH-27) para destinação final.



Figura 18: Remoção do sedimento contaminado. O resíduo foi transportado em baldes até tambores, onde foi armazenado e transportado até o Laboratório de Oceanografia Geológica para destinação final

Em laboratório, os dados de altura e tempo foram inseridos em uma macro para cálculo da condutividade hidráulica utilizando a teoria de Philip (1993). A macro foi desenvolvida pelo Laboratório St. Anthony Falls da Universidade de Ciências de Minnesota nos Estados Unidos, e concedida para este trabalho por Ahmed (2011). O

tutorial para criação da macro está disponível em Ahmed *et.al* (2011b) e Nestingen (2007).

Além da teoria de Philip (1993), foi calculada a condutividade hidráulica *in situ* utilizando as equações de Ródio (1965) expressa na Equação 8, Caputo (1988) expressa na Equação 9 e a Lei de Darcy (Darcy, 1856) exibida na equação 10, através de software de planilha eletrônica.

Equação 8: Cálculo para coeficiente de permeabilidade. FONTE: Ródio (1965)

$$K = \frac{\Delta h}{\Delta t} \times \left(\frac{r}{R}\right)^2$$

Onde:  $\Delta h$  = rebaixamento da coluna;  $\Delta t$  = variação de tempo;  $r$  = raio do poço;  $R = ((1 + 4h)^{0,5} - 1)/2$ .

Equação 9: Cálculo de condutividade hidráulica. Fonte: Caputo (1988)

$$k = \left(\frac{r}{4H}\right) \left(\frac{dh}{dt}\right)$$

Onde:  $r$  = raio do tubo;  $H$  = altura do tubo;  $dh$  = distância do tubo percorrida pelo fluido;  $dt$  = intervalo de tempo.

Equação 10: Lei de Darcy (1856)

$$k = \frac{v}{i}$$

Onde  $v$  é a velocidade de percolação (obtida através da vazão dividida pela área) e  $i$  é o gradiente hidráulico, que é uma relação entre a carga que se dissipa na percolação ( $h$ ) e a distância ao longo da qual a carga se dissipa ( $L$ ).

#### 4.1.3. Permeabilidade empírica

Muitas equações vem sendo usadas para estimar a condutividade hidráulica de materiais porosos, que pode ser prevista usando relações empíricas, modelos de capilaridade, modelos estatísticos e teorias de raio hidráulico (Chapuis, 2004).

Estas equações utilizam propriedades simples do solo, como porosidade, curva granulométrica, grau de seleção, forma do grão e empacotamento do sedimento (Chapuis, 2012a; Rosas et al., 2014). As variações entre as fórmulas encontram-se nas propriedades utilizadas e nos fatores de correção aplicados por cada autor.

A fim de comparar os resultados dos modelos empíricos de condutividade hidráulica aos valores encontrados *in situ* foi calculada a condutividade hidráulica a partir de diversas equações. Essa comparação permitiu validar os resultados empíricos e encontrar a equação que melhor retrata a permeabilidade medida nas praias lagunares.

A equação de Hazen (1911) utiliza o diâmetro efetivo do grão e o índice de vazios da amostra para determinar a condutividade hidráulica, conforme Equação 11.

Equação 11: equação estendida de Hazen (1911) para cálculo da condutividade hidráulica. Onde  $d_{10}$  é o diâmetro efetivo,  $e$  é o índice de vazios e  $e_{max}$  é o índice de vazios máximo.

$$k = 1.5d_{10}^2 e^3 (1 + e_{max}) \div [e_{max}^3 (1 + e)]$$

A Equação de Kotyakhov (1949), exibida na Equação 12, calcula a condutividade a partir do diâmetro efetivo e da porosidade do substrato.

Equação 12: Equação de Kotyakhov (1949). Onde  $d_{10}$  é o diâmetro efetivo e  $n$  é a porosidade

$$k = \frac{d_{10}^2 \times n^3}{72 \times (1 - n)^2}$$

A Equação 13 (Amer & Award, 1974) calcula a permeabilidade utilizando o índice de vazios, o coeficiente de uniformidade e o diâmetro efetivo do grão

Equação 13: Relação de Amer & Award (1974). Onde  $e$  é o índice de vazios;  $C_u$  é o coeficiente de uniformidade e  $d_{10}$  é o diâmetro efetivo (mm)

$$k = 35 \left( \frac{e^3}{1 + e} \right) C_u^{0.6} (d_{10})^{2.32}$$

A Equação de NAVFAC (1974) exibida abaixo, utiliza o diâmetro efetivo e o índice de vazios para estimar a permeabilidade do solo.

Equação 14: Equação de NAVFAC (1974). Onde  $d_{10}$  é o diâmetro efetivo e  $e$  é o índice de vazios.

$$k = 10^{1.291e - 0.6435} [d_{10}(mm)]^{10^{0.5504 - 0.2937e}}$$

A Equação 15 (Sahabi et al., 1984) calcula a condutividade hidráulica a partir do coeficiente de uniformidade, do diâmetro efetivo e do índice de vazios.

Equação 15: Equação empírica para cálculo da condutividade hidráulica por Sahabi et al., (1984). Onde  $C_u$  é o coeficiente de uniformidade,  $d_{10}$  é o diâmetro efetivo e  $e$  é o índice de vazios.

$$k = 1.2C_u^{0.735} d_{10}^{0.89} (e^3 / 1 + e)$$

A Equação de Chapius (2004) utiliza o diâmetro efetivo e o índice de vazios para calcular K, conforme Equação 16.

Equação 16: Equação empírica para cálculo da permeabilidade por Chapuis (2004). Onde  $d_{10}$  é o diâmetro efetivo e  $e$  é o índice de vazios.

$$k = 2.4622(d_{10}^2 e^3 / 1 + e)^{0.7825}$$

Todos os parâmetros necessários ( $e$ ,  $C_u$ ,  $d_{10}$ ,  $n$ ,  $e_{max}$ ) foram calculados para cada ponto da área de estudo.

O diâmetro efetivo indica o diâmetro (mm) onde passa apenas 10% da massa da amostra e é determinado a partir da curva de distribuição granulométrica. O coeficiente de uniformidade é definido pela relação entre o diâmetro onde passa 60% dos grãos e o diâmetro efetivo (Das, 2012).

O índice de vazios máximo indica o índice de vazios do solo no estado mais fofo e pode ser calculado utilizando o coeficiente de uniformidade e o fator arredondamento obtido através do arredondamento da amostra. O índice de vazios máximo foi calculado conforme Chapuis(2012b).

O índice de vazios foi determinado através do método do picnômetro e calculado pela equação expressa na Equação 17.

Equação 17: Cálculo do índice de vazios da amostra. Fonte: Das (2012)

$$e = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1$$

A porosidade é definida pela relação entre o volume de vazios e o volume total da amostra (Das, 2012).

## 4.2. Sedimento

Em cada praia da área de estudo foram realizadas coletas de sedimentos para análise granulométrica e morfométrica. A estrutura vertical foi analisada a partir de corte do sedimento.

### 4.2.1. Grnulometria e Morfometria

Para análise granulométrica, as amostras, em laboratório, foram pesadas, secas em estufa e depois pesadas de novo, a fim de determinar o percentual de umidade. Após esse processo, as amostras foram submetidas aos procedimentos de lavagem para retirada do sal, secas em estufa e em seguida, pesadas. A análise granulométrica foi realizada através da peneiragem mecânica utilizando peneiras com intervalo de  $\frac{1}{4}$  de phi de acordo com a escala de Wentworth (1922). Parâmetros estatísticos como tamanho médio, mediana, desvio padrão e assimetria (Folk &

Ward, 1957) foram calculados para cada amostra a partir do pacote rysgran (Gilbert et al., 2014) do software R (R Core Team, 2016).

A morfometria corresponde à descrição da forma do grão e é expressa pela esfericidade e arredondamento (Suguio, 1980). As propriedades foram determinadas utilizando-se lupa binocular, servindo-se da técnica clássica de comparação visual entre grão e cartas de esfericidade e arredondamento. Utilizou-se, respectivamente, das cartas de Rittenhouse (1943), Krumbein (1941) e Bigarella et al., (1955). Os índices de esfericidade e arredondamento foram agrupados em classes e a porcentagem de grãos para cada classe foi obtida (Paisani, 2005).

#### 4.2.2. Estrutura vertical

A análise da estrutura vertical é importante para a visualização dos constituintes em sua estrutura original. A análise foi realizada a partir do corte do sedimento com auxílio de pá geológica, criando-se uma escarpa lisa e reta (Figura 17).

O corte foi fotografado e a distribuição vertical dos sedimentos foi analisada em laboratório. Foram consideradas na análise a composição e espessura das camadas, as estruturas sedimentares e a presença e padrão de laminação de camadas impermeáveis constituídas por sedimentos finos.

### 4.3. *Compactação*

A metodologia dos ensaios de compactação foi realizada de acordo com Vieira et al.,(2004). Os ensaios foram realizados com o uso de um penetrômetro manual com ponteira de aço de cerca de 1 cm de diâmetro e com ponteira cônica para determinar a resistência em areias com leitura direta em kgf/cm<sup>2</sup>, conforme Figura 19. Os dados de resistência à penetração (40 kgf/cm<sup>2</sup>; 50 kgf/cm<sup>2</sup>; RC10) foram anotados em uma planilha.



Figura 19: Ensaio de compactação com uso de penetrômetro manual (foto a esquerda)

#### 4.4. Lençol freático

A profundidade do lençol foi obtida de acordo com a metodologia executada por Alves et al., (2004). Um buraco foi cavado em cada estação de coleta com auxílio de um trado. A distância entre a superfície do sedimento e a superfície do lençol freático foi medida com auxílio de uma vara graduada, conforme Figura 20.



Figura 20: Instalação do trado e medição da profundidade do lençol freático (distância entre a superfície e o lençol) com auxílio de vara graduada.

#### 4.5. Análise

Os resultados de dados sedimentares, lençol freático e de compactação foram comparados aos ensaios de permeabilidade a fim de entender o comportamento do óleo no ambiente. Foram criados gráficos de dispersão comparando cada variável à condutividade hidráulica através do software estatístico R (R Core Team, 2016) para

averiguação das correlações e padrões. Foram geradas retas de regressão lineares e não lineares para cada variável. O coeficiente linear de Pearson foi calculado para cada variável, a fim de verificar a ocorrência de correlação significativa entre os parâmetros e a condutividade hidráulica.

Gráficos de dispersão e coeficiente de Pearson também foram gerados comparando a condutividade hidráulica do MPD com as demais equações empíricas e *in situ*, a fim de verificar qual equação melhor se adequa às condições da lagoa.

## 5. RESULTADOS e DISCUSSÕES

Os resultados obtidos foram divididos em duas seções: sedimentologia e permeabilidade para melhor discussão. Os resultados dos parâmetros (lençol, teor de umidade e permeabilidade) estão resumidos na Tabela 6 e nas Figuras 21 e 22. Os resultados de permeabilidade serão melhor detalhados ao longo da seção.

Tabela 6: Resultados de permeabilidade e parâmetros (profundidade do lençol, teor de umidade e compactação) para cada ponto. As letras A, B e C se referem à posição ocupada pelo ponto na praia, A refere-se a ensaio realizado na linha d'água, B no meio da face da praia e C na berma. As letras N e S em Arambaré referem-se a Norte e Sul e estão relacionadas à posição da praia em relação à desembocadura do Arroio que deságua na região.

	UTM		Permeabilidade				Parâmetros		
	Lat	Long	Prof. (cm)	Larg. (cm)	K (cm/s)	Tempo (H/M/S)	Prof. Lençol (cm)	Teor Umidade (%)	Compact RP50 (cm)
Arambaré N 1A	452823	6580431	9	23	2.40E-02	00:02:17	20	15%	31
Arambaré N 1B	452819	6580432	19	19	1.91E-03	00:07:34	57	10%	43
Arambaré N 1C	452817	6580433	17	20	3.25E-02	00:02:06	93	9%	34
Arambaré N 2A	452225	6580437	14	24	4.03E-02	00:00:58	20	15%	40
Arambaré N 2B	452823	6580438	21	20	2.33E-03	00:09:03	57	10%	37
Arambaré N 2C	452818	6580441	20	19	1.44E-02	00:05:12	93	9%	43
Arambaré S 1A	452254	6578548	16	20.5	2.63E-03	02:07:00	15	13%	19
Arambaré S 1B	452250	6578548	4	38.5	1.02E-03	01:30:11	35	8%	25
Arambaré S 1C	452246	6578549	16	15	2.23E-03	01:30:00	62	9%	28
Arambaré S 2A	452255	6578555	--	--	3.12E-03	02:00:00	15	13%	34
Arambaré S 2B	452252	6578559	15	20	8.54E-03	01:03:25	35	8%	28
Arambaré S 2C	452246	6578557	7	18.5	7.37E-04	02:54:39	62	9%	34
Guaíba 1A	469871	6665664	13	30	2.34E-02	00:05:24	23	10%	47
Guaíba 1B	469869	6665665	23	21	1.37E-02	00:10:13	50	7%	40
Guaíba 1C	469868	6665665	29	19	1.90E-02	00:28:04	63	9%	45
Guaíba 2A	469876	6665662	23	31	1.02E-02	00:04:29	23	10%	34
Guaíba 2B	469874	6665665	19	18	1.42E-02	00:05:45	50	7%	65
Guaíba 2C	469872	6665667	29	18	6.21E-03	00:35:14	63	9%	43
Ipanema 1A	477863	6665859	14	24	4.49E-03	00:06:54	15	10%	28
Ipanema 1B	477865	6665860	18	20	1.32E-02	00:05:44	46	9%	28
Ipanema 1C	477866	6665869	20	30	1.33E-03	00:51:56	52	9%	31
Ipanema 2A	477871	6665853	14	23	1.24E-04	00:07:35	15	10%	27
Ipanema 2B	477873	6665854	18	20	9.22E-03	00:06:08	46	9%	27
Ipanema 2C	477875	6665856	28	20.5	5.65E-03	00:23:42	52	9%	31
Mostardas 1A	503029	6567976	10	40	1.91E-03	02:24:59	10	17%	32
Mostardas 1B	503033	6567971	12	19	1.26E-03	00:26:43	62	12%	31
Mostardas 1C	503034	6567971	13.5	14	3.15E-03	01:59:06	76	9%	31
Mostardas 2A	503025	6567971	5	12	5.15E-06	03:16:43	10	17%	40
Mostardas 2B	503026	6567968	12	19.5	3.58E-03	01:34:25	62	12%	32
Mostardas 2C	503027	6567966	10	16	1.94E-03	01:25:21	76	9%	28



O lençol freático apresentou as maiores profundidades no ponto C e as menores no ponto A. O padrão contrário foi observado para o teor de umidade. Os maiores teores de umidade estão relacionados aos ensaios realizados no ponto A e os menores ao ponto C. A relação indireta entre as variáveis teor de umidade e profundidade do lençol é explicada pela saturação dos interstícios entre os grãos provocada pela umidade. Quanto maior a umidade do solo, maior a saturação dos poros e mais raso é o lençol. Segundo Costi (2008), uma elevação da superfície freática eleva também a zona de acreção capilar do sedimento, aumentando a umidade.

A partir da Figura 21, é possível visualizar o comportamento do lençol para cada praia amostrada. O lençol apresentou profundidades superiores nas praias de Arambaré Norte e Mostardas, e menores profundidades nas praias de Arambaré Sul e Ipanema.

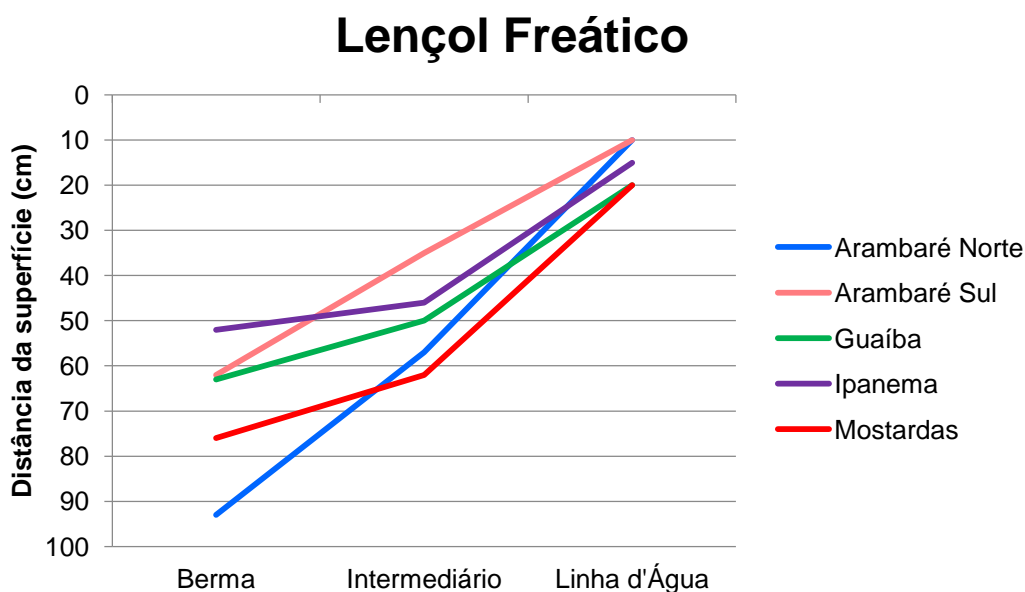


Figura 21: Perfil de profundidade do lençol freático para cada praia estudada. A figura mostra que todos os perfis possuem o mesmo comportamento: maiores profundidades na berma, tornando-se mais rasos à medida em que se aproximam da linha d'água

O comportamento em todos os perfis foi semelhante: maiores profundidades na berma, tornando-se mais raso à medida em que se aproxima da linha d'água. Este mesmo comportamento foi encontrado por outros autores como Alves et al. (2004) e Oliveira & Vinzon (2003): um gradiente de profundidade do lençol freático na direção do pós-praia, sendo a intensidade desse gradiente dependente das características de declividade da praia e da dinâmica da maré.

Cabe ressaltar que os perfis gerados para a profundidade do lençol freático representam um dado pontual e instantâneo. O lençol freático sofre variações em sua profundidade de acordo com variações de nível, umidade, precipitação, dentre outros parâmetros, que provocarão mudanças na morfologia da praia e na percolação de fluidos.

A profundidade de penetração, em cada praia, para uma carga de 50 kg é mostrada na Figura 22. A profundidade de penetração é inversa à compactação. Quanto maior a compactação do substrato, menor a profundidade de penetração do penetrômetro.

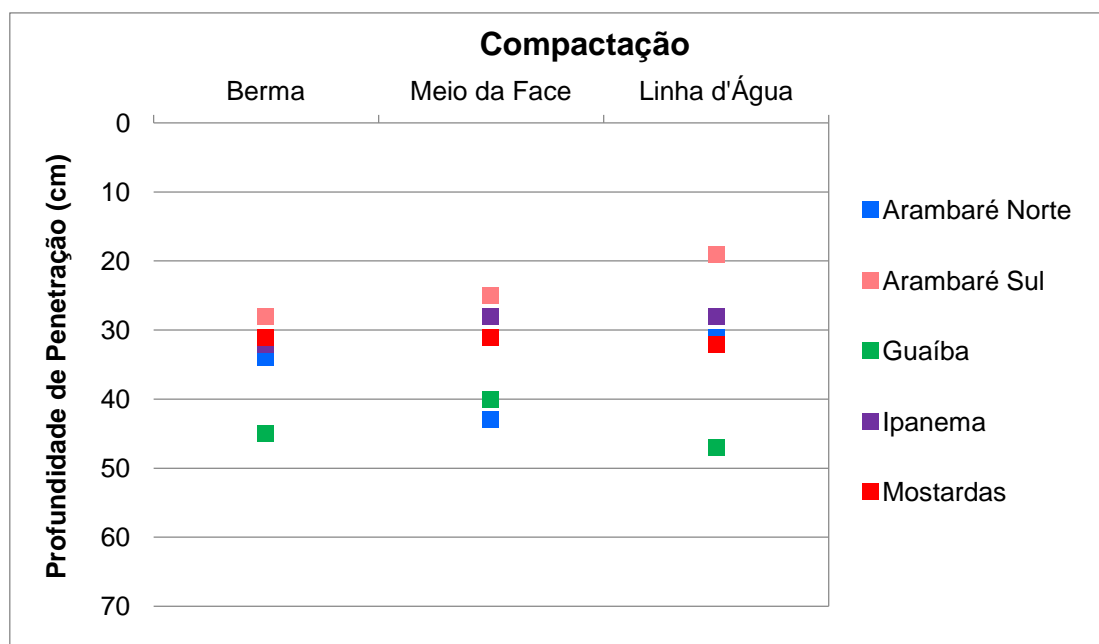


Figura 22: Profundidade de penetração do penetrômetro no substrato por ponto para o perfil 1

De forma geral, os pontos apresentaram baixa compactação, com profundidade de penetração média de 30 cm. As exceções foram causadas por particularidades dos pontos amostrados. Através da Tabela 6 também é possível notar que, os maiores valores de compactação, apresentaram os menores valores de condutividade hidráulica.

O maior valor de compactação encontrado foi no ponto 1A em Arambaré Sul. Nesta praia ocorre a intervenção antrópica através do tráfego de veículos. Nesta localidade, a remoção de detritos praias através do uso de tratores (Figura 23) é uma prática recorrente.



Figura 23: Trator circulando sobre a face da praia de Arambaré, RS (esquerda). Trilhas dos pneus após a passagem do trator.

Esta prática traz diversas consequências para o ambiente. Primeiro, a compactação mecânica da areia reduz o índice de vazios, aumentando a resistência ao deslocamento de líquidos e gases no meio e, conseqüentemente, diminuindo a permeabilidade do local. Segundo, a compactação representa uma barreira para os processos biológicos, já que dificulta as trocas respiratórias, a propagação de raízes e a obtenção de alimentos. Terceiro: modifica o comportamento da praia na escala temporal.

Os resultados obtidos serão discutidos, em detalhe, nas próximas seções.

### 5.1. *Sedimentologia*

Os resultados granulométricos obtidos para os cinco pontos estão resumidos na Tabela 7 e os respectivos histogramas de frequência são exibidos nas Figuras 25, 26 e 27.

O município de Arambaré foi dividido em duas amostras devido às diferenças granulométricas visíveis entre a parte Norte (Figura 24 a) e a parte Sul (Figura 24 b). A parte Norte foi assim denominada por estar posicionada ao norte da desembocadura do arroio Velhaco, enquanto a parte Sul fica ao sul da desembocadura.



Figura 24: Praia de Arambaré. a) Arambaré Norte; b) Arambaré Sul

Tabela 7: Parâmetros granulométricos obtidos para as praias da área de estudo. As siglas presentes na primeira coluna representam a praia e a localização do ponto onde o ensaio foi realizado. AN representa Arambaré Norte, AS Arambaré Sul, G Guaíba, I Ipanema e MO Mostardas. A última letra da sigla representa a posição do ponto, A na linha d'água, B no meio da face da praia e C na berma.

	<b>Média</b>	<b>Classificação</b>	<b>Mediana</b>	<b>Seleção</b>	<b>Classificação</b>	<b>Assimetria</b>	<b>Classificação</b>	<b>Curtose</b>	<b>Classificação</b>	<b>% Cascalho</b>	<b>% Areia</b>	<b>% Lama</b>
<b>ANA</b>	0.23472222	Areia Grossa	-0.0006667	1.170827	Pobrememente selecionado	0.28072617	Positiva	0.9109187	Mesocúrtica	13.4422976	86.5577	0
<b>ANB</b>	0.72555556	Areia Grossa	0.588333333	0.9873283	Moderadamente selecionado	0.18726963	Positiva	0.8749109	Platicúrtica	1.975776	98.02422	0
<b>ANC</b>	0.31916667	Areia Grossa	0.246333333	0.9465694	Moderadamente selecionado	0.1090234	Positiva	1.0438827	Mesocúrtica	8.4160212	91.58398	0
<b>ASA</b>	0.83955556	Areia Grossa	0.664333333	1.4071515	Pobrememente selecionado	0.14153973	Positiva	0.6140434	Muito platicúrtica	7.5405843	92.45942	0
<b>ASB</b>	1.89194444	Areia Média	2.326833333	1.0459596	Pobrememente selecionado	-0.640380	Muito negativa	2.2361929	Muito leptocúrtica	2.720277	97.27972	0
<b>ASC</b>	0.40255556	Areia Grossa	-0.045	1.6984848	Pobrememente selecionado	0.30343535	Muito negativa	0.5370139	Muito platicúrtica	30.4262215	69.57378	0
<b>GA</b>	0.012	Areia Grossa	0.243166667	0.9901351	Moderadamente selecionado	-0.3121124	Muito negativa	0.9252216	Mesocúrtica	19.2162031	80.7838	0
<b>GB</b>	0.49966667	Areia Grossa	0.642166667	0.6746199	Moderadamente bem selecionado	-0.3690961	Muito negativa	1.2079379	Leptocúrtica	5.6277392	94.37226	0
<b>GC</b>	0.74983333	Areia Grossa	0.803666667	0.6715972	Moderadamente bem selecionado	-0.0523549	Aproximadamente e simétrica	1.3081821	Leptocúrtica	0.7666306	99.23337	0
<b>IA</b>	0.06477778	Areia Grossa	0.160833333	1.1839735	Pobrememente selecionado	-0.0774328	Aproximadamente e simétrica	0.6591727	Muito platicúrtica	26.1553533	73.84465	0
<b>IB</b>	0.74772222	Areia Grossa	0.844833333	0.8138813	Moderadamente selecionado	-0.2780106	Negativa	0.9926406	Mesocúrtica	5.7978579	94.20214	0
<b>IC</b>	0.39094444	Areia Grossa	0.582	1.0376831	Pobrememente selecionado	-0.2178142	Negativa	0.82782	Platicúrtica	12.7837252	87.21627	0
<b>MA</b>	2.20438889	Areia Fina	2.288833333	0.2776111	Muito bem selecionado	-0.3828459	Muito negativa	0.8226636	Platicúrtica	0	100	0
<b>MB</b>	2.21388889	Areia Fina	2.292	0.2800101	Muito bem selecionado	-0.2796584	Negativa	0.8081275	Platicúrtica	0	100	0
<b>MC</b>	2.18222222	Areia Fina	2.260333333	0.2611061	Muito bem selecionado	-0.3720222	Muito negativa	0.6351102	Muito platicúrtica	0	100	0

Ponto A: Linha d'água:

As amostras realizadas no ponto A (Figura 25) apresentaram variações pronunciadas entre a margem oeste da Lagoa dos Patos e Lago Guaíba contra a margem leste da Lagoa.

Na margem oeste, os sedimentos são compostos predominantemente por areia grossa com pobre grau de seleção e alto percentual de cascalho. Estas praias apresentam partículas bem distribuídas ao longo da escala phi, sendo caracterizadas como bimodais ou polimodais (Figura 25 A, B, C e D). Estas características se devem à proximidade com o escudo cristalino, que diminuem o retrabalhamento dos sedimentos e a maturidade dos mesmos.

A praia de Mostardas, na margem leste da Lagoa dos Patos, por sua vez, apresenta areias de granulação fina com alto grau de seleção. O histograma (Figura 25 E) apresenta um único comportamento senoidal, sendo classificada como amostra unimodal.

A margem leste da lagoa dos Patos faz parte da restinga que separa a laguna do oceano, sendo constituída pelos mesmos sedimentos que o setor oceânico.

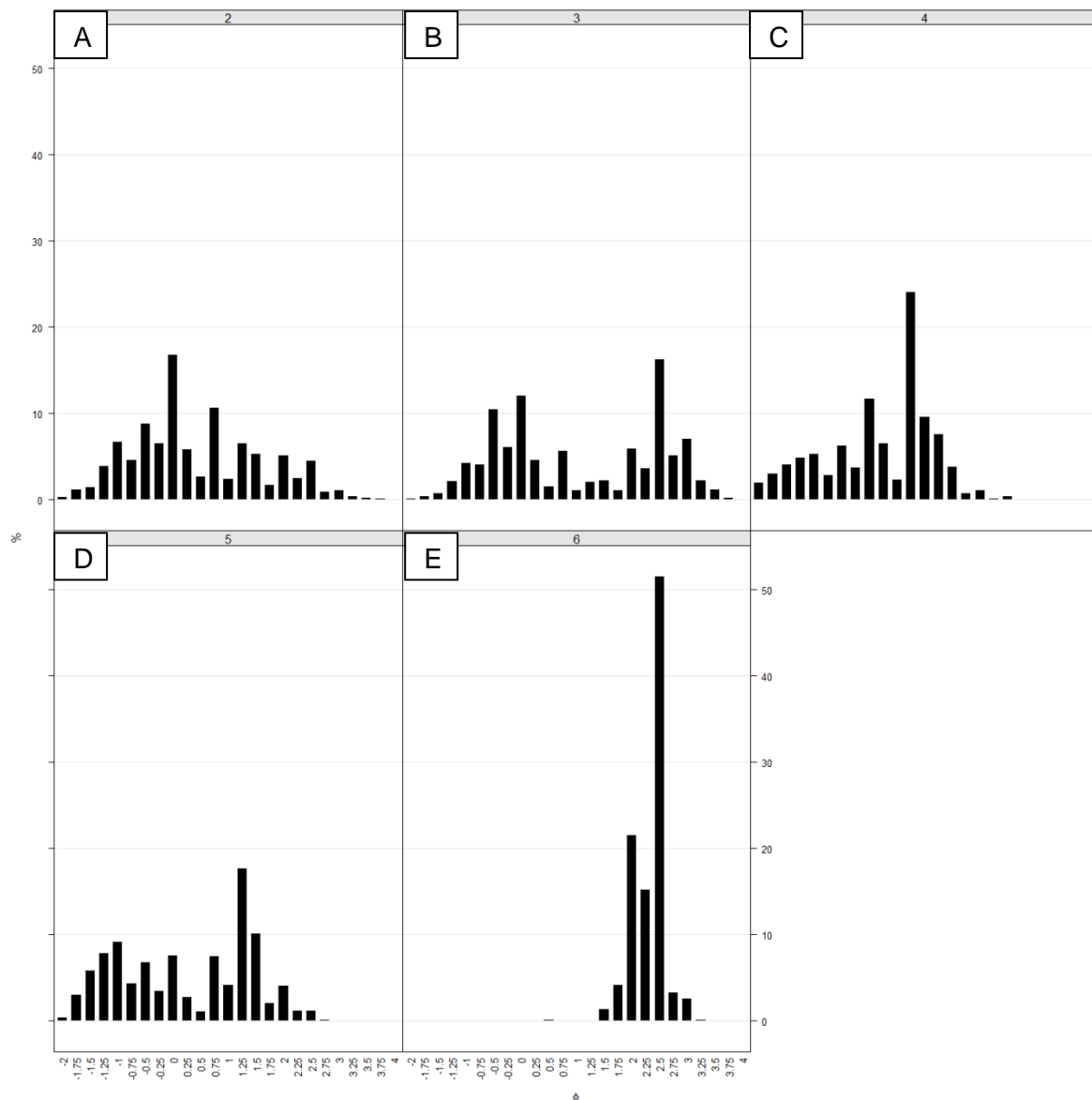


Figura 25: Histogramas de frequência para o ponto A (linha d'água). Os gráficos representam, sequencialmente, (A) Arambaré Norte, (B) Arambaré Sul, (C) Guaíba, (D) Ipanema e (E) Mostardas.

#### Ponto intermediário:

O ponto B (Figura 26) apresentou areias grossas com grau de seleção moderado para as praias de Arambaré Norte, Guaíba e Ipanema (Figura 26 A, C e D). A diferença principal entre os pontos A e o B para estas praias é o percentual de cascalho, que diminuiu drasticamente. A praia de Mostardas manteve as características de areia fina e alto grau de seleção (Figura 26 E).

As diferenças marcantes foram vistas em Arambaré Sul. Neste ponto, a praia é composta predominantemente por areia fina (70%) (Figura 26 B).

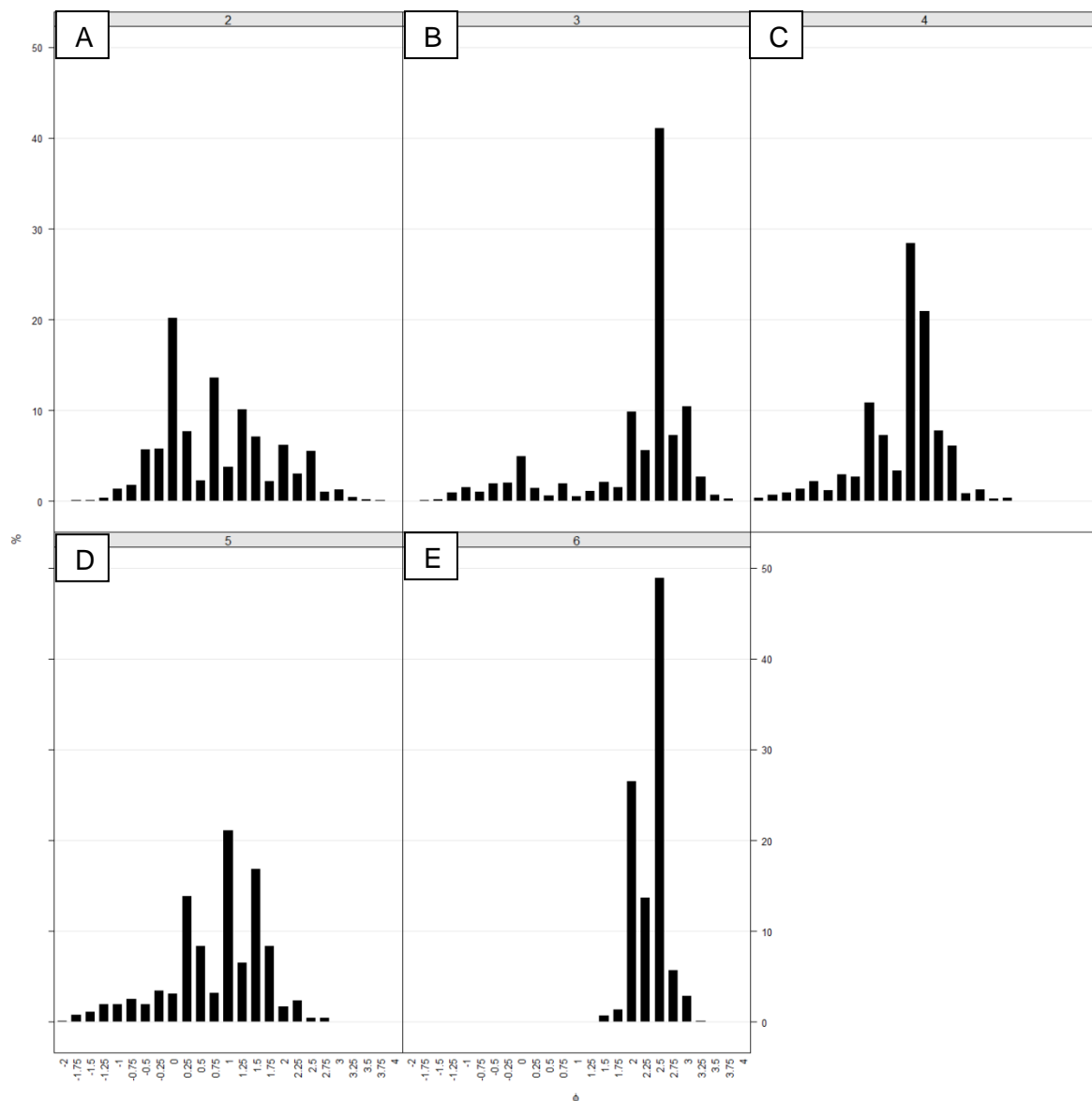


Figura 26: Histogramas de frequência para o ponto B (intermediário). Os gráficos representam, sequencialmente, (A) Arambaré Norte, (B) Arambaré Sul, (C) Guaíba, (D) Ipanema e (E) Mostardas.

#### Ponto Berma:

O ponto C, correspondente à berma (Figura 27), apresentou características semelhantes ao ponto A: areias grossas com moderado a baixo grau de seleção e distribuição polimodal para as praias da margem oeste e Guaíba (Figura 27 A, B, C e D) e areia fina com moderado grau de seleção para Mostardas (Figura 27 E).



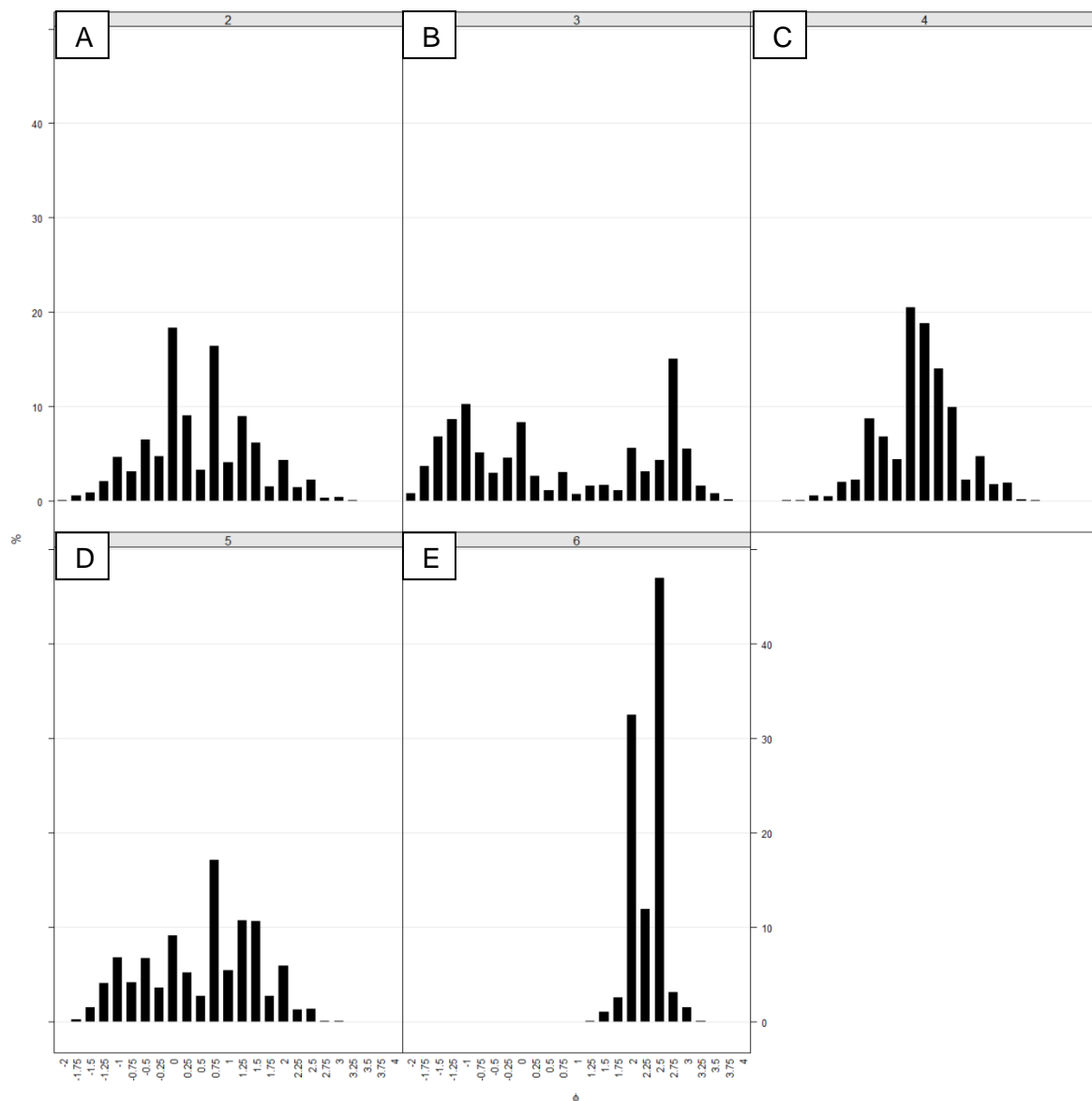


Figura 27: Histogramas de frequência para a berma. Os gráficos representam, sequencialmente, Arambaré Norte (A), Arambaré Sul (B), Guaíba (C), Ipanema (D) e Mostardas (E).

Os histogramas mostram que as praias da margem oeste da Lagoa dos Patos e as praias do Lago Guaíba são tipicamente polimodais, compostas por areias grossas a médias, enquanto a margem leste da laguna possui características semelhantes ao oceano com areias finas e alto grau de seleção.

As curvas de frequência acumulada utilizadas posteriormente para cálculo do diâmetro efetivo são mostradas na Figura 28.

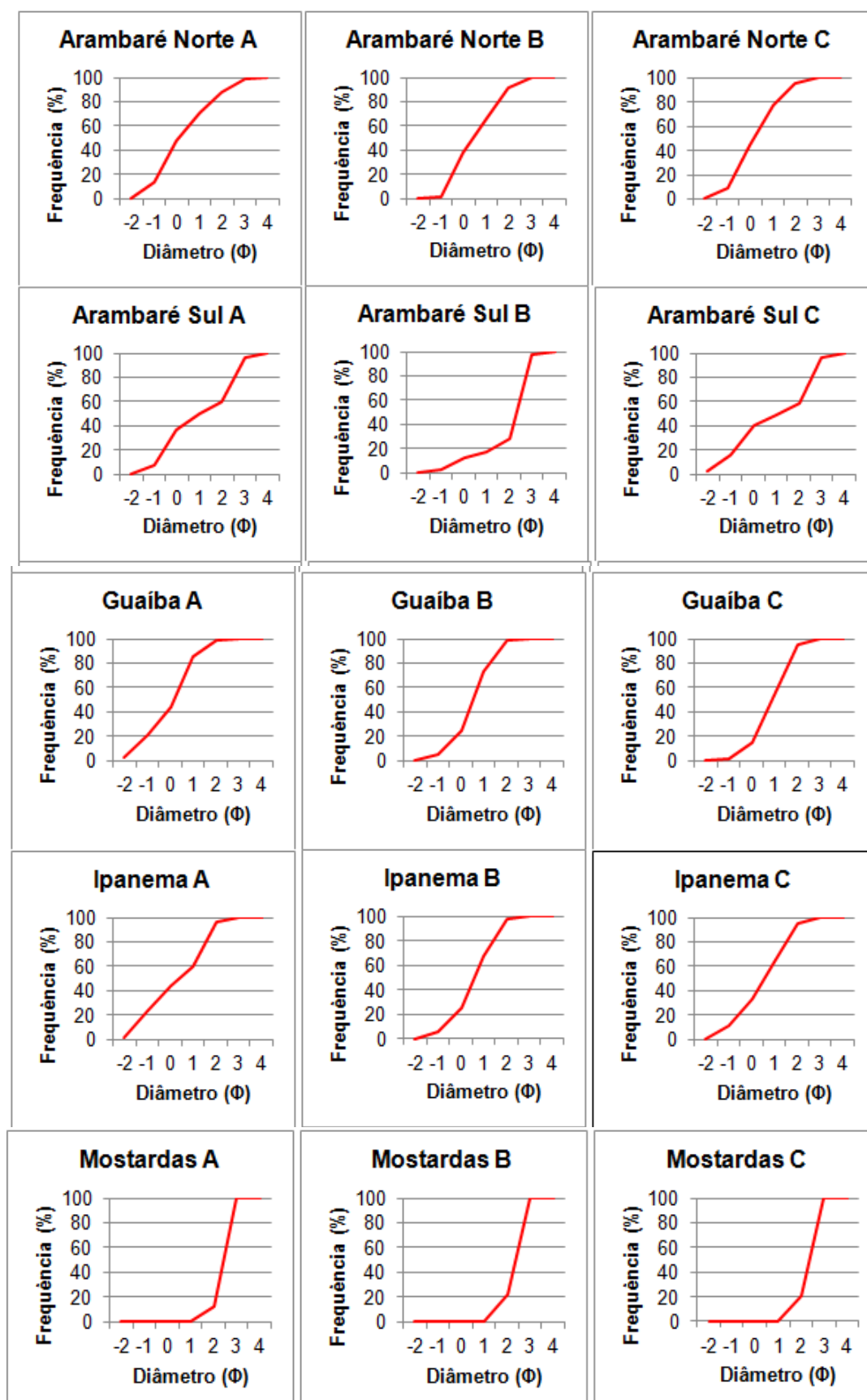


Figura 28: Curvas de frequência acumulada para cada ponto da área de estudo

### 5.1.1. Estrutura Vertical

Em geral, as praias estudadas apresentaram uma coluna de sedimentos homogênea, sem estratificações ou grandes irregularidades (Figura 29), porém, em alguns pontos foram encontrados rochas, restos de construção, vegetação e outras estruturas rígidas, que criam barreiras para o movimento dos fluídos, dificultam a mobilidade dos sedimentos e prejudicam a previsão do comportamento da infiltração na praia (Figura 30). Além disso, algumas praias possuem lâminas de sedimentos finos e grossos intercalados na forma de lentes (Figura 31). Estas lentes ocorrem devido à variação energética do regime ondulatório durante períodos de ventos mais rigorosos ou marés meteorológicas.



Figura 29: Camada de sedimentos homogênea. Sem grandes alterações estruturais ou presença de barreiras vegetais.



Figura 30: Camada de sedimentos heterogênea; A) camada de rocha na profundidade de 30 cm. B) litoface pleistocênica impermeável em 35 cm; C) Bioturbação provocada por animais e restos vegetais em camadas superficiais.

A ocorrência e espessura das lentes não apresentam padrões espaciais definidos devido às variações morfológicas da antepraia, da face da praia e dos esporões

arenosos que provocam a heterogeneidade na distribuição da energia e na deposição dos sedimentos.

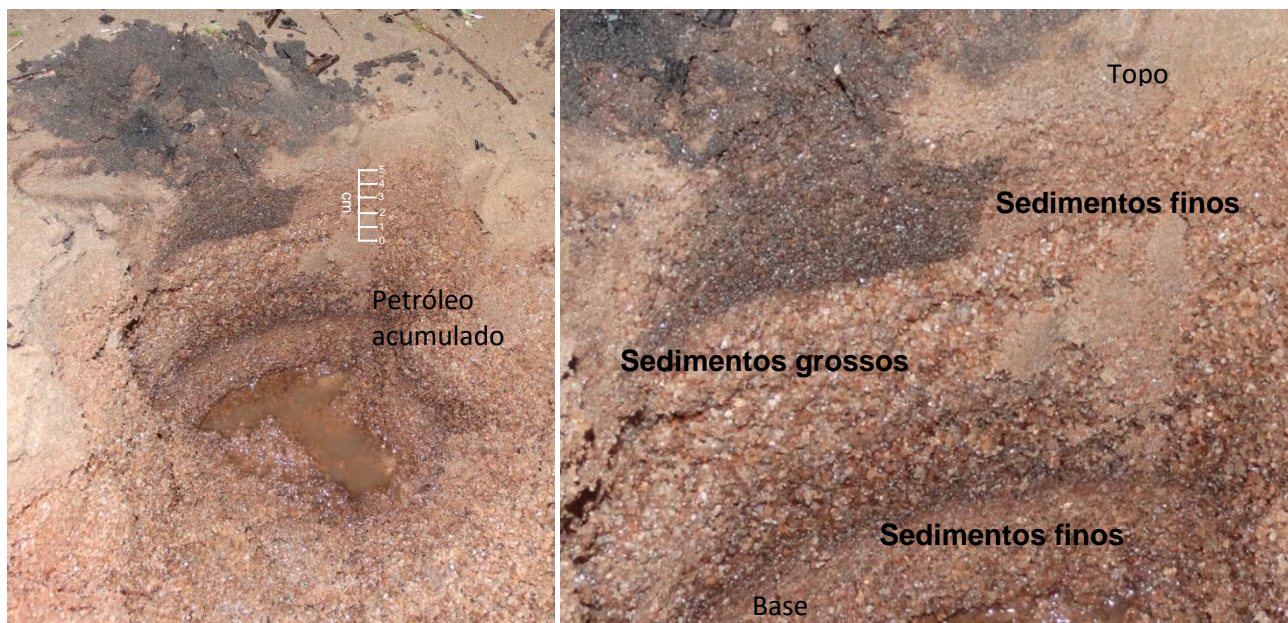


Figura 31: Corte estratigráfico da coluna sedimentar. Coluna heterogênea formada pela presença de camadas de sedimentos finos e grossos intercalados na forma de lentes. A linha vermelha representa a gota de infiltração mostrando o acúmulo irregular do petróleo devido ao escoamento diferenciado provocado pela presença de lentes, detalhadas à direita.

A distribuição vertical heterogênea do pacote sedimentar pode representar uma barreira para percolação do fluido quando houver uma descontinuidade rígida (como uma rocha ou uma camada compacta de sedimentos finos) que promovem a impermeabilização do solo. Porém, quando a descontinuidade for causada por processos biológicos (como escavação por animais ou propagação de raízes), a estrutura heterogênea pode fornecer um caminho preferencial para o escoamento do fluido, potencializando a permeabilidade da área. Segundo Hayes et al. (1993), três mecanismos favoreceram a penetração do óleo nas praias da Arábia Saudita após o derrame na Guerra do Golfo em 1991: a infiltração vertical através da superfície, a presença de buracos de animais escavadores como poliquetas e siris e a presença de *bubble sand* (depósito de areia com porosidade superior a 50% na forma de esponja). De acordo com os autores, as maiores profundidades atingidas pelo óleo foram nos pontos com presença de bioturbação.

Os mesmos dados foram verificados por Demore (2001) ao simular um derrame de óleo em praias do Estuário da Lagoa dos Patos no RS, verificou que a perturbação causada pela propagação de rizosferas de *Spartina alterniflora* e tubos de organismos favorece o incorporamento do óleo no pacote sedimentar na forma de gotículas, mesmo em locais com baixa permeabilidade natural.

### 5.1.2. Arredondamento e Esfericidade

Os resultados de arredondamento e esfericidade são exibidos na Tabela 8. A partir dos resultados é possível a identificação de três grupos de ocorrência: os angulosos / subangulosos, os subangulosos / subarredondados e os arredondados.

O grupo dos grãos arredondados ocorrem na praia lagunar de Mostardas, na margem leste da Lagoa dos Patos. A praia possui grãos com alta esfericidade e bom arredondamento. O grupo dos subangulosos / subarredondados foi encontrado nas praias de Ipanema, Guaíba e Arambaré Norte, nas margens do Guaíba e na margem oeste da laguna. Os grãos nestas três praias apresentam arredondamento intermediário e esfericidade média. A praia de Arambaré Sul apresentou arredondamento baixo e esfericidade média, sendo classificada no grupo de grãos angulosos / subangulosos.

Especialmente, as praias na margem oeste da Lagoa dos Patos e as praias do Lago Guaíba apresentaram grãos com arredondamento variando entre anguloso a subarredondado, enquanto a margem leste da Lagoa apresentou grãos bem arredondados.

As diferenças de arredondamento entre as margens podem ser explicadas geologicamente. A margem leste da Lagoa (correspondente a Mostardas) faz parte da “Restinga da Laguna dos Patos”, que é uma faixa arenosa que constitui a planície costeira (Villwock, 1984), cuja origem está relacionada ao sistema Laguna-Barreira já explicado. A restinga é formada por areias quartzosas, claras e bem selecionadas, dos sistemas III e IV, resultado do retrabalhamento do sedimento durante as variações do nível do mar (Tomazelli et al., 2000; Villwock, 1972).

A margem oeste da Lagoa, no entanto, possui sedimentos oriundos das Terras Altas formadas pelo escudo cristalino e leques aluviais (Figura 7). A proximidade entre a área fonte dos sedimentos e o depósito final diminui o tempo de retrabalhamento dos depósitos, fazendo com que os sedimentos que compõem estas praias possuam baixa maturidade e por isso, grãos angulosos e subangulosos.

Tabela 8: Arredondamento e esfericidade para a área de estudo

	<i>Morfométrica</i>	
	<b>Esfericidade</b>	<b>Arredondamento</b>
Arambaré N 1A	Média	Anguloso / subarredondado
Arambaré N 1B	Média	Anguloso / subarredondado
Arambaré N 1C	Média	Anguloso / subarredondado
Arambaré N 2A	Média	Anguloso / subarredondado
Arambaré N 2B	Média	Anguloso / subarredondado
Arambaré N 2C	Média	Anguloso / subarredondado
Arambaré S 1A	Média	Anguloso / subarredondado
Arambaré S 1B	Média	Subarredondado
Arambaré S 1C	Média	Muito anguloso
Arambaré S 2A	Média	Anguloso / subarredondado
Arambaré S 2B	Média	Subarredondado
Arambaré S 2C	Média	Muito anguloso
Guaíba 1 A	Média	Subanguloso / subarredondado
Guaíba 1B	Média	Subanguloso / subarredondado
Guaíba 1C	Média	Subarredondado
Guaíba 2 A	Média	Subanguloso / subarredondado
Guaíba 2B	Média	Subanguloso / subarredondado
Guaíba 2C	Média	Subarredondado
Ipanema 1 A	Média	Subanguloso / subarredondado
Ipanema 1B	Média	Subarredondado
Ipanema 1C	Média	Subarredondado
Ipanema 2 A	Média	Subanguloso / subarredondado
Ipanema 2B	Média	Subarredondado
Ipanema 2C	Média	Subarredondado
Mostardas 1 A	Alta	Arredondado
Mostardas 1B	Alta	Arredondado
Mostardas 1C	Alta	Arredondado
Mostardas 2 A	Alta	Arredondado
Mostardas 2B	Alta	Arredondado
Mostardas 2C	Alta	Arredondado

## 5.2. *Permeabilidade*

A largura e profundidade da gota, com a respectiva condutividade hidráulica estão expostas na tabela 9. No geral, salvo algumas exceções, os menores valores de infiltração vertical foram encontrados nos ensaios posicionados no ponto A, referente

à linha d'água, enquanto os maiores valores foram encontrados no ponto C, sobre a berma. Estes comportamentos estão bem evidenciados na Figura 32.

Tabela 9: Valores de largura e profundidade da gota de infiltração e condutividade hidráulica para cada ponto

		Gota		Condutividade Hidráulica
		Largura (cm)	Profundidade (cm)	K (cm/s)
Arambaré Norte	1A	23	9	2.40E-02
	1B	19	19	1.91E-03
	1C	20	17	3.25E-02
	2A	24	14	4.03E-02
	2B	20	21	2.33E-03
	2C	19	20	1.44E-02
Arambaré Sul	1A	20.5	16	2.63E-03
	1B	38.5	4	1.02E-03
	1C	15	16	2.23E-03
	2A	---	---	3.12E-03
	2B	20	15	8.54E-03
	2C	18.5	7	7.37E-04
Mostardas	1A	40	10	2.34E-02
	1B	19	12	1.37E-02
	1C	14	13.5	1.90E-02
	2A	12	5	1.02E-02
	2B	19.5	12	1.42E-02
	2C	16	10	6.21E-03
Guaíba	1A	30	13	4.49E-03
	1B	21	23	1.32E-02
	1C	19	29	1.33E-03
	2A	31	23	1.24E-04
	2B	18	19	9.22E-03
	2C	18	29	5.65E-03
Ipanema	1A	24	14	1.91E-03
	1B	20	18	1.26E-03
	1C	30	20	3.15E-03
	2A	23	14	5.15E-06
	2B	20	18	3.58E-03
	2C	20.5	28	1.94E-03

Os baixos valores de infiltração na linha d'água são explicados pela saturação dos poros provocada pela baixa profundidade do lençol freático. Nesta posição, o óleo percola até encontrar a barreira imposta pelo lençol. A partir desta profundidade, o óleo passa a se movimentar lateralmente e, devido a isto, a linha d'água possui os maiores valores de largura de gota.

A profundidade do lençol freático tende a aumentar com o aumento da distância da linha d'água, sendo que no ponto C, correspondente à berma, encontram-se os maiores valores de profundidade do lençol. Nesta posição, a quantidade de poros aumenta, propiciando a percolação do fluido.

Na Figura 32 é exibida a profundidade da gota por cidade e por ponto. Percebe-se que os maiores valores de percolação correspondem aos municípios de Guaíba (29 cm), Ipanema (28) e Arambaré Norte (21). Estas praias são compostas por areias grossas com grau de seleção variando de pobre a moderado. As praias de Mostardas e Arambaré Sul apresentaram os menores valores de infiltração. A baixa profundidade em Mostardas é explicada por suas areias finas e com alto grau de seleção. Em Arambaré Sul a alta compactação dos sedimentos finos diminui a quantidade de poros, prejudicando a percolação.

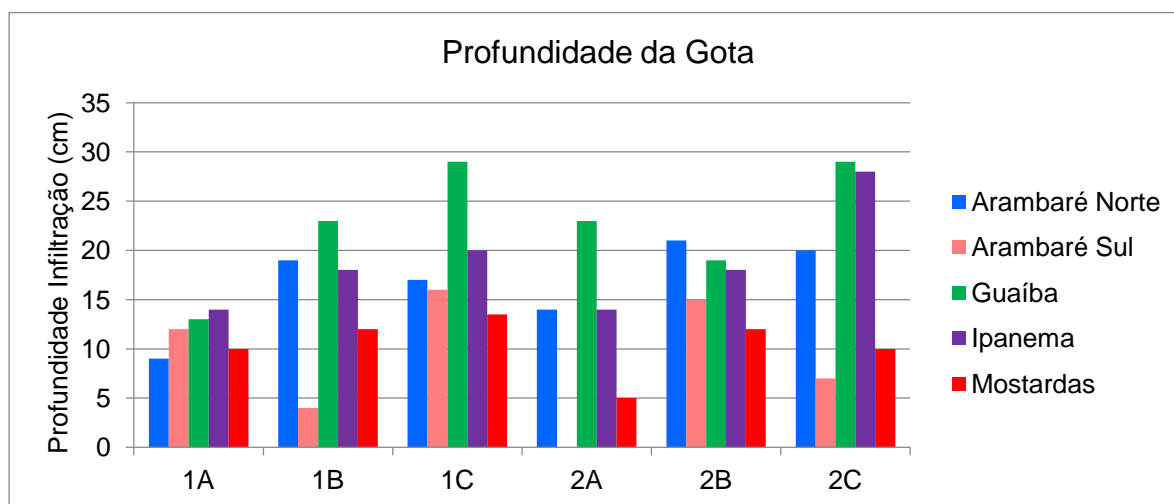


Figura 32: Gráfico com as profundidades da gota (cm) por ponto para cada praia.

A profundidade máxima atingida pelo óleo nos pontos B e C foi limitada pela quantidade de fluido utilizada (750 ml). Em um derrame de óleo, onde a quantidade de contaminante liberado é alta, o óleo irá percolar até a profundidade do lençol freático. Segundo Hayes & Michel (1999) a profundidade de penetração do óleo é limitada pelo volume derramado, pela profundidade do lençol freático e pela presença de camadas impermeáveis (como rochas ou sedimentos finos).

Segundo McLaren (1985), Demore (2001), Oliveira & Vinzon (2003), Gandra (2005), Costi (2008) e CETESB (2007) o lençol freático provoca a imobilização ou restrição espacial do contaminante devido à redução da porosidade ocasionada pela saturação dos interstícios intergranulares.

Porém, apesar de limitar a infiltração vertical, o lençol pode transportar o óleo para o pós-praia, subsuperficialmente, através das oscilações causadas pela maré e das subsequentes mudanças no nível do lençol freático na praia (McLaren, 1985). Na Figura 33 é exibido o transporte de óleo ao longo do perfil pelas variações no nível da água provocadas pela maré.



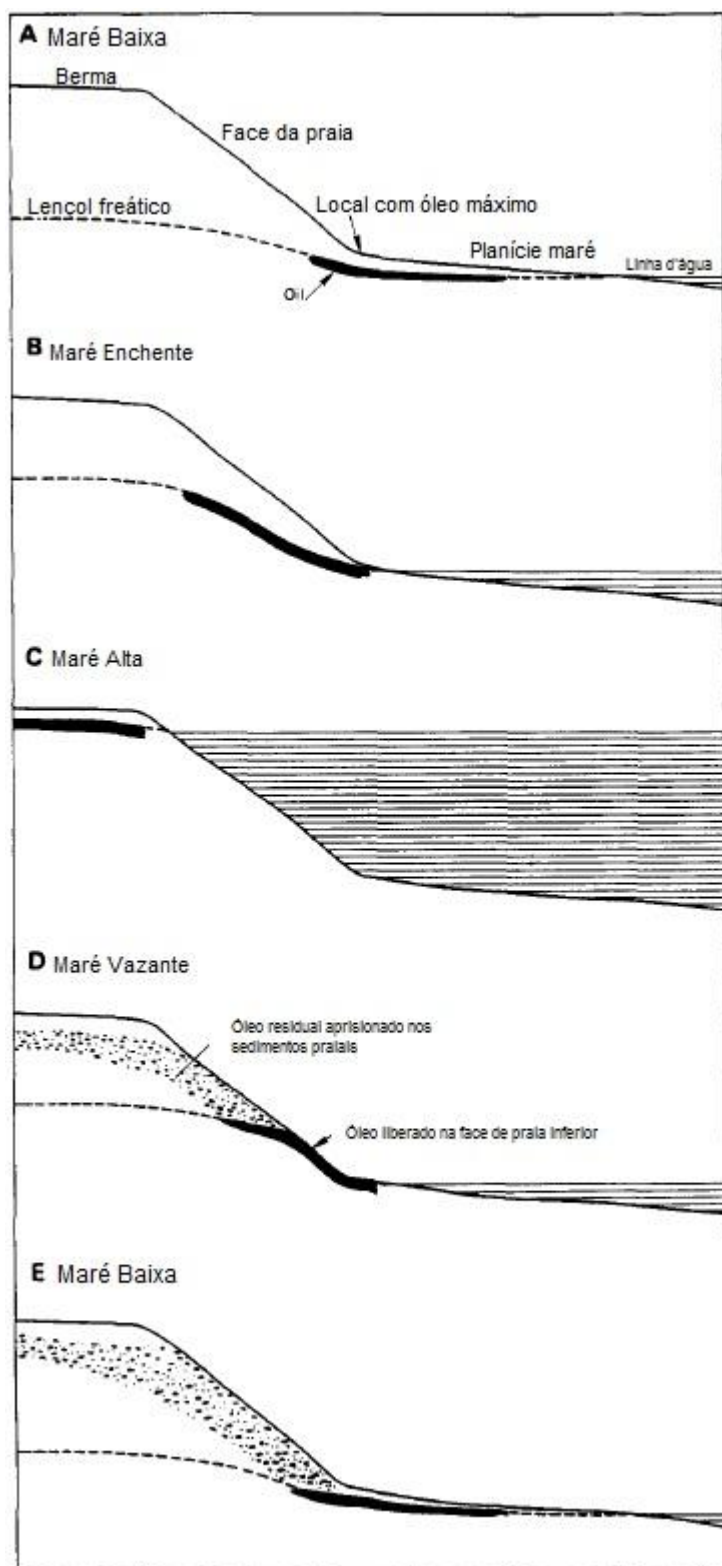


Figura 33: Movimento de óleo nos sedimentos praias provocado pelo ciclo de maré. A) Óleo inicialmente concentrado na face de praia; B e C) Migração do óleo para a região superior do perfil durante a maré alta; D e E) Conforme a maré desce, o lençol freático libera óleo na face da praia, enquanto óleo residual é tropeado na zona superior do perfil. Adaptado de McLaren (1985).

O óleo, inicialmente concentrado na face da praia e na planície de maré, migra para sedimentos superiores com o aumento da maré (enchente). Conforme a maré desce (vazante), o lençol provoca a liberação de óleo na face da praia enquanto óleo residual é retido em sedimentos superiores, onde permanece trapeado (McLaren, 1985).

De acordo com Halmemies et al. (2003), outra implicação está relacionada à dissolução de compostos solúveis do hidrocarboneto (como BTEX e MTBE) ao lençol, provocando contaminação da água. Estes compostos podem alcançar o lençol via infiltração de capilaridade da água, mesmo que o óleo em si não alcance o lençol. Segundo os autores, a poluição do lençol, após um derrame de óleos leves ou derivados, é uma questão de horas.

Segundo Petrobrás (2006) e MMA (2007b), as praias da área de estudo (praias de areia fina a média expostas ou abrigadas) possuem permeabilidade moderada, sendo que a penetração máxima no substrato é de cerca de 25 cm. Os resultados aqui obtidos, no entanto, indicam que mesmo utilizando uma quantidade pequena e limitante de óleo (750 ml), em alguns pontos a percolação do fluido foi superior ao esperado. Caso a quantidade de óleo utilizada fosse maior (como no caso de um acidente), o contaminante iria percolar até encontrar a superfície freática, que no caso, apresentou valores entre 60 cm e 95 cm.

A metodologia para definição da sensibilidade ao óleo (Petrobrás, 2006; MMA, 2007b) utiliza o volume de substrato contaminado e a facilidade de limpeza para definir o quão sensível um ambiente é, e, para isso, estipulam comportamentos esperados para o contaminante (no caso a profundidade máxima de percolação). Os resultados aqui obtidos, no entanto, mostram que estes valores estipulados não podem ser generalizados, já que as particularidades do compartimento onde esta praia está inserida, podem modificar a permeabilidade do substrato e não corresponder às classificações pré-existentes. Devido a isto, as singularidades da permeabilidade do óleo em cada local devem ser estudadas e acrescidas as metodologias existentes.

### 5.2.1. Padrão Gotas

As plumas de infiltração encontradas estão exibidas na Figura 34.

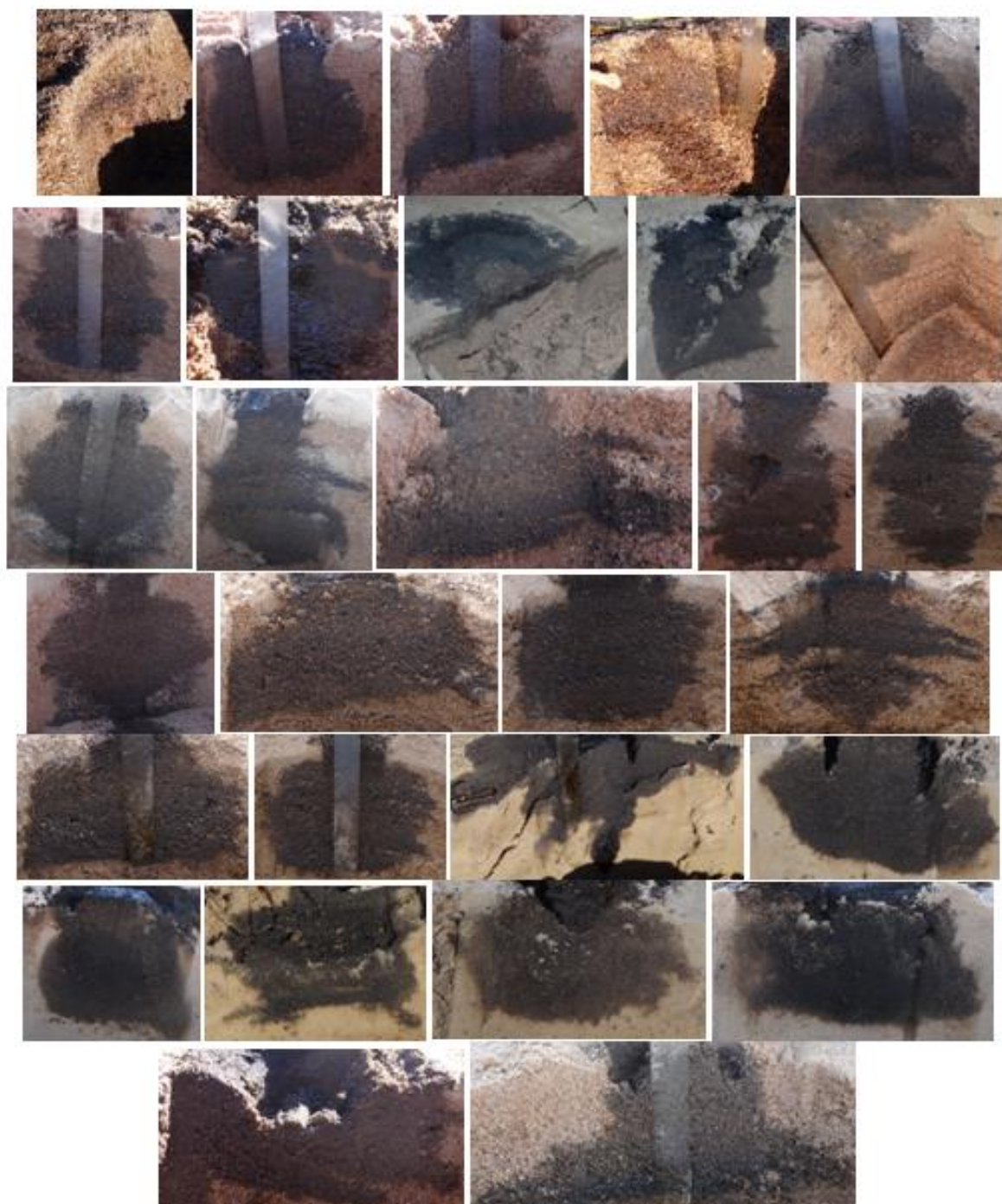


Figura 34: Gotas de infiltração encontradas para os ensaios realizados

A partir das 30 gotas geradas foi possível a identificação de quatro padrões de pluma de infiltração, relacionadas à parâmetros específicos. Os quatro padrões estão exibidos na Figura 35 e serão descritos a seguir.

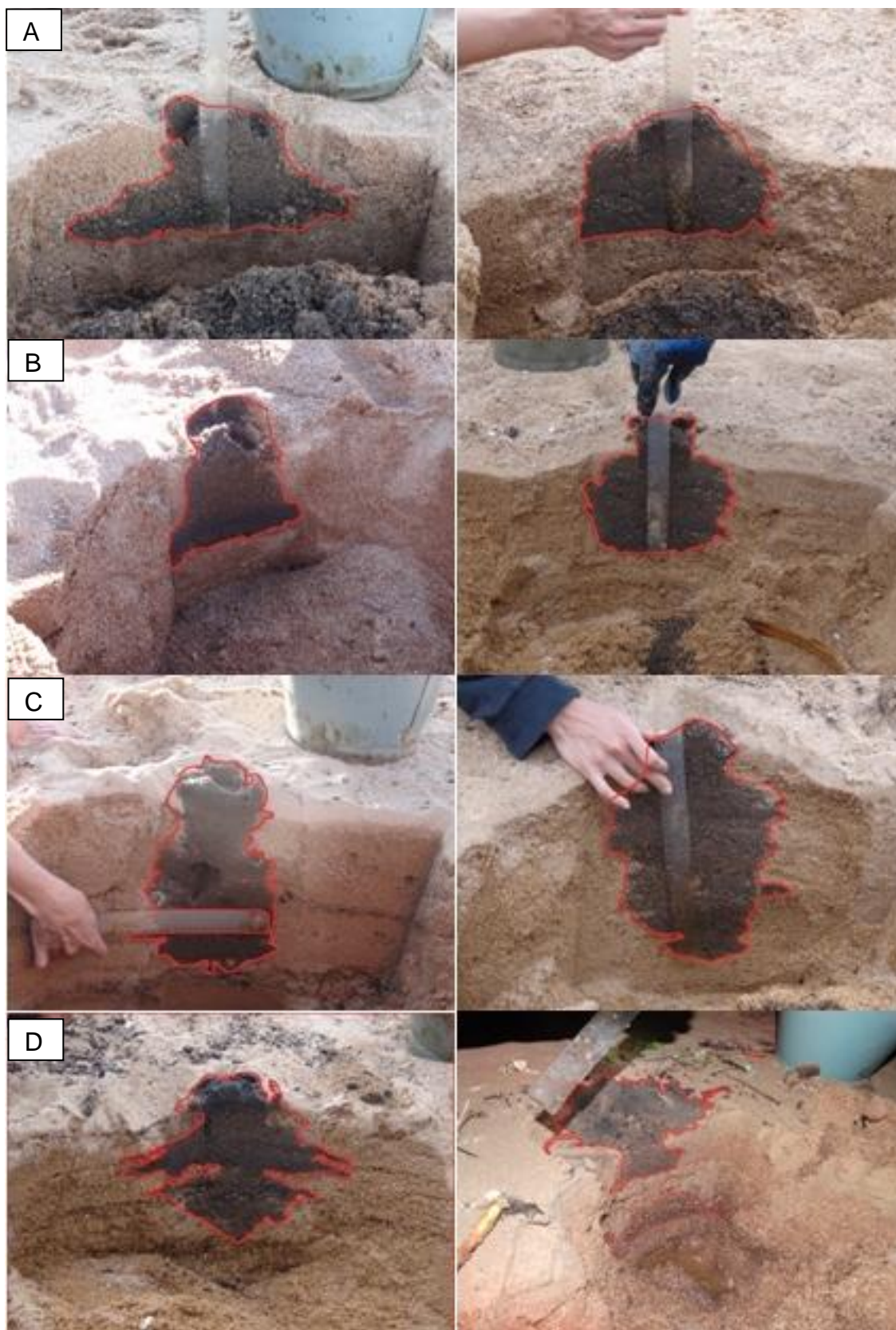


Figura 35: Padrões encontrados na pluma de infiltração do petróleo. As linhas vermelhas delimitam a gota. A) Gota retangular ou em forma de lâmpada (espalhamento lateral é superior à infiltração vertical); B) Gota em bulbo ou triângulo (espalhamento igual à infiltração); C) Gota retangular (infiltração superior ao espalhamento); D) Gota irregular.

**PADRÃO 1** (Figura 35 A): Espalhamento lateral superior à penetração vertical. Gota retangular ou em forma de luminária. Ocorrência: 12 gotas. Encontrado em pontos amostrados na linha de água e nas margens da Lagoa dos Patos. Este padrão ocorre devido à baixa profundidade do lençol e ao alto teor de umidade. A água provoca a saturação do espaço poroso, limitando a infiltração vertical e provocando o espalhamento lateral do contaminante.

**PADRÃO 2** (Figura 35 B): Espalhamento lateral semelhante à penetração vertical. Gota em forma de bulbo, triângulo ou lâmpada. Ocorrência: 10 gotas. Encontrado em pontos amostrados na berma e no meio da face da praia nas margens da Lagoa dos Patos. Este padrão foi observado em locais com areia média a grossa e amostra com moderado grau de seleção.

**PADRÃO 3** (Figura 35 C): Penetração vertical superior ao espalhamento lateral. Gota retangular. Ocorrência: 3 gotas. Encontrado nos pontos amostrados sob a berma e o meio da face da praia nas margens do Lago Guaíba. Padrão associado a areias grossas com grau de seleção moderado a pobre e coluna vertical do pacote sedimentar homogênea.

**PADRÃO 4** (Figura 35 D): Gota irregular. Ocorrência: 4 gotas. Encontrado em locais com coluna vertical do pacote sedimentar heterogênea, provocada por descontinuidades como lentes sedimentares, rochas ou bioturbação. A localização deste padrão depende das singularidades do local amostrado.

Ressalta-se que estes padrões foram encontrados para um óleo intermediário (grau API 33) não intemperizado. Como dito anteriormente, a permeabilidade é dependente das características do fluido percolante, portanto, óleos com viscosidade distintas irão percolar diferentemente. Porém, as relações entre espalhamento e profundidade definidas em cada padrão tendem a ser as mesmas.

Outro ponto importante é o intemperismo. Depois de ser liberada no mar, a mancha de óleo passa por uma série de processos naturais denominada de intemperismo, que inclui a evaporação, oxidação, espalhamento, dissolução, sedimentação e emulsificação (Figura 36). O intemperismo provoca modificações na aparência e na forma do óleo, tornando-o mais viscoso e mais denso e, conseqüentemente, modificando o comportamento do óleo no ambiente.

Gandra (2005) ao realizar uma simulação de derrame de óleo leve Hydra em laboratório verificou que em cinco horas de exposição, houve redução de 61,52% dos hidrocarbonetos do óleo. Após 24 horas esta redução atingiu 77,13%, chegando a 89% após 48 horas. O mesmo autor, ao simular um derrame com óleo intemperizado (1 litro de óleo para 4 litros de água do mar) na praia oceânica do Cassino no RS, encontrou valores de penetração do óleo variando entre 2 e 5 cm após cinco horas de exposição. Costi (2008) ao realizar ensaios nessa mesma praia usando óleo leve não intemperizado encontrou profundidade de penetração de até 11,58 cm.

A intemperização do óleo, além de diminuir a infiltração, pode provocar o surgimento de uma camada de pavimento asfáltico extremamente resistente e dura em subsuperfície, caso não seja completamente removido. Segundo Hayes et al. (1993), as condições para a formação desse pavimento asfáltico inclui: grandes quantidades de mousse (óleo muito intemperizado), declividade da praia igual ou superior a 4°, ventos em direção à praia, segurando o óleo no sedimento, areias médias a grossas e área que permita a quebra das ondas de tempestade. Todas estas condições são satisfeitas no Sistema Patos-Guaíba

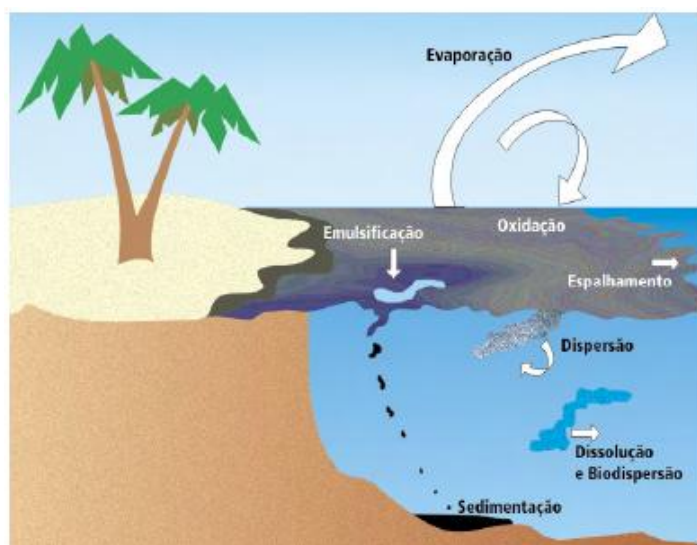


Figura 36: Processos envolvidos no intemperismo de uma mancha de óleo. Fonte: CETESB (2007)

### 5.2.2. Condutividade Hidráulica

A Condutividade hidráulica calculada a partir da metodologia do MPD (conforme Ahmed *et.al*, 2011b) é exibida na Figura 37.

Os valores de K obtidos se mostraram iguais à profundidade de penetração: os maiores coeficientes foram encontrados nas praias de Arambaré Norte, Guaíba e Ipanema, enquanto os menores em Arambaré Sul e Mostardas. Este padrão já era esperado já que a condutividade hidráulica é o parâmetro que mede a permeabilidade do solo e, portanto, quanto maior o valor de K, maior a profundidade alcançada pelo fluido.

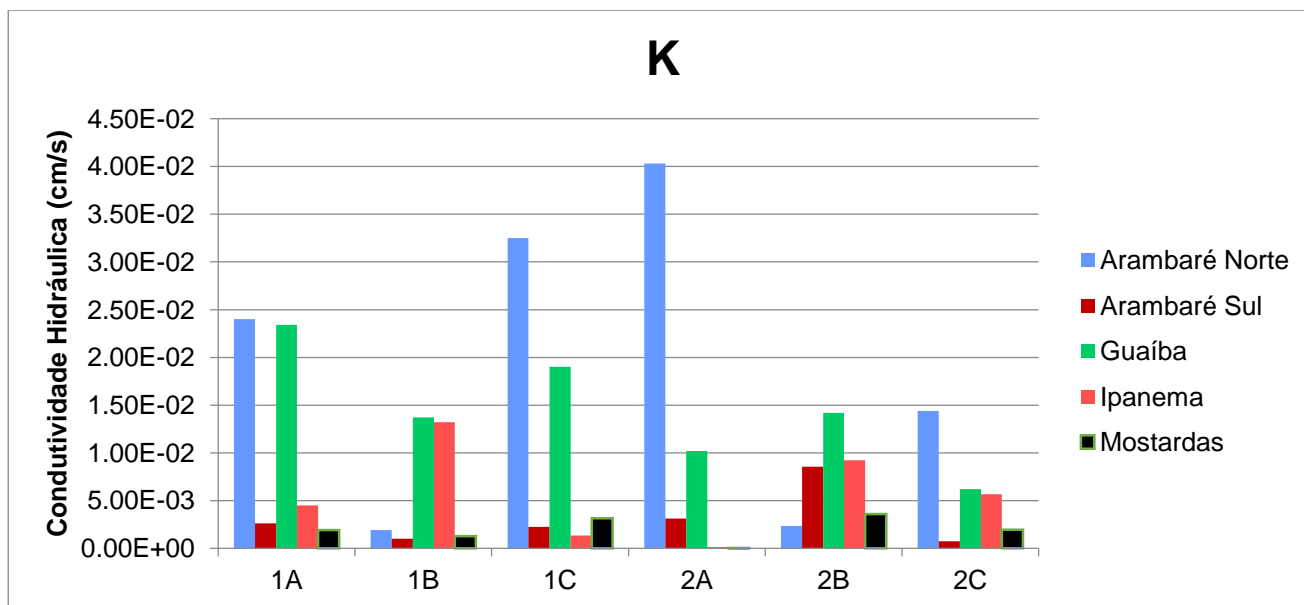
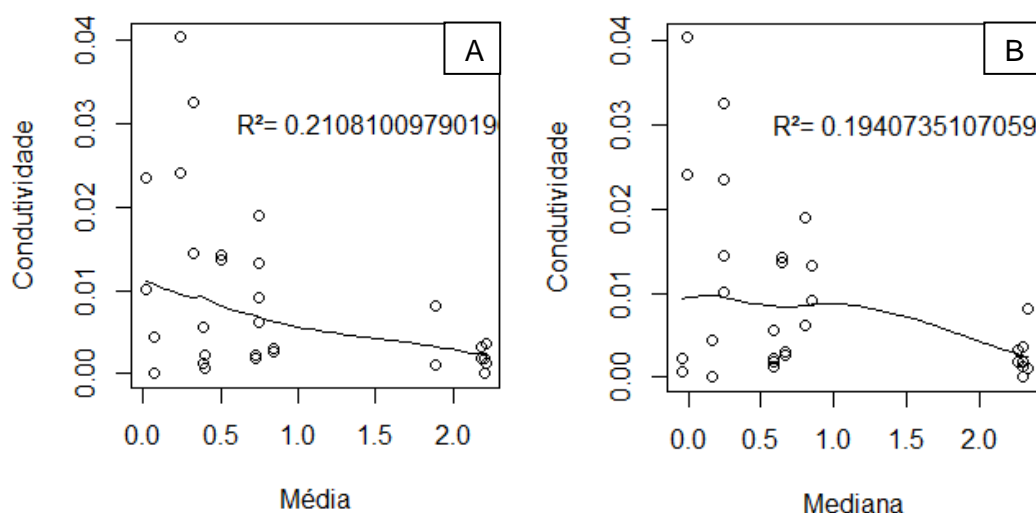
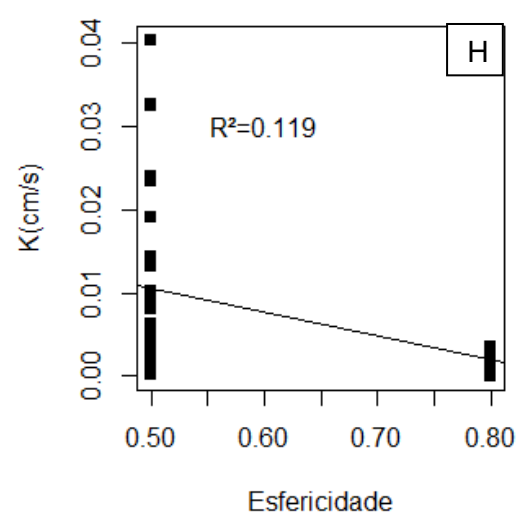
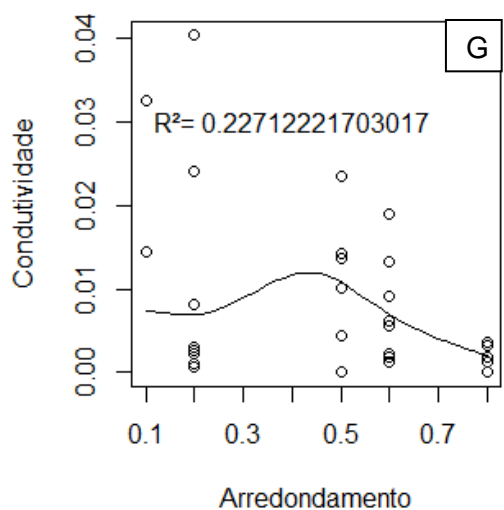
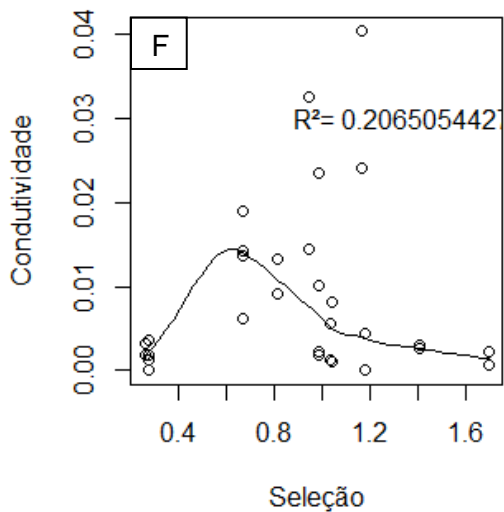
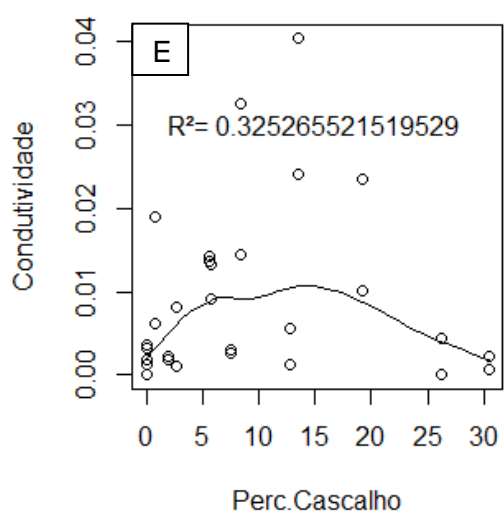
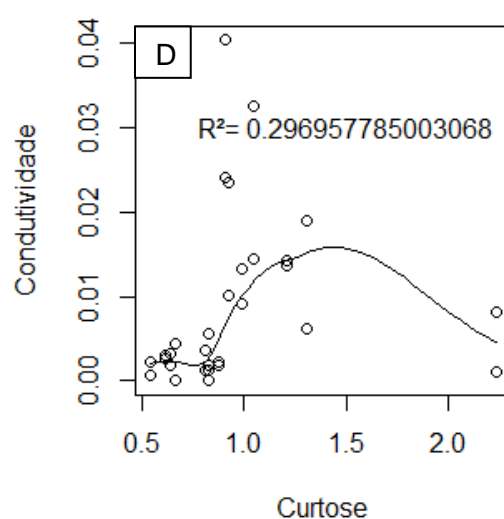
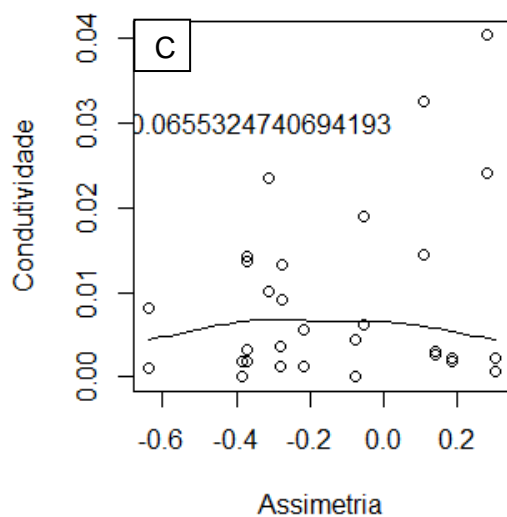


Figura 37: Condutividade hidráulica calculada pela teoria de Philip por ponto para as praias da área de estudo.

A fim de verificar quais fatores são determinantes na permeabilidade foram criados gráficos de dispersão entre a profundidade da gota, a condutividade hidráulica e os parâmetros (média, mediana, grau de seleção, % cascalho, arredondamento, esfericidade, compactação e profundidade do lençol), que serão exibidos na Figura 38 abaixo.







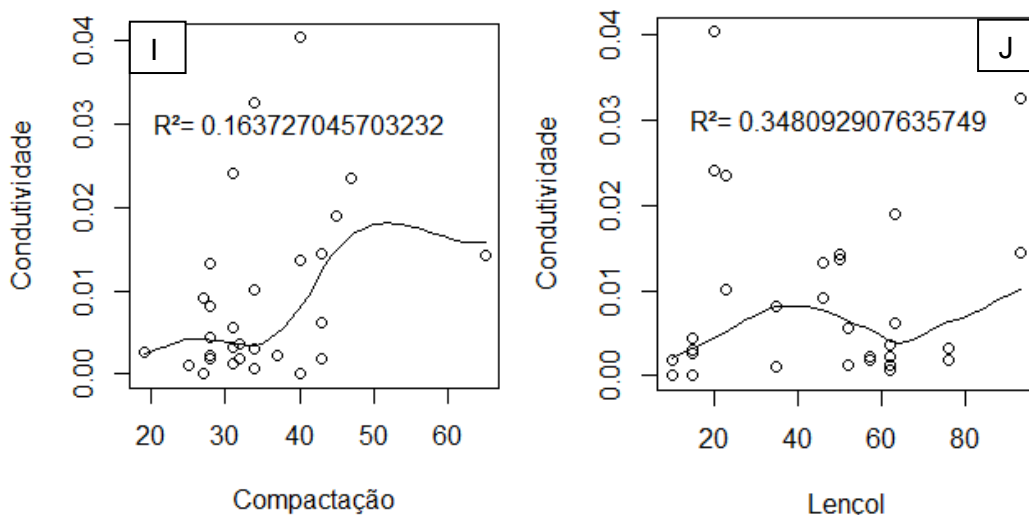


Figura 38: Gráficos de dispersão entre a condutividade hidráulica e a) média; b) mediana; c) assimetria; d) curtose; e) grau de seleção; f) % cascalho; g) arredondamento; h) esfericidade; i) compactação; j) profundidade do lençol freático

Os coeficientes de correlação não lineares encontrados foram de 0.457 entre a média e a condutividade hidráulica; 0.44 para a mediana; 0.248 para assimetria; 0.54 para curtose; 0.445 para o grau de seleção; 0.57 para o %cascalho; 0.483 para o arredondamento, 0.389 para o grau de compactação, 0.344 para a esfericidade e 0.5899 para o lençol.

Os coeficientes lineares foram de -0.44 entre a média e a condutividade hidráulica; -0.426 para a mediana; 0.248 para assimetria; 0.16 para curtose; 0.09 para o grau de seleção; 0.07 para o %cascalho; 0.408 para o arredondamento, 0.361 para o grau de compactação, -0.344 para a esfericidade e 0.377 para o lençol. Para um n amostral de 30 obteve-se um valor crítico para o coeficiente de correlação de Pearson igual 0.361 (Triola, 2005). Comparando-se aos valores obtidos, foi encontrada correlação linear significativa para a média, mediana, e arredondamento da amostra, e para o grau de compactação do solo e profundidade do lençol freático.

Os gráficos exibidos na Figura 38 mostram que a condutividade hidráulica apresenta grande variabilidade em sedimentos de tamanho grosso a médio, sendo que uma resposta linear somente é encontrada em sedimentos de granulometria fina. Como as praias lagunares estudadas são constituídas majoritariamente de areia grossa e pobre grau de seleção, a condutividade hidráulica apresenta grande variação, não correspondendo a um padrão definido. A partir do cálculo do coeficiente de variação (CV), encontrou-se o valor de 114% de variabilidade da condutividade hidráulica para as praias estudadas, indicando que o desvio padrão é muito superior à média da condutividade.

A correlação negativa para a média e mediana indicam que a permeabilidade diminui com a diminuição do tamanho do grão. Este resultado já era esperado, pois quanto maior o diâmetro do grão, maior a quantidade de espaços porosos da amostra e maior a percolação do fluido.

A correlação negativa entre a permeabilidade e o grau de arredondamento e esfericidade é explicada pelo empacotamento dos grãos: grãos bem arredondados e com alta esfericidade devem empacotar com o espaço mínimo de poros, diminuindo a infiltração. Com o aumento da angulosidade dos grãos, o espaço do poro tende a aumentar, assim como a permeabilidade do local. O grau de arredondamento da amostra está relacionado à maturidade do sedimento e, conseqüentemente, à herança geológica e à distância da área fonte.

A correlação positiva para a profundidade de penetração do penetrômetro (RP50) aponta que a permeabilidade diminui com o aumento da compactação: quanto mais compacto o substrato, menor a quantidade de vazios e mais difícil a percolação do fluido. Vieira *et.al* (2004) ao analisarem o impacto do tráfego de veículos na praia do Cassino no RS, verificaram que o coeficiente de permeabilidade apresentou valores significativamente menores nas áreas com maior compactação (resistência à penetração), no caso, sobre as trilhas dos veículos.

A correlação positiva para a profundidade do lençol freático mostra que, quanto mais profundo o lençol freático, maior a permeabilidade. Este comportamento já era esperado pois, como dito anteriormente, a água provoca a saturação dos poros, criando uma barreira para a percolação do fluido. Este comportamento, apesar de lógico, possui altas conseqüências, já que o lençol possui alta variação espacial e temporal que podem modificar o comportamento do fluido em uma área.

Segundo CETESB (2007), essa condição (lençol restringindo a infiltração) é evidenciada em termos sazonais já que um mesmo local pode ser mais ou menos vulnerável quanto à amplitude espacial de contaminação de acordo com as variações periódicas nos níveis do lençol.

Além disso, as flutuações na profundidade do lençol causam modificações na morfologia da praia que afetarão o escoamento do fluido secundariamente. Segundo Turner & Nielsen (1997), taxas rápidas de elevação do lençol freático provocam remobilização dos sedimentos na praia por fluidificação e devido a isso, as flutuações no nível do lençol freático podem ser consideradas um fator significativo na alteração do arranjo dos sedimentos na zona de *swash*. Rodriguez et al. (2015) verificaram que o arranjo estrutural, que é diferente para cada solo, pode provocar alto coeficiente de variação da permeabilidade para amostras consideradas homogêneas (com o mesmo grau de saturação e porosidade).

A correlação linear positiva entre o grau de seleção e o % cascalho, apesar de não ser significativa, é um resultado importante, pois os dados contradizem estudos pretéritos de Beard & Weyl (1973); Selley (1998) e Stern (2007). Segundo estes autores, terrenos que apresentam pobre seleção dos grãos, permitem que os interstícios intergranulares sejam preenchidos por sedimentos finos (areia muito fina, silte e argila), obstruindo os poros e, conseqüentemente, reduzindo a porosidade e permeabilidade. Os dados aqui obtidos, no entanto, indicam que a permeabilidade aumenta com a diminuição do grau de seleção, ou seja, amostras mal selecionadas (com características bimodais ou polimodais) com baixa ou nula concentração de sedimentos finos, tendem a apresentar valores de permeabilidade superiores à amostras bem selecionadas.

Esta característica também foi notada por Pereira & Calliari (2005) e por Costi & Calliari (2008) para a praia oceânica de Concheiros no litoral sul do RS. De acordo com os autores, este local apresenta a maior permeabilidade do litoral (condutividade hidráulica de 0.0098 e profundidade da gota de 20 cm), sendo que o alto valor foi atribuído às características bimodais do local (praia composta por cascalho biodetrítico e areia de granulometria variável). Os valores de permeabilidade encontrados pelos autores para a praia oceânica, no entanto, são uma ordem de grandeza menor do que os valores de permeabilidade encontrados para a Lagoa (maior valor 0.04). A menor permeabilidade em praias oceânicas pode ser explicada pela alta mobilidade da face da praia, provocada pela exposição à energia das ondas, que remobiliza o pacote sedimentar, afetando a quantidade de vazios.

A estrutura do pacote sedimentar, condicionada pelo arranjo das partículas, define os vazios existentes que são os caminhos possíveis de percolação do fluxo (Rodriguez et al., 2015). Alta energia das ondas em praias oceânicas, portanto, promovem modificação na disposição das partículas na face da praia, alterando a permeabilidade do substrato.

Ainda segundo Pereira & Calliari (2005), os coeficientes de permeabilidade das praias oceânicas apresentaram, de forma geral, estreita relação com os estágios morfodinâmicos de Wright & Short (1984). Em praias dissipativas, a infiltração é baixa, porém o espalhamento do óleo é maior, enquanto em praias intermediárias a reflectivas, a infiltração é maior. Os autores concluíram que a variação da permeabilidade ao longo das praias arenosas do RS é um reflexo, além dos estágios morfodinâmicos, da herança geológica da planície costeira do estado.

As relações entre a permeabilidade e os parâmetros de média, mediana, arredondamento, esfericidade, compactação e lençol freático condizem com a literatura e indicam que a permeabilidade no sistema Patos-Guaíba é governada, em grande parte, pelos mesmos parâmetros que as praias oceânicas já estudadas. Os resultados de grau de seleção, por sua vez, mostram que, as características bimodais e polimodais da praia provocam o incremento da permeabilidade em sistemas governados pela forçante fluvial. Pryor (1973) relata que a porosidade em barras arenosas fluviais (rios) podem apresentar aumento de porosidade com a diminuição do grau de seleção devido ao estilo diferente de empacotamento dos grãos que ocorre nestes corpos. O autor ainda afirma que a presença de pacotes laminares e estratificados são fatores importantes para a porosidade de corpos arenosos. Com o aumento da porosidade do substrato pode ocorrer o aumento da permeabilidade do mesmo.

Uma característica importante que governa o escoamento do fluxo em praias lacustres, portanto, é o desvio padrão ou grau de seleção da amostra. A definição da permeabilidade destes ambientes deveria considerar não só o histograma de distribuição das classes granulométricas, mas também o percentual de cascalho (que favorece a infiltração), o percentual de finos (que diminui a porosidade) e a forma em que os grãos estão dispostos na coluna sedimentar (presença de pacotes estratificados e laminados).

### 5.2.3. Equações

Como dito anteriormente, a condutividade hidráulica (K) pode ser calculada a partir de várias equações que consideram as medições *in situ*, incluindo a Lei de Darcy (Darcy, 1856) e as equações de Ródio (1965) e Caputo (1988) e por equações empíricas que utilizam as características do sedimento. A fim de comparar os resultados foi calculada a condutividade hidráulica para cada equação. Os resultados encontrados para a condutividade *in situ* estão exibidos na Tabela 10. Os gráficos de correlação entre cada equação e a equação de Ahmed (2011) são mostrados na Figura 39

Tabela 10: Valores de condutividade hidráulica encontrados para equações *in situ* (Caputo, 1988; Ródio, 1965; Lei de Darcy, 1856)

		Prof	Ahmed et al., (2011b)	Caputo (1988)	Ródio (1965)	Lei de Darcy
Arambaré N	1A	9	2.40E-02	4.13E-03	2.52E-01	6.93E-02
	1B	19	1.91E-03	1.31E-03	7.56E-02	2.21E-02
	1C	17	3.25E-02	4.05E-03	2.81E-01	6.80E-02
	2A	14	4.03E-02	8.72E-03	6.06E-01	1.47E-01
	2B	21	2.33E-03	1.21E-03	6.22E-02	2.03E-02
	2C	20	1.44E-02	1.91E-03	1.10E-01	3.21E-02
Arambaré S	1A	16	2.63E-03	5.47E-05	2.97E-03	1.38E-03
	1B	4	1.02E-03	9.35E-05	3.80E-03	1.85E-03
	1C	16	2.23E-03	7.72E-05	4.20E-03	1.94E-03
	2A	0	3.12E-03	6.20E-05	3.20E-03	1.53E-03
	2B	15	8.54E-03	1.10E-04	5.96E-03	2.76E-03
	2C	7	7.37E-04	3.98E-05	2.05E-03	1.05E-03
Guaíba	1A	13	2.34E-02	1.38E-03	6.75E-02	3.55E-02
	1B	23	1.37E-02	1.07E-03	5.52E-02	1.80E-02
	1C	29	1.90E-02	4.42E-04	1.97E-02	7.42E-03
	2A	23	1.02E-02	2.21E-03	1.27E-01	3.72E-02
	2B	19	1.42E-02	1.90E-03	9.81E-02	3.20E-02
	2C	29	6.21E-03	2.68E-04	1.63E-02	4.50E-03
Ipanema	1A	14	4.49E-03	1.44E-03	8.29E-02	2.42E-02
	1B	18	1.32E-02	1.56E-03	1.01E-01	2.62E-02
	1C	20	1.33E-03	1.91E-04	1.10E-02	3.21E-03
	2A	14	1.24E-04	1.37E-03	7.47E-02	2.31E-02
	2B	18	9.22E-03	1.78E-03	9.17E-02	2.99E-02
	2C	28	5.65E-03	4.60E-04	2.37E-02	7.74E-03
Mostardas	1A	10	1.91E-03	3.76E-05	1.84E-03	1.32E-03
	1B	12	1.26E-03	2.97E-04	2.22E-02	4.99E-03
	1C	14	3.15E-03	3.08E-05	2.48E-03	1.05E-03
	2A	5	5.15E-06	1.31E-05	6.42E-04	9.74E-04
	2B	12	3.58E-03	8.41E-05	4.33E-03	1.94E-03
	2C	10	1.94E-03	4.88E-05	3.64E-03	1.56E-03

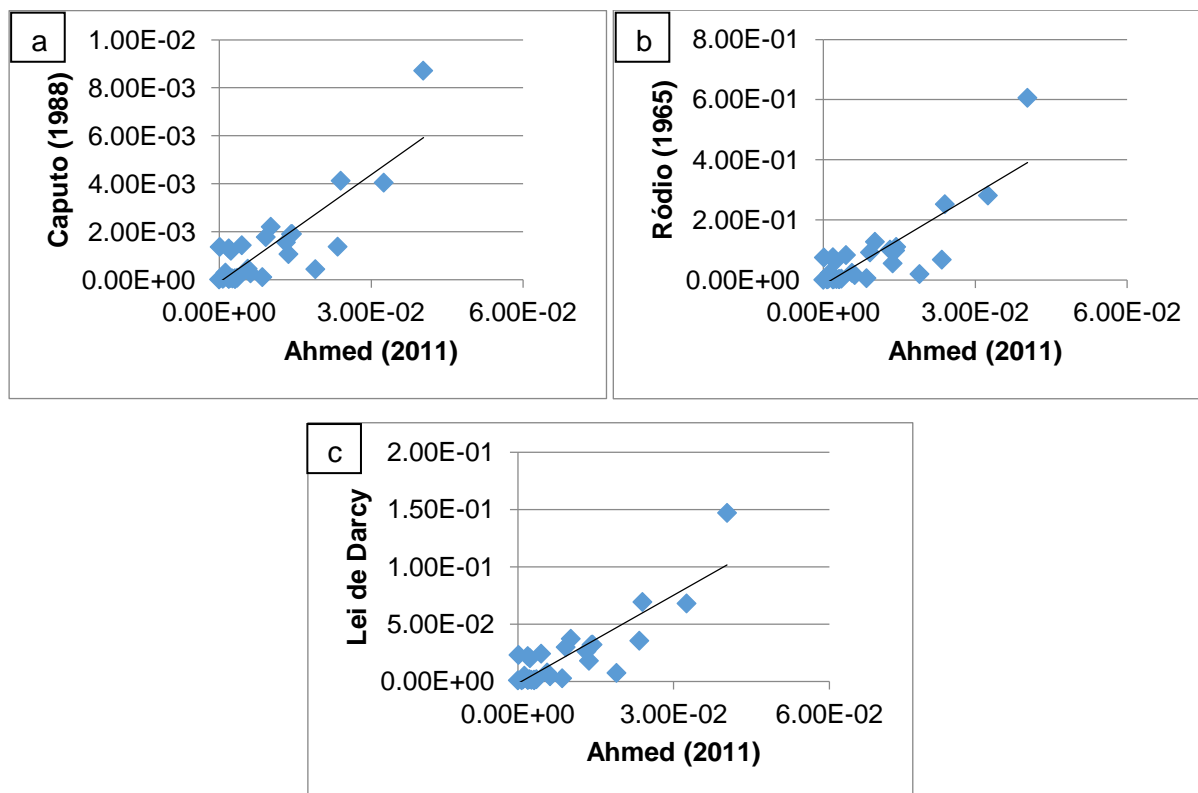


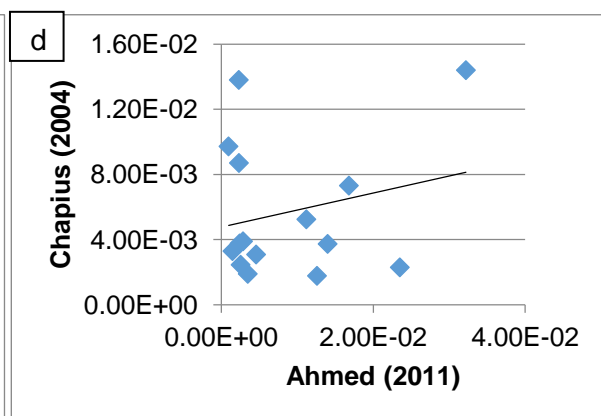
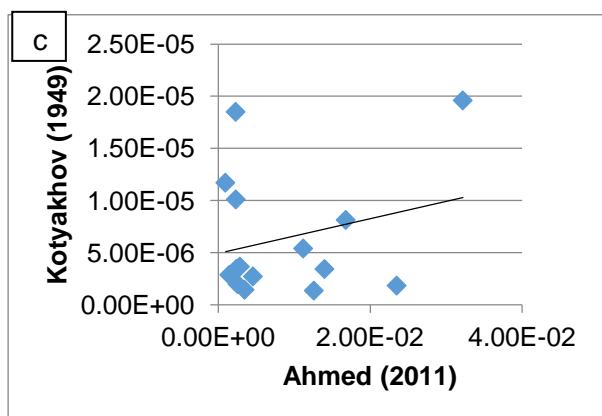
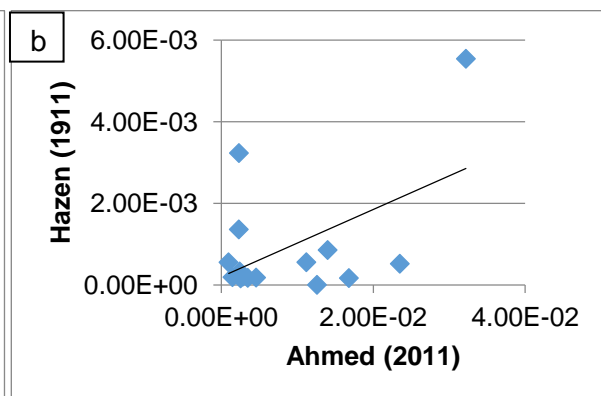
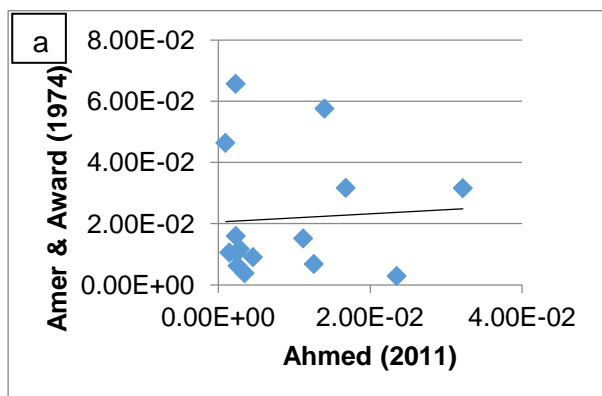
Figura 39: Gráficos de correlação entre a condutividade hidráulica do MPD (Ahmed *et.al*, 2011b) e: a) Caputo (1988); b) Ródio (1965); c) Lei de Darcy (1856).

No geral, as três equações apresentaram resultados semelhantes para a condutividade hidráulica. A partir da análise da linha de tendência na Figura 39, foi encontrado coeficiente de correlação de 0.844 entre a equação de Ahmed *et.al* (2011b) e Caputo (1988); coeficiente de 0.837 entre Ahmed *et.al* (2011b) e Ródio (1965) e coeficiente de 0.860 entre Ahmed *et.al* (2011b) e a Lei de Darcy (1856). Todas as equações obtiveram valores satisfatórios para K e coeficientes de correlação significativos (segundo Triola, 2005) e podem ser utilizadas para determinar a permeabilidade do ambiente.

Na Tabela 11 são mostrados os valores de condutividade hidráulica utilizando equações empíricas. A partir da análise da linha de tendência na Figura 40, foi obtido coeficiente de correlação de 0.062 entre a equação de Ahmed *et.al* (2011b) e Amer & Award (1974); coeficiente de 0.514 entre Ahmed e Hazen (1911); coeficiente de 0.259 entre Ahmed e Kotyakhov (1949); coeficiente de 0.234 entre Ahmed e Chapuis (2004); coeficiente de -0.308 entre Ahmed e NAVFAC (1974) e coeficiente de 0.314 entre Ahmed e Shahabi *et al.*, (1984).

Tabela 11: Valores de condutividade hidráulica encontrados através da aplicação de equações empíricas

		Amer & Award (1974)	Hazen (1911)	Kotyakhov (1949)	Chapuis (2004)	NAVFAC (1974)	Shahabi et al., (1984)
Mostardas	A	3.16E-02	5.54E-03	1.96E-05	1.44E-02	7.21E-03	1.19E-02
	B	1.60E-02	3.23E-03	1.01E-05	8.70E-03	4.44E-03	5.99E-03
	C	2.92E-03	5.19E-04	1.83E-06	2.29E-03	1.44E-03	1.29E-03
Arambaré Norte	A	1.17E-02	2.06E-04	3.65E-06	3.89E-03	2.78E-03	4.73E-03
	B	9.09E-03	1.80E-04	2.71E-06	3.08E-03	6.85E-03	2.03E-03
	C	1.06E-02	1.90E-04	2.86E-06	3.29E-03	1.07E-02	1.90E-03
Arambaré Sul	A	3.17E-02	1.68E-04	8.13E-06	7.31E-03	3.51E-03	1.57E-02
	B	5.76E-02	8.55E-04	3.42E-06	3.73E-03	1.92E-03	2.58E-03
	C	6.83E-03	1.92E-06	1.35E-06	1.77E-03	1.66E-03	3.33E-03
Guaíba	A	6.57E-02	1.36E-03	1.85E-05	1.38E-02	2.91E-02	8.95E-03
	B	1.52E-02	5.56E-04	5.39E-06	5.24E-03	1.55E-02	2.29E-03
	C	3.83E-03	1.73E-04	1.43E-06	1.89E-03	4.85E-03	8.99E-04
Ipanema	A	4.64E-02	5.54E-04	1.17E-05	9.72E-03	1.13E-02	1.07E-02
	B	1.04E-02	3.30E-04	3.44E-06	3.76E-03	8.73E-03	2.06E-03
	C	6.25E-03	1.61E-04	1.98E-06	2.45E-03	6.37E-03	1.37E-03



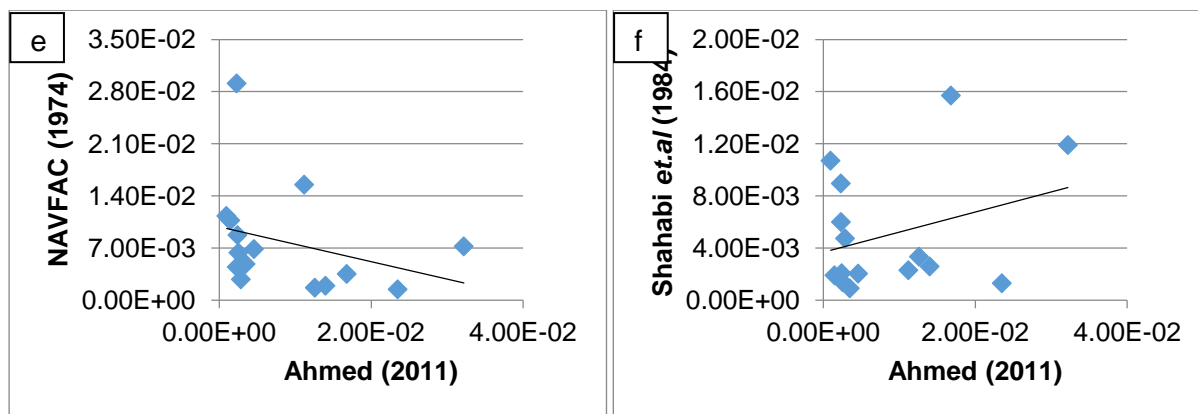


Figura 40: Gráficos de dispersão entre a condutividade hidráulica do MPD (Ahmed *et.al*, 2011b) e: a) Amer & Award (1974); b) Hazen (1911); c) Kothyakhov (1949); d) Chapuis (2004); e) NAVFAC (1974); f) Shahabi et al., (1984)

Para um n amostral de 15 obteve-se um valor crítico para o coeficiente de correlação de Pearson igual 0.514 (Triola, 2005). A única equação empírica que demonstrou correlação significativa foi a de Hazen (1911), sendo portanto, a única indicada para prever a permeabilidade das praias lagunares.

Os dados utilizados para os cálculos da condutividade hidráulica empírica são exibidos na tabela 12.

Tabela 12: Parâmetros utilizados nas equações empíricas da condutividade. Cu é o coeficiente de uniformidade; RF é o fator forma oriundo do arredondamento; emax é o índice de vazios máximo; emin é o índice de vazios mínimo; w é o teor de umidade; e é o índice de vazios e n é a porosidade.

		Cu	RF	1/emax	emax	1/emin	emin	w	E	n
Mostardas	A	1.16	0.7	1.114727	0.897081	2.363554	0.423092	17	0.377	0.274
	B	1.1	0.7	1.163298	0.859625	2.308001	0.433275	12	0.298	0.229
	C	1.17	0.7	1.106877	0.903443	2.372533	0.42149	9	0.176	0.149
Arambaré Norte	A	3.5	0.3	0.575292	1.738248	2.813308	0.355453	10	0.199	0.166
	B	3.06	0.3	0.617507	1.619415	2.701283	0.370194	7	0.135	0.119
	C	3.15	0.3	0.608399	1.643658	2.725454	0.366911	7	0.125	0.11
Arambaré Sul	A	5.11	0.3	0.456379	2.191161	3.128864	0.319605	13	0.286	0.222
	B	1.29	0.49	1.055313	0.947586	2.290553	0.436576	10	0.219	0.179
	C	7.89	0.15	0.109419	9.139181	1.537532	0.650393	8	0.145	0.127
Guaíba	A	2.81	0.3	0.644289	1.552099	2.630214	0.380197	9	0.209	0.173
	B	2.05	0.3	0.743377	1.345212	2.367267	0.422428	7	0.145	0.127
	C	2.14	0.49	0.784301	1.275021	2.818912	0.354747	6	0.114	0.102
Ipanema	A	4	0.3	0.533334	1.874998	2.924652	0.341921	10	0.226	0.184
	B	2.44	0.49	0.714057	1.400448	2.955857	0.338311	7	0.141	0.123
	C	2.67	0.49	0.665826	1.501894	3.049887	0.327881	6	0.122	0.108

### 5.3. *Permeabilidade e Sensibilidade*

A permeabilidade em sistemas lagunares, além de ser governada pelos parâmetros tamanho do grão e mediana como as praias oceânicas, é influenciada pela polimodalidade do sistema e pela distribuição vertical dos sedimentos. A polimodalidade favorece o escoamento do fluido nos locais onde a porcentagem de partículas grossas é alta e a concentração de sedimentos finos é baixa. A coluna vertical heterogênea, composta por lâminas de sedimentos finos e grossos intercalados modifica o padrão de escoamento do fluido. A presença de uma lente de sedimentos grosseiros abaixo de um sedimento superficial fino, por exemplo, acelera o escoamento nesta profundidade, fazendo com que o óleo se deposite em profundidades superiores à esperada.

Estas duas características (polimodalidade e estrutura do pacote heterogênea) são agravantes em um derramamento, pois promovem o aumento da permeabilidade do substrato, provocando maior contaminação do solo, aumentando o volume de material contaminado, de impactos gerados e dificultando o processo de limpeza. Porém, mesmo modificando o comportamento do fluido no substrato, estas características não são consideradas na classificação da sensibilidade ao óleo da praia. Este fato está relacionado primeiramente ao fato da metodologia de definição da sensibilidade ao óleo ser baseada no ambiente oceânico onde estes parâmetros não são relevantes. Em segundo lugar, a definição das características sedimentológicas do local em questão são definidas visualmente pelo pesquisador em campo, dificultando o enquadramento das particularidades citadas.

Outros dois parâmetros que são abordados apenas teoricamente na sensibilidade ao óleo, mas que fornecem informações importantes para o planejamento da resposta, são o grau de compactação e a profundidade do lençol freático. O lençol representa a profundidade máxima de infiltração do percolante (McLaren (1985); Oliveira & Vinzon (2003); CETESB (2007)), porém, devido à alta sazonalidade e variabilidade espacial deste parâmetro, a profundidade do lençol do local atingido é uma informação crucial para o planejamento da resposta. Em meses secos o lençol estará mais profundo, e o pacote sedimentar contaminado será superior ao encontrado em períodos mais chuvosos.

Associado à altura do lençol freático está a umidade do solo. Como dito anteriormente, quanto maior a umidade do solo, maior a saturação dos poros e menor a profundidade do lençol. Segundo Halmemies et al. (2003), o teor de umidade tem um grande efeito na penetração do óleo. Quando o percentual de umidade em areias cascalhosas aumenta em 100%, a velocidade de infiltração do fluido diminui 80%.

A alta compactação do substrato, por sua vez, diminui a quantidade de vazios do sedimento, diminuindo assim a permeabilidade. Um solo com alta compactação pode vir a ser usado como área de deflação de manchas já que o contaminante ficará retido superficialmente.



Os resultados encontrados permitiram criar uma diretriz com procedimentos de campo e técnicas laboratoriais que devem ser adotadas antes da classificação final do ISL pelo pesquisador:

- Coleta de sedimentos para análise granulométrica, incluindo o tamanho do grão, o grau de seleção, e os percentuais de cascalho e finos;
- Coleta de testemunhos para análise da estrutura vertical, verificando a presença de lentes e/ou estruturas (como rochas, vegetação, bioturbação);
- Medir o grau de compactação do sedimento, assim como averiguar se há perturbação antrópica da praia pelo uso de carros e tratores;
- Verificar a profundidade e comportamento do lençol freático da área analisada;
- Predição da condutividade hidráulica do local através da equação de Hazen (1911);

A adoção destas diretrizes irá facilitar a predição do comportamento e tempo de permanência do contaminante no substrato, garantindo que a classificação final do ISL da praia contemple a real sensibilidade do ambiente ao óleo. Além disso, a prática laboratorial diminuirá a generalização do comportamento do óleo, já que as particularidades da praia serão consideradas durante o mapeamento.

O entendimento da permeabilidade no sistema, através do uso do tutorial, servirá para aperfeiçoar o método oficial de definição da sensibilidade ao óleo, garantindo que os esforços de contenção e limpeza sejam rápidos e eficazes.

## 6. CONCLUSÕES

A permeabilidade do óleo nas praias do sistema “Patos-Guaíba” apresentou valores de condutividade hidráulica (K) variando entre 0.00124 e 0.04 cm/s, e profundidade de penetração do fluido entre 5 e 30 cm. Os valores de K se enquadraram nos valores típicos para a classe granulométrica areia (0.01 a 0.0001 cm/s).

A aplicação das equações para cálculo da permeabilidade que utilizam os dados obtidos no ensaio *in situ* mostraram resultados semelhantes e boa correlação. Isso indica que qualquer uma destas equações pode ser utilizada para definir a condutividade hidráulica. As equações empíricas (que utilizam parâmetros granulométricos para prever a permeabilidade), no entanto, apresentaram baixa correlação, sendo que apenas a equação de Hazen (1911) apresentou valores satisfatórios de permeabilidade para as praias lagunares, sendo por isto a única indicada para prever a permeabilidade da laguna.

Os maiores valores de permeabilidade ocorreram nas praias com grãos angulosos de tamanho médio a grosso, com grau de seleção pobre a moderado, baixa compactação do pacote sedimentar e lençol freático profundo. Estas características indicam que a permeabilidade em sistemas lagunares é governada, principalmente, pelo tamanho do grão, pelo arredondamento do sedimento e pelo grau de compactação do substrato. Estes dados estão de acordo com as leis que regem o escoamento do fluido.

O parâmetro grau de seleção, porém, apresentou resultados divergentes: normalmente, solos com pobre grau de seleção apresentam baixos valores de permeabilidade já que os interstícios intergranulares são preenchidos por grãos menores que obstruem os poros e reduzem a permeabilidade. No Sistema Patos-Guaíba, porém, ocorreu o inverso: praias com baixo ou moderado grau de seleção (caracterizadas como bimodais ou polimodais) apresentaram os maiores valores de permeabilidade. Esta relação está relacionada tanto à ausência de finos (silte e argila), quanto à alta concentração de cascalho.

Comparando os valores de permeabilidade do óleo obtidos em estudos anteriores para praias oceânicas no RS, é possível perceber que o Sistema Patos-Guaíba, apresenta valores de condutividade de uma ordem de grandeza maior. Tal diferença está relacionada às variações energéticas entre o ambiente marinho e o ambiente lagunar: na região oceânica, as praias estão expostas à alta energia de ondas, que remobilizam os sedimentos na face da praia, provocando a reorganização dos grãos no substrato e alterando o arranjo das partículas. Mesmo praias bimodais ou polimodais apresentam alterações rápidas no arranjo e na porosidade. No sistema lagunar, no entanto, a remobilização dos sedimentos é baixa. A baixa mobilidade do sistema lagunar permite que os grãos se depositem em camadas intercaladas de sedimentos finos e grossos, criando um pacote vertical heterogêneo, responsável pelas modificações no comportamento do fluido,

Outra característica importante está relacionada à herança geológica e maturidade dos sedimentos. Nas praias oceânicas e em Mostardas (que mesmo estando na margem lagunar, possui as mesmas características que o ambiente oceânico por

estar na restinga da laguna), a energia das ondas durante as variações do nível do mar foi responsável pelo retrabalhamento do sedimento, garantindo grãos com alta maturidade (grãos esféricos, arredondados e com grau de seleção moderado a alto), promovendo a diminuição da permeabilidade. As praias na margem oeste da Lagoa dos Patos e nas margens do Guaíba, no entanto, possuem sedimentos oriundos das Terras Altas. A proximidade entre a área fonte dos sedimentos e o depósito final diminui o tempo de retrabalhamento dos depósitos, fazendo com que os sedimentos que compõem estas praias possuam baixa maturidade (grãos angulosos com baixo grau de seleção) que favorecem o escoamento do fluido.

O método oficial brasileiro para definição da sensibilidade ao óleo baseia-se no comportamento e tempo de permanência do contaminante no substrato, utilizando para tal valores típicos permeabilidade do substrato. Segundo a metodologia, as praias lagunares (compostas por areia grossa, média ou fina) possuem percolação do petróleo até a profundidade máxima de 25 cm. Os resultados aqui obtidos, no entanto, mostram que mesmo utilizando uma quantidade limitante de contaminante, a percolação nas praias lagunares foi superior ao estimado pelo método. Esta diferença entre os valores está relacionada a alguns fatores. Primeiro, a metodologia de definição da sensibilidade ao óleo é baseada em um ambiente oceânico (onde os sedimentos possuem alta maturidade, grande mobilidade e grau de seleção variando de moderado a alto), mas é aplicada em ambientes fluviais e lacustres (onde ocorrem sedimentos mal selecionados, de baixa maturidade e mobilidade).

Segundo, a metodologia não considera o desvio padrão da amostra na classificação do valor de sensibilidade do ambiente. A definição do tamanho do grão é feita visualmente pelo pesquisador em trabalho de campo, sendo que o substrato é classificado como areia média, grossa ou fina. Porém, as praias lagunares são tipicamente polimodais, fazendo com que a classificação feita pelo pesquisador não seja condizente com as reais características do ambiente. Terceiro, a distribuição vertical dos sedimentos não é considerada. Em corpos lagunares é comum a ocorrência de sedimentos finos e grossos intercalados em camadas, devido as variações energéticas do ambiente e à baixa mobilidade do sistema. Este pacote heterogêneo é responsável por modificar o movimento do fluido, alterando assim o comportamento esperado do contaminante.

Para que a permeabilidade lagunar seja contemplada na sensibilidade ao óleo, as características sedimentológicas do ambiente devem ser consideradas. Para isso, alguns procedimentos de campo e técnicas laboratoriais devem ser adotadas antes da classificação final do ISL da praia. Estas técnicas incluem a análise granulométrica (incluindo o tamanho médio, o desvio padrão e os percentuais de cascalho e finos); a coleta e análise de testemunho para verificação da estrutura vertical (presença de lentes e/ou estruturas); as medições do grau de compactação do sedimento e da profundidade do lençol freático e a predição da condutividade hidráulica do local através da equação de Hazen (1911). A adoção destas diretrizes irá facilitar a predição do comportamento e do tempo de permanência do contaminante no substrato, garantindo assim que a classificação final do ISL da praia contemple a real sensibilidade do ambiente ao óleo.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S.L.; REICHERT, J.M.; SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & BLUME, E. 2003. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, da produtividade e da qualidade de grãos de trigo em Argissolo Franco Arenoso sob plantio direto. *Ciência Rural*, v. 33, nº 2: p. 275 – 282.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO – ANP. 1998. *Portaria nº 155, de 21 de outubro de 1998*. Estabelece critérios para a fixação do preço mínimo do petróleo, produzido mensalmente em cada campo.

AHMED, F. 2011. The “dirt” on soils, water, and infiltration. *Stormwater U.S. Education Program: Bioretention Systems*. St. Anthony Falls Laboratory. Universidade de Ciências de Minnesota. Estados Unidos

AHMED, F.; GULLIVER, J.S. & NIEBER, J.L. 2011 a. A new technique to measure infiltration rate for assessing infiltration of BMPs. In: 12<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN DRAINAGE. *Anais...* Porto Alegre/Brazil: 8 p.

AHMED, F.; GULLIVER, J.S. & NIEBER, J.L. 2011 b. Performance of low impact development practices on stormwater pollutant load abatement. *Project Report No. 560*. St. Anthony Falls Laboratory. University of Minnesota. Minneapolis, Minnesota. 33p.

ALLAN, F.M. et al., 2006. Infiltration of oil into porous sediments. *Applied Mathematics and Computation*, nº 177; p. 659-664.

ALVES, E.S.; RODRIGUES, S.A.; PEZZUTO, P.R. & SHIMIZU, G.Y. 2004. Caracterização ambiental da porção subaérea de praias arenosas expostas com diferentes características morfodinâmicas no litoral centro-norte de Santa Catarina, Brasil. *Notas Técnicas. FACIMAR*, 8: p. 1-24.

AMER, A.M. & AWARD, A.A. 1974. Permeability of cohesion less soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. ASCE, V. 100, nºGT12: p. 1309 – 1316.

ASLESON, C.B.; NESTINGEN, R.S.; GULLIVER, J.S.; HOZALSKI, R.M. & NIEBER, J.L. 2009. Performance assessment of rain gardens. *Journal of the American Water Resources Association*, nº 4; vol. 45: p. 1019 – 1031.

BAIRD, A.J. & HORN, D.P. 1996. Monitoring and modeling groundwater behavior in sandy beaches. *Journal of Coastal Research*. 12(3). P. 630-640.

BAITELLI, R.; CORREA, I.C.S.; TOLDO JR., E.E.; MARTINS, L.R.S.; WESCHENFELDER, J. & AYUP-ZOUAIN, R.N. 2009. Sistema Lagunar: Síntese dos conhecimentos sobre a Lagoa dos Patos. In: *50 anos de Geologia*. UFRGS: p. 317 – 325.

BARBOZA, E.G. 1999. Terraços da margem leste da Laguna dos Patos, litoral médio do Rio Grande do Sul: estratigrafia e evolução holocênica. *Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Geociências*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 154 p.

BARBOZA, E.G.; TOLDO JR, E.E.; TOMAZELLI, L.J.; DILLENBURG, S.R. & AYUP-ZOUAIN, R.N. 2006. Stratigraphic and holocenic evolution of the submerged platform of the eastern margin of the Lagoa dos Patos Lagoon, RS. *Journal of Coastal Research*. Special Issue 39: p. 266 – 269.

BEARD, D.C. & WEYL, P.K. 1973. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand. *The American Association of Petroleum Geologist Bulletin*. 57(2): p. 349-369.

BERNABEU, A.M.; LA FUENTE, M.N.; REY, D; RUBIO, B.; VILAS, F. MEDINA, R.; GONZÁLES, M.E. 2006. Beach morphodynamics forcements in oiled shorelines: coupled physical and chemical processes during and after fuel burial. *Marine Pollution Bulletin*, nº 52. P. 1156- 1168.

BIGARELLA, J.J; HARTKOPF, C.C.; SOBANSKI, A. & TREVISAN, N. 1955. Textura superficial dos grãos em areias e arenitos. *Arquivos de Biologia e Tecnologia*, x: 253-275.

BRASIL, 2000. *Lei Nº 9.966*, de 28 de abril de 2000. Dispõe sobre a prevenção, o controle e a fiscalização da poluição causada por lançamento de óleo e outras substâncias nocivas ou perigosas em águas sob jurisdição nacional e dá outras providências.

BRASIL, 2001. *Resolução Nº 293*, 12 de dezembro de 2001. Dispõe sobre o conteúdo mínimo do Plano de Emergência Individual para incidentes de poluição por óleo originados em portos organizados, instalações portuárias ou terminais, dutos, plataformas, bem como suas respectivas instalações de apoio, e orienta a sua elaboração.

BRASIL, 2003. *Decreto Nº 4.871* de 6 de novembro de 2003. Dispõe sobre a instituição dos Planos de Áreas para o combate à poluição por óleo em águas sob jurisdição nacional e dá outras providências.

BRASIL, 2008. *Resolução Nº 398*, de 11 de junho de 2008. Dispõe sobre o conteúdo mínimo do Plano de Emergência Individual para incidentes de poluição por óleo em águas sob jurisdição nacional, originados em portos organizados, instalações portuárias, terminais, dutos, sondas terrestres, plataformas e suas instalações de apoio, refinarias, estaleiros, marinas, clubes náuticos e instalações similares, e orienta a sua elaboração. Publicada no DOU nº 111, de 12 de junho de 2008, Seção 1, p. 101-104.

CABRAL, J.; KOIDE, S.; SIMÕES, S. & MONTENEGRO, S. 2000. Recursos Hidricos Subterrâneos. In: COLLISCHONN, W. & DORNELLES, F. *Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas*. Porto Alegre. Ed. ABRH, V.1: 237-277

CAICEDO, R.G.M.N.O.L.; BASTOS NETO, A.C. & AZAMBUJA FILHO, N.C. 2010. Análise da vulnerabilidade do lençol freático à contaminação por hidrocarbonetos em cenário de vazamentos na área do oleoduto Orsul II, Refap-Copesul, RS. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. V. 15, nº1. P. 101 – 109.

CALLIARI, L.J.; TOZZI, H.A.M & KLEIN, A.H.F. 1998. Beach morphology and coastline erosion associated with storm surges in Southern Brazil – Rio Grande to Chuí. *Academia Brasileira de Ciências*: 231 – 247.

CAPUTO, H.P. 1988. *Mecânica dos solos e suas aplicações*. 6ª edição. Volume 1. Editora LTC. Rio de Janeiro. 244 p.

CASTANEDO, S. JUANES, J.A.; MEDINA, R.; PUENTE, AL.; FERNANDEZ, R.; OLABARRIETA, M. & POMBO, C. 2009. Oil spill vulnerability assessment integrating physical, biological and socio-economical aspects: Application to the Cantabrian coast (Bay of Biscay, Spain). *Journal of Environmental Management* 91. p.149-159.

CASTELÃO, R.M. & MÖLLER JR., O.O. 2003. Sobre a circulação tridimensional forçada por ventos na Lagoa dos Patos. *Atlântica*. 25 (2): p. 91-106.

CETESB, 2007. *Ambientes Costeiros contaminados por óleo: procedimentos de limpeza. manual de orientação*. Governo do Estado de São Paulo. Secretaria do Meio Ambiente. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. São Paulo. p. 120.

CHAPUIS, R.P. 2004. Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. *Can. Geotech. Journal*. 41: p. 787-795.

CHAPUIS, R.P. 2012a. Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review. *Bulletin Eng Geol Environ*. 71: 401 – 434.

CHAPUIS, R.P. 2012b. Estimating the *in situ* porosity of sandy soils sampled in boreholes. *Engineering Geology*. 141-142: p. 57 – 64.

COSTI, J. 2008. Influência das características morfodinâmicas das praias arenosas oceânicas do RS na penetração e persistência do petróleo nos sedimentos. *Monografia* (Graduação em Oceanologia) – Instituto de Oceanografia. Universidade Federal do Rio Grande/FURG. Rio Grande, 58 p.

COSTI, J. & CALLIARI, L.J. 2008. Estimativa do volume sedimentar potencialmente contaminado em casos de derrame de óleo em condições de verão para praias arenosas do Rio Grande do Sul. In: RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE. *Anais...* Rio de Janeiro, 8 p.

DARCY, H. 1856. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Victor Dalmont, Paris.

DAS, B.M. 2012. *Fundamentos de engenharia geotécnica*. Ed. Cengage Learning. Tradução da 7ª edição norte americana. São Paulo.

DELANEY, P. 1965. Fisiografia e geologia de superfície da planície costeira do Rio Grande do Sul. *Publicação Especial da Escola de Geologia* de Porto Alegre. V. 6: 105 p.

DEMORE, J.P. 2001. Aspectos sedimentares do estuário da Lagoa dos Patos e sua interação com a poluição por petróleo: subsídios para um plano de contingência. *Monografia* (Graduação em Oceanografia) – Instituto de Oceanografia. Universidade Federal do Rio Grande/FURG. Rio Grande, 52 p.

DILLENBURG, S.R.; TOMAZELLI, L.J. & BARBOZA, E.G. 2004. Barrier evolution and placer formation at Bujuru, southern Brazil. *Marine Geology*. 203. p. 43-56.

DNAEE (Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica), 1983. Mecânica de Correntes do Guaíba. Ministério de Minas e Energia. *Relatório Síntese*.

DOMENICO, P.A. & SCHWARTZ, F.W. 1990. *Physical and chemical hydrogeology*. John Wiley & Sons. EUA. 822 p.

FOLK, R.L. & WARD, W.C. 1957. Brazor river bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*. v 27, nº1, p. 3-26

FORTUNATO, I. & FORTUNATO NETO, J. 2012. Risco ambiental à luz dos princípios da precaução e da prevenção. In: GUIMARÃES, S.T.L. *et al* (Orgs). *Gestão de Áreas de Riscos e Desastres Ambientais*. 1ª edição. IGCE/UNESP/RIO CLARO, Rio Claro. p. 12-31.

FUSSEL, D.R.; GÖDJEN, H.; HAYWARD, P.; LILIE, R.H. & MARCO, A. 1981. *Revised inland oil spill clean-up manual*. In: CONCAWE. The Hague (Netherlands). 149 p.

GANDRA, M.S. 2005. Efeitos do petróleo sobre a associação de macroinvertebrados bentônicos de praias arenosas do extremo sul do Brasil. *Dissertação* (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica. Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande/FURG. Rio Grande, RS. P. 86.

GILBERT, E.R.; CAMARGO, M.G. & SANDRINI-NETO, L. 2014. rysgran: Grain size analysis, textural classifications and distribution of unconsolidated sediments. *R package version 2.1.0*. <https://CRAN.R-project.org/package=rysgran>.

GLUYAS, J.G. & SWARBRICK, R.E. 2013. *Petroleum Geoscience*. Ed. John Wiley & Sons.

GONG, Y.; ZHAO, X.; CAI, Z.; O'REILLY, S.E.; HAO, X. & ZHAO, D. 2014. A review of oil, dispersed oil and sediment interactions in the aquatic environment: Influence of the fate, transport and remediation of oil spills. *Marine Pollution Bulletin*, nº 79. P. 16-33.

GUNDLACH, E. & HAYES, M.O. 1978. Vulnerability of costal environments to oil spill impacts. *Marine Technology Society Journal*, v.12, n.4, p. 18-27.

GUNDLACH, E.R.; FINKELSTEIN, K.J. & SADD, J.L. 1981. Impact and persistence of Ixtoc I oil on the South Texas coast. In: INTERNATIONAL OIL SPILL CONFERENCE. *Anais...* American Petroleum Institute: p. 477 – 485.

HALMEMIES, S.; GRÖNDAHL, S.; NENONEN, K. & TUHKANEN, T. 2003. Estimation of the time periods and processes for penetration of selected spilled oils and fuels in different soils in the laboratory. *Spill Science & Technology Bulletin*: vol. 8 (5-6): p. 451 – 465.

HAYES, M.O. & MICHEL, J. 1999. Factors determining the long-term persistence of Exxon Valdez oil in gravel beaches. *Marine Pollution Bulletin*: vol. 38 (2): p. 92-101.

HAYES, M.O.; MICHEL, J. MONTELLO, T.M.; AURAND, D.V.; AL-MANSI, A.M.; AL-MOAMEN, A.H.; SAUER, T.C. & THAYER, G.W. 1993. Distribution and weathering of shoreline oil one year after the Gulf War oil spill. *Marine Pollution Bulletin*. vol. 27. P. 135-142.

HAZEN, A. 1911. Discussion of “Dams on sand formations” by A.C. Koenig. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. 73: p. 199-203.

HOEFEL, F.G. 1998. *Morfodinâmica de praias arenosas oceânicas: uma revisão bibliográfica*. Editora da Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, 93 p.

IBAMA. 2014. *Relatório de Acidentes Ambientais*. IBAMA. 31 p.

KOMAR, P.D. 1998. *Beach processes and sedimentation*. 2ª edição. Editora Prentice Hall, New Jersey: 429 p.

KOTYAKHOV, F.I. 1949. Relationship between physical parameters of sandstones. *Neft Khoz*. V.12: p. 29 – 32.

KRUMBEIN, W.C. 1941. Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 11, nº 2: 64-72.

LYRA, M.M. 1997. Dano Ambiental. *Revista de Direito Ambiental*. São Paulo. v.8 p. 49 – 83.

MACHADO JR, V.C. 2015. Utilização de técnicas de análise multicritério para a elaboração de Cartas de Sensibilidade Ambiental ao Óleo (Cartas SÃO) na margem oeste da Lagoa dos Patos- RS. *Monografia* (Graduação em Geografia). Universidade Federal do Rio Grande/FURG. Rio Grande, RS. P. 50.

MARINHO, C. 2015. Integração de parâmetros geomorfológicos e biológicos no desenvolvimento de uma proposta de Índice de Sensibilidade do Litoral (ISL). *Dissertação* (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica. Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande/FURG. Rio Grande, RS. P. 114.



MARQUES, V.C. & NICOLODI, J.L. 2015. Análise sedimentológica na definição de sensibilidade ao óleo na Lagoa dos Patos e Lago Guaíba, RS.

MARQUES, W.C. & MÖLLER, O.O. 2008. Variabilidade temporal em longo período da descarga fluvial e níveis de água da Lagoa dos Patos, Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. V. 13, nº3: p. 155 – 163.

MARTINS, I.R.; VILLWOCK, J.A.; MARTINS, L.R. & BENVENUTI, C.E. 1989. The Lagoa dos Patos Estuarine Ecosystem (RS, Brasil). *Pesquisas*. Porto Alegre, v.3: p. 5 – 44.

MARTINS, L.R., 1967. Aspectos texturais e deposicionais dos sedimentos praias e eólicos da planície costeira do Rio Grande do Sul. *Publicação Especial*, Escola de Geologia UFRGS, Porto Alegre. v. 13, p. 102

MARTINS, K.A. 2013. Definição de ambientes quanto ao grau de exposição à energia hidrodinâmica no Lago Guaíba e Lagoa dos Patos no contexto do Índice de Sensibilidade Ambiental do Litoral (ISL). *Monografia* (Graduação em Oceanologia). Universidade Federal do Rio Grande/FURG, Rio Grande. p. 59.

MATOS, M.P. & LIMA-GUIMARÃES, S.T. 2012. A percepção ambiental em planos de emergência: uma proposta para os estudos de sensibilidade ambiental a derrames de óleo. In: GUIMARÃES, S.T.L. *et al* (Orgs). *Gestão de Áreas de Riscos e Desastres Ambientais*. 1ª edição. IGCE/UNESP/RIO CLARO, Rio Claro. p. 121-150.

McLAREN, P. 1985. Behavior of diesel fuel on a high energy beach. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 16 (5): p. 191-196.

MENEGAT, R.; PORTO, M.L.; CARRARO, C.C. & FERNANDES, L.A.D. 1999. *Atlas ambiental de Porto Alegre*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre. p. 73 – 78.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA, 2007a Atlas de sensibilidade ambiental ao óleo da Bacia Marítima de Santos. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental. 133 p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA, 2007b. *Especificações e normas técnicas para elaboração de cartas de sensibilidade ambiental para derramamentos de óleo*. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental, Gerência de Qualidade. 107 p.

MÖLLER JR, O.O.; CASTAING, P.; SALOMON, J-C. & LAZURE, P. 2001. The influence of local and non-local forcing effects on the subtidal circulation of Patos Lagoon. *Estuaries*. V. 24(2): p. 297-311.

MOTTA, V. 1969. Relatório-diagnóstico sobre a melhoria e o aprofundamento do acesso pela Barra de Rio Grande. *Instituto de Pesquisas Hidráulicas*, UFRGS, Porto Alegre.

MUNARO, P. 1994. Geologia e mineralogia do depósito de minerais pesados de Bojuru, RS. *Dissertação* (Mestrado em Geociências) - Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 96 p.

NAVFAC. 1974. *Soil mechanics, foundations, and earth structures*. Naval Facilities Engineering Command design manual DM7. U.S. Government Printing Office. Washington, D.C.

NESTINGEN, R.S. 2007. The comparison of infiltration devices and modification of the Philip-Dunne permeameter for the assessment of rain gardens. *Dissertação* (Master of Science) – Graduate School, University of Minnesota. Minneapolis, 58 p.

NICOLODI, J.L. 2007. O padrão de ondas no Lago Guaíba e sua influência nos processos de sedimentação. *Tese* (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Geociências. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, 195 p.

NICOLODI, J.L.; TOLDO JR. E.E. & FARINA, L. 2010. Dinâmica e ressuspensão por ondas no Lago Guaíba (RS, Brasil) e implicações nos locais de captação de água para abastecimento humano. *Pesquisas em Geociências*, 37(1): p. 25 – 39.

NICOLODI, J.L. 2015. Mapeamento de sensibilidade ao óleo da bacia marítima de Pelotas. In: XV CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO – ABEQUA. *Anais...* Imbé, RS. 2 p.

NOBRE, L.C.; CAVALCANTI, M.A.G.; NOBRE, P.; KAYANO, M.T.; RAO, V.B.; BONATTI, J.P.; SATYAMURTI, P.; UVO, C.B. & COHEN, J.C. 1986. Aspectos da climatologia dinâmica do Brasil. *Climanálise*, número especial.

NOAA, 1992. An introduction to coastal habitats and biological resources for oil spill response. *National Oceanic and Atmospheric Administration*. Seattle, Washington.

OLIVEIRA, E.B. 2014. Determinação da influência de sangradouros na sensibilidade ao óleo das praias arenosas do RS. *Monografia* (Graduação em Oceanologia). Instituto de Oceanografia. Universidade Federal de Rio Grande/FURG, Rio Grande. p.64.

OLIVEIRA, F.A.M. & VINZON, S.B. 2003. Dinâmica do escoamento na face da praia. In: IX CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO. *Anais...* Recife. P.3.

OWENS, E.H. 1988. Estimating and quantifying oil contamination on the shoreline. *Marine Pollution Bulletin*. Vol. 18, nº 3. P. 110-118.

OWENS, E.H. 2002. Response strategies for spills on land. *Spill Science & Technology Bulletin*. Vol.7. p. 115-117

PAISANI, J.C. 2005. Análise morfométrica e de textura superficial de grãos utilizada na identificação de litofácies eólica e de dissipação em rampa arenosa/dissipação: o caso da Praia Mole (Ilha de Santa Catarina). *Geosul*, v. 20, nº 39: p. 105 – 118.

PEREIRA, P.S. 2005. Variabilidade da orla oceânica do Rio Grande do Sul e suas implicações na elaboração de planos de contingência: aspectos morfodinâmicos, sedimentológicos e geo-morfológicos. *Dissertação* (Mestrado em Oceanografia Geológica) – Curso de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica. Universidade Federal do Rio Grande/FURG, Rio Grande. 161 p.

PEREIRA, P.S. & CALLIARI, L.J. 2005. Permeabilidade das praias oceânicas do Rio Grande do Sul (RS) em relação a eventuais derrames de óleo. In: III CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS. *Anais...* Salvador. p.6.

PEREIRA, C.M.; WESCHENFELDER, J. & CORRÊA, I.C.S. 2009. Reconhecimento e mapeamento de fácies sísmicas nos pontais arenosos da lagoa dos Patos, RS, Brasil. *Pesquisas em Geociências*. 36 (1): p. 23-35.

PETROBRÁS, 2006. *Manual de avaliação de óleo em linha de costa*. Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello (CENPES). Gerência de Avaliação de Impacto e Monitoramento Ambiental. Rio de Janeiro. P. 90.

PETROBRÁS, 2007. *Mapas de sensibilidade ambiental ao derrame de óleo: ambientes costeiros, estuarinos e fluviais*. 2ª edição. Rio de Janeiro. p. 170.

PHILIP, J.R. 1993. Approximate analysis of falling-head lined borehole permeameter. *Water Resources Research*, 29: p. 3763 – 3768.

PHLEGER, F.B. 1981. A review of some general features of coastal lagoons. In: Unesco Technical Papers in Marine Science. *Coastal lagoon research, present and future*. Beaufort, NC. UNESCO-IABO. 70 p.

PRYOR, W.A. 1973. Permeability-porosity patterns and variations in some Holocene sand bodies. *AAPG Bulletin*. 57.1: p. 162-189.

R CORE TEAM. 2016. R: A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>.

REBOITA, M. 2001. Normais climatológicas provisórias de Rio Grande, RS, no período de 1991 a 2000. *Monografia* (Graduação em Geografia). Universidade Federal do Rio Grande/FURG, Rio Grande. 121 p.

RIO GRANDE DO SUL, 2002. *Atlas eólico do Rio Grande do Sul*. Secretaria de Energia Minas e Comunicações. Porto Alegre. 70 p.

RITTENHOUSE, G. 1943. A visual method of estimating two-dimensional sphericity. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 13, nº 2: p. 79-81.

ROCHA, C.; FOSTER, S.; KONING, E. & EPPING, E. 2005. High-resolution permeability determination and two-dimensional porewater flow in sandy sediment. *Limnology and Oceanography: Methods*. 3: p. 10 – 23.

RÓDIO, S.A. 1965. *Measures des permeabilities en place*. S.I: Cooperation Technique A.S.T.E.F., Stage de Perfectionnement, Geoconseil.

RODRIGUEZ, T.T.; WEISS, L.A.; TEIXEIRA, R.S. & BRANCO, C.J.M.C. 2015. Permeabilidade de solo laterítico por diferentes métodos. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, Vol. 36 (2): p. 17-32.

ROSAS, J.; LOPES, O.; MISSIMER, T.M.; COULIBALY, K.M.; DEHWAH, A.H.A.; SESLER, K.; LUJAN, L.R. & MANTILLA, D. 2014. Determination of hydraulic conductivity from grain-size distribution for different depositional environments. *Groundwater*. Vol. 52, nº3: p. 399 – 413.

ROWLAND, D.K. LINDLEY, A.P.; HALL, G.P.; ROSSAL, M.J.; WILSON, D.R.; BENHAM, D.G.; HARRISON, A.F. & DANIELS, R.E. 2000. Effects of beach sand properties, temperature and rainfall on the degradation rates of oil in buried oil/beach sand mixtures. *Environmental Pollution*. N. 109, P. 109 – 118.

SARAIVA, J.M.B.; BEDRAN, C. & CARNEIRO, C. 2003. Monitoring of storm surges on Cassino Beach. *Journal of Coastal Research*. 35 (SI). P: 323-331.

SCHERPINSKI, C.; URIBE-OPAZO, M.A.; VILAS BOAS, M.A.; SAMPAIO, S.C. & JOHANN, J.A. 2010. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da infiltração da água no solo. *Acta Scientiarum Agronomy*. Maringá, v. 32, nº1, p. 7-13.

SELLEY, R.C. 1998. *Elements of Petroleum Geology*. 2ª edição. Londres: Academic Press. 470 p.

SHAHABI, A.A.; DAS, B.M; TARQUIN, A.J. 1984. An empirical relation for coefficient of permeability of sand. In: FOURTH AUSTRALIA-NEW ZEALAND CONFERENCE ON GEOMECHANICS PERTH. *Anais...* Australia: p. 54 – 57.

SOUZA PINTO, C. 2000. *Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas*. São Paulo: Oficina de Textos. 247 p.

STERN, A.G. 2007. Parâmetros texturais de sedimentos para elaboração de cartas de sensibilidade ambiental ao derramamento de óleo Cartas SAO. *Dissertação* (Mestrado) – Instituto de Geociências: Universidade de São Paulo/USP, São Paulo. 103 p.

STRAIN, P.M. 1986. The persistence and mobility of a light crude oil in a sandy beach. *Marine Environmental Research*. 19: p. 49 – 76.

SUGUIO, K. 1980. *Rochas Sedimentares*. Ed. Edgard Blücher. São Paulo. 500 p.

TOLDO JR., E.E. 1994. Sedimentação, predição do padrão de ondas e dinâmica sedimentar da antepraia e zona de surfe do sistema lagunar da Lagoa dos Patos. *Tese* (Doutorado). Programa de Pós Graduação em Geociências, Instituto de Geociências – UFRGS. 143 p.

TOLDO JR, E.E. & ALMEIDA, L.E.S.B. 2009. *Rio Guaíba*. Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica. UFRGS, 7 p.

TOLDO JR., E.E.; ALMEIDA, L.E.S.B.; CORRÊA, I.C.S.; FERREIRA, E.R. & GRUBER, N.L.S. 2006. Wave prediction along Lagoa do Patos coastline, southern Brazil. *Atlântica*. 28 (2): 87-95.

TOMAZELLI, L.J. 1985. Contribuição ao conhecimento das fácies de ambiente praias a partir de elementos do Pleistoceno costeiro do Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA. *Anais...* Florianópolis, SC. p. 325-338.

TOMAZELLI, L.J. & VILLWOCK, J.A. 1991. Geologia do sistema lagunar holocênico do litoral norte do Rio Grande do Sul. *Pesquisas*, 18: p. 13-24.

TOMAZELLI, L.J. & VILLWOCK, J.A. 1992. Considerações sobre o ambiente praias e a deriva litorânea de sedimentos ao longo do litoral norte do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 19 (1): 3-12.

TOMAZELLI, L.J. & VILLWOCK, J.A. 2000. O Cenozóico do Rio Grande do Sul: Geologia da planície costeira. p. 375-406. In: Holz, M & DeRos, L.F. eds. *Geologia do Rio Grande do Sul*. Edição CIGO/UFRGS, Porto Alegre, nº de páginas.

TOMAZELLI, L.J.; DILLENBURG, S.R. & VILLWOCK, J.A. 2000. Late quaternary geological history of Rio Grande do Sul coastal plain, Southern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*. 30(3): p. 474 – 476.

TRIOLA, M.F. 2005. *Introdução a Estatística*. 9ª edição. Editora LTC. Rio de Janeiro.

TSOUK, E.; AMIR, S. & GOLDSMITH, V. 1985. Natural self-cleaning of oil polluted beaches by waves. *Marine Pollution Bulletin*. 16(1): P. 11- 19.

TURNER, I.L. & NIELSEN, P. 1997. Rapid water table fluctuations within the beach face: implications for swash zone sediment mobility? *Coastal Engineering*, Vol. 32: p. 45 - 59.

VIEIRA, H.; CALLIARI, L.J.; OLIVEIRA, G.P. 2004. O estudo do impacto da circulação de veículos em praias arenosas através de parâmetros físicos: um estudo de caso. *Engevista*. V. 6, nº3: p. 54-63.

VILLWOCK, J.A. 1972. Contribuição à geologia do Holoceno da Província Costeira do Rio Grande do Sul. *Dissertação* (Mestrado em Geociências). Porto Alegre, UFRGS. 113 p.

VILLWOCK, J.A. 1984. Geology of the coastal province of Rio Grande do Sul, Southern Brazil. A synthesis. *Pesquisas*, 16: p.5-49.

VILLWOCK, J.A.; DEHNHARDT, E.A.; LOSS, E.L.; TOMAZELLI, L.J. & HOFMEISTER, T. 1979. Concentraciones de arenas negras a lo largo de la costa de Rio Grande do Sul, Brasil. Memórias. In: SEMINARIO SOBRE ECOLOGIA BENTONICA Y SEDIMENTACION DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DEL ATLANTICO SUR. *Anais...* Montevideo, UNESCO. P. 405-414.

VILLWOCK, J.A.; TOMAZELLI, L.J.; LOSS, E.L.; DEHNHARDT, E.A.; HORN, N.O.; BACHI, FL.A. & DEHNHARDT, B.A. 1986. Geology of the Rio Grande do Sul Coastal Province. In: Rabassa, J. ed. *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*. A.A. Balkema, Rotterdam. 4: 79-97.

VILLWOCK, J.A. & TOMAZELLI, L.J. 1995. Geologia Costeira do Rio Grande do Sul. *Notas Técnicas*, Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, UFRGS. Porto Alegre, 8: 1-45.

VILLWOCK, J.A. & TOMAZELLI, L.J. 1998. Holocene coastal evolution in Rio Grande do Sul, Brazil. *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*, 11: 283-296.


WALLY, M.K. 2015. Índice de Sensibilidade ao Óleo em ambientes fluviais aplicado a região do pólo petroquímico de triunfo e do Delta do Jacuí, RS. *Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica*. Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande/FURG. Rio Grande, RS. P. 93.

WENTWORTH, C.K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*. 30: 377-392.

WRIGHT, L.D. & SHORT, A.D. 1984. Morphodynamic variability of surf zone and beaches: a synthesis. *Marine Geology*, 56: 93-118.

## 8. ANEXOS

### Anexo 1



Processo n.º 2792-05.67 / 15-2
-----------------------------------

AUTGER N.º 127 / 2015-DL
--------------------------

### AUTORIZAÇÃO GERAL

A Fundação Estadual de Proteção Ambiental, criada pela Lei Estadual n.º 9.077 de 04/06/90, registrada no Ofício do Registro Oficial em 01/02/91, e com seu Estatuto aprovados pelo Decreto n.º 51.761, de 26/08/14, no uso das atribuições que lhe confere a Lei n.º 6.938, de 31/08/81, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, regulamentada pelo Decreto n.º 99.274, de 06/06/90 e com base nos autos do processo administrativo n.º 2792-05.67/15-2 AUTORIZA o:

**I - Identificação:**

<b>EMPREENDEDOR:</b>	<b>200522 - ELAINE BARONI DE OLIVEIRA</b>
CPF / CNPJ:	088.545.796-02
ENDEREÇO:	RUA JOAO SALOMAO, 11 BAIRRO CIDADE NOVA 96211-190 RIO GRANDE/ RS
<b>EMPREENDIMENTO:</b>	<b>217944 - PESQUISA - ENSAIOS CONTROLADOS DE PERMEABILIDADE</b>
LOCALIZAÇÃO:	1 - PRAIA DO CASSINO, MUNICÍPIO DE RIO GRANDE 2 - PRAIA DE ARAMBARÉ, MUNICÍPIO DE ARAMBARÉ 3 - PRAIA DO PONTAL DO CRISTÓVÃO PEREIRA, MUNICÍPIO DE MOSTARDAS 4 - PRAIA DE BARRA DO RIBEIRO, MUNICÍPIO DE BARRA DO RIBEIRO 5 - PRAIA DE IPANEMA, MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE COORDENADAS GEOGRÁFICAS (datum SIRGAS-2000) 1 - LAT. -32.209641° E LONG. -52.179965° 2 - LAT. -30.891665° E LONG. -51.480334° 3 - LAT. -31.078505° E LONG. -51.175022° 4 - LAT. -30.299028° E LONG. -51.297503° 5 - LAT. -30.137737° E LONG. -51.230440°

**A PROMOVER À ATIVIDADE DE: ATIVIDADE OUTRA COM RAMO NAO CLASSIFICADO (PESQUISA)**

<b>RAMO DE ATIVIDADE:</b>	9999,80
<b>ÁREA DO TERRENO EM m²:</b>	64,00

**II - Condições e Restrições:**

1. **Esta Autorização não será renovada.**
2. **Quanto ao empreendimento:**
  - 2.1 Trata-se de pesquisa acadêmica, envolvendo ensaios controlados de permeabilidade de petróleo cru em sedimentos, a serem realizados em praias oceânicas (Cassino), lagunares (Pontal do Cristóvão Pereira e Arambaré) e lacustres (Barra do Ribeiro e Ipanema);
3. **Quanto à localização:**
  - 3.1 Os ensaios serão conduzidos nas praias do Cassino, em Rio Grande, do Pontal do Cristóvão Pereira, em Mostardas, em Arambaré, em Barra do Ribeiro e de Ipanema, em Porto Alegre;
  - 3.2 A malha de ensaio será composta de 9 (nove) a 10 (dez) pontos, distribuídos no pós-praia, na face de praia e no campo de dunas (quando presente), totalizando uma área total média de 64 m² por praia;
4. **Quanto ao uso do solo/condições geológicas:**

AG N.º 127 / 2015-DL
Identificador de Documento 684954
Folha 1/2

Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler/RS  
Avenida Borges de Medeiros, 261 - Fone (51) 3288-9400 - FAX: (51) 3288-9526 - CEP 90020-021 - Porto Alegre - RS - Brasil  
[www.fepam.rs.gov.br](http://www.fepam.rs.gov.br) / [dl@fepam.rs.gov.br](mailto:dl@fepam.rs.gov.br)



Processo n.º  
2792-05.67 / 15-2

- 4.1- Trata-se de praias arenosas, de uso recreativo à população;
5. **Quanto às questões biológicas/biota:**
- 5.1- Os ensaios não poderão ser realizados em locais que atinjam a fauna e a flora, protegidas por lei;
6. **Quanto à Preservação e Conservação Ambiental:**
- 6.1- Está autorizada a intervenção em dunas (APP), exclusivamente, para instalação de permeâmetros (cilindros de 45 cm de comprimento e 10 cm de diâmetro);
- 6.2- Após a realização dos ensaios, as cavas deverão ser preenchidas com areia do entorno, desde que livre de resíduos sólidos e contaminantes;
7. **Quanto aos Resíduos Sólidos:**
- 7.1- Os sedimentos praias contaminados com óleo deverão ser extraídos armazenados em tambores, sacos plásticos de alta densidade ou *big-bags*, lacrados e com conteúdo identificado;
- 7.2- Os tambores deverão ser transportados imediatamente após a execução dos ensaios para o Laboratório de Oceanografia Geológica da Universidade Federal do Rio Grande – FURG;
8. **Quanto aos Riscos Ambientais:**
- 8.1- Em caso de incidente envolvendo queima ou derramamento de óleo, executar medidas de controle (ações de emergência);
- 8.2- Manter ferramentas (rodos de madeira, pás, enxadas e baldes), materiais de apoio (absorventes naturais) e equipamentos de segurança (extintores de incêndio) no local;
- 8.3- A Fepam deverá ser informada, imediatamente após o controle da ocorrência, através de Relatório Técnico ilustrado;
9. **Quanto à Publicidade da Licença:**
- 9.1- Fixar, no acesso às áreas de estudo, placas para divulgação da pesquisa e da presente Autorização Geral. A placa deverá ser instalada uma semana antes da data de execução dos ensaios e retirada imediatamente após o término dos trabalhos em cada local;
- 9.2- Cópia desta Autorização deverá ser disponibilizada na hora e no local de execução dos estudos.

Havendo alteração nos atos constitutivos, cópia da mesma deverá ser apresentada, imediatamente, à FEPAM, sob pena do empreendedor acima identificado continuar com a responsabilidade sobre a atividade/empreendimento licenciado por este documento.

Este documento licenciatório é válido para as condições acima, porém perderá sua validade caso os dados fornecidos pelo empreendedor não correspondam à realidade ou algum prazo estabelecido nas condições acima seja descumprido.

Esta Autorização não dispensa nem substitui quaisquer alvarás ou certidões de qualquer natureza exigidos pela legislação Federal, Estadual ou Municipal, nem exclui as demais licenças ambientais.

Esta Autorização deverá estar disponível no local da atividade licenciada para efeito de fiscalização.

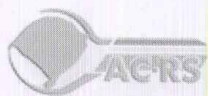
Data de emissão: Porto Alegre, 22 de abril de 2015.

Este documento licenciatório é válido para as condições acima no período de 22/04/2015 a 21/04/2016.

Este documento licenciatório foi certificado por assinatura digital, processo eletrônico baseado em sistema criptográfico assimétrico, assinado eletronicamente por chave privada, garantida integridade de seu conteúdo e está à disposição na página [www.fepam.rs.gov.br](http://www.fepam.rs.gov.br).

fepam@.





Nome do arquivo: 684954.pdf  
Autenticidade: Documento Integro



DOCUMENTO ASSINADO POR	DATA	CPF/CNPJ	VERIFICADOR
Rafael Volquind	24/04/2015 18:57:19 GMT-03:00	68610998053	Assinatura válida

Documento Assinado Digitalmente

Documento eletrônico assinado digitalmente conforme MP nº 2.200-2/2001 de 24/08/2001, que institui a infraestrutura de Chaves Públicas Brasileira - ICP-Brasil.

## Anexo 2



Informo para os devidos fins que, foi disponibilizada a Sr<sup>a</sup> Elaine Oliveira, para fins de pesquisa, a mistura de petróleos com as seguintes informações de identificação:

Origem: 01T  
Data: 02/12/2014  
Hora: 14:40

A amostra disponibilizada possui as seguintes propriedades, determinadas por regra de cálculo de mistura:

°API: 33,54  
Acidez: 0,29 mg KOH/g  
Densidade: 0,8549  
Enxofre: 0,25% massa  
Níquel: 3,59 mg/kg  
Vanádio: 5,54 mg/kg

Canoas, 16 de junho de 2015

Priscila Perin Guastalli

Química de Petróleo

REFAP/Qualidade de Produtos