



Universidade Federal do Rio Grande

Instituto de Oceanografia



Programa de Pós Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica

Contribuições ao estudo das variações morfossedimentares superficiais e estratigráficas da Praia dos Concheiros, RS.

Dissertação apresentada como pré-requisito
para obtenção de Título de Mestre em
Oceanografia Física, Química e Geológica
pela Universidade Federal do Rio Grande

André Luiz Araujo Damião

Orientador: Dr. João Luiz Nicolodi



ATA ESPECIAL P/DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO – 09/2015

Às quatorze horas do dia 10 de agosto do ano dois mil e quinze, na Sala 3107 – Pav. 3 - FURG/Carreiros, reuniu-se a Comissão Examinadora da Dissertação de **MESTRADO** do Acad. **ANDRÉ LUIZ ARAUJO DAMIÃO**, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. João Luiz Nicolodi - Orientador/Presidente – IO/FURG, Prof. Dr. Lauro Julio Calliari – IO /FURG, Prof. Dr. Ulisses Rocha Oliveira – ICHI/FURG, Prof. Dr. Miguel da Guia Albuquerque – IFRS. **Título: " CONTRIBUIÇÕES AO ESTUDO DAS VARIAÇÕES MORFO-SEDIMENTARES DA PRAIA DOS CONCHEIROS, RS, POR MEIO DA UTILIZAÇÃO DE IMAGEAMENTO DIGITAL E GPR"**. Dando início à reunião, a Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, , Profa. Dra. Elisa Helena L. Fernandes, agradeceu a presença de todos e fez a apresentação da Comissão Examinadora. Logo após esclareceu que a candidata terá um tempo de 45 a 60 min. para explanação do tema, e cada membro da Comissão, um máximo de 30 min. para perguntas. A seguir, passou à palavra ao candidato que apresentou o tema e respondeu às perguntas formuladas. Após ampla explanação a Comissão reuniu-se na Sala da Secretaria da Coordenação do Programa, para discussão do conceito a ser atribuído ao candidato. Durante este encontro ficou estabelecido o que segue: As sugestões de todos os membros da Banca Examinadora, que seguem em pareceres em anexo, foram aceitas pelo orientador/candidato para incorporação na versão final da Dissertação. Finalmente a Comissão Examinadora considerou o candidato **APROVADO**, por unanimidade. Nada mais havendo a tratar, foi lavrada a presente ata que após lida e aprovada, será assinada pela Comissão Examinadora, pela candidata e pelo Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica.

Prof. Dr. Lauro Julio Calliari

Prof. Dr. João Luiz Nicolodi
Presidente

Prof. Dr. Ulisses Rocha Oliveira

Prof. Dr. Miguel da Guia Albuquerque

Acad. André Luiz Araujo Damião

Composição da banca:

Prof. Dr João L. Nicolodi (orientador – IO FURG)

Prof. Dr. Lauro J. Calliari (IO-FURG)

Prof. Dr. Ulisses Rocha Oliveira (ICHI – FURG)

Prof. Dr. Miguel da Guia Albuquerque (IFRS)

Agradecimentos

Agradeço a Deus, por tudo o que ele fez, e que continua fazendo por mim.

Agradeço a minha família, que sempre me amou e que esteve sempre do meu lado em todos os momentos da minha vida. Obrigado pai pelos ensinamentos, por me ajudar nesse início de carreira e por corrigir o português (péssimo) da dissertação. Obrigado mãe pelo carinho, pelos ensinamentos e por sempre me guiar pro caminho do bem. Valeu Xande e Aninha pela amizade, pelas risadas, por servirem de exemplo de disciplina e por tudo que vocês já fizeram por mim.

Muito obrigado Alice, meu amor! Você é tudo pra mim!! Você me ajudou imensamente durante todos esses anos que nos conhecemos. Aturou minha bagunça e minhas chatices. Sem você eu não chegaria aqui. Vamos surfar muito na Austrália, se Deus quiser!. Te amo muito!! Pra sempre... A Kaya negrrinha também! Um salve pra Ferrari também hehe

Quero muito agradecer a todos que me ajudaram nas saídas de campo. Principalmente o Henrique Reynolds, vulgo Biro-Biro, que sempre era o primeiro a pilhar e o único que sabia usar a estação total. Brother fissurado no surf que nem eu! É nós mlk doido! Num faz mto tempo que o Deda foi embora...

Obrigado Sôr, o Fábio Paz Australiano, pela paciência de me ajudar no MATLAB, sem você com certeza o trabalho não ia sair assim.

Um grande abraço pra todos da Crowd Oceanográfica: Piero Sebastian Zica, Biri Durbidge, Bruno Tubelka Saantos, Juliano Wilson, Tropeço, Ace Bucha, Man, Rihel Tudor, Bahia Lemos e todos os outros... Irado pegar altas ondas e fazer altas trips com vocês. Iriiii!!

Um salve para os meus grandes amigos Paulin, Dieguinho e Gaúcho.

Queria agradecer a todos que compartilharam vários dos melhores momentos da minha vida nos Concheiros, pegando altas ondas, fazendo fogueira, altas rangaceiras, pescando, ou simplesmente curtindo a magia natural do pico!

Obrigado Nicolodi pela orientação. Obrigado Calliari pela co-orientação e por aceitar ser da banca novamente. Obrigado Miguel por disponibilizar o GPR e por aceitar ser da Banca. Obrigado Ulisses pela saída pra Santa e por aceitar ser da banca.

Muito obrigado Ricardo por ter me ajudado quando eu tava atolado na areia movediça e aberto as portas do seu santuário! Nunca vou esquecer! É nós Pastor!!

Não dá pra esquecer de agradecer à República Oriental del Uruguay!!! Uruguay es Natural!

JAH BLESS! Amo todos vocês

Resumo

A Praia dos Concheiros possui características únicas no Rio Grande do Sul. Sua composição sedimentológica e a morfologia resultante são notáveis quando comparada a praias adjacentes. Os depósitos de bioclastos presentes na face praial – que dão nome à praia – são distribuídos de forma descontínua e rítmica, mostrando algum tipo de dinâmica oscilatória, atuando no transporte e na deposição desses sedimentos. Este fato pode estar associado a forçantes com componentes longitudinais, como ondas marginais, ou a mecanismos de auto-organização, nos quais interações não-lineares e processos de *feedback* entre a hidrodinâmica, morfologia e sedimentologia acarretam a formação desses padrões rítmicos dos depósitos. A amostragem textural de forma automatizada por meio de imageamento digital se mostra um método muito eficaz, por ser rápido e de baixo custo, sem perder acurácia, permitindo assim uma cobertura de maior resolução espaço-temporal sem um grande aumento de esforço. Processos de transporte sedimentar que ocorrem na face praial, tanto na direção transversal quanto na longitudinal, deixam registrado suas assinaturas na estratigrafia. Portanto, para investigar a estrutura interna da praia, foi utilizado um GPR (*Ground-Penetrating-Radar*), um equipamento geofísico não-invasivo para análise de camadas da sub-superfície. Com base nos dados adquiridos utilizando esses métodos, foi dado um passo em direção a uma melhor compreensão dos fatores – por exemplo, migração da zona de *swash* e o agente eólico - *responsáveis* pela formação de estruturas sedimentares encontradas na área de estudo, como as laminações intercaladas de areia fina siliclástica e de cascalho biodetrítico. Os bioclastos depositados na face praial são a parte emersa de uma feição sedimentológica muito maior, que tem variações que ocorrem em várias escalas espaciais e temporais. Então, fica claro que um melhor entendimento dessa praia e do comportamento desses sedimentos biogênicos só tem a agregar conhecimento sobre diversos processos dinâmicos atuantes na zona costeira. Por todas essas características e por ser isolada geograficamente, a Praia dos Concheiros se configura como um laboratório de oceanografia costeira em escala real, onde vários estudos morfodinâmicos e paleoceanográficos podem e devem ser realizados.

Abstract

Concheiros Beach has unique characteristics in Rio Grande do Sul. Its sedimentological composition and resulting morphology are notable when compared to adjacent beaches. The bioclastic deposits present in the beach face – where the name of the beach comes from – are distributed in a discontinuous and rhythmic way, showing some kind of oscillatory dynamic acting in the transport and deposition of these sediments. This fact may be associated to forcings with alongshore components, like edge-waves, or with self-organization mechanisms, in which non-linear interaction and feedback processes between the hydrodynamic, morphology and sedimentology, leads to the formation of these rhythmic patterns in the deposits. Textural sampling in an automated manner using digital imagery is shown to be a very efficient method, because of its rapidity and low cost, without losing accuracy. Sedimentary transport processes that occur in the beach face, both in the cross-shore as in the alongshore direction, leave its signature recorded in the stratigraphy. Therefore, to investigate the internal structure of the beach, a GPR (Ground-Penetrating-Radar) was utilized, a non-invasive geophysical equipment that analyzes the layers in the sub-surface. Based on data acquired with these methods, a step was taken towards a better understanding of the factors – for example, swash zone migration and eolian agent - responsible for the formation of sedimentary structures found in the study site, like the intercalated laminations of fine siliclastic sand and biotrititic gravel. The bioclasts deposited in the beach face are the emerged portion of a much larger sedimentological feature that varies in many spatial and temporal scales. Hence, it is clear that a better understanding of this beach and the behavior of the biogenic sediments, comes to add knowledge about several dynamic processes acting on the coastal zone. Because of all these characteristics and because of its geographic isolation, Concheiros Beach configures a coastal oceanography lab in full scale, where many morphodynamic and paleoceanographic studies could and should be realized.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Índice	iv
Lista de Figuras	v
1. Introdução	1
Objetivo Geral	4
Objetivos específicos.....	4
2. Área de Estudo	5
2.1 Geologia e Sedimentologia	5
2.2 Climatologia Regional.....	8
2.3 Características Morfodinâmicas.....	9
3. Materiais e Métodos	13
3.1 Amostragem Textural.....	13
3.1.1 Conceito (Rubin, 2004).....	13
3.1.2 Validação do Método	18
3.1.3 Análise Fatorial	21
3.2 Medições Topográficas e Dados de Onda.....	23
3.3 GPR (Ground-Penetrating-Radar).....	23
4. Resultados e Discussão	26
4.1 Variação morfossedimentar superficial	26
4.2 Estratigrafia da sub-superfície praial.....	43
4.3 Padrões Rítmicos.....	48
5. Conclusões	55
Referências Bibliográficas	57
Anexo	61

Lista de Figuras

Figura 1: Perfil esquemático transversal aos sistemas deposicionais da Planície Costeira do Rio Grande do Sul com suas fácies sedimentares associadas_____	6
Figura 2: Distribuição da fácies bioclástica na plataforma continental da área de estudo, Uruguai e Argentina_____	7
Figura 3: Perfis sobrepostos e mudanças verticais para a praia dos Concheiros__	11
Figura 4: Parâmetros morfométricos para a Praia dos Concheiros_____	11
Figura 5: Quebra de onda do tipo mergulhante_____	12
Figura 6: Área de estudo. A seta verde indica onde foi realizada as amostragens sedimentares e topográficas._____	13
Figura 7: Imagem digital de grãos naturais numa resolução de 236 <i>pixels</i> por centímetro_____	16
Figura 8: - Curvas de autocorrelação para seis tamanhos de grãos peneirados__	17
Figura 9: Curvas de Autocorrelação para cada fração granulométrica _____	19
Tabela 1: TM (tamanho médio) das amostras peneiradas comparado ao TM utilizando o algoritmo_____	20
Figura 10: Gráficos de distribuição granulométrica das cinco amostras_____	21
Figura 11: Exemplos de amostras representativas de cada fator_____	23
Figura 12: Trajeto feito usando o GPR com antena de 200MHz_____	26
Figura 13: <u>Esquerda</u> : GPR acoplado atrás de um veículo 4x4 <u>Direita</u> : GPR com antena de 400MHz na região dos perfis, tracionado manualmente_____	26
Figura 14: Dados de onda, vento e maré para os dias de 13/10/14-18/10/14____	27
Figura 15: <u>Acima</u> : Topografia do dia 14/10/2014; <u>Abaixo</u> : topografia do mesmo dia com a localização dos pontos amostrais_____	28
Figura 16: Imagens da face praial, amostras sedimentares e curvas de autocorrelação para o dia 14/10/14_____	29
Figura 17: <u>Acima</u> : Curvas de Autocorrelação das dia 14/10; <u>Abaixo</u> : Gráfico de distribuição granulométricas das amostras do dia 14/10/14_____	30
Figura 18: <u>Acima</u> : Topografia do dia 15/10/2014; <u>Abaixo</u> : variação topográfica entre os dias 15/10 e 14/10_____	31

Figura 19: Pequenas cúspides formadas no dia 15/10/2014	32
Figura 20: <u>Acima</u> : Curvas de Autocorrelação das dia 15/10; <u>Abaixo</u> : Gráfico de distribuição granulométricas das amostras do dia 15/10	33
Figura 21: Escarpa na berma mostrando intercalações	34
Figura 22: <u>Acima</u> : Topografia do dia 17/10/2014; <u>Abaixo</u> : variação topográfica entre os dias 17/10 e 15/10	35
Figura 23: <u>Acima</u> : Curvas de Autocorrelação das dia 17/10; <u>Abaixo</u> : Gráfico de distribuição granulométricas das amostras do dia 17/10	36
Figura 24: Exemplo de amostra descartada: ponto 4C	37
Figura 25: Face praial no dia 17/10/2014 mostrando cascalho biodetrítico depositado ritmicamente	38
Figura 26: : <u>Acima</u> : Topografia do dia 18/10/2014; <u>Abaixo</u> : variação topográfica entre os dias 18/10 e 17/10	39
Figura 27: <u>Acima</u> : Curvas de Autocorrelação das dia 18/10; <u>Abaixo</u> : Gráfico de distribuição granulométricas das amostras do dia 18/10	40
Figura 28: Exemplo de imagem descartada: Ponto 3C	41
Figura 29: Imagem longitudinal de GPR com antena de 200MHz, localizada a 2km do hotel	44
Figura 30: Imagem de GPR de uma seção longitudinal utilizando antena de 200MHz localizada a 1.6km do hotel	45
Figura 31: Imagem longitudinal de GPR com antena de 200MHz, localizada a 0.8km do hotel	46
Figura 32: Imagem de GPR com antena de 200MHz, localizada na região onde foram feitos os perfis praias	47
Figura 33: Imagem longitudinal de GPR utilizando antena de 400MHz, na região onde foi feito os perfis topográficos.	48
Figura 34: Exemplos de feições da zona costeira da área de estudo que apresentam ritmicidade	49
Figura 35: Exemplos de variação longitudinal na composição sedimentar	51
Figura 36: Face praial da Praia dos Concheiros em 1994	53
Figura 37: Seção longitudinal da praia imageada utilizando GPR, com uma antena de 400MHz	54

1. Introdução

Por ser uma praia isolada e que possui características únicas na região, referentes a episódios marcantes na evolução geomorfológica, a Praia dos Concheiros se configura como uma região muito apropriada para se efetuar estudos paleogeográficos e morfodinâmicos. A presença de depósitos de bioclastos na parte emersa da praia (de onde vem seu nome) é como a ponta de um *iceberg*, sendo uma pequena parte de uma feição sedimentológica muito maior, servindo como um indicador de importantes processos e mecanismos morfodinâmicos atuantes em diversas escalas espaço-temporais.

O entendimento da evolução de longo prazo das praias em grandes escalas temporais coloca um importante desafio para pesquisadores. Não é claro como mecanismos que forçam a morfologia, como hidrodinâmica e processos de transporte sedimentar, afetam as praias nessas escalas. O problema é acentuado pela escassez de conjunto de dados para esses períodos. Com a ameaça de uma mudança climática iminente, um entendimento aprofundado e melhores ferramentas de previsões são cruciais, tanto para pesquisadores quanto para a sociedade.

A geomorfologia incorpora cada vez mais pesquisas interdisciplinares, reconhecendo a interligação de processos formadores de paisagem como geologia, hidrologia, biologia (de microbiologia à ecologia), dinâmica humana (de engenharia à economia e à sociologia), geoquímica e bioquímica. Na maioria dos ambientes e através de uma ampla variedade de escalas, morfologia e processos físicos de transporte sedimentar exibem acoplamento de duas vias com processos biológicos. O *feedback* resultante pode ter papel essencial em guiar a evolução paisagística e a resposta a mudanças das forçantes. O uso humano de terra e manipulações de engenharia tem efeitos substanciais na mudança morfológica, por meio de uma ampla variedade de escalas espaço-temporais. Pesquisadores estão começando a focar nesses acoplamentos de duas vias e *feedbacks*, trazendo à tona as ferramentas quantitativas de análises de sistemas complexos e de modelagem. Embora esses estudos estejam no início, há muito o que esperar para o futuro. A geomorfologia tem um papel essencial em uma nova ciência da superfície terrestre que não só responde questionamentos do passado e do presente, como para o futuro; e não só para cientistas, mas para a sociedade como um todo. (Murray *et al*, 2009)

As paisagens, e como elas mudam ao longo do tempo, fornecem o modelo onde a vida deve funcionar e ditam as atividades humanas e os ecossistemas que podem existir em um dado local. Paisagens íngremes e acidentadas limitam o desenvolvimento humano e da agricultura; paisagens costeiras suportam habitats de banhados e berçários que são cruciais para a vida marinha mundial. Além disso, sustentam uma variedade de atividades econômicas, industriais e agrícolas. A superfície terrestre exhibe alguns dos exemplos mais marcantes de fenômenos de auto-organização, com localizações espaço-temporais espontâneas, padrões e estruturas emergentes, padrões fractais e escala de lei de potência. Reconhecer a

possibilidade de cada um desses tipos de fenômenos reformula como interpretamos muito do que observamos e também prevemos o futuro. (Murray *et al*, 2009)

O comportamento morfológico da praia é importante por várias razões. Erosão e acreção da linha de costa em resposta a agentes dinâmicos é uma função do balanço sedimentar e um dos parâmetros mais importantes que deve ser previsto é o transporte transversal de sedimento. As altas velocidades e a concentração de sedimento em suspensão na zona de espraiamento da praia fazem dela uma fundamental peça do balanço geral de sedimento. (Butt e Russel, 2000)

A praia dos Concheiros é uma praia de composição bimodal, que alterna diferentes estágios praias e diferentes texturas superficiais sedimentares. Richmond e Sallenger (1984), estudando uma praia de sedimento bimodal, verificaram que, sob o mesmo fluxo, grãos de diferentes tamanhos podem mover-se em direções opostas, com grãos menores movendo na direção *offshore* e os maiores em direção *onshore*, acrescendo a zona de espraiamento inferior.

Fácies deposicionais são formadas pela interação de ondas, correntes e pelos fluxos da camada de fundo associados. Entender as relações entre as fácies praias e as condições que as formam são muito importantes para uma completa definição das características morfo-estratigráficas da praia, assim como pode indicar dinâmicas de onda e topografia no período de deposição (Short, 1984). Fácies stratigráficas nos permitem interpretar como se comporta determinada praia em relação aos agentes dinâmicos e, assim, nos permitem entender melhor sua mobilidade e suas variações morfológicas e texturais.

Sonu (1972) realizou um estudo em outra praia bimodal e verificou uma sequência de mudanças na textura da face praial durante ciclos de tempestade e as seguintes recuperações do perfil praial. De acordo com este autor, a passagem de tempestades resulta num aplainamento do perfil e uma face praial composta por sedimentos unimodais finos. Nos primeiros estágios da recomposição do perfil, um material mais grosso com distribuição unimodal aparecia na face praial inferior. Uma acreção continuada era acompanhada pela adição de material mais fino, resultando em uma composição fortemente bimodal. Areias finas eram o sedimento predominante da praia no estágio final de uma acreção bem desenvolvida.

Klein (1996) relata que não foi possível constatar se na praia dos Concheiros acontece essa sequência descrita por Sonu (1972), devido à falta de uma amostragem sedimentológica mais detalhada. Dessa forma, aquele autor coloca como recomendação para um futuro trabalho a verificação da ocorrência - ou não - dessa sequência de distribuição granulométrica. Esse autor ainda salienta a importância de estudos de características morfológicas e sedimentológicas de maior periodicidade e frequência para uma melhor elucidação dos processos responsáveis pela configuração de laminações plano-paralelas de sedimento fino intercalado com sedimentos grossos carbonáticos encontrados na região.

A Praia dos Concheiros distingue-se fortemente das demais praias do litoral sul-riograndense. Essa distinção deve-se a fatores como a granulometria e a

mineralogia dos sedimentos, com uma mistura de sedimentos terrígenos finos (areia quartzosa fina e média) junto com uma quantidade variável de sedimentos carbonáticos grosseiros (seixos, cascalho, areia muito grossa e areia grossa), dando a essa região uma composição bimodal, ou até mesmo polimodal de sedimentos (Araújo, 2002). A origem de sedimentos carbonáticos na praia é atribuída ao retrabalhamento pela hidrodinâmica atual de paleolinhas de praias afogadas pela transgressão holocênica e ao retrabalhamento dos depósitos biodetríticos concentrados nas cavas dos bancos arenosos lineares (Calliari & Klein, 1993 e 1995). Existe também a presença de sedimentos terrígenos grossos que são provenientes de depósitos fluviais dos paleocanais encontrados na antepraia e na plataforma continental (Figueiredo Jr, 1975; Calliari & Klein, 1993).

Essa composição bimodal de sedimentos faz com que esta praia apresente características morfológicas diferenciadas em relação às outras praias oceânicas do Rio Grande do Sul. A Praia dos Concheiros apresenta um perfil com uma declividade acentuada, um sistema de banco-cava bem definido e feições secundárias como cúspides praias bem formadas. Nota-se a presença de uma berma entre a face praias superior e o pós-praia e também de um degrau na face praias inferior (Klein, 1996).

Em cada um desses subambientes praias, podemos verificar diferentes características sedimentológicas, que variam em tamanho e composição do grão. De uma forma geral, o tamanho do grão aumenta da duna para a zona de arrebatção, sendo a berma um dos subambientes com maior percentagem de grosseiros. Esta zonação sedimentológica depende do processo dominante atuante em determinado subambiente. Na região do pós-praia e nas dunas, o agente dominante é o vento, enquanto na face praias, o *swash* predomina. Na zona de arrebatção, o processo de quebra das ondas e de outros fatores hidrodinâmicos definem a granulometria. Esses diferentes agentes dinâmicos e a interação entre eles produzem padrões de deposição característicos, com variações na seleção e na assimetria dos sedimentos. O estudo destes padrões visa ampliar o conhecimento dos processos deposicionais sedimentares em praias com este tipo de composição.

Os depósitos de cascalho carbonático biogênico são distribuídos em manchas de dimensões variadas, acarretando numa variação longitudinal na composição sedimentológica, morfológica e, portanto, morfodinâmica da praia. Esta variação longitudinal pode estar associada a ondas infragravitacionais e/ou a mecanismos de auto-organização (Damião, 2013).

Estudos focando a relação entre agentes hidrodinâmicos da zona de *surf* e *swash* de praias de sedimento bimodais e o padrão de deposição desses sedimentos são escassos e pouco entendidos (Nuber *et al*, 2006). Poucos estudos têm sido realizados em praias com presença de sedimentos biodetríticos, sendo que desses, a maior parte se restringe às praias tropicais (Klein, 1996).

Dessa forma, o presente estudo visa buscar uma melhor entendimento dos processos e mecanismos atuantes na face praias da área de estudo e como eles

afetam a distribuição sedimentológica e variação morfológica neste subambiente da praia.

Objetivo Geral

Identificar as variações morfossedimentares que ocorrem na superfície e sub-superfície da face praial da área de estudo.

Objetivos específicos

- Determinar a importância de cada processo (vento e onda) nos depósitos superficiais, correlacionando-os com as estruturas sedimentares encontradas;
- Observar a zonação textural da zona de espraiamento, a fim de explicar como se formam as laminações intercaladas de areia fina quartzosa e de cascalho biodetrítico;
- Investigar a estrutura interna da praia para verificar como se comporta a estratigrafia de sub-superfície.

2. Área de Estudo

A Praia dos Concheiros localiza-se no litoral sul do Rio Grande do Sul, a 150km do balneário Cassino e a 30km do Balneário Hermenegildo, e se estende por uma faixa de 50km. Situa-se ao sul de uma projeção costeira, com uma orientação de SW-NE (47°), ficando assim mais exposta a ondulações de quadrante Sul, que são as de maiores alturas e períodos significativos (Hs e Ts), logo, as mais energéticas. Nota-se uma variação longitudinal da morfologia da praia com a presença de uma ritmicidade nos bancos e na face praial, na forma de cúspides, que podem se desenvolver a partir de sistemas de *ridge-channel* modulados por ondas marginais (Sallenger Jr., 1979).

2.1 Geologia e Sedimentologia

A Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS) e a Plataforma Continental foram modeladas pelas variações glacio-eustáticas do nível do mar, principalmente as mais recentes do Quaternário. Feições topográficas e sedimentares provocadas por processos transgressivos e regressivos ficaram impressas na PCRS na forma dos Sistemas Laguna-Barreiras, onde cada máximo transgressivo formou uma barreira, sendo a Barreira I a mais antiga e a Barreira IV a mais recente, de idade holocênica. Entre as barreiras, se encontram depósitos lagunares associados às lagunas costeiras pleistocênicas e as atuais, holocênicas (Fig.1). (Tomazelli & Villwock, 2005).

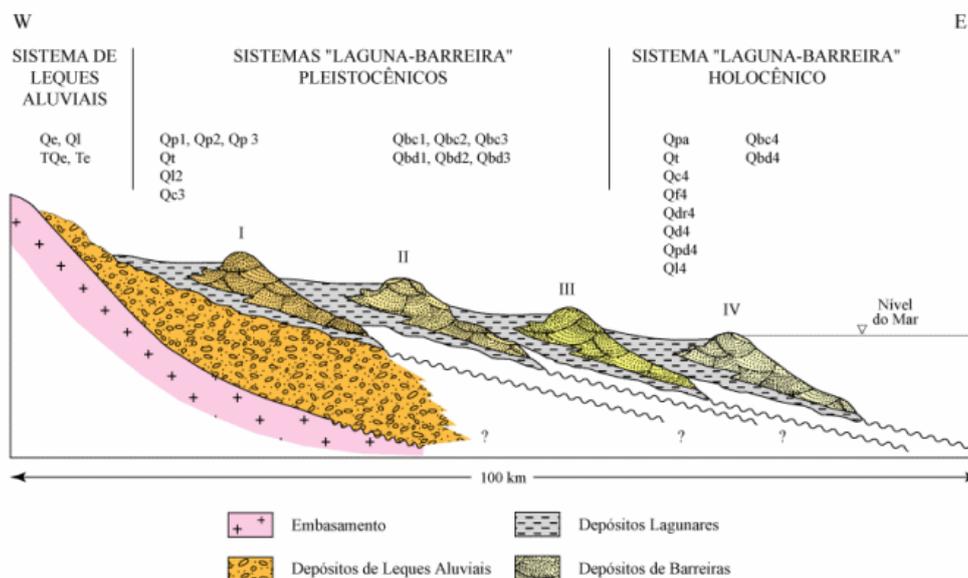


Fig.1: Perfil esquemático transversal aos sistemas deposicionais da Planície Costeira do Rio Grande do Sul com suas fácies sedimentares associadas. (Retirado de Tomazelli & Villwock, 2005).

Na plataforma continental, os eventos transgressivos/regressivos também foram importantes na modelagem da morfologia e da sedimentologia. No máximo da regressão pleistocênica, o nível do mar encontrava-se 130m abaixo da cota atual, expondo uma rede de drenagem fluvial que acabava por desaguar quase na quebra da plataforma. Com o evento transgressivo subsequente, areias transgressivas preencheram os vales dos canais.

Em estabilizações momentâneas do nível do mar, os depósitos de bioclastos foram concentrados em corpos alongados, mais ou menos paralelos à atual linha de costa. Esses depósitos podem ser encontrados na plataforma externa, média e interna. A profundidade onde se encontram correspondem às isobatas de estabilizações pretéritas do nível do mar. Esses sedimentos bioclásticos são relíquias e apenas na plataforma interna estão sendo trabalhados pela dinâmica atual (Martins *et al*, 2003). (Fig.2)

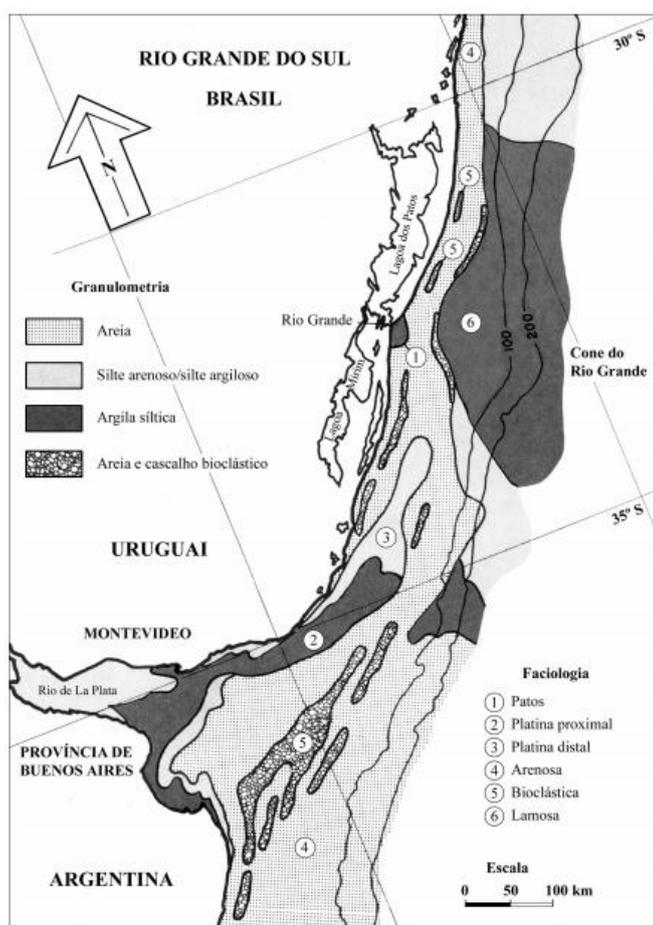


Fig.2: Distribuição da facies bioclástica na plataforma continental da área de estudo, Uruguai e Argentina. (Retirado de Martins *et al*, 2003)

Modelo Evolutivo Holocênico dos Concheiros:

Caron (2007) e Lima (2008), estudando as fácies sedimentares de seqüências estratigráficas da região de retrobarreira dos balneários Chui e Hermenegildo, respectivamente, propuseram modelos evolutivos muito semelhantes para a porção sul da PCRS. Eles verificaram que estas regiões se comportavam como um estuário, sendo possivelmente uma extensão da Lagoa Mangueira, que possuía canais de ligações (*inlets*) com o oceano. A Transgressão Pós-Glacial afogou a região de retrobarreira que era ocupada por um ambiente fluvial (Chuí) ou paludial de água doce (Hermenegildo), imprimindo características estuarinas-lagunares para a região. No máximo da transgressão holocênica (+ou- 6ka AP), o mar atingiu um nível de 3 a 4m superior ao atual. Nesse período

transgressivo, os ambientes estuarinos atingiram seu apogeu e ocuparam toda a depressão lagunar. A Barreira IV, que se situava a sudeste da região, deslocou-se rumo ao continente, favorecendo o desenvolvimento e a manutenção dos canais de ligação (Lima, 2008). Ambos os autores citados acima encontraram fácies sedimentares areno-cascalhosas associadas a esta fase, constituídas principalmente por conchas de moluscos, cuja assembleia é caracterizada como do tipo sedimentológica. Também se verificou a presença de moluscos em posição de vida, cuja datação revelou uma idade correspondente ao máximo transgressivo. Esses ambientes seriam estuários rasos onde as condições hidrodinâmicas mais severas favoreceriam a deposição e a concentração de leitos de bioclastos. O paleoclima da região nessa época era quente e seco. Com o posterior rebaixamento do nível do mar, houve uma perda progressiva das características estuarinas devido ao fechamento dos canais de ligação e ao assoreamento lagunar por dunas transgressivas e sedimentos pré-holocênicos (Caron, 2007; Lima, 2008).

Uma hipótese que pode ser formulada é a de que o desenvolvimento dos moluscos formadores de conchas carbonáticas foi favorecido pelo paleoclima e pela produtividade biológica (devido às características estuarinas) da região nas épocas de máxima transgressão. Com a regressão subsequente, as conchas seriam distribuídas na plataforma continental pela rede de drenagem fluvial. Quando o mar começou a transgredir novamente, ele retrabalharia esse material carbonático em linhas de praia e os concentraria em bancos.

Nesta região, fica claro que a concentração do cascalho biodetrítico está vinculada a episódios marcantes da evolução paleogeográfica da PCRS (Martins *et al*, 2003).

A plataforma interna da área de estudo é caracterizada por um fundo irregular com presença de bancos arenosos lineares e afloramentos de *beach rocks*. Esses bancos podem atuar como lente batimétricas, dependendo do clima de ondas, e concentrar energia de ondas na região (Calliari *et al*, 1998). A complexidade da antepraia e da plataforma interna é resultado de vários eventos transgressivos e regressivos causados por variações glácio-eustáticas do nível do mar. A morfologia atual da região sul pode ser definida como uma superfície "palimpsest", onde as feições relíquias têm sido parcialmente modificadas pela hidrodinâmica atual (Calliari & Klein, 1993).

A principal fonte de sedimentos das praias modernas são as areias pleistocênicas (Martins, 1967; Martins da Silva, 1976; Villwock, 1987). Os minerais da área possuem alta maturidade mineralógica e são oriundos de rochas do complexo ígneo-metamórfico do escudo sul-riograndense e de rochas basálticas do planalto (Pomerancblum & Costa, 1972), que foram transportadas e espalhadas sobre a costa pela drenagem pleistocênica. A concentração de depósitos biodetríticos na área de estudo é resultado do retrabalhamento de paleolinhas de praias afogadas durante a transgressão holocênica e/ou do retrabalhamento de depósitos concentrados na cava de banco arenosos pela hidrodinâmica atual (Figueiredo Jr., 1975; Corrêa, 1983 *apud* Calliari & Klein, 1993).

2.2 Climatologia Regional

- Ventos e Clima

As características climáticas desta região estão sob o controle do centro de alta pressão do anticiclone do Atlântico Sul. A migração do centro de alta pressão e a passagem de sistemas de frentes polares a intervalos de seis a dez dias são responsáveis pelas modificações sazonais no clima (Nimer, 1989). Existe uma predominância dos ventos provenientes do quadrante NE nos meses de setembro a fevereiro. Nos meses de abril a agosto, os ventos de SW são os que predominam (Godolphim, 1976). Em média, os ventos de SW são mais intensos dos que os de NE (Klein, 1996). Ventos de SW, de S e de SE estão associados a tempestades e são importantes por sua intensidade (Calliari, 1980 *apud* Araújo, 2002).

A temperatura média anual é de 17°C e as médias mensais variam entre 13°C em julho e 24°C em janeiro (IBGE, 1986). A precipitação média mensal é maior durante o inverno e a primavera (Klein, 1996).

- Ondas, Maré e Correntes Litorâneas

Os trabalhos de Wainer (1963) e Motta (1963) fornecem as primeiras informações a respeito do clima de ondas na costa do Rio Grande do Sul, por meio da análise de registros obtidos descontinuadamente ao longo de um ano. Esses autores observaram com maior frequência alturas significativas (Hs) em torno de 1,5 metro e períodos significativos (Ts) em torno de 9 segundos. Anualmente, verificaram que as alturas significativas (Hs) puderam alcançar valores de até 3,5 metros e os períodos significativos (Ts) raramente ultrapassaram os 15 segundos. A observação visual da incidência de ondulações e vagas revelaram que as ondas de maior energia e menor esbelteza provinham de SE e as de menor energia e maior esbelteza de E e NE.

Tozzi (1995) observa para a praia do Cassino períodos significativos médios (Tsm) de 10,7 segundos e alturas significativas médias (Hsm) de 0,83 metro. Vagas de E e ondulações de SE constituem as oscilações incidentes mais frequentes. No verão, predominam as ondas de E e no inverno as de SE. As condições de maior energia estão associadas às oscilações do quadrante S, seguidas pelas de SE e, finalmente, pelas de E. As tempestades apresentam ondas com alturas significativas (Hs) em torno de 1,5 metro, podendo atingir de 2,5 a 3 metros extraordinariamente. Os períodos significativos médios (Tsm) observados nesses eventos variam entre 11 e 14 segundos, enquanto os períodos médios (Tm) entre 7 e 8 segundos.

Na área de estudo, as marés astronômicas são do tipo diurno, com uma amplitude média de 0,47 metro devido à proximidade de um ponto anfidrômico. As alterações mais significativas do nível do mar acontecem em decorrência de marés meteorológicas, que são consequência de agentes meteorológicos como vento e pressão atmosférica. A entrada dos ventos de S e de SW fazem com que grandes volumes de água fiquem represados junto à costa, elevando os níveis marinhos destas regiões. Esses eventos relativamente comuns no outono e no inverno

caracterizam geralmente a passagem de sistemas frontais junto à costa, combinando a atuação intensa dos ventos S com os baixos valores de pressão atmosférica (Tozzi, 1995). De acordo com Calliari *et al* (1998) e Tozzi (1995), a ocorrência de marés meteorológicas associadas aos equinócios é responsável pelas maiores variações morfológicas no perfil praiial na costa sul do Brasil.

Estudos mostram que o transporte litorâneo é bidirecional, atuando tanto na direção SW-NE como na direção NE-SW. Porém, mesmo sendo menos frequentes, as correntes litorâneas de SW-NE possuem maior competência para transportar sedimento, devido à maior energia de ondas provenientes do quadrante sul; portanto, há um transporte líquido para NE (Tomazelli, 1990; Tomazelli & Villwock, 1992 *apud* Calliari & Klein, 1993). Na região do Farol do Albardão, há uma variação brusca na orientação da costa (23°). Neste local, a corrente litorânea pode se descolar da costa, depositando sedimento na antepraia dessa região. Nas imediações da inflexão costeira, há um alargamento da barreira arenosa. Um processo similar acontece em Mostardas no Litoral Médio, como foi verificado por Absalonsen e Toldo (2007).

2.3 Características Morfodinâmicas

Das praias do Rio Grande do Sul, os Concheiros possuem a zona de estirâncio de maior declividade (>5°) devido à sua composição sedimentológica. Um aumento na energia de ondas durante tempestades de ondulação imprime a esta área uma característica morfológica única, causando erosão no perfil praiial com a formação de escarpas quase contínuas de altura variável (de 0,5 a 1,20m), a aproximadamente 50 metros da linha d'água. Feições secundárias sob a forma de cúspides praiiais acentuadas são comuns, dificultando sobremaneira a já difícil trafegabilidade na área (Calliari & Klein, 1993).

Variações verticais no pacote sedimentar são significativas entre o limite inferior do pós-praia e o limite inferior da face praiial, podendo atingir valores de até 1,25m. As cúspides se desenvolvem nesta região, sofrendo uma alta variabilidade, dependendo do clima de ondas. Em condições de alta energia, ocorre a erosão destas feições e o aplainamento do perfil, e, em condições de calmaria, há acreção e desenvolvimento das mesmas. Elas podem se desenvolver a partir de cordões ou *ridges* longitudinais depositados na zona de estirâncio, que aprisiona água num canal paralelo à linha d'água. Assim, variações longitudinais do *run up* induzido por ondas marginais faz com que a água destes canais convirja para locais de pouco *swash* e fluam em direção ao mar, erodindo a boca do canal. Quando canais adjacentes se encontram, desenvolvem-se as cúspides, espaçadas entre si por um comprimento de onda marginal sincrônica ou de meio comprimento de onda marginal sub-harmônica (Sallenger Jr., 1979).

Na figura 3, pode-se observar que no pós-praia há pouca mobilidade do perfil, devido ao fato de que a hidrodinâmica não atua regularmente nesta região e o vento, normalmente, não tem competência suficiente para mobilizar estes sedimentos mais grosseiros. Na zona de arrebentação, embora existam poucos dados morfológicos sequenciais, nota-se alta mobilidade do pacote, com uma alta

amplitude vertical (Calliari & Klein, 1993). Há uma zonação na granulometria do sedimento na face praial, com o material mais grosseiro depositado na porção inferior e o sedimento mais fino nas porções superiores. Mudanças na distribuição de sedimento e na elevação do perfil são causadas por migração da zona de *swash* (Nuber *et al*, 2006).

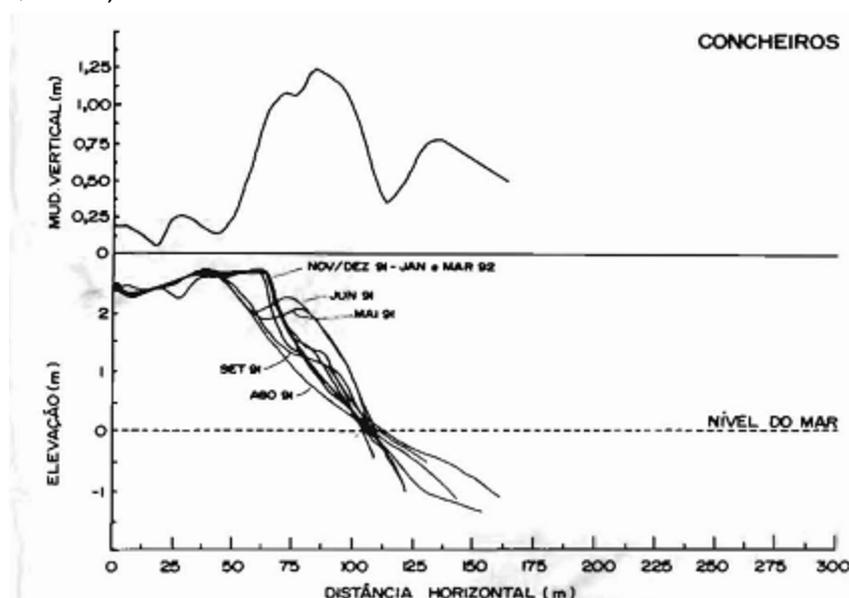


Fig.3: Perfis sobrepostos e mudanças verticais para a praia dos Concheiros. (Retirado de Calliari & Klein, 1993)

Valores do parâmetro Ω indicam que esta praia varia entre os estágios intermediários com características mais reflectivas. Analisando os Índices de Mobilidade da Linha de Praia σY e Pós-Praia (CV) e as Variações de Volume do envelope acima do "datum", fica evidente esta classificação (Fig.4). Nota-se a presença de circulação do tipo *rip*, comum para estes tipos de praias, que estão associados à ritmicidade da face praial e aos bancos submersos.

CONCHEIROS	
N	10
MESES	8
Hb (m)	0,99
T (s)	10,5
Mz (PHI)	0,5/2,25 (*)
Ws (cm/s)	2,20/15,00
Ω	0,5/4
DECLIVIDADE	1:13
Yb (m)	109
σYb (m)	2.5
CV (%)	2
Vv (m ³ /m)	9
σVv (m ³ /m)	11

Fig.4: Parâmetros morfométricos para a Praia dos Concheiros. (Retirado e modificado de Calliari & Klein, 1993) N—número de pesquisas; Hb—altura da arrebentação; T—período das ondas; Mz—tamanho médio do sedimento; Ws—velocidade de sedimentação das partículas; $\Omega = Hb/T.Ws$; Yb - largura média da praia; σYb - índice de mobilidade da praia; CV - índice de mobilidade do pós-praia; Vv - variação de volume acima do datum; σVv - desvio-padrão de Vv; (*) sedimento bimodal (os valores representam as modas);

As mudanças temporais na configuração dos perfis indicam uma tendência à bisazonalidade, com predominância do perfil de acreção (*swell*) entre novembro e março, e perfil de erosão (*storm*) entre abril e outubro, como resultado do regime de ondas dominantes na costa do Rio Grande do Sul (Calliari & Klein, 1993).

Esta praia possui dois bancos. O tipo de quebra de onda nesta praia é mergulhante (fig.5), quando ocorre sobre o banco mais interno da praia, geralmente sob ação de ondulações de pouca esbeltez, ou seja, alto período e baixa altura de onda. Quando entra ondulações mais energéticas, de maior altura significativa, o tipo de quebra de onda passa para deslizante, ocorrendo sob o segundo banco, sendo este o mais externo.



Fig.5 - Quebra de onda do tipo mergulhante, que ocorre sobre o banco mais interno da área de estudo. (André Damião - 2015)

A figura 6 mostra a área de estudo e a localização onde foi realizado o presente trabalho, que será detalhado no capítulo de resultados e discussões.

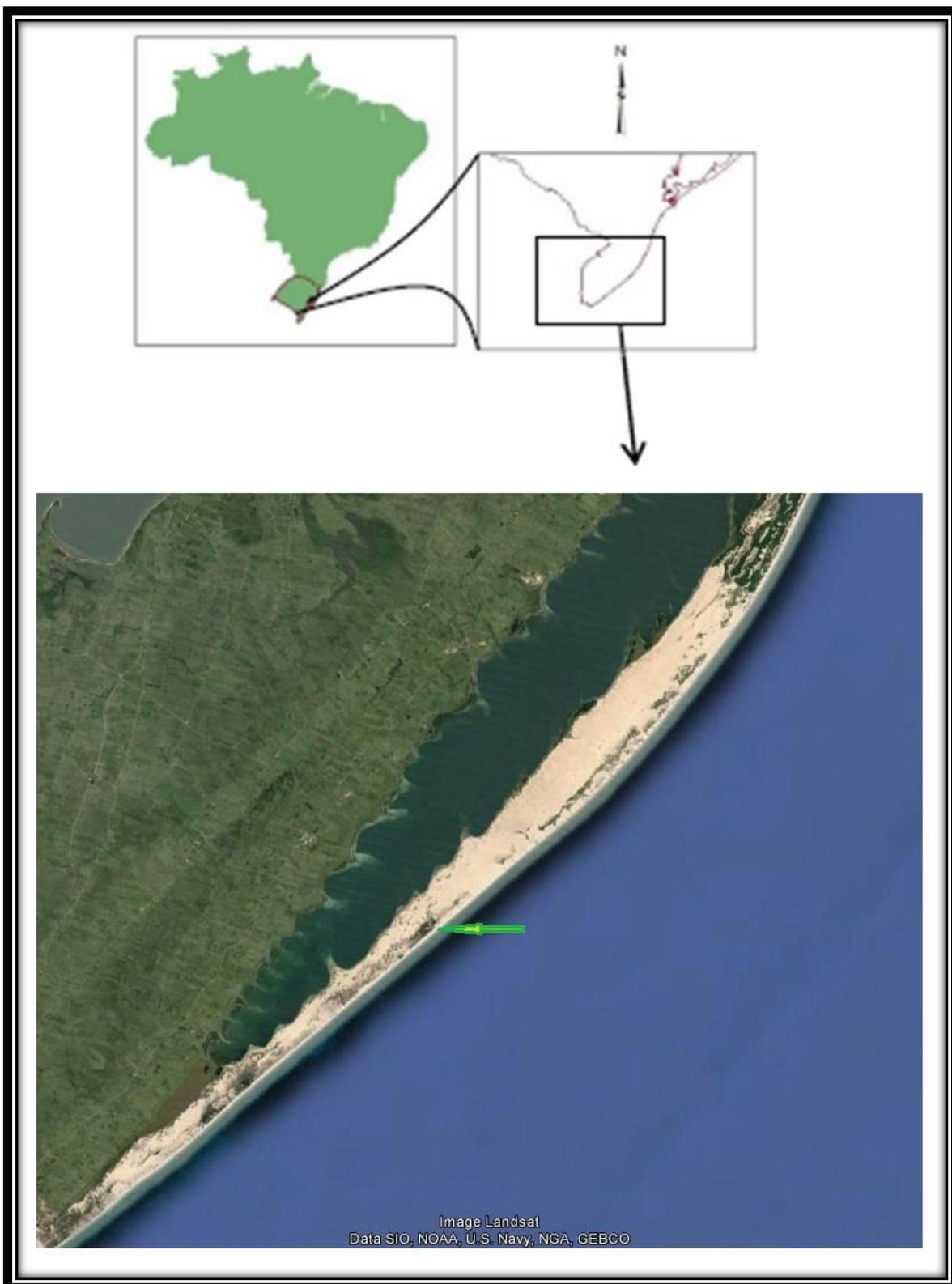


Fig.6 – Área de estudo. A seta verde indica onde foi realizada as amostragens sedimentares e topográficas.

3. Materiais e Métodos

Os materiais e métodos utilizados nos experimentos são divididos em: amostragem textural; medições topográficas e dados de onda; e GPR.

3.1 Amostragem Textural

Para a amostragem textural, foi utilizada a metodologia elaborada por Rubin (2004). Esta, por meio de imagens fotográficas digitais, utilizando um simples algoritmo, permite estimar a granulometria dos sedimentos superficiais (camada de grãos que é afetada diretamente pelo fluxo e onde as variações texturais são maiores).

A análise granulométrica é fundamental na sedimentologia, porém, mesmo com o avanço tecnológico em instrumentos de laboratório, ainda constitui uma análise lenta. A maioria das abordagens para análise granulométrica para sedimentos arenosos de leito utiliza peneiragem mecânica, decantação e difração a *laser*. Exceto pela análise de imagem digital, estas outras abordagens necessitam de coleta e transporte da amostra para o laboratório. A amostragem de sedimento superficial (a parte que interage com o fluxo) é particularmente difícil e geralmente envolve uma placa com material aderente para coletar e um solvente para retirar o material antes da análise. O método utilizado neste trabalho é tão eficiente quanto o método da placa com vaselina, porém é muito mais rápido. Ele possui a capacidade de monitorar variações granulométricas de sedimento do leito, que é onde o fluxo interage diretamente. Esta técnica pode ser utilizada em campo, fornecendo dados quase que em tempo real. Com dados de calibração, pode-se obter dados quantitativos em tempo real. (Rubin, 2004)

3.1.1 Conceito (Rubin, 2004)

O algoritmo granulométrico apresentado por Rubin (2004) é baseado na ideia que a autocorrelação espacial numa imagem varia com o tamanho do grão. Autocorrelação espacial pode ser definida como a correlação entre duas regiões retangulares (chamadas plaquetas) numa imagem, e medida calculando a correlação entre a intensidade de cada *pixel* numa plaqueta com o *pixel* localizado correspondentemente na outra plaqueta.

O valor da correlação espacial se aproxima de 1.0 quando a distância entre as plaquetas é pequena em relação ao tamanho do grão, e se aproxima de 0 quando esta distância se aproxima do tamanho dos maiores grãos. Calculando a correlação espacial em uma variedade de *offsets* – distâncias entre as duas plaquetas - obtém-se uma curva que descreve a correlação como uma função de distância.

Para uma amostra com tamanho de grão uniforme, o diâmetro do grão pode ser determinado, combinando a curva de autocorrelação da amostra com curvas

de auto-correlações de amostras calibradas. Para amostras contendo múltiplos tamanhos de grãos, a distribuição granulométrica pode ser facilmente determinada, resolvendo a proporção das frações de tamanhos de grãos individuais que coletivamente produzam o melhor ajuste para a curva de autocorrelação observada.

A autocorrelação r entre duas plaquetas numa imagem é:

$$r = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}}$$

Onde x_i e y_i são as intensidades dos *pixels* nas duas plaquetas, \bar{x} e \bar{y} são a intensidade média dos *pixels* nas duas plaquetas. Se as duas plaquetas são representativas do sedimento, $\bar{x} = \bar{y}$ e os dois termos do denominador (relativos ao desvio padrão) são iguais. Uma curva de autocorrelação é determinada, calculando r como uma função da distância entre as duas plaquetas. Com o aumento da distância do *offset* k entre as duas plaquetas, x_i se torna cada vez menos relacionado com y_i , os dois termos do numerador se tornam menos prováveis de terem o mesmo sinal e a soma de seus produtos diminuem eventualmente até zero.

Curvas de autocorrelação podem ser calculadas analiticamente para algumas situações simples e idealizadas. Nelas, a correlação entre os *pixels* nas duas plaquetas pode ser calculada para qualquer *offset* (medidos na direção paralela da malha de *pixels*). A correlação é 1.0 quando o *offset* é zero (as duas amostras são idênticas) e 0 quando o *offset* é maior ou igual ao tamanho do grão (porque as intensidades dos *pixels* correspondentes nas duas plaquetas são aleatórias e não relacionadas). Para *offsets* intermediários, a correlação depende da fração da distância dos *pixels* que terminam no mesmo “grão” que começou. A correlação desta população é 1.0; a correlação da população dos *pixels* que acabam em um novo grão é zero. Para *offsets* k que são menores ou iguais ao tamanho do grão, a correlação r é proporcional ao tamanho do grão

$$r_k = \frac{D - k}{D}$$

Neste modelo conceitual simplificado, o tamanho do grão D é igual a distância do *offset* k onde a correlação r diminui para zero.

Medição de grãos de tamanhos uniformes

Uma imagem de sedimento natural é substancialmente diferente do exemplo simulado acima. Grãos reais (Fig.7) possuem formas irregulares (não são quadrados), diferem de tamanho em uma imagem, se sobrepõem e têm

intensidades de *pixels* não-uniformes (devido à iluminação externa e às variações de cor intrínsecas dentro de um grão).

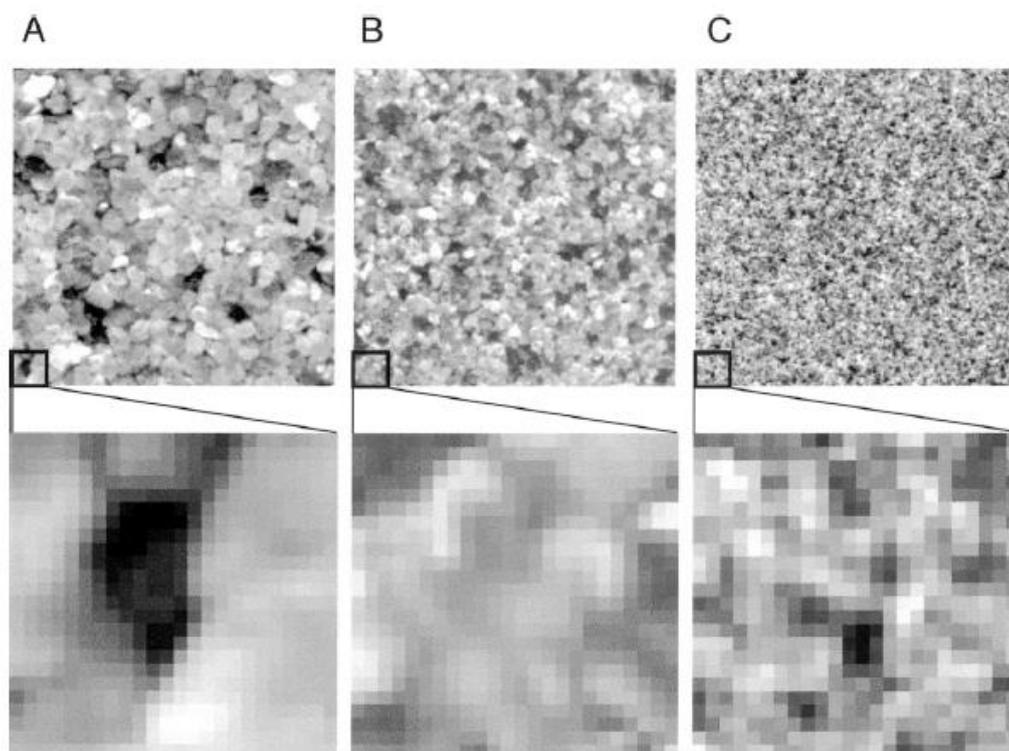


Fig.7 - Imagem digital de grãos naturais numa resolução de 236 *pixels* por centímetro. Imagens da fileira de cima estão aumentadas para mostrar quadrados de 1cm; as da fileira de baixo mostram quadrados de 1mm. Três tamanhos de grãos estão ilustrados: **A**) 0.5-0.6mm, **B**) 0.250-0.3mm, **C**) 0.150-0.180mm (Retirado de Rubin, 2004)

Essas variações naturais fazem com que curvas de autocorrelação reais sejam mais íngremes para *offsets* curtos e mais graduais para *offsets* longos. Uma abordagem para análise de imagens digitais para grãos naturais de tamanhos uniformes é determinar curvas de calibração para cada fração granulométrica do sedimento em uma área geográfica. O tamanho do grão em amostras individuais pode ser determinado, comparando-o com as curvas calibradas. Experimentos com sedimentos naturais sugerem que esta abordagem funciona bem para populações naturais de areias praias e de dunas.

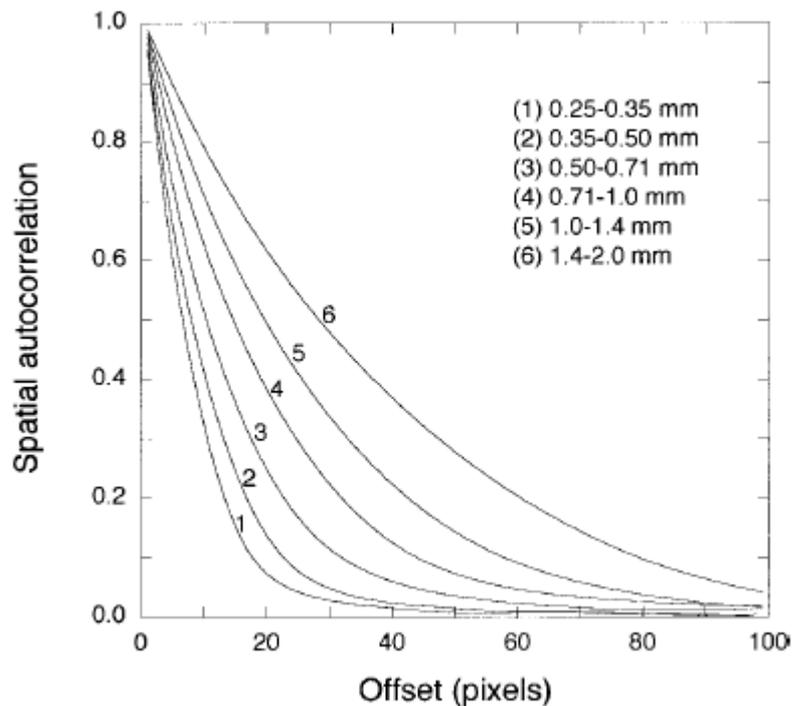


Fig. 8 - Curvas de autocorrelação para seis tamanhos de grãos peneirados. As curvas quantificam o que é visível ao olho nas imagens da figura 7: *pixels* em grãos maiores são mais similares – por uma distância mais longa – do que os *pixels* de grãos menores. (Retirado de Rubin, 2004)

Medição de grãos naturais de tamanhos mistos

A abordagem para determinar uma distribuição granulométrica completa a partir de uma curva de autocorrelação requer 3 passos: (1) determinar curvas de autocorrelação para cada fração granulométrica numa população sedimentar (feito uma vez para todas as amostras duma região geográfica); (2) determinar a curva de autocorrelação para uma amostra específica de sedimento desta região; e (3) resolver as proporções das curvas calibradas que dão o melhor ajuste para a curva de autocorrelação da amostra.

As equações lineares que descrevem este problema são:

$$\begin{aligned}
 a_{(1,1)}x_1 + a_{(1,2)}x_2 + \dots + a_{(1,m)}x_m &= b_1 \\
 a_{(2,1)}x_1 + a_{(2,2)}x_2 + \dots + a_{(2,m)}x_m &= b_2 \\
 &\vdots \\
 a_{(n,1)}x_1 + a_{(n,2)}x_2 + \dots + a_{(n,m)}x_m &= b_n
 \end{aligned}$$

Onde $x_1 \dots x_m$ é a solução (a proporção de cada fração granulométrica m na mistura), os coeficientes a são os valores da autocorrelação observada para as areias calibradas (m areias calibradas medidas à um *offset* de $1 \dots n$ *pixels*), e $b_1 \dots b_n$ são os valores de autocorrelação observados para a amostra sendo analisada. Cada fileira da equação acima relaciona portanto a autocorrelação b da amostra para um dado *offset* de *pixel* com a proporção das frações granulométricas individuais ($x_1 \dots x_m$) e os coeficientes de calibração a para cada tamanho de grão no *offset* de *pixel* especificado.

O número máximo de classes granulométricas que podem ser avaliadas é limitado tanto por m quanto por n . Este último valor é limitado pelo tamanho do maior grão (expresso em *pixels*). O mínimo de informação necessária para resolver a equação acima é a autocorrelação espacial medida em m *offsets* de *pixels*, que no caso, pode ser resolvida por álgebra matricial. Quando aplicada a imagens reais, informação adicional geralmente está disponível, porque o número de *offsets* de *pixels* úteis provavelmente excederá o número de amostras de calibração (n, m).- Neste caso, distribuições granulométricas mais precisas podem ser calculadas usando uma solução de mínimos quadrados para os dados.

Considerações sobre amostragem e resolução de imagem

1) As imagens das amostras devem ter resolução suficiente para que os menores grãos de interesse sejam representados por mais de um *pixel*, pois grãos menores que um *pixel* terão curvas de autocorrelação que são relacionados a manchas de grãos ao invés de grãos individuais.

2) Imagens de calibração e de amostras devem conter grãos bastantes para serem representativos do sedimento sob análise (representativo de forma, cor, mineralogia, cristais internos, e empacotamento). Mais de uma imagem pode ser necessária por amostra sedimentar, principalmente para imagens de tamanhos de grãos mistos, onde grãos podem estar segregados por tamanho em diferentes escalas.

3) Para que as imagens contenham vários grãos e muitos *pixels* por grão, as imagens devem ter muitos *pixels*. Assim sendo, podem ser utilizadas várias imagens para uma amostra.

4) Os resultados não são sensíveis à claridade da imagem (intensidade de *pixel* médio) ou contraste (desvio padrão da intensidade de *pixel*), porque a equação 1 é normalizada em relação a estas medições estatísticas.

5) Iluminação deve ter um ângulo constante. Iluminação de ângulos diferentes podem causar variações em sombreamento, o que influencia os resultados de autocorrelação.

6) Granulometria calculada para uma imagem pode estar sujeita a erros se o leito é fotografado de uma distância ou ângulo diferente das imagens de calibração. Para evitar problemas, a câmera deve ser sempre mirada perpendicularmente à superfície e mantida a uma distância constante desta.

Lista de passos para calcular granulometria de sedimentos naturais

- 1) Coletar amostras físicas representativas do sedimento sob investigação.
- 2) Peneirar o sedimento para obter frações granulométricas individuais.
- 3) Tirar fotografias de alta resolução para cada fração granulométrica.

4) Calcular curvas de autocorrelação para cada fração granulométrica. Um número suficiente de grãos de cada tamanho deve ser incluídos nas imagens para que as estatísticas de autocorrelação sejam representativas do sedimento.

5) Tirar fotografias de alta resolução das amostras a ser analisadas; incluindo grãos suficientes para serem representativas do sedimento.

6) Calcular a curva de autocorrelação das imagens das amostras.

7) Para a medição de tamanho, a curva de autocorrelação da amostra pode ser comparada diretamente com as curvas de calibração. Para determinar a distribuição granulométrica, usar uma solução de mínimos quadrados para resolver as proporções de cada fração granulométrica que coletivamente dão o melhor ajuste para a curva de autocorrelação da amostra.

As rotinas para executar todos os cálculos de autocorrelação e de distribuição granulométrica encontram-se no Anexo.

3.1.2 Validação do Método

Primeiramente foi peneirada uma grande amostra com quantidades suficientes de cada granulometria para que pudessem ser fotografados sedimentos retidos nas peneiras de cada fração granulométrica em intervalos de $\frac{1}{2}$ phi. Depois, foram feitas curvas de autocorrelação para cada fração a fim de montar um arquivo de calibração (fig.9).

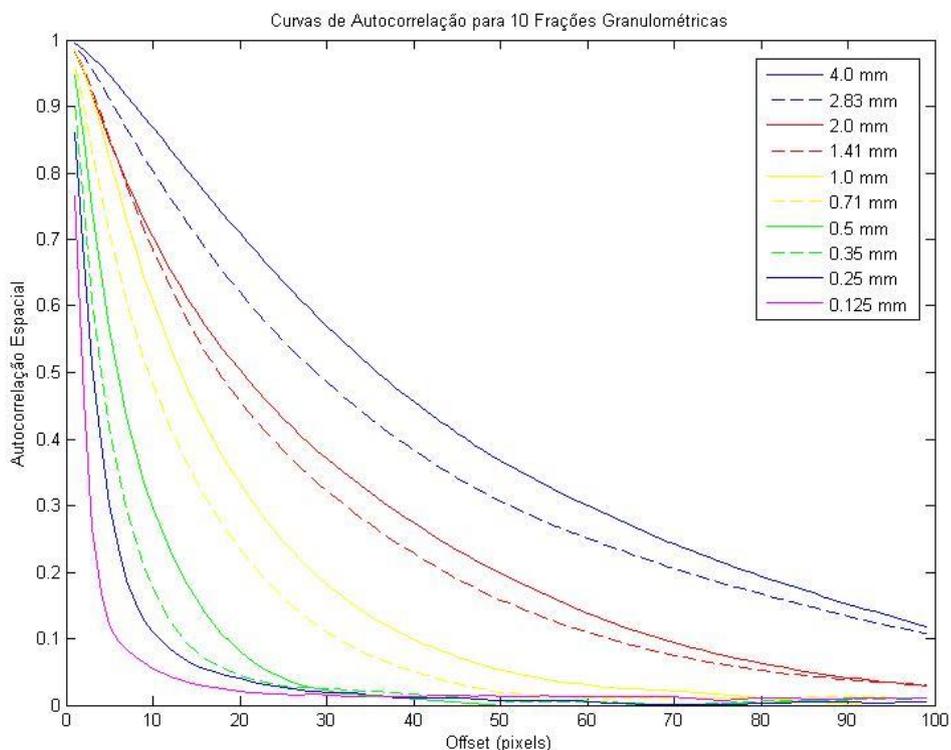


Fig.9 – Curvas de Autocorrelação para cada fração granulométrica

Foram coletadas e peneiradas cinco amostras contendo proporções diferentes de bioclastos, para serem comparadas com o método de Rubin (2004). A peneiragem foi feita utilizando peneiras com intervalo de $\frac{1}{2}$ phi. Depois, calculou-se o tamanho médio de grão para cada amostra peneirada, comparando-o com o tamanho médio de grão calculado via algoritmo (tabela 1).

Amostra	TM Peneirado (mm)	TM Algoritmo (mm)	Correlação (%)
1	0.188629	0.1692	0.896998871
2	2.72437	2.9395	0.926814084
3	0.795852	1.2667	0.628287677
4	0.865456	0.8305	0.959609732
5	0.619886	0.6342	0.977429833

Tabela 1 – TM (tamanho médio) das amostras peneiradas comparado ao TM utilizando o algoritmo.

Nota-se que o tamanho médio calculado utilizando o algoritmo possui uma boa correlação com o tamanho médio medido das amostras peneiradas, exceto a amostra 3, que possui apenas 62% de correlação. Isso se deve ao fato de que o algoritmo calcula o tamanho médio dos sedimentos que estão exatamente na superfície, enquanto na peneiragem, utilizou-se também sedimentos abaixo da superfície (que eram mais finos).

Gráficos de distribuição granulométrica das cinco amostras também foram plotadas, utilizando ambos os métodos para comparação (fig.10). A diferença nos gráficos se deve também ao fato de que, na peneiragem, foram utilizados sedimentos da superfície e abaixo dela, enquanto os gráficos plotados utilizando o algoritmo só utiliza os sedimentos superficiais.

Este algoritmo funciona melhor para amostras unimodais, como pode se observar nas duas primeiras amostras, onde o sedimento é quartzoso fino para a amostra 1 e bioclástico grosso para a amostra 2. Para amostras bimodais e polimodais (amostras 3-5), o algoritmo consegue identificar esta polimodalidade, porém o gráfico não fica tão igual ao peneirado.

Os gráficos da terceira coluna da fig.10 são os gráficos de autocorrelação de cada amostra. Eles gráficos mostram a tendência do tamanho de grão. Para a Praia dos Concheiros, este gráfico pode ser utilizado, pois sedimentos grossos representam bioclastos, enquanto sedimentos finos são quartzosos. Logo, apenas olhando para este gráfico, pode-se ter uma boa noção do tipo de sedimento da amostra.

Pela velocidade da amostragem e também pela eficácia, este método elaborado por Rubin (2004) se mostra muito útil para praias de sedimentos arenosos a cascalhosos (Barnard *et al*, 2007), como é o casa da Praia dos Concheiros.

A metodologia de Rubin (2004) pode portanto, fornecer um ponto de partida para a descrição rápida, automatizada e quantitativa de características sedimentológicas adicionais como orientação de grão, forma, seleção, bimodalidade e mineralogia, que devem ser possíveis usando técnicas

apresentadas por Buscombe e Masselink (2009). Esses trabalhos abrem portas para técnicas de granulometrias digitais quantificadas com distribuições granulométricas ainda mais precisas e, possivelmente, medidas de formas bi-dimensionais (Buscombe, 2008). Além disso, o uso destas técnicas pode ser útil na modelagem artificial de superfícies de grãos para uso em simulações de transporte de sedimento.

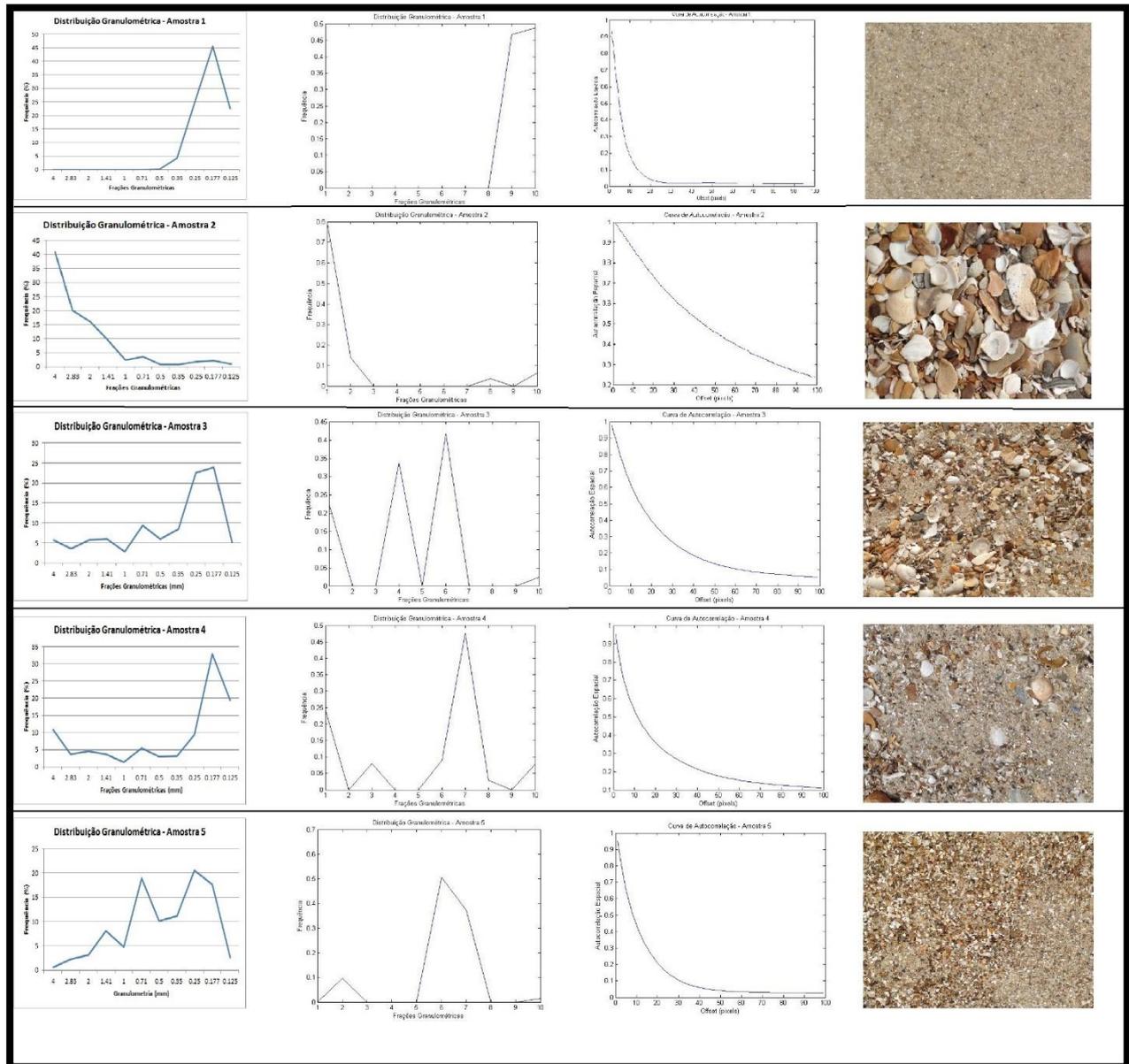


Fig.10 – Tabela mostrando gráficos de distribuição granulométrica das 5 amostras utilizando a peneira (1ª coluna), utilizando o algoritmo (2ª coluna), curvas de autocorrelação para as 5 amostras (3ª coluna), e imagens digitais das amostras sedimentares utilizadas (4ª coluna). Cada fileira corresponde à respectiva amostra (fileira 1 – amostra 1 e assim por diante).

Portanto, usar imagens digitais para quantificar tamanho do grão (e outras propriedades) de leitos sedimentares antigos ou modernos, de uma maneira automatizada, é de interesse considerável por ser relativamente rápido e barato. Permite, portanto, uma maior cobertura e resolução de medições granulométricas comparativamente a métodos tradicionais (Buscombe *et al*, 2010; Rubin, 2004). Isso porque medições a partir de imagens digitais são ordens de grandeza mais

rápidas do que medições físicas, como peneiragem e decantação, ainda que a técnica de Rubin (2004) possa não ser tão precisa para as caudas da distribuição (Barnard *et al*, 2007). Além disso, as medições com fotografias não são intrusivas, e amostram somente os grãos que estão expostos ao fluxo e, portanto, sujeitos aos mecanismos de transporte.

3.1.3 Análise Fatorial

Segundo alguns autores (Moustafa, 1988; Calliari, 1994; Serau, 1999), para amostras com mais de uma moda, o uso de análises estatísticas padrões implica a perda de informações da distribuição granulométrica e conseqüentemente, a distorção da descrição real das amostras. A análise fatorial, por sua vez, considera o percentual de material retido em cada fração do parâmetro caracterizador das amostras, possibilitando que uma única amostra venha a ser definida por um número de parâmetros ou variáveis exatamente iguais à de seu fracionamento (Serau, 1999).

Análise fatorial Modo Q:

Modo Q é um tipo de análise fatorial que examina relações entre objetos dentro de um grande conjunto de dados. Amostras são agrupadas por similiaridade de atributos. Uma das melhores características da análise fatorial de Modo Q é sua habilidade de simplificar um conjunto de dados complexo. Esta análise fatorial de Modo Q determina o número mínimo de dimensões independentes requeridas para responder para a maior parte da informação da matriz de coeficientes de similaridade entre as amostras. A comparação de relações entre objetos é realizada ao agrupar objetos similares em pequenos números de fatores reais ou teóricos, dos quais a representação da informação inicial já é conhecida. (Moustafa, 1988)

Em análises fatoriais, a dimensionalidade do conjunto de dado original é reduzida no sentido que a variância da amostra é representada por alguns fatores, ao invés de um grande número de variáveis. Com esta redução, as amostras podem ser mais facilmente agrupadas e comparadas. (Moustafa, *op.cit.*)

Serau (1999), utilizando a análise fatorial nos sedimentos da praia dos Concheiros verificou a presença de quatro agrupamentos sedimentares (ou fatores) que responderam por 97,43% da variância das amostras incluídas na matriz original e representativas da totalidade textural amostrada.

Segundo Serau (*op.cit.*):

“O Fator 1 (F1), responsável pela explicação de mais de 70% da variância das amostras, descreve uma curva unimodal, aproximadamente leptocúrtica e de assimetria negativa, em torno das areias finas a médias (entre 1,5 - 2,5 phi)

O segundo agrupamento ou população sedimentar com maior responsabilidade na explicação da variância das amostras, o Fator 2 (F2), revela uma distribuição de características bimodais, aproximadamente leptocúrtica e de assimetria positiva, determinada por uma moda

principal em torno das areias muito grossas (entre -0,5 e 0 phi) e outra, secundária em torno das areias finas (entre 2 e 2,5 phi)

O terceiro agrupamento sedimentar ou Fator 3 (F3) descreve uma curva aproximadamente normal, em torno das areias médias a grossas (entre 0,5 e 1,5 phi), caracterizando, dessa forma, um agrupamento sedimentar de textura intermediária dos dois primeiros fatores.

Finalmente, o quarto agrupamento sedimentar ou Fator 4 (F4), está representado por uma moda que detém ampla banda textural (amostra polimodal), o qual impossibilita a distinção da fração onde se concentram a maior parte dos grãos. Entretanto, é válido afirmar que o mesmo caracteriza a população sedimentar de maior granulometria (cascalho biotétrico), concentrada em uma moda igual ou superior aos grânulos que se encontram representados pela segunda variável (entre -1,5 e -1 phi)”

Desta forma, as amostras neste trabalho também são descritas de acordo com os fatores encontrados por Serau (op.cit.). Exemplos para cada fator se encontram na figura 11 abaixo.

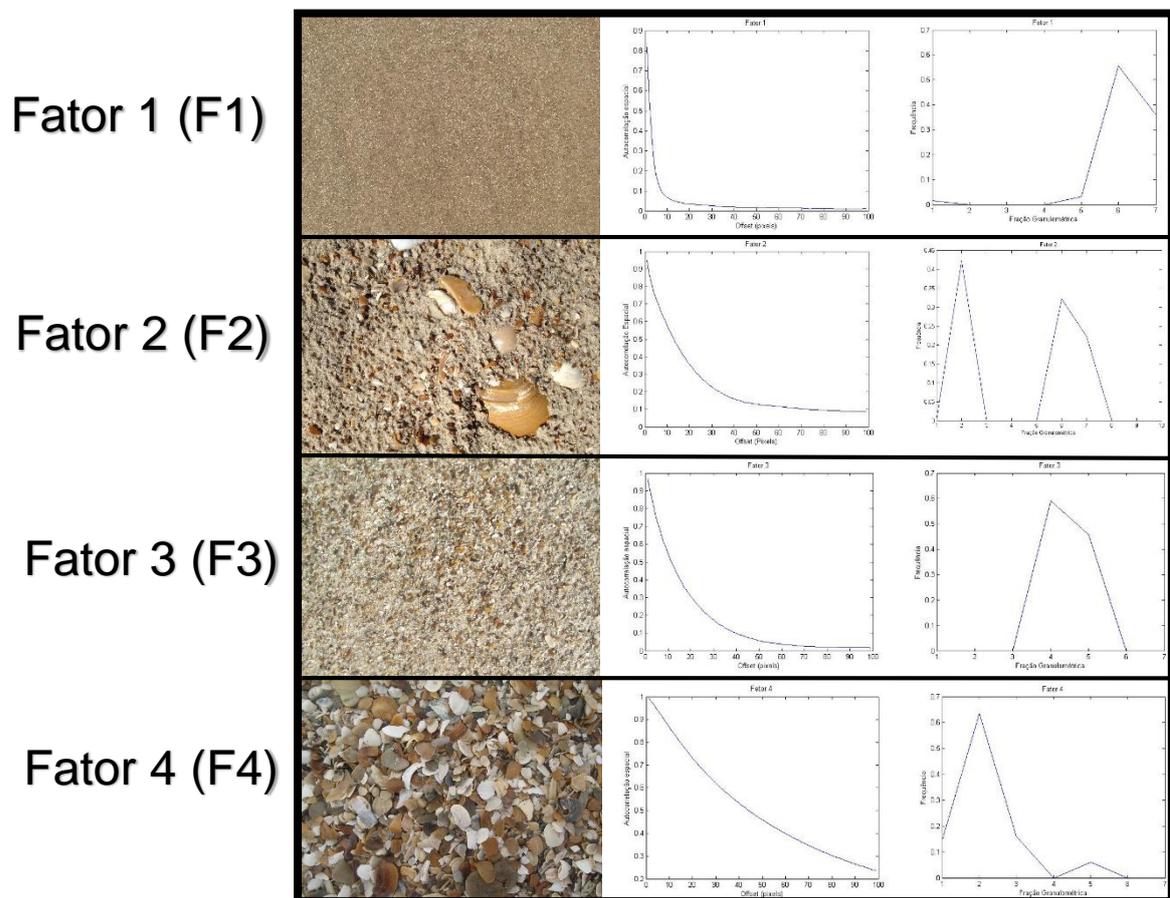


Fig.11- Exemplos de amostras representativas de cada fator: 1ª coluna: imagem da amostra; 2ª coluna: curva de autocorrelação da amostra; 3ª coluna: gráfico de distribuição granulométrica para cada amostra. (Cada fileira representa um fator)

Comparações de grupos sedimentares derivadas de análise fatorial com aquelas derivadas de análises estatísticas padrões confirmam a validade de grupos de fator e o sucesso desta técnica. O uso de análise fatorial indica uma possível modificação em técnicas experimentais que podem resultar em menos esforço sem muita perda de capacidade explanatória. (Moustafa, 1988)

Padrões mapeados podem ser usados para explicar tendências. Neste estudo particular, distribuições granulométricas serão relacionadas a forças ou processos físicos trabalhando no sistema sob investigação.

3.2 Medições Topográficas e Dados de Onda

Para medição da variação topográfica da praia, foram feitos quatro perfis paralelos uns aos outros e transversais à praia, com uma distância de 15m entre cada perfil, utilizando uma estação total Nikon DTM-330, um prisma óptico e uma haste graduada para encaixar e medir a altura do prisma. Os perfis seguiram um mesmo alinhamento onde a estação foi ancorada a marcos de referência (RN: Referência de Nível) instalado sobre a berma.

Os perfis foram realizados uma vez por dia durante o experimento, que foi realizado entre os dias 14/10/2014 e 18/10/2014, com exceção do dia 16/10/2014, devido a condições ambientais que impossibilitaram a medição. Desta forma, pôde-se plotar uma imagem tridimensional da morfologia praial para cada dia, assim como a variação morfológica durante os dias que se passaram no evento registrado. Para a plotagem dos dados foi utilizado o *software* MATLAB.

Para a aquisição dos dados de altura de onda, foi utilizada a metodologia de estimativa visual, na qual onze alturas de ondas foram medidas. Dentre estas medições, foram desconsideradas a maior e a menor altura e com as nove alturas restantes foi realizada uma média. O período de pico das ondas também foi estimado visualmente até a obtenção de um período médio, assim como foi estipulada a altura de onda. A altura de onda média, o período de pico médio e a direção média coletados por meio da estimativa visual foram comparados com os dados do modelo de ondas *Wave Watch III*, retirado do site www.surfguru.com.br.

3.3 GPR (Ground-Penetrating-Radar)

Para investigar a estratigrafia de sub-superfície da praia dos Concheiros, foi utilizado um GPR. O GPR é um método geofísico que consiste em emissões de pulsos de rádiofrequência. Quando esses pulsos encontram heterogeneidades nas propriedades elétricas de sub-superfície, parte da energia é refletida de volta à antena e parte é transmitida para camadas mais profundas. Assim, o sinal refletido é amplificado, transformado para frequência de áudio, gravado, processado e depois pode ser exibido.

O GPR pode ser usado para mapear condições geológicas como profundidade do embasamento rochoso, profundidade do lençol freático, profundidade e grossura de camadas de sedimento assim como outras características do solo (Beres e Haeni, 1991). Em geologia sedimentar, o GPR é

usado principalmente para estudos estratigráficos onde perfis de alta-resolução quase-contínuos ajudam na determinação de: arquitetura estratigráfica, geometria do corpo arenoso, e correlação e quantificação de estruturas sedimentares (Bristow e Jol, 2003).

O desenvolvimento contínuo da tecnologia de GPR desde 1950 tem permitido a aquisição de dado de modo não-invasivo da estratigrafia e estrutura sedimentar de depósitos sedimentares inconsolidados. Esta técnica é particularmente adequada para investigações de depósitos dominados por areias e cascalhos (Neal *et al*, 2002) como é o caso da Praia dos Concheiros. GPR tem sido utilizado por sedimentólogos para reconstruir ambientes deposicionais do passado e a natureza de processos sedimentares em uma variedade de ambientes (Neal, 2004).

A escolha da frequência da antena-radar para um estudo é feita de acordo com o objetivo do estudo, dependendo de uma conciliação entre resolução e penetração de sinal. Sinais de radar de alta frequência produzem imagens de alta resolução, porém tem uma profundidade de penetração limitada, enquanto sinais de baixa frequência possuem baixa resolução, mas são menos atenuados com a profundidade (Beres e Haeni, 1991).

No dia 17/11/2014, o equipamento foi acoplado na traseira de um carro 4x4 e tracionado paralelo à praia, logo abaixo da berma, usando uma antena de 200 MHz (fig.13). Foi feito um trajeto (fig.12) do hotel abandonado (33.416433° S; 52.946347° W) até a frente da casa do eremita Ricardo Pastor (33.398747° S; 52.927493° W), onde foram realizados os experimentos de campo, totalizando 2,5 km. Depois foram feitos perfis longitudinais e perpendiculares à praia na região dos perfis do experimento, utilizando uma antena de 400 MHz (fig.13).

Os dados coletados foram processados utilizando o *software* GRED. Os seguintes filtros foram aplicados para otimizar os dados: mover *start-time*; remoção de fundo; filtro passa-banda vertical; ganho linear; e ganho suavizado.



Fig.12 – Trajeto feito usando o GPR (ponto A_Sul está situado na frente do hotel abandonado; ponto B_Norte está situado na frente da casa do eremita Ricardo Pastor)



Fig.13 - Esquerda: GPR acoplado atrás de um veículo 4x4 para amostragem longitudinal com a antena de 200MHz. Direita: GPR com antena de 400MHz na região dos perfis, tracionado manualmente.

4. Resultados e Discussão

4.1 Variação morfossedimentar superficial

O experimento do trabalho foi realizado durante a entrada de uma ondulação de alto período ($T_p=16s$). Foram realizados perfis topográficos antes, durante e depois da entrada da ondulação para averiguar as alterações morfológicas causadas por ela. A figura 14 mostra altura, período e direção de onda, assim como direção e velocidade do vento para a semana da saída de campo. Observações visuais no campo corroboraram com este gráfico.

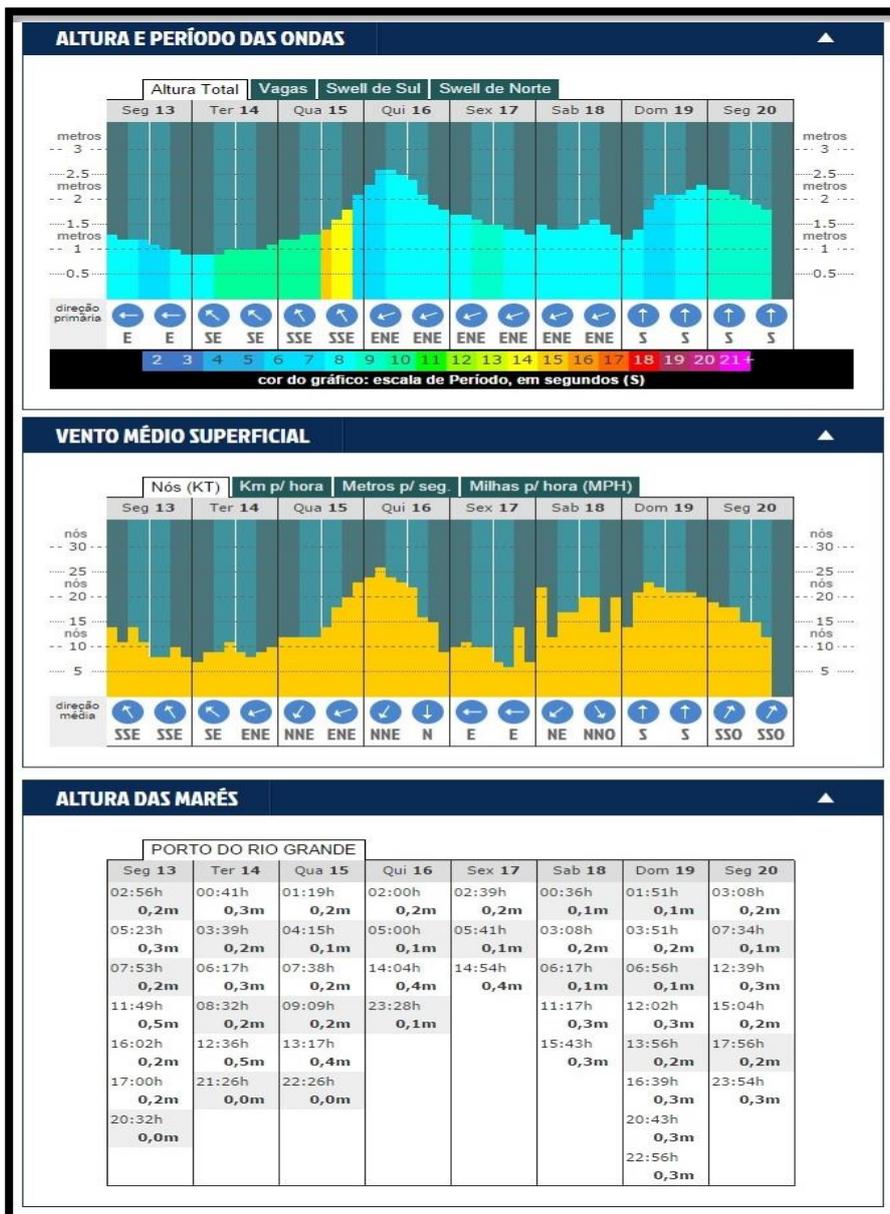


Fig.14 - Acima: Altura, Período e Direção de onda para semana da saída de campo de Outubro de 2014 (13/10 - 20/10); Meio: Direção e velocidade do vento em nós para o mesmo período; Abaixo: Altura das Marés para o Porto de Rio Grande.

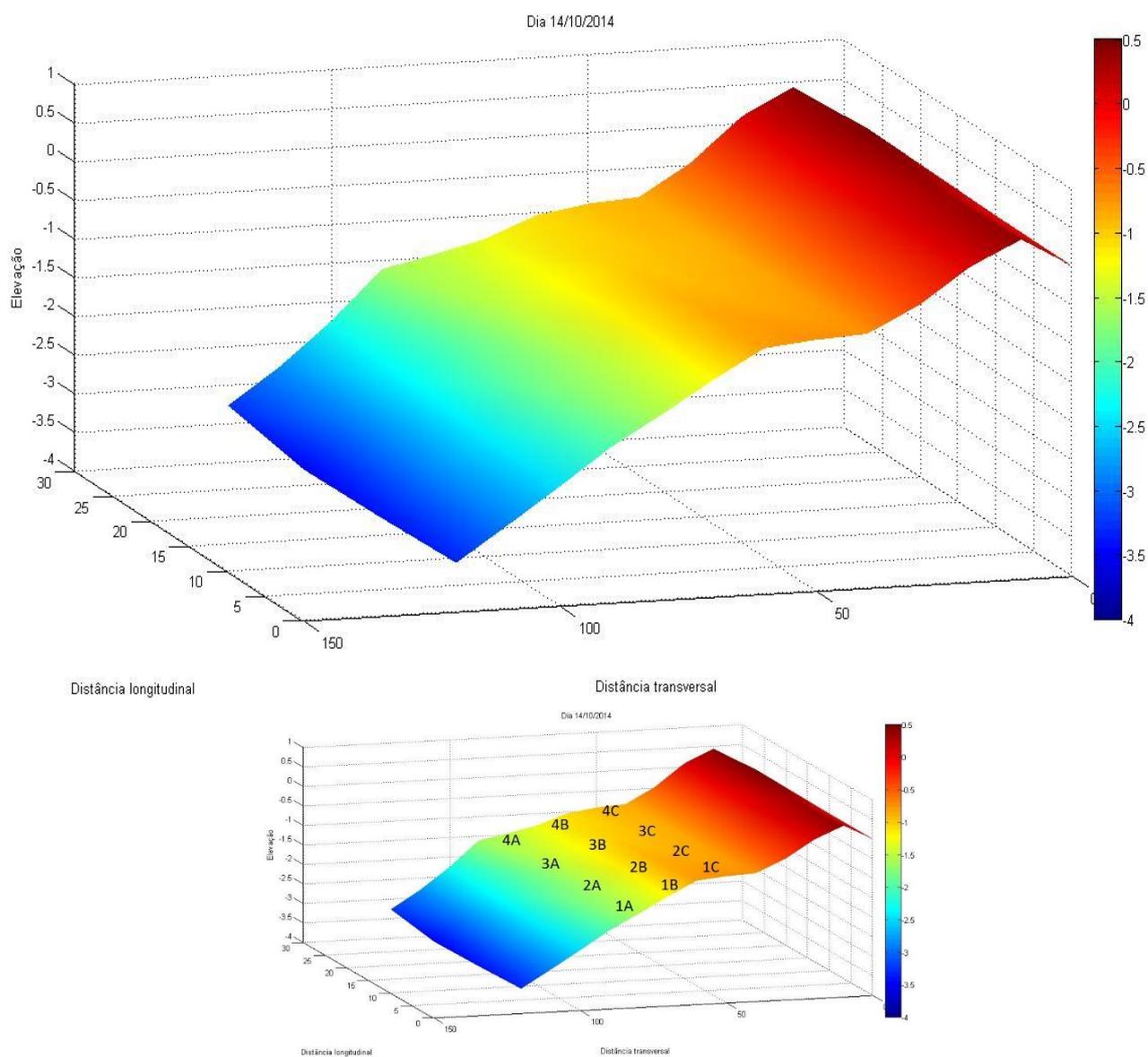


Fig.15 - Acima: Topografia do dia 14/10/2014; Abaixo: topografia do mesmo dia com a localização dos pontos amostrais. (escala em metros)

No dia 14/10/2014, o primeiro dia do experimento, a praia apresentava uma topografia levemente tridimensional como mostra a figura 15. A linha d'água neste dia estava situada por volta da distância transversal 90m. O horário das medições foi por volta das 16h, horário em que a maré estava vazante.

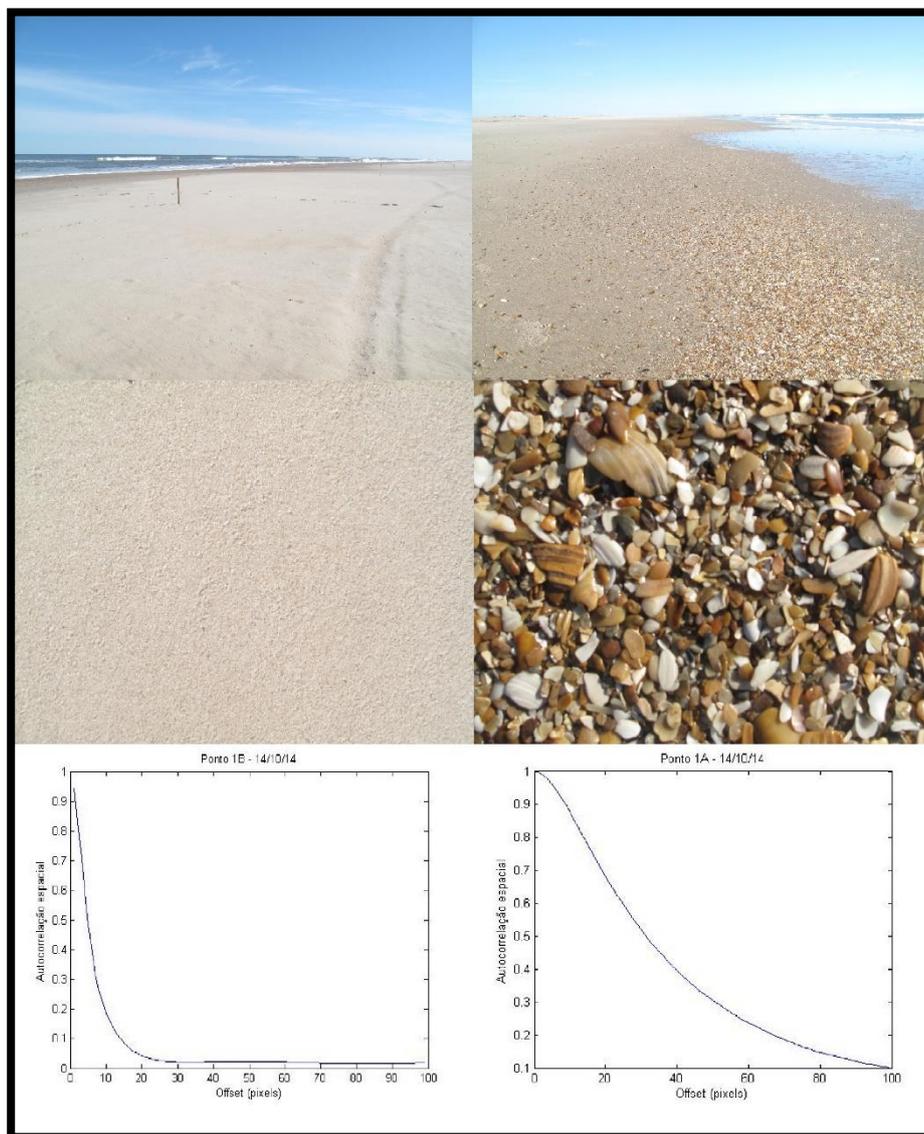


Fig.16 - Dia 14/10/2014 - 1ª fileira: Fotografias da área de estudo mostrando cascalho biodetrítico na face praial inferior e areia quartzosa fina na face praial média e superior; 2ª fileira: Imagem digital da amostra 1B (areia quartzosa fina) e 1A (cascalho biodetrítico); 3ª fileira: Curvas de autocorrelação das amostras 1B e 1A.

No dia 14/04, a praia se apresentava acrescida, com bastante sedimento quartzoso fino presente na face praial média e superior. Logo acima da linha d'água havia presença de cascalho biodetrítico, depositado na face praial inferior (fig.16). O nível do mar estava visivelmente baixo, com grande distância horizontal entre a linha d'água e a estaca mais próxima ao oceano.

A figura 17 mostra as curvas de autocorrelação e os gráficos de distribuição granulométrica dos sedimentos superficiais do dia 14/10/2014. Pode-se inferir, a partir dos gráficos, que os pontos 1A, 2A e 4A representam amostras compostas com sedimentos cascalhosos bioclástico, típicos do grupo de Fator (F4) descritos por Serau (1999). Os pontos 1B, 1C, 2B, 2C, 3C, 4B e 4C são amostras contendo sedimentos quartzosos unimodais finos, representando assim o Fator 1 (F1). As amostras 3A e 3B se encontram em um embaiamento de uma pequena cúspide formada e representam amostras com areias grossas carbonáticas e médias quartzosas, comuns ao agrupamento sedimentar de Fator 3 (F3).

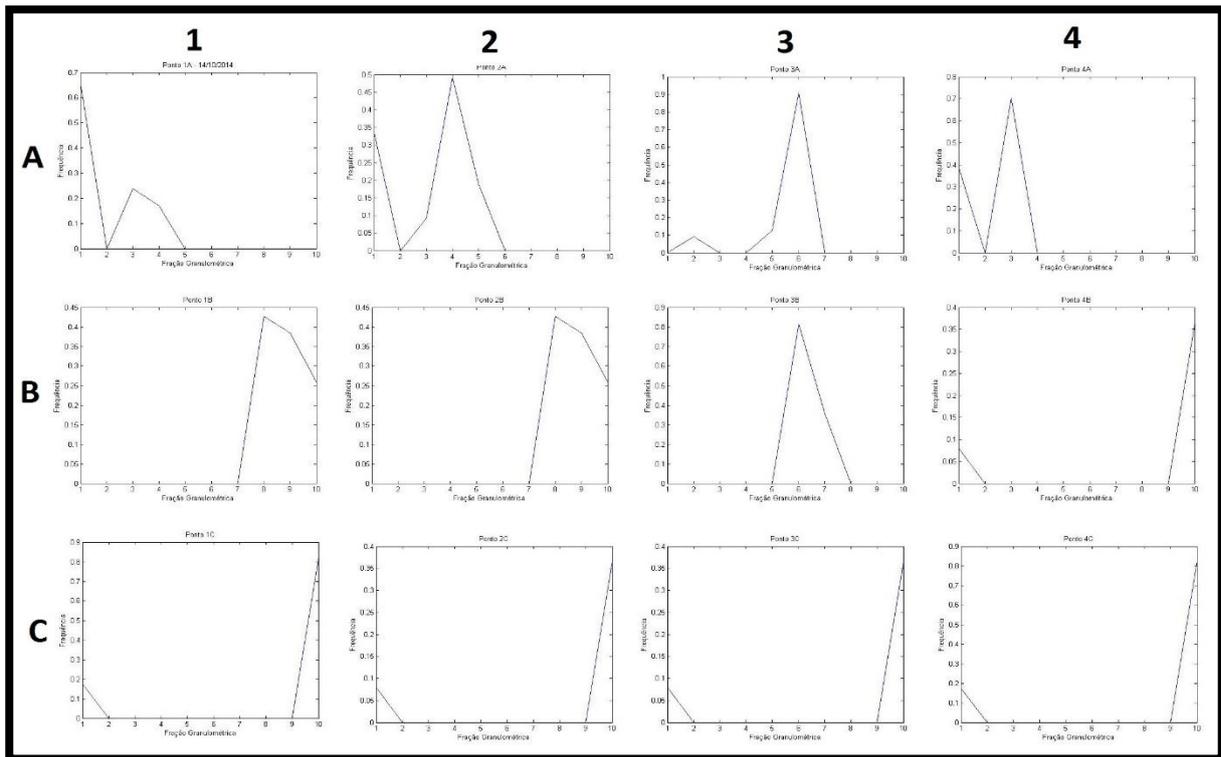
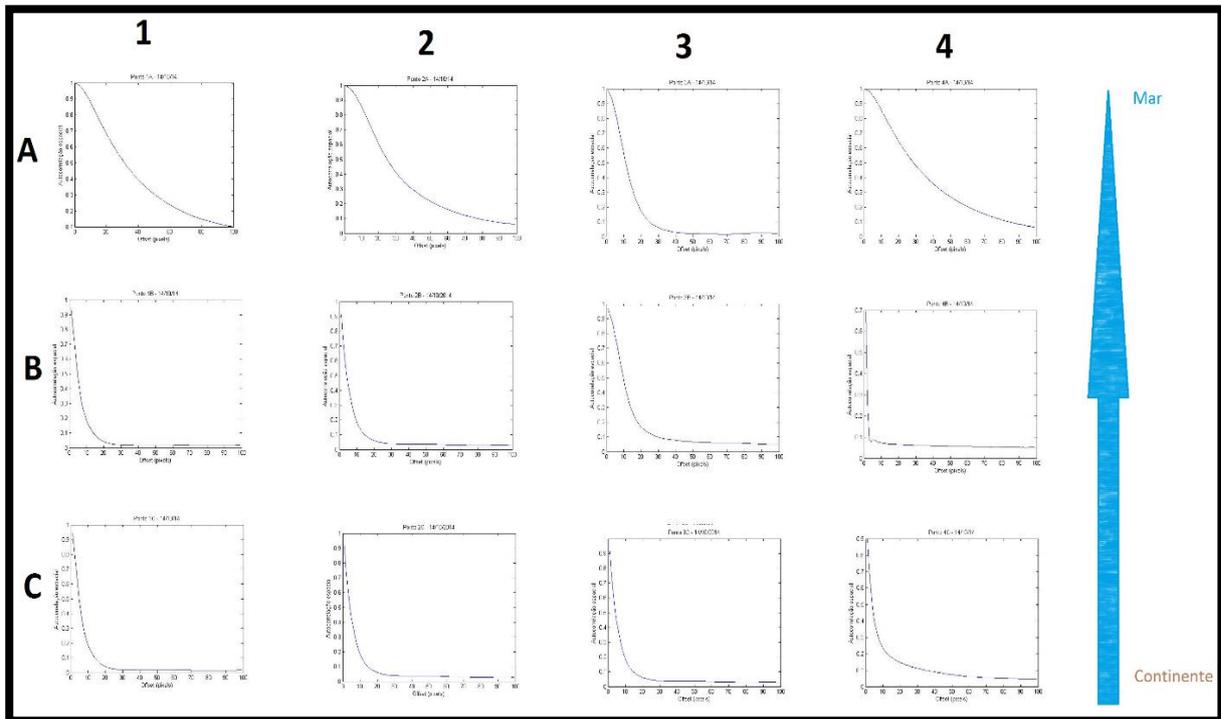


Fig.17 - Acima: Curvas de Autocorrelação das amostras de sedimento superficial do dia 14/10/2014; Abaixo: - Gráfico de distribuição granulométricas das amostras sedimentares superficiais do dia 14/10/2014.

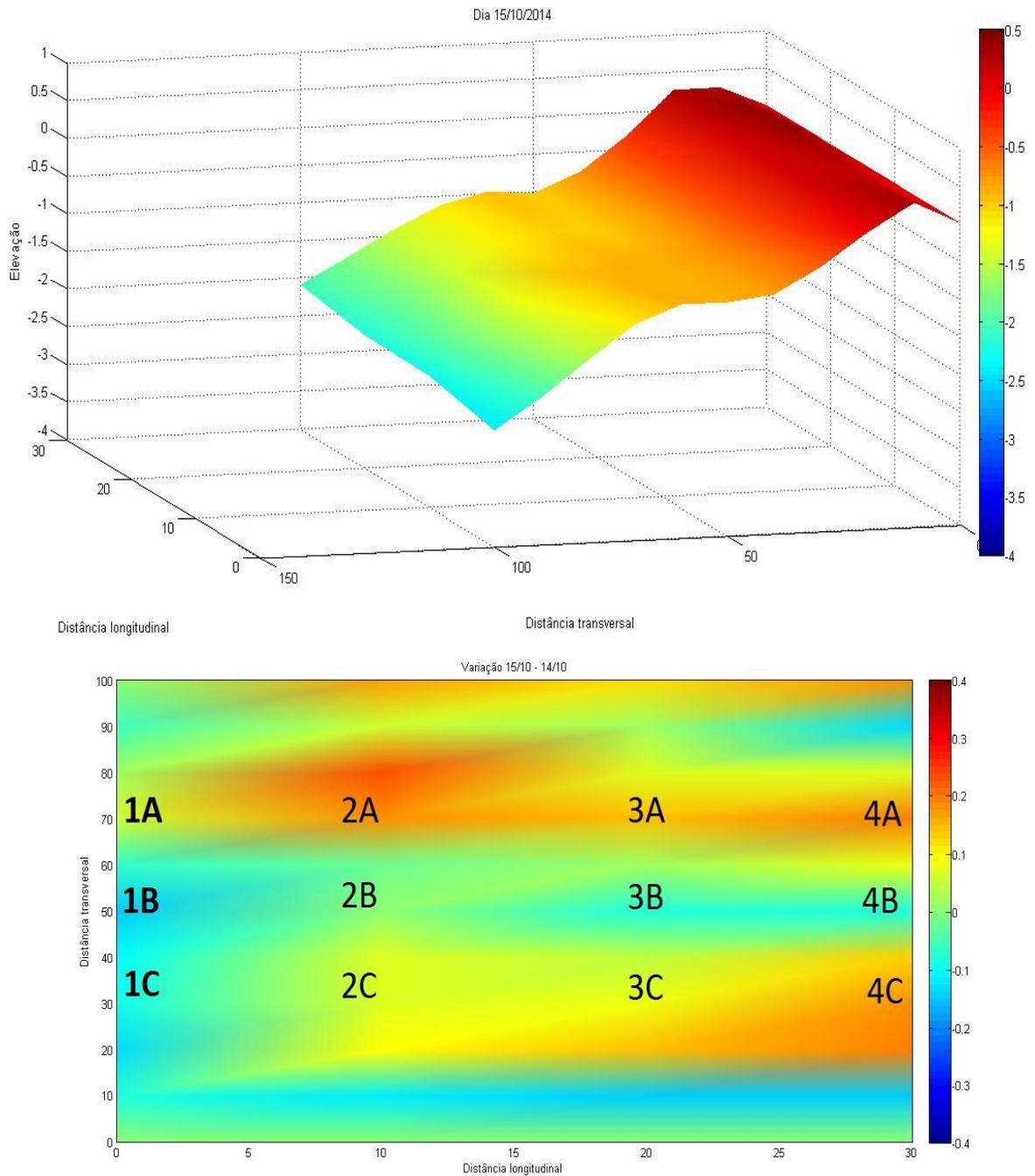


Fig.18 - Acima: Topografia do dia 15/10/2014; Abaixo: variação topográfica entre os dias 15/10 e 14/10 (cores quentes – deposição; cores frias – erosão; escala em metros) com a localização dos pontos amostrais.

No decorrer do dia 15/10, houve a entrada da ondulação de alto período e baixa altura significativa (fig.14). A amplitude de maré neste dia era de 0,4m, o que fez com que houvesse uma migração da zona de *swash*. O alcance máximo do espraiamento atingiu a fileira C em alguns locais, como foi o caso da linha de estaca 3, onde havia um pequeno embaiamento.

A alteração morfológica entre estes dois dias não foi muito grande. Ainda assim, este evento teve êxito na variação textural sedimentar. A figura 18 mostra a topografia do dia 15/10 e a variação morfológica ocorrida entre os dias 15/10 e 14/10. Estão plotados os pontos de amostragem textural sobre o gráfico de variação. Nota-se que a topografia do dia 15/10 ficou ainda mais tridimensional comparada ao dia 14/10, com uma canaleta mais pronunciada, além de pequenas cúspides formadas ao lado do local dos perfis (fig.19).



Fig.19 - Pequenas cúspides formadas no dia 15/10/2014

No gráfico de alteração morfológica da figura 18, pode-se verificar deposições verticais de até 20cm em alguns pontos, como 2A, 4A e 4C. No ponto 3A houve deposição de um pacote entre 10-20cm. Outros pontos como 1A, 2C e 3C são observadas deposições de até 10cm. Nos pontos 2B e 3B houve pouca a nenhuma variação. No ponto 4B houve uma pequena erosão de apenas alguns centímetros, enquanto nos pontos 1B e 1C houve erosão vertical de mais ou menos 10cm.

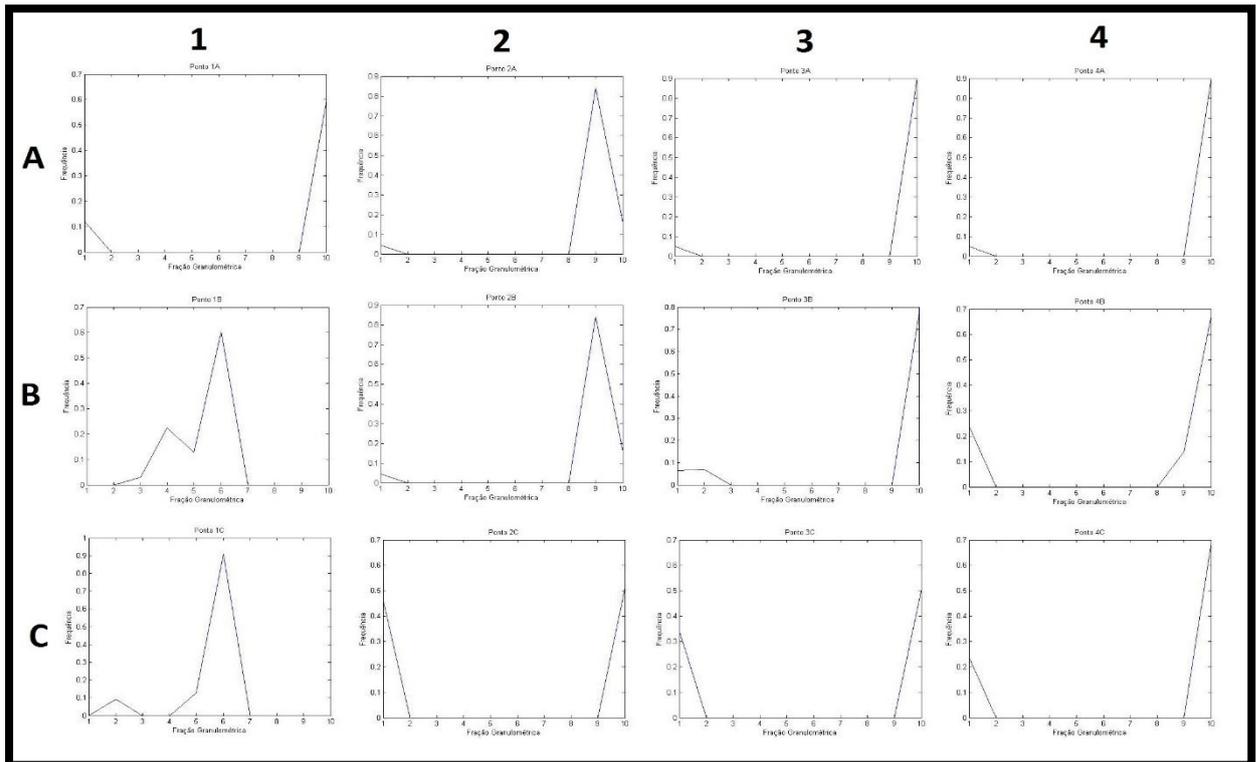
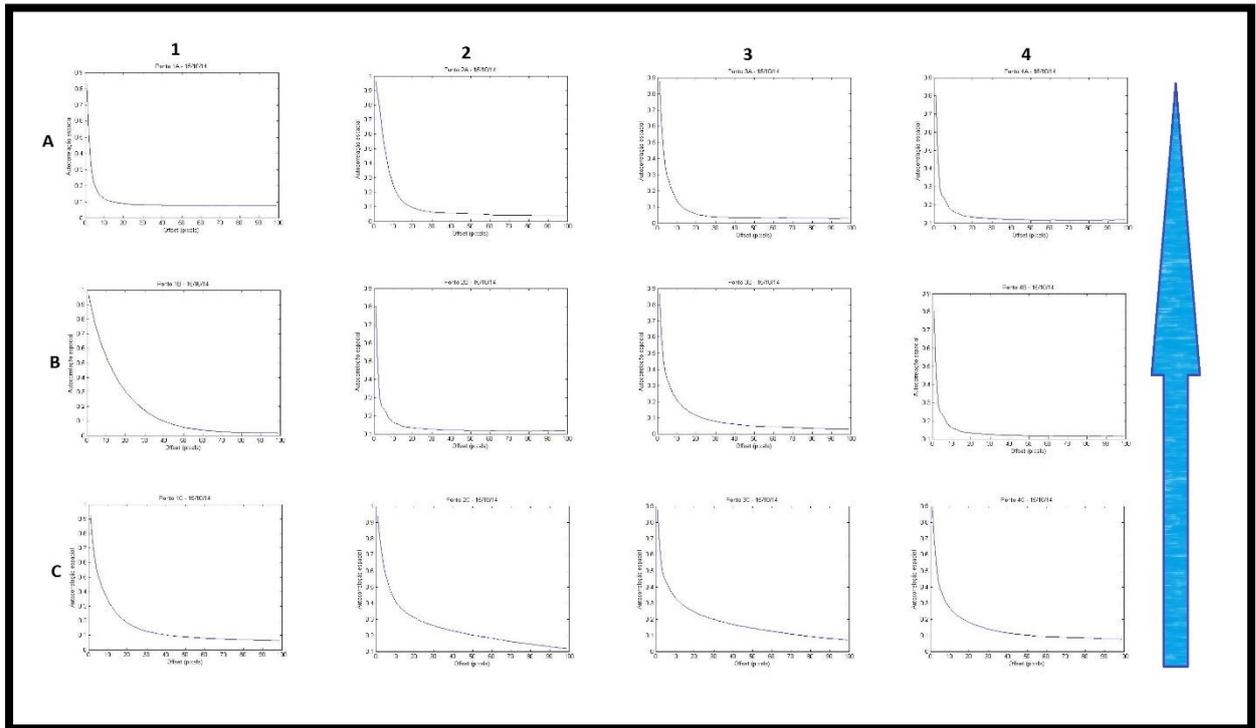


Fig.20 - Acima: Curvas de Autocorrelação das amostras de sedimento superficial do dia 15/10/2014; Abaixo: Gráfico de distribuição granulométricas das amostras sedimentares superficiais do dia 15/10/2014.

Com base na figura 20, que mostra as curvas de autocorrelação e os gráficos de distribuição granulométrica das amostras sedimentares superficiais para o dia 15/10/2014, podemos inferir os tipos de sedimento presentes neste dia. Os pontos 1A, 2A, 3A, 4A e 2B são areias finas correspondentes ao Fator 1 (F1). As amostras 1B e 1C, são compostas por areias grossas carbonáticas misturadas com areias médias e quartzosas, representando assim o grupo sedimentar de Fator 3 (F3). As amostras 2C, 3C, 4C, são compostas por sedimentos bimodais, contendo areia muito grossa biodetrítica com areia fina quartzosa. Estes sedimentos são comuns ao grupo de Fator 2 (F2). Como se pode observar, neste dia não houve a presença de sedimentos do Fator 4 (F4), ou cascalho biodetrítico, talvez pelo fato de que o maior nível energético atingido pelo mar devido a entrada da ondulação tenha os levado junto ao degrau da praia ou abaixo da linha de *swash* mínima neste dia, ou ainda, como veremos no parágrafo abaixo, tenham sido enterrados por um pacote de areia fina.

Comparando as amostras sedimentares dos dias 14/10 e 15/10 com o gráfico de variação morfológica (fig.18), podemos observar como ocorreu a alteração textural da praia entre estes dois dias. Os pontos amostrais 1 A, 2 A, 3 A e 4 A, continham a presença de cascalho biodetrítico (F4) no dia 14/10, e depois de sofrer deposição de até 20 cm nestes pontos, eles passaram a apresentar sedimentos unimodais quartzosos finos. Pode ser que este pacote de areia fina tenha soterrado os sedimentos cascalhosos, criando assim as intercalações de areia fina terrígena com cascalho e/ ou areia grossa biodetrítica frequentemente encontrada na área de estudo (fig.21). Os pontos amostrais 1B e 1C, que eram compostos por areia fina (F1), sofreram erosão de até 10cm e alteraram a textura para areias grossas carbonáticas com areias médias quartzosas (F3). O ponto 2B sofreu pouca ou nenhuma variação morfológica e portanto manteve-se com areia fina (F1) entre os dois dias. O ponto 3B alterou sua textura de F3 para F1; provavelmente a pequena erosão sofrida neste ponto foi o suficiente para retirar as sedimentos mais grossos. Os pontos 2C, 3C e 4C, sofreram acresção, e com isto houve uma alteração textural de F1 para F2, ou seja, de areias finas para sedimentos bimodais, Provavelmente a acresção atuou em depositar pedaços de conchas na linha máxima de *swash*, que no dia 15/10, atingiu a fileira C de amostras.



Fig.21 - Escarpa na berma mostrando intercalações de areias finas e médias quartzosas com areias grossas e cascalho biodetríticos

No dia 16/10, as condições ambientais (chuva e vento forte que durou o dia todo) impossibilitaram as medições topográficas, assim como as amostragens sedimentares. Neste dia, as ondas vinham de ENE, atingindo alturas significativas de 2,5m com 8 segundos de período. A direção do vento era de NNE chegando a mais de 25 nós de velocidade.

Provavelmente as características das ondas no dia 16/10 (Hs alto e T baixo) fez com que o perfil praial aplainasse e perdesse as características tridimensionais presentes nos dois dias anteriores, como pode-se observar na figura abaixo da topografia do dia 17/10.

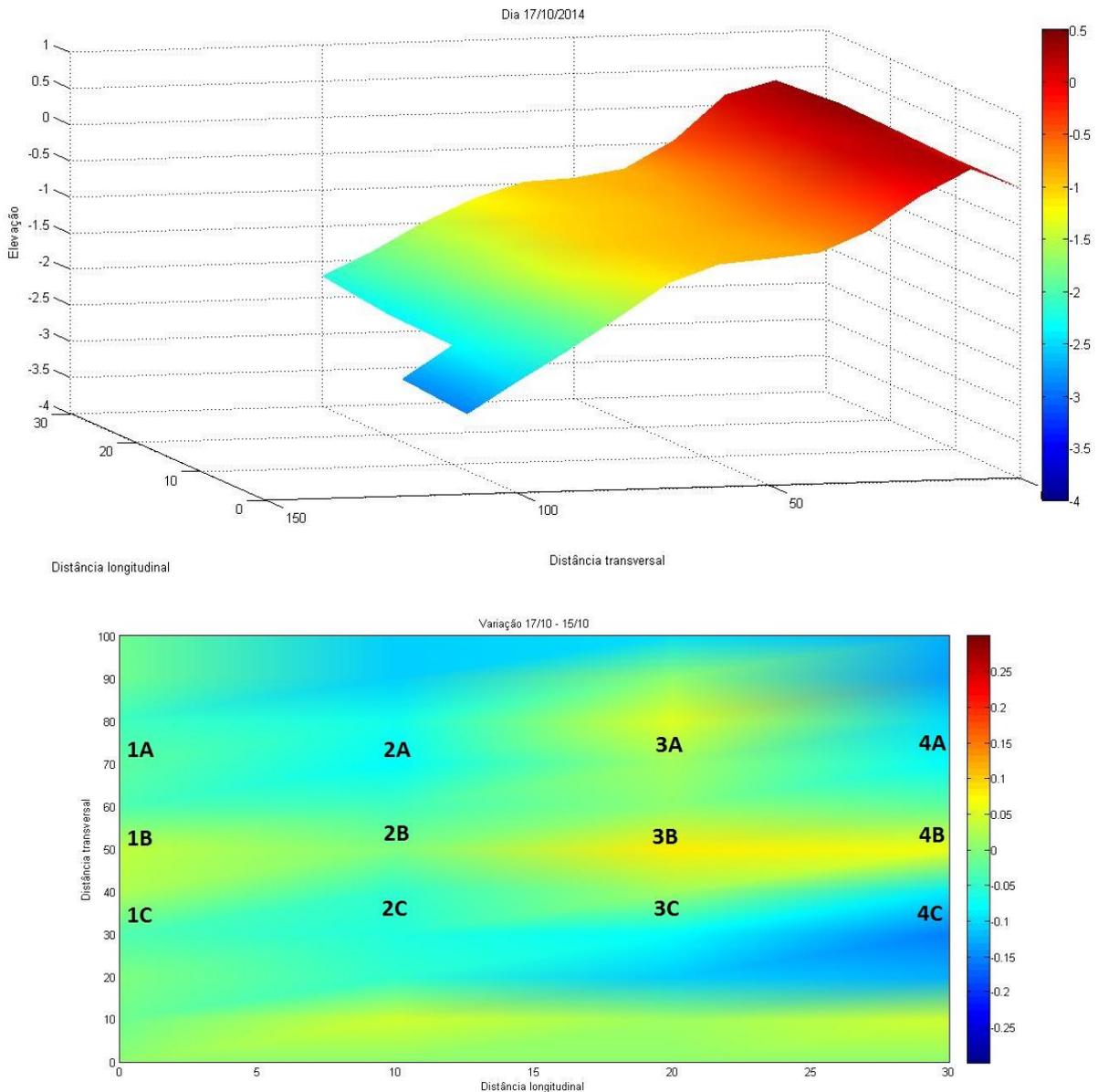


Fig.22 - Acima: Topografia do dia 17/10/2014; Abaixo: variação topográfica entre os dias 17/10 e 15/10 (cores quentes – deposição; cores frias – erosão; escala em metros) com a localização dos pontos amostrais.

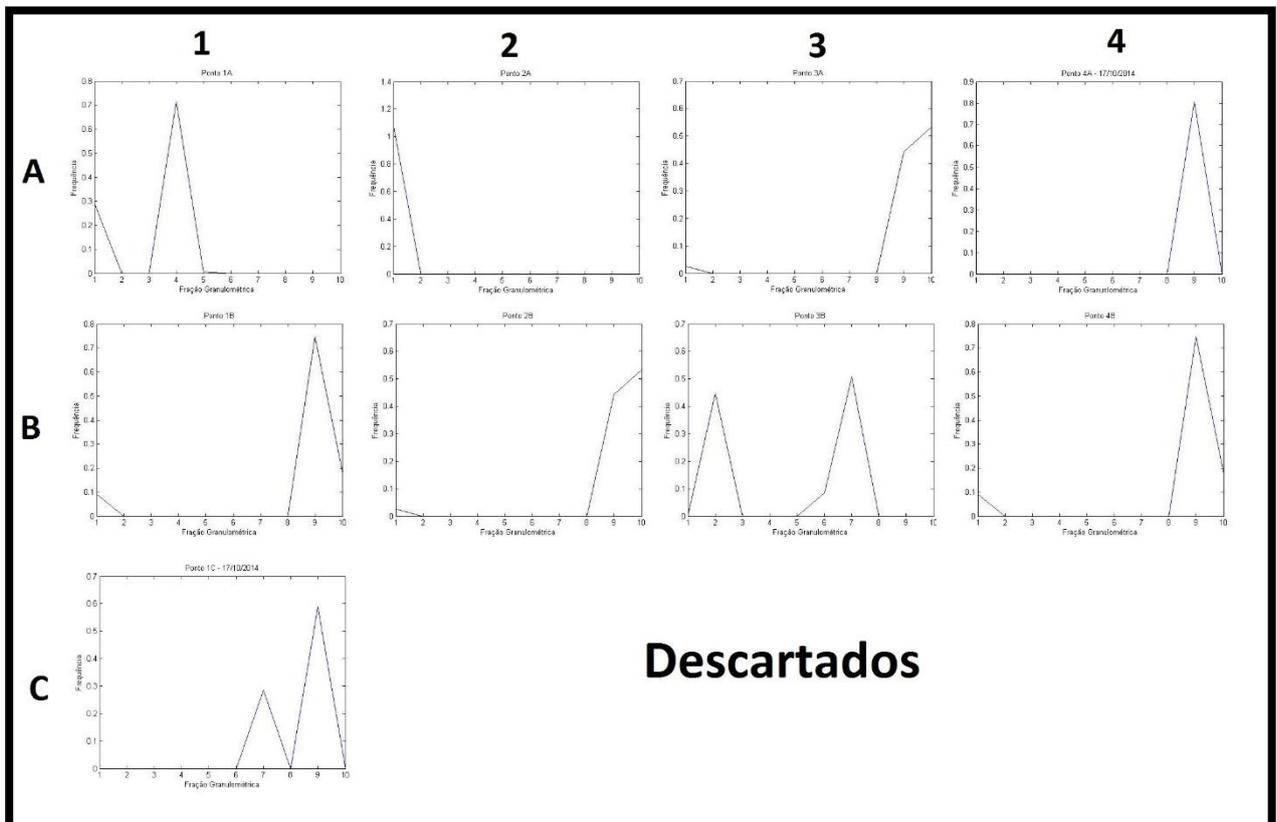
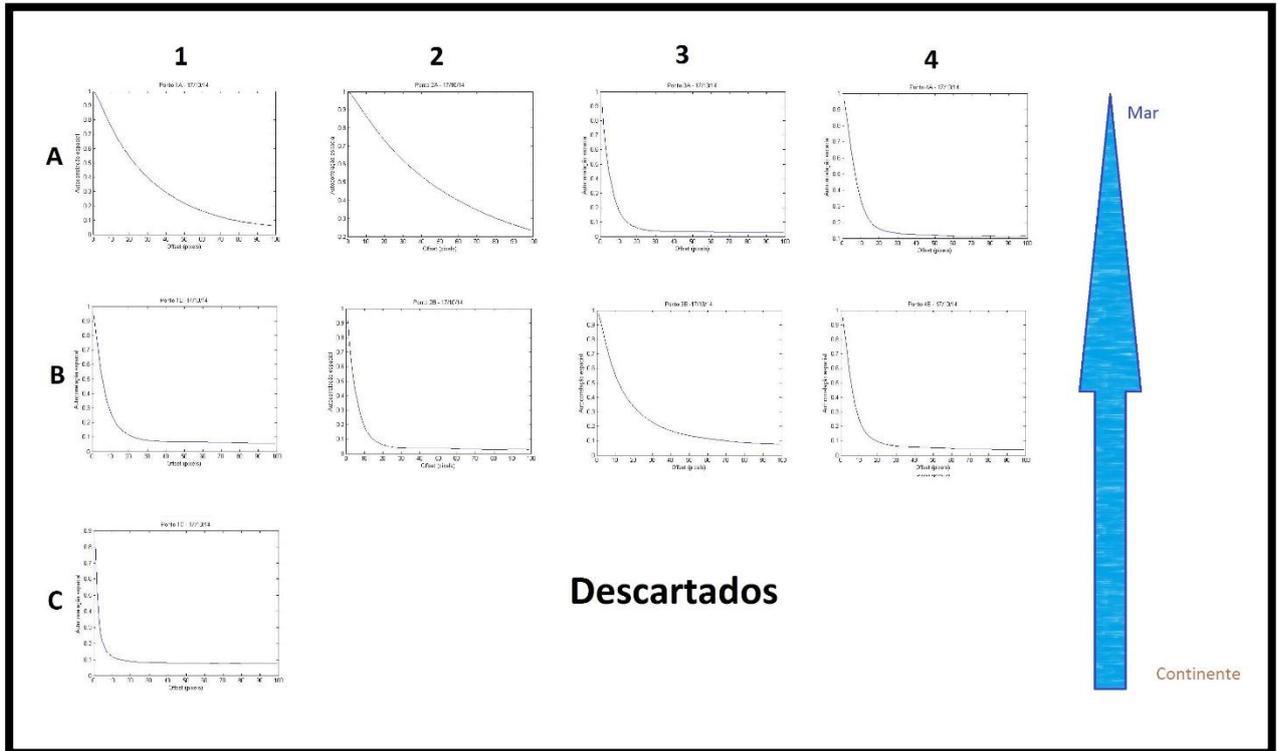


Fig.23 - Acima: Curvas de Autocorrelação das amostras de sedimento superficial do dia 17/10/2014; Abaixo: Gráfico de distribuição granulométricas das amostras sedimentares superficiais do dia 17/10/2014.

A partir dos gráficos da figura 23 , que mostra as curvas de autocorrelação e os gráficos de distribuição granulométrica das amostras sedimentares superficiais do dia 17/10, podemos deduzir os tipos de sedimentos presentes neste dia na área de estudo. Os pontos 1A e 2A mostram a presença de sedimentos do grupo de Fator 4, ou seja, cascalhos bioclásticos. Os pontos 3A, 4A, 1B, 1C, 2B e 4B indicam a presença de sedimentos de Fator 1, areias finas. O ponto 3B é representado pelo Fator 2, sedimento bimodal contendo areia quartzosa média com areia muito grossa e cascalho biodetrítico. Os pontos 2C, 3C e 4C foram descartados devido à presença de marcas de chuva na superfície do dia anterior, o que fez com que o algoritmo superestimasse o tamanho do grão. (fig.24)

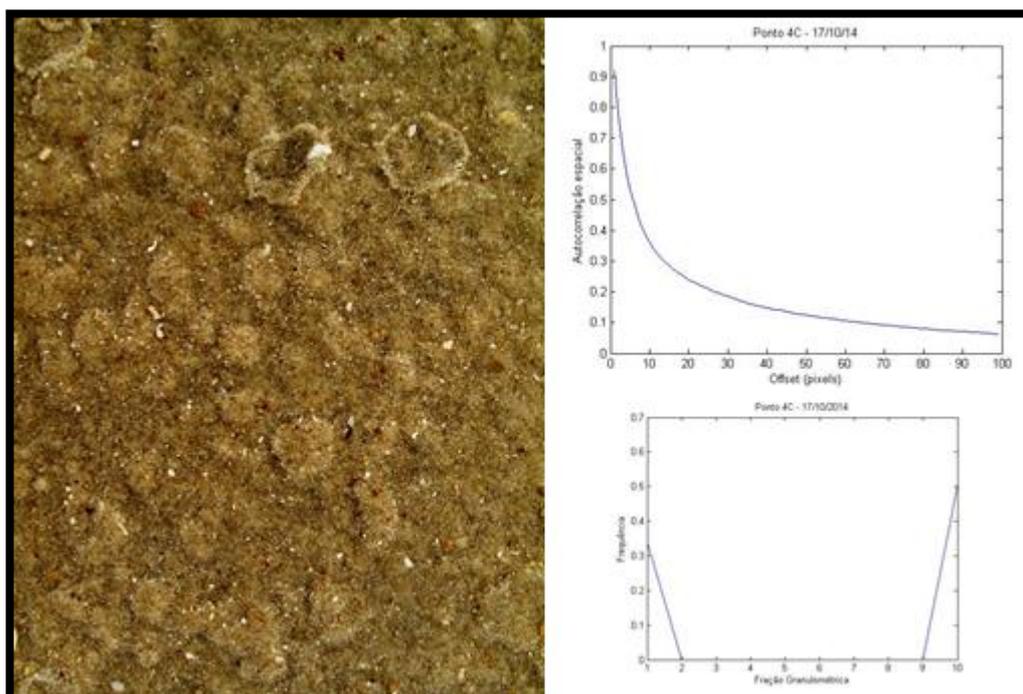


Fig.24 - Exemplo de amostra descartada: ponto 4C, a amostra é composta por areia fina e média porém devido as marcas de chuva, o algoritmo superestimou o tamanho do grão como mostra os gráficos acima.

O gráfico de variação topográfica do dia 17/10 (fig.22) mostra que houve pouca variação líquida entre os dias 17/10 e 15/10. Nos pontos 1A, 1C, 2B 2C e 3C a variação foi próxima de zero. Nos pontos 1B e 3A, houve uma ligeira deposição menor que 5cm. Os pontos 3B e 4B foram os que sofreram maior deposição, com variações verticais entre 5-7cm. Nos pontos 2A e 4 A, houve uma pequena retirada em torno de 5cm de pacote sedimentar. O ponto 4C foi o que sofreu maior erosão com mais de 10cm de perda de sedimento.

Com isso, a alteração textural ocorreu da seguinte forma: nos pontos 1 A e 2 A, onde houve quase nenhuma erosão e até 5 cm de erosão, respectivamente, a fração cascalhosa (F4) voltou a aparecer na face praial inferior. Este tipo de sedimento geralmente aparece quando o nível energético marinho diminui, assim como ocorreu no dia 17/10. Este fato também foi evidenciado por Serau (1999). No ponto 3B, onde houve deposição entre 5-7cm, a textura passou de areia fina (F1) para sedimento bimodal, com areia quartzosa média e areia muito grossa

biodetrítica (F2). Provavelmente o *swash* atuou em depositar estes sedimentos mais grossos neste ponto amostral onde havia um pequeno embaiamento no dia 15/10, e com esta acresção, a topografia ficou mais plana no dia 17/10. Os pontos 3A, 4A, 2B e 4B permaneceram com a mesma composição sedimentar de areias finas (F1). A figura 25 mostra a face praial no dia 17/10, mostrando a deposição rítmica de cascalho biodetrítico na fileira amostral A. Apesar de situarem-se nesta fileira, os pontos 3A e 4A, estavam situados entre os depósitos, por isso possuía sedimentos finos.



Fig.25 - Face praial no dia 17/10/2014 mostrando cascalho biodetrítico depositado ritmicamente. A topografia praial estava menos tridimensional que nos dias anteriores.

Os pontos 1B e 1C passaram de (F3) para (F1), locais onde houve pouca ou nenhuma deposição. Provavelmente os sedimentos finos foram transportados pelo vento NNE que vinha do continente em direção ao mar, trazendo areias das dunas e tapando os sedimentos mais grossos que estavam presentes anteriormente. Este pode ser outro mecanismo causador das intercalações estratigráficas encontradas na área de estudo por outros autores (Klein, 1996; Serau, 1999). Este mecanismo seria responsável por laminações mais finas dos que as encontradas na face praial inferior, onde a presença de sedimentos mais grossos (F4), acarretariam em intercalações mais grossas.

No dia 18/10, o último dia do experimento, as condições meteorológicas e-oceanográficas se mantiveram similares ao dia anterior. Neste dia, a amplitude de maré foi a menor entre todos os dias do experimento (0.2m), ficando a zona de espraiamento limitada a face praial inferior, por volta da distância transversal 95m.

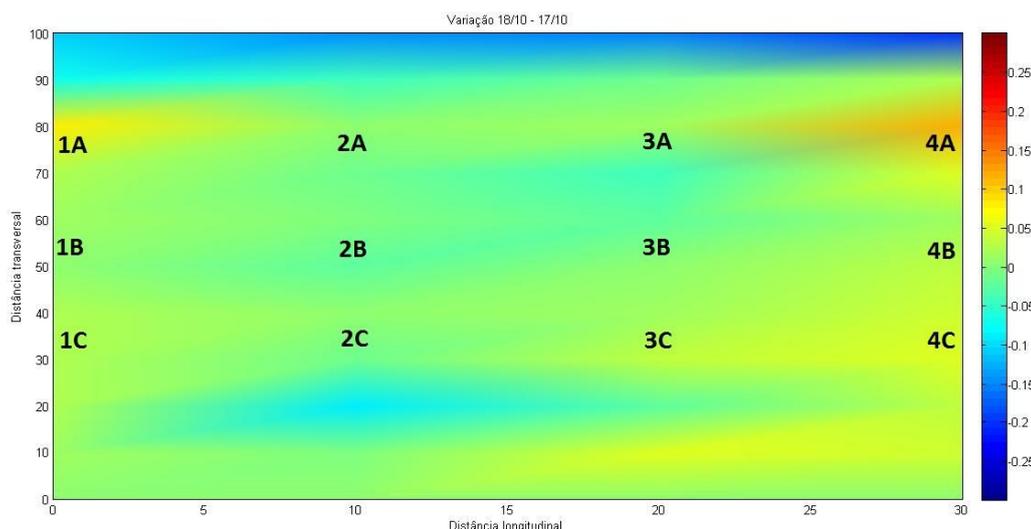
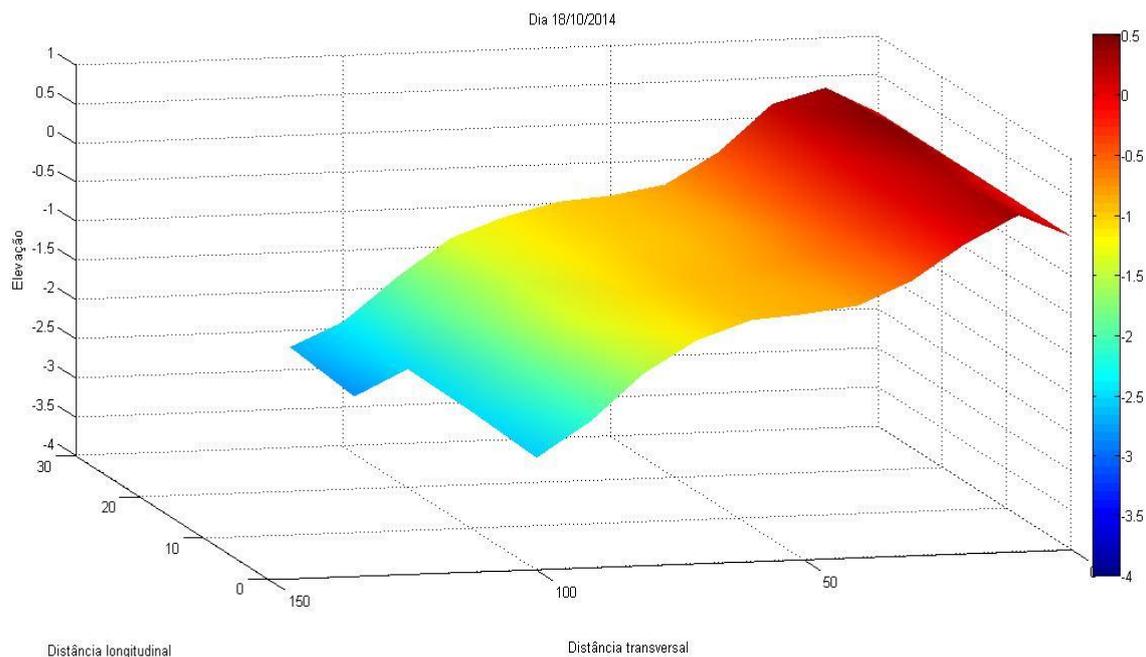


Fig.26 - Acima: Topografia do dia 18/10/2014; Abaixo: variação topográfica entre os dias 18/10 e 17/10 (cores quentes – deposição; cores frias – erosão; escala em metros) com a localização dos pontos amostrais.

Houve uma pequena acresção generalizada entre os dias 17/10 e 18/10, como pode ser verificado na figura acima. Os pontos com maior variação foram 1A, 4C e 4A, com deposições de 5-10cm para os dois primeiros pontos e 10-15cm para o último. Os pontos 1C, 3C e 4B obtiveram deposições de até 5cm, enquanto o restante dos pontos não sofreu quase nenhuma alteração. Esta acresção observada na malha amostral pode ser devida tanto à pouca energia de onda quanto à ação do vento “terral”, ou seja, vento vindo do continente para o mar (NE a NNO durante o dia 18/10).

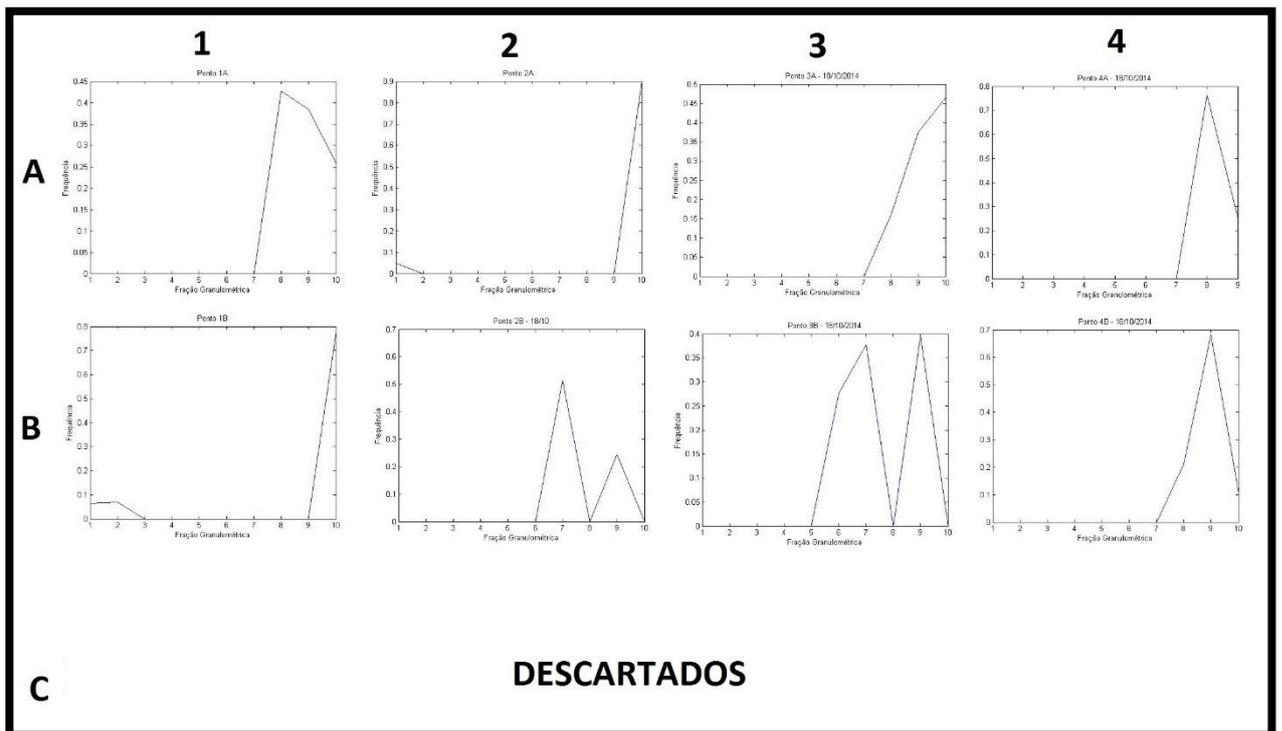
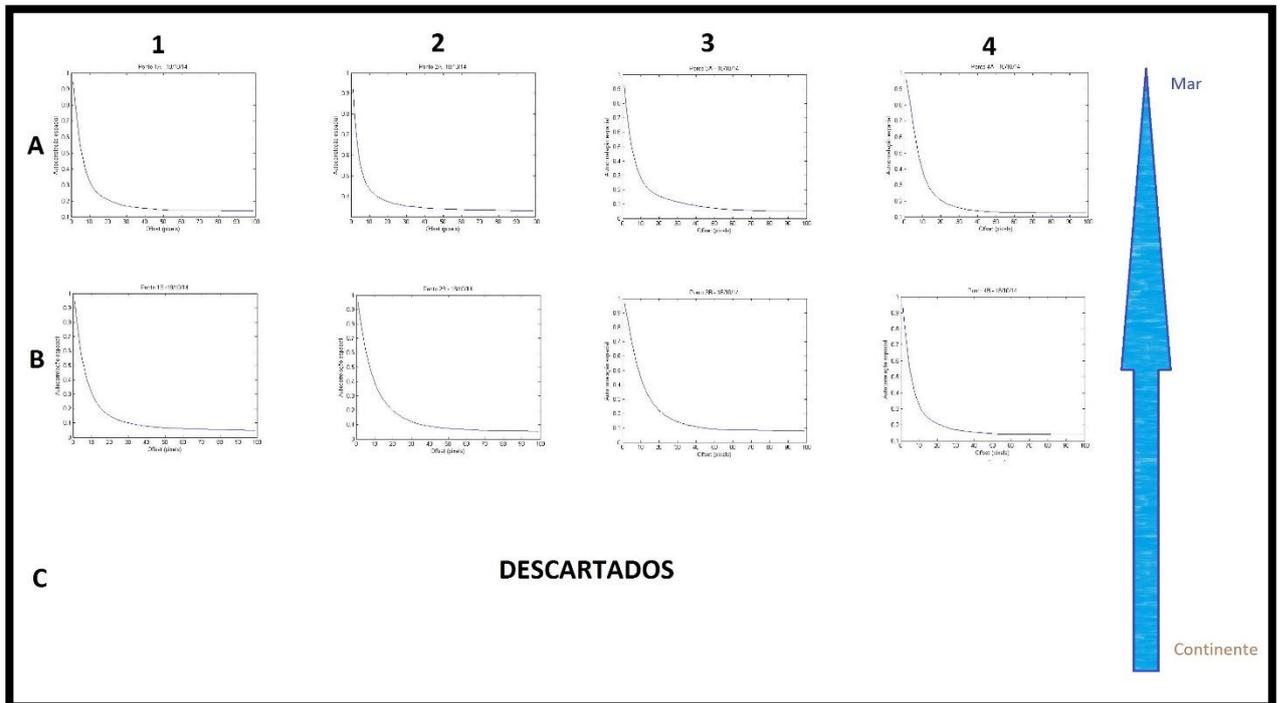


Fig.27 - Acima: Curvas de Autocorrelação das amostras de sedimento superficial do dia 18/10/2014; Abaixo: Gráfico de distribuição granulométricas das amostras sedimentares superficiais do dia 18/10/2014.

A partir da figura 27, que mostra as curvas de autocorrelação e gráficos de distribuição granulométrica para as amostras sedimentares superficiais do dia 18/10/2014, podemos definir os tipos de sedimento presentes neste dia.

Os pontos 1 A, 2 A, 3, A, 4 A, 1B, e 4B são compostos por areia fina (F1). Os pontos 2B e 3B possuem areais finas a grossa, sendo uma mistura entre F1 e F3, que podem indicar o transporte de um grupo de sedimentos sobre outro. Os pontos amostrais da fileira C foram descartados devido à falha na coleta da imagem. As imagens possuíam marcas de deposição no leito causados pelo vento que fizeram com que o algoritmo superestimasse o tamanho do grão e assim o tipo de sedimento presente (fig.28). De forma a contornar este problema, teria sido necessário pressionar uma placa contra o leito para que estas formas não fossem gravadas na imagem.

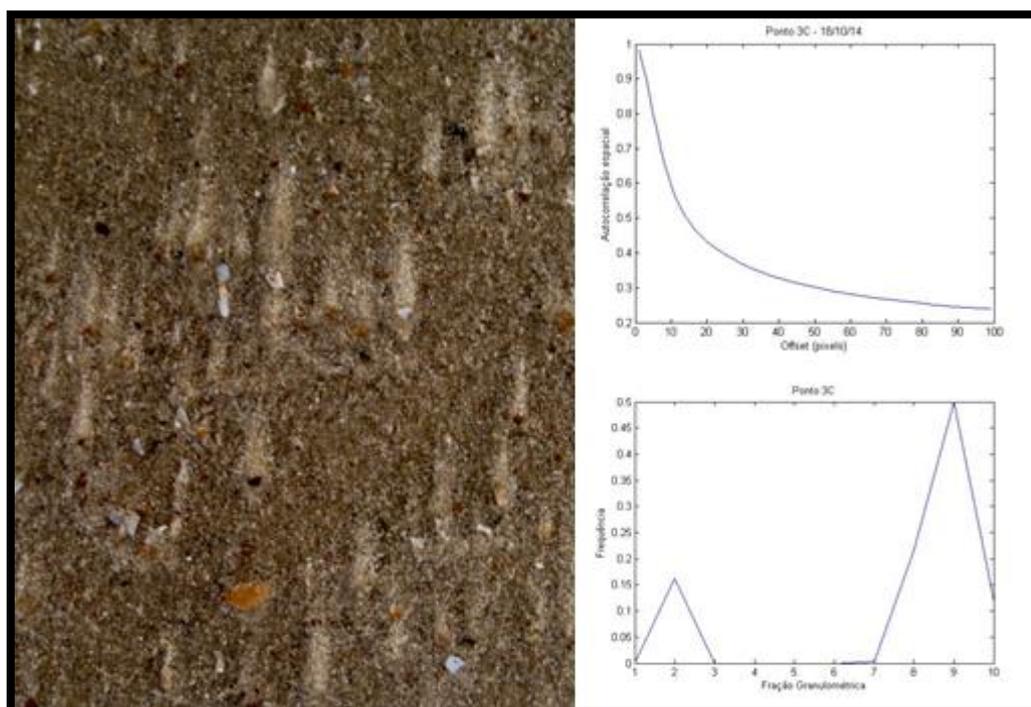


Fig.28 - Exemplo de imagem descartada: Ponto 3C marcas de deposição causadas pelo vento fazem com que sedimentos predominantemente mais finos pareçam estar misturados com cascalho.

Comparando as alterações texturais com as variações morfológicas entre os dias 18/10 e 17/10, podemos verificar que a acresção generalizada experimentada pela área de estudo entre esses dias fez com que os sedimentos presentes no dia 17/10 fossem coberto por areia fina, provavelmente provenientes das dunas trazidas pelo vento (NE a NNO), assim como depositados pelas ondas na parte inferior do perfil. Os pontos 1A e 2A foram os que sofreram maior alteração textural, passando de sedimentos cascalhosos (F4) para sedimentos finos (F1). Esta acresção de sedimentos finos sobre os depósitos bioclásticos seria responsável por mais uma lâmina nas intercalações de areia fina e cascalho biodetrítico. O ponto 2B passou de uma textura sedimentar fina (F1) para uma ligeiramente mais grossa (F3), podendo ter sido acrescida com areias grossas carbonáticas provenientes do pós-praia que teriam sido trazidas pelo vento. No ponto 3B, o efeito foi contrário, ou seja, uma textura mais grossa (F3) foi alterada para uma mais fina

(F1). De novo, este fato pode ter ocorrido graças à ação do agente eólico depositando areia fina das dunas sobre o sedimento do dia 17/10.

A zonação textural observada dos grupos sedimentares pelo tempo sugerem que a posição da zona de *swash* controla o transporte de granulometrias específicas através da face praial. Cada um dos quatro fatores pode representar a dominância de diferentes tipos de transporte sedimentar. A dominância de um processo nos sedimentos da face praial parece depender da posição da amostra nesta região e a quantidade e o tamanho disponível de material. O estágio praial, estágio da maré e energia de onda também são importantes. (Moustafa, 1988)

As populações sedimentares representadas por cada fator provavelmente têm uma diferente história de transporte em relação aos sedimentos de outros grupos. Desta forma, pode-se inferir certos mecanismos e processos responsáveis pelo transporte e zonação de cada fator.

O Fator 1 representa a matriz sedimentar da área de estudo e portanto a maior parte dos sedimentos encontrados. Além de outros agentes, pode-se associar o transporte eólico a este fator.

O Fator 2 parece estar associado com o máximo alcance do *swash*, que atua em depositar a fração mais grossa e quando o *uprush* perde a capacidade de transporte desta fração, o *backwash* transporta somente a fração mais fina. O resultado é uma amostra fortemente bimodal.

O Fator 3 é caracterizado por ser um agrupamento sedimentar intermediário entre os dois primeiros. Portanto, parece ser uma mistura de sedimento mais grosso da face praial inferior com sedimento antecedente mais fino da face praial média e superior. Este fator é relacionado com a migração da zona de *swash* induzido pela maré (astronômica ou meteorológica) ou *set-up*.

O Fator 4 é representado pelos sedimentos mais grossos e, portanto, mais pesados. São limitados à zona de *swash* inferior e ao degrau da praia, podendo ser depositados mais acima da praia (face praial média e superior), quando ocorre uma elevação do nível do mar.

A posição do *swash* controla o transporte seletivo de grãos finos para deposição na face praial superior por meios de saltação e suspensão, enquanto a migração limitada do cascalho do degrau é controlada por tração (ou rolamento) e saltação. Pode ser inferido que o transporte seletivo de grupos sedimentares representa o efeito da média dos processos hidrodinâmicos trabalhando na zona de *swash*. O estudo textural de sedimentos do presente nesta zona altamente ativa é uma ferramenta útil para um melhor entendimento dos mecanismos de transporte de sedimento e para a determinação da preservação potencial da estratigrafia. (Moustafa, 1988)

Assim, se analisarmos, por exemplo, a variação textural das amostras dos pontos 1A e 2A ao longo dos dias do experimento, podemos notar uma clara alternância entre os dois fatores mais contrastantes. No primeiro dia (14/10), estes pontos estão compostos por sedimentos do Fator 4. No segundo dia (15/10), a

composição sedimentar é do Fator 1. No terceiro dia amostrado (17/10), o Fator 4 reaparece. No último dia do experimento (18/10), os sedimentos amostrados são pertencentes ao Fator 1. Esta alternância textural pode ser explicada por migrações da zona de *swash*, que por sua vez, são explicados por flutuações do nível do mar causados por maré, pressão atmosférica, empilhamento de água na costa causado por ondas (*set-up*), entre outros agentes. Provavelmente, a alternância textural evidenciada neste estudo, deve deixar registrada na estratigrafia a sua ocorrência, formando assim depósitos com laminações plano-paralelas com intercalações de sedimentos grossos (F4) e sedimentos finos (F1).

Além destes dois pontos relatados acima, outros situados mais acima da face praial também tiveram uma certa alternância entre fatores durante o experimento. O ponto 3B, teve uma variação textural de F3 para F1 depois para F2, enquanto o ponto 1B, variou de F1 para F3 depois de volta para F1. Nesta região da face praial, o vento, com as oscilações de velocidade e direção, pode ser um agente importante nesta flutuação textural.

Neste estudo específico não foi possível a verificação da sequência de Sonu (1972) pois não houve uma entrada de uma tempestade ou uma grande ondulação que fizesse com que o perfil praial fosse aplainado. Porém, em outras saídas de campo, por meio de observações visuais, foi possível constatar que a Praia dos Concheiros apresenta sim esta sequência de recomposição praial em certas ocasiões.

Klein (1996) relatou que estudos morfológicos e sedimentológicos de maior periodicidade e frequência na Praia dos Concheiros são necessários para uma completa elucidação dos processos responsáveis pelas configurações de camadas de sedimento fino intercaladas com camadas de sedimentos grossos bioclásticos. O presente experimento foi feito, portanto, com o intuito de contribuir para um melhor entendimento sobre estas características da área de estudo. Na próxima seção, veremos como são as características estratigráficas de maior profundidade na região.

4.2 Estratigrafia da sub-superfície praial

Nesta seção, são apresentadas as imagens de GPR, com uma breve descrição e interpretação das estruturas observadas, utilizando a terminologia recomendada por Neal (2004).

Imagens longitudinais (200MHz)

Seguem imagens da estrutura interna da praia, imageada utilizando o GPR com uma antena de 200MHz.

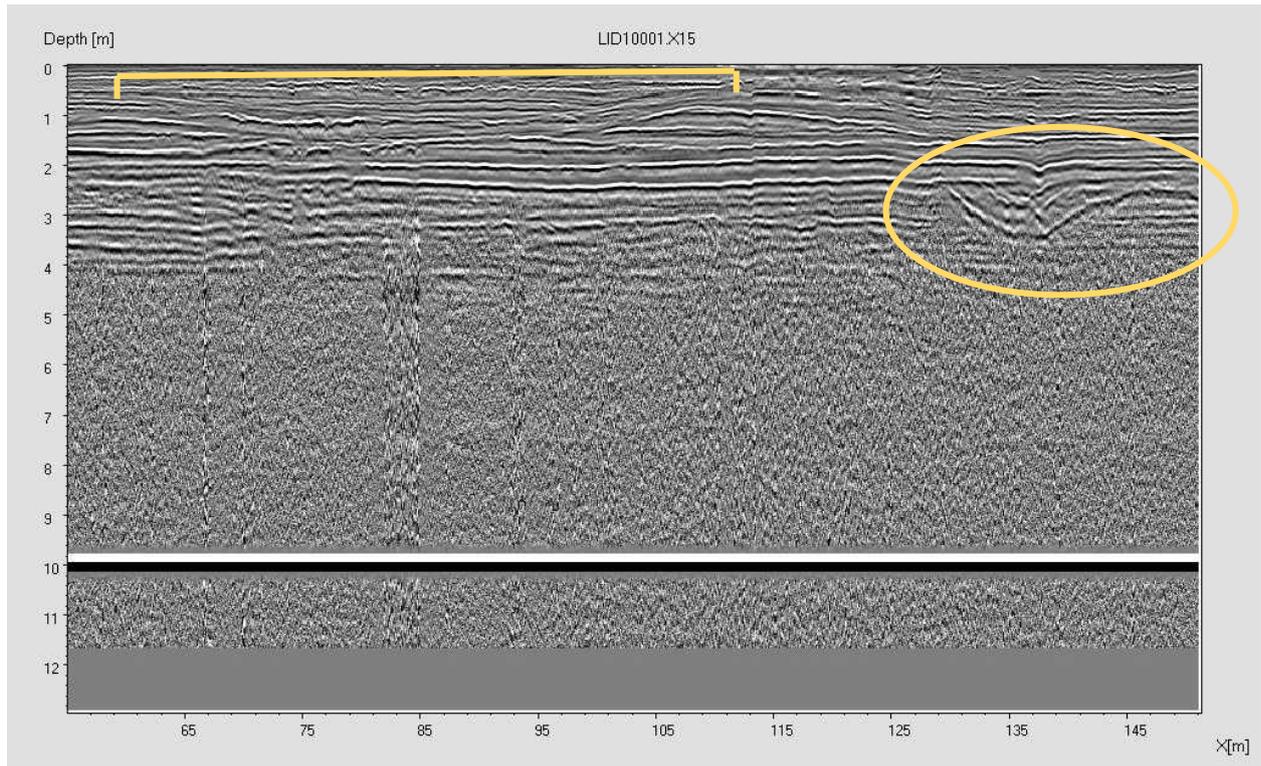


Fig.29 - Imagem longitudinal de GPR com antena de 200MHz, localizada a 2km ao norte do hotel

Na parte superior da figura 29, notam-se duas feições (indicados pela linha amarela) com uma geometria de *onlap* nas superfícies de radar, delimitando uma fácies de radar com refletores de forma curvada convexa com uma configuração sub-paralela entre os refletores, que são moderadamente contínuos. Estas feições parecem indicar uma acresção vertical, provavelmente referentes a cúspides praiais pela continuidade e caráter ondulatório (com comprimento de aproximadamente 50m). Abaixo e à direita da figura, indicada pela elipse amarela, nota-se uma geometria de superfície de radar concordante, mostrando uma fácies de radar curvada côncava, com configuração paralela entre os refletores. Aparentemente, esta feição corresponde ao preenchimento de um canal, ou sangradouro. A partir de 4m de profundidade, o sinal é atenuado devido à água subterrânea salobra, e a imagem e os refletores não ficam tão nítidos.

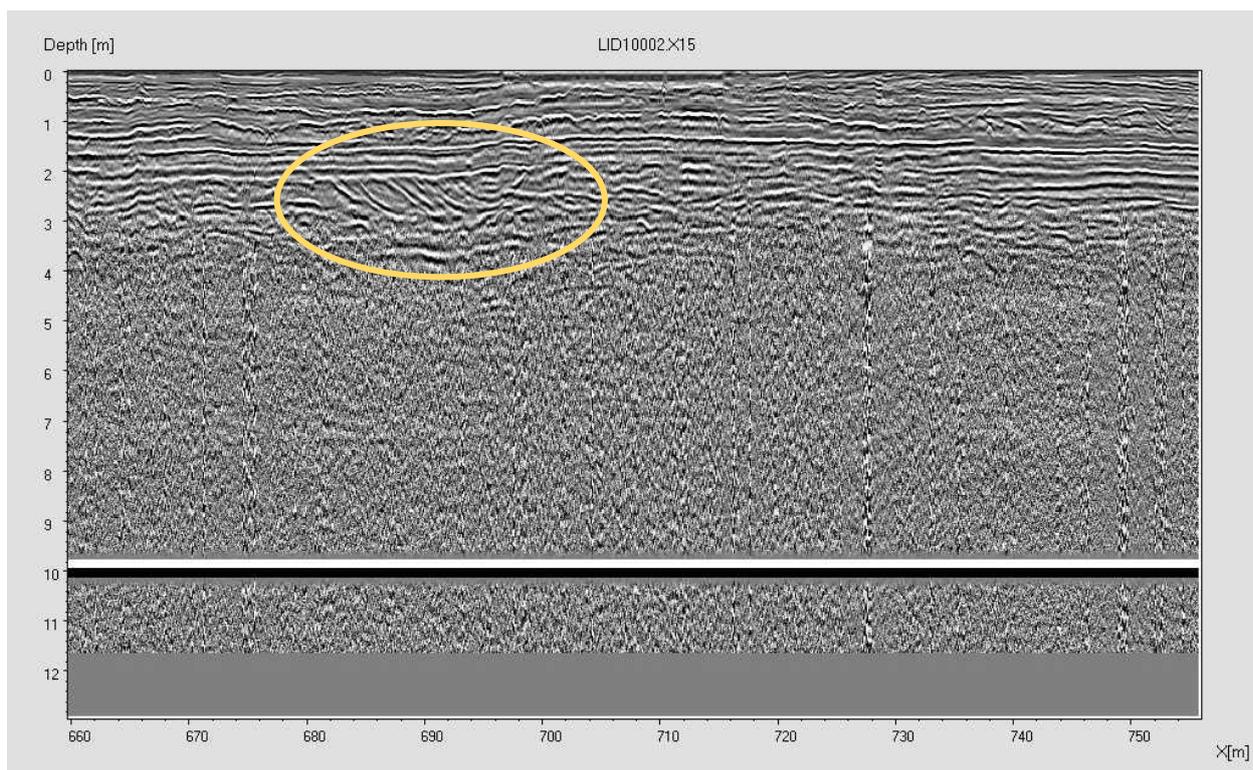


Fig.30 - Imagem de GPR de uma seção longitudinal utilizando antena de 200MHz localizada a 1.6km ao norte do hotel

No destaque da figura 30, a 1,6km do hotel, a NE, nota-se a presença de refletores com geometrias de *toplap* e *downlap*, delimitando uma fácies de radar com a forma curvada sigmoidal, com um mergulho de ângulo moderado em direção a NE, com uma configuração oblíqua tangencial entre os refletores. Esta fácies parece mostrar uma acresção e/ou migração lateral, de uma cúspide ou sangradouro. De novo, a água subterrânea salobra tem efeitos de atenuação de sinal a partir de 3-4m, o que diminui a nitidez dos refletores e, portanto, dificulta a identificação de feições mais profundas.

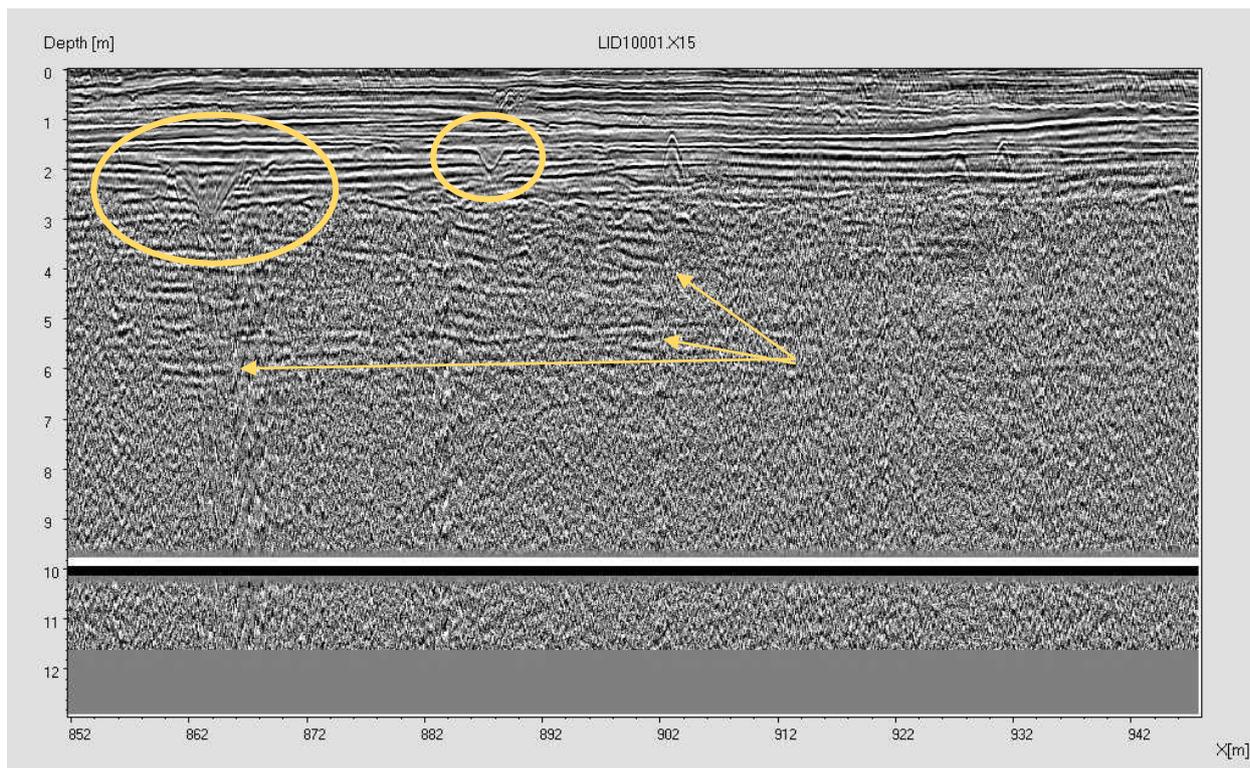


Fig.31 - Imagem longitudinal de GPR com antena de 200MHz, localizada a 0.8km ao norte do hotel.

Na imagem da figura 31, destacam-se feições de truncagem erosional (elipses amarelas). Podem estar associadas a escarpas transversais em cúspides formadas em bermas do antigo perfil praial. Podem, ainda, corresponder a escarpas formadas por canais ou sangradouros, que em épocas de maior pluviosidade, podem causar esses tipos de feições erosivas. Nota-se o mesmo tipo de atenuação de sinal também observado nas outras imagens devido à água subterrânea, embora, nesta imagem, alguns refletos (identificados com setas) abaixo do lençol podem ser visualizados. Devem ser referentes a camadas de sedimento bem contrastantes entre si, como laminações intercaladas de cascalho biotétrico e areia fina siliclástica.

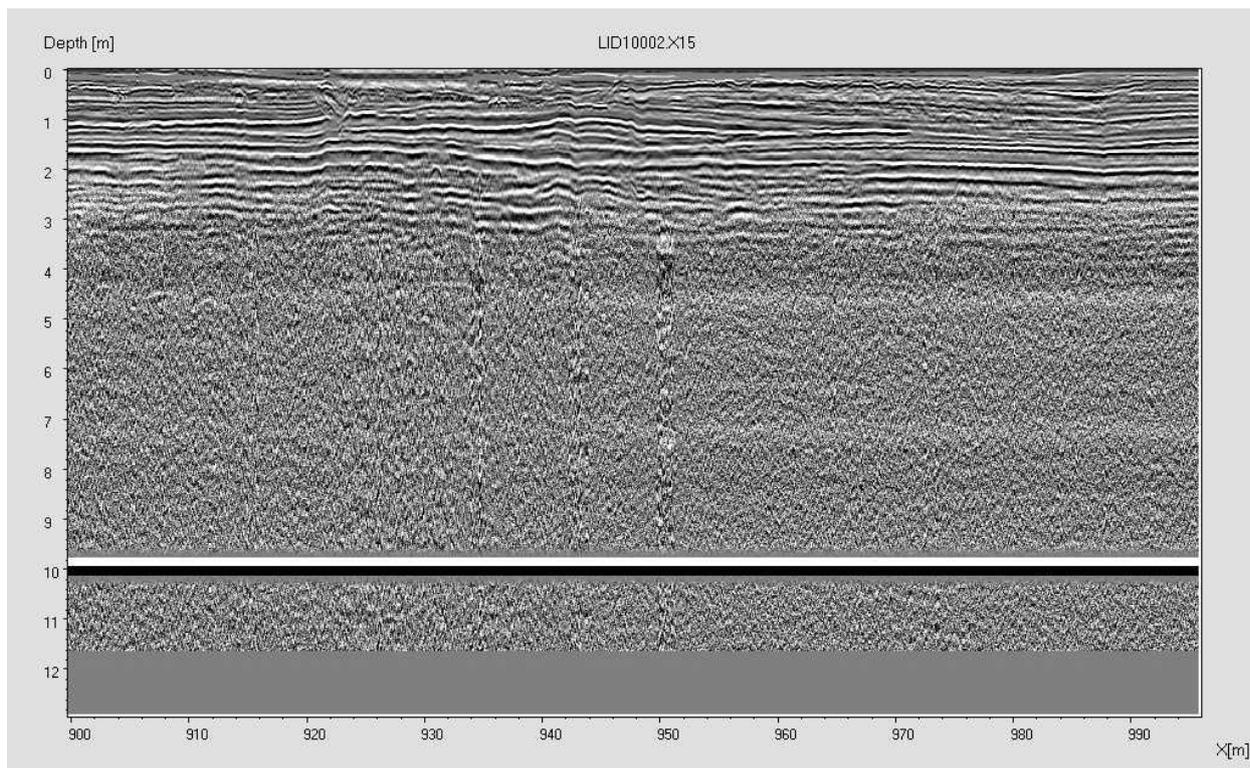


Fig.32 - Imagem de GPR com antena de 200MHz, localizada na região onde foram feitos os perfis praias, na frente da casa do eremita Pastor.

Na figura 32, podem ser observadas que os refletores são concordantes com configurações plano-paralelas horizontais contínuas. De acordo com Costas *et al* (2006), esse tipo de configuração representa uma agradação ou acreção vertical, possivelmente decorrentes de processos de *overtopping/overwashing* ou sobre-lavagem. Nota-se também que a espessura das camadas destas lâminas variam verticalmente. As possíveis causas destas variações são abordadas no próximo capítulo. Estes tipos de refletores podem ser observados também em todas as outras imagens, correspondendo a laminações de sedimentos de material diferente intercalando-se (cascalho biodetrítico e areia fina siliclástica). Em depósitos formados por areia e cascalho, os refletores marcam efetivamente as posições das superfícies delimitadoras (Neal *et al*, 2002).

Imagens com a antena de 400 MHz

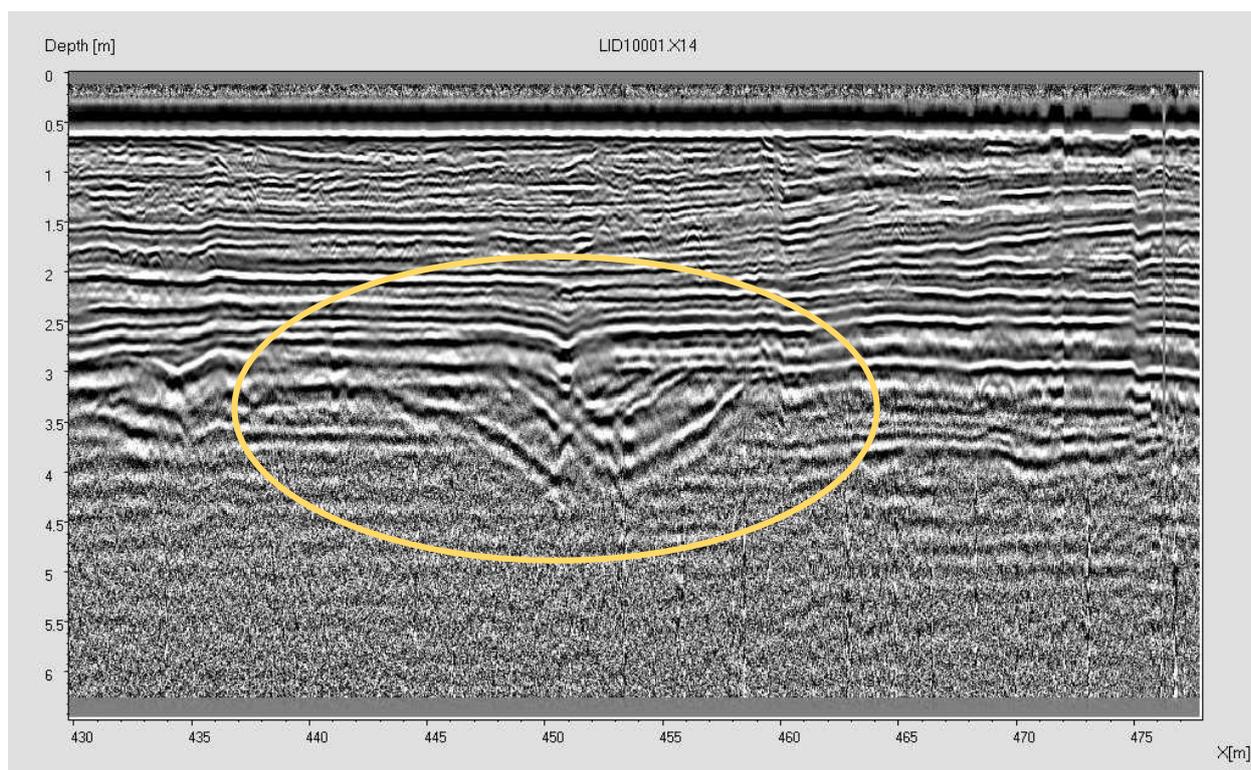


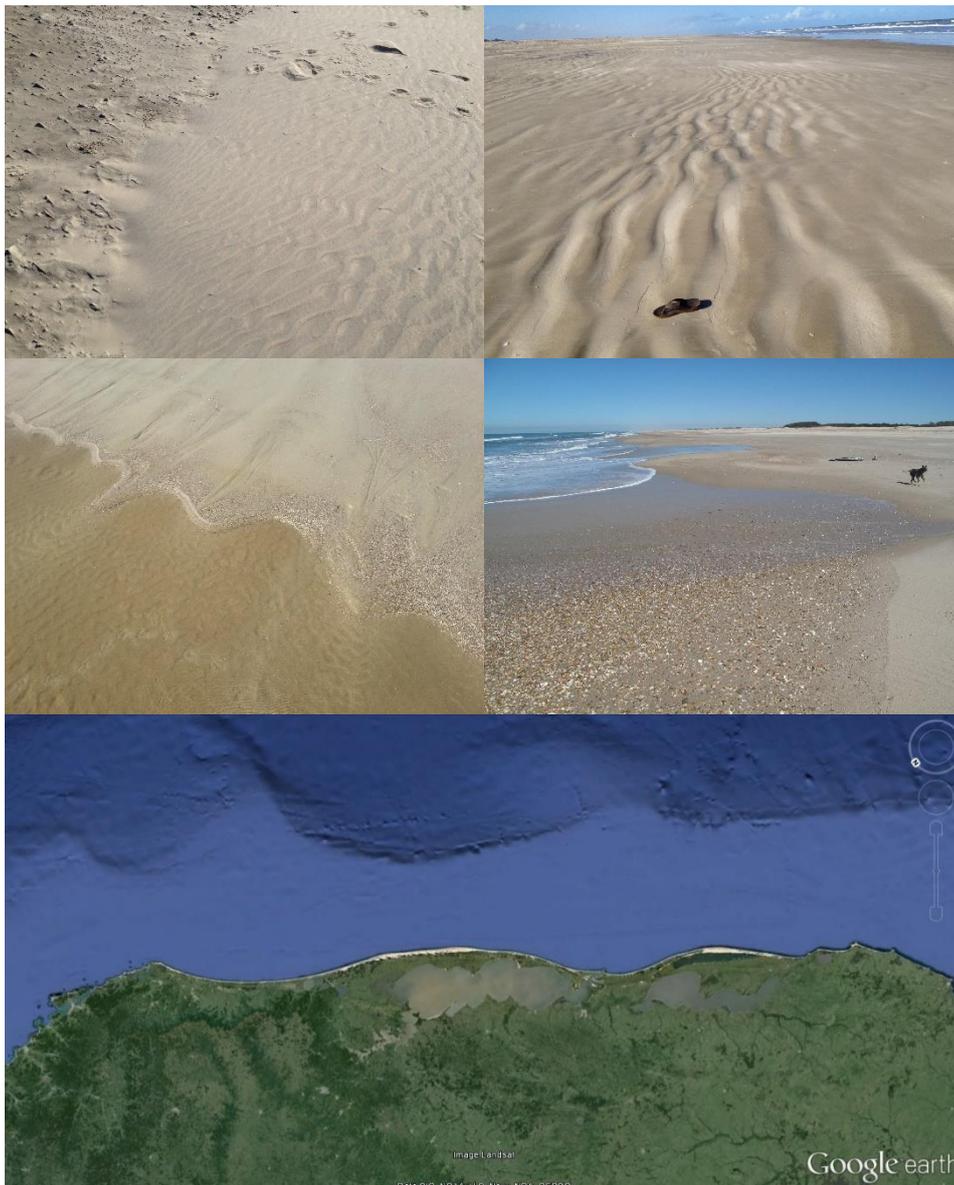
Fig.33 - Imagem longitudinal de GPR utilizando antena de 400MHz, na região onde foi feito os perfis topográficos.

Na figura 33, uma imagem de GPR feita utilizando a antena de 400MHz proporciona melhor resolução, mas com menor profundidade de penetração do sinal. Destaca-se uma feição com refletores discordantes com a vizinhança, delimitando uma fácies de radar de forma curvada côncava, onde os refletores estão configurados sup-paralelamente e são moderadamente contínuos. Parecem representar um canal ou embaiamento de cuspide que foi posteriormente assoreado. Além disso, é possível notar, assim como nas outras imagens, a presença de laminações plano-paralelas com variação vertical de espessura.

A aplicação de GPR em sedimentos expandindo-se rapidamente, pois fornece imagens de sub-superfície rasa de alta resolução que não podem ser derivadas por qualquer outro método não-destrutivo. O uso de GPR foi além da caracterização de ambientes por padrões de refletores e fácies de radar e está se movendo para uma avaliação mais quantitativa de geometria e arquitetura de corpo arenoso. O GPR tem grande potencial na seleção de locais para testemunhos e amostragens para estudos geotécnicos, estratigráficos e geocronológicos. O seu uso deve levar a avanços significativos em estudos estratigráficos do Quaternário. (Bristow e Jol, 2003)

4.3 Padrões Rítmicos

A morfodinâmica costeira e praias visa estudar a forma, estrutura e evolução da interface fluido-sedimento e o ajuste mútuo de padrões no escoamento, morfologia e transporte sedimentar. Interações entre sedimentos, ondas e correntes sobre uma gama de escalas espaço-temporais resultam em uma variedade de feições observadas na região costeira: *ripples* e *megaripples*; ondulações da linha de costa que vão de dezenas de metros, como as cúspides praias, centenas de metros no caso das megacúspides, chegando até quilômetros em feições da linha de costa (fig.34); padrões de deposição no leito chamado de *bedforms* que aparecem na plataforma continental interna, entre outras. (Coco e Murray, 2007)



Fig,34 - Exemplos de feições da zona costeira da área de estudo que apresentam ritmicidade: *ripples*, cúspides, e linhas de costa ondulada ou “cuspíada” (*cusped shoreline*; fonte: google earth)

A presença e a regularidade marcante de algumas dessas feições deixam pesquisadores perplexos a décadas. Embora resolver esse enigma científico tenha sido a maior motivação, o entendimento de processos da zona costeira e a habilidade de prever a formação de padrões têm implicação na capacidade de prever respostas da linha de costa a ondas. Podem, também, antecipar como tendências de erosão podem afetar significativamente a população que vive perto da costa. A morfodinâmica costeira afeta o transporte de poluentes, as cadeias alimentares, e a ecologia praias. Além disso, *bedforms* que se desenvolvem na plataforma interna podem afetar várias aplicações de engenharia relacionadas à prospecção de recursos minerais marinhos e à dragagem de canais, entre outras (Coco e Murray, op. cit).

Os primeiros estudos sobre a formação destes padrões rítmicos na geomorfologia assumia a pré-existência de um molde – estruturas organizadas espacialmente pela hidrodinâmica ou pelo embasamento geológico – onde sua forma seria impressa na areia inconsolidada. Chamado de molde forçante, essa noção é atraente, pois as características do padrão morfológico, principalmente as escalas espaciais, podem ser previstas deterministicamente, baseado somente nas propriedades do molde (Coco e Murray, 2007).

No caso das cúspides praias, por muitos anos, sua formação foi atribuída a ondas marginais, ondas não-discerníveis visualmente e que possuem uma componente periódica longitudinal. Essas ondas, por possuírem escalas espaciais da mesma ordem das cúspides, foram consideradas responsáveis por imprimir na praia uma estrutura que daria surgimento ao aparecimento dessas cúspides. O problema da abordagem do “molde forçante” é que ele contorna a complexidade das interações morfodinâmicas - a textura superficial responde passivamente às condições hidrodinâmicas. Na natureza, a morfologia afeta a hidrodinâmica e o transporte sedimentar, que por sua vez altera a morfologia, e assim, a morfologia, em evolução contínua, afetará a hidrodinâmica e o transporte sedimentar.

Outra hipótese é a de auto-organização, onde interações não-lineares e o *feedback* entre a hidrodinâmica e a morfologia acarretam em formações de padrões. Dessa forma, ocorre o surgimento de novas propriedades e dinâmicas dos sistemas que estão efetivamente desacoplados dos constituintes, ou seja, a feição emergente não é igual à soma das partes (Coco e Murray, 2007). Modelagens numéricas mostram que esta hipótese é bem sucedida na explicação da formação desses padrões rítmicos.

A teoria do caos nos mostra que comportamentos ricos, complicados e perpetuamente dinâmicos podem surgir de simples interações não-lineares. Trabalhos geomorfológicos recentes têm revelado vários casos onde interações locais e determinísticas em um sistema distribuído espacialmente podem explicar comportamentos complexos que previamente seriam relacionados a causas também complexas que desafiam um entendimento holístico (Murray *et al*, 2009). Uma gama de interações não-lineares pode dar origem a padrões de auto-organização com fortes gradientes e localizações espaciais que antes eram atribuídos a hipotéticos “moldes forçantes”. Novos conhecimentos e modelos das

interações que criam essas estruturas localizadas facilitam explorações de como a paisagem vai alterar, enquanto o clima ou o uso da terra mudam.

Na praia dos Concheiros, pode-se encontrar algumas destas feições, conforme ilustra a figura 34. Além destas, Damião (2013) observou que os depósitos de bioclasto, que dão nome à praia, são depositados descontinua e ritmicamente em diferentes escalas temporais. Coletando sedimentos na face praial e no degrau da praia, desde o Farol do Albardão (ponto 1) até a Barra do Chuí (ponto 44), a cada 2km, observou-se uma variação longitudinal na composição sedimentar (fig.35).

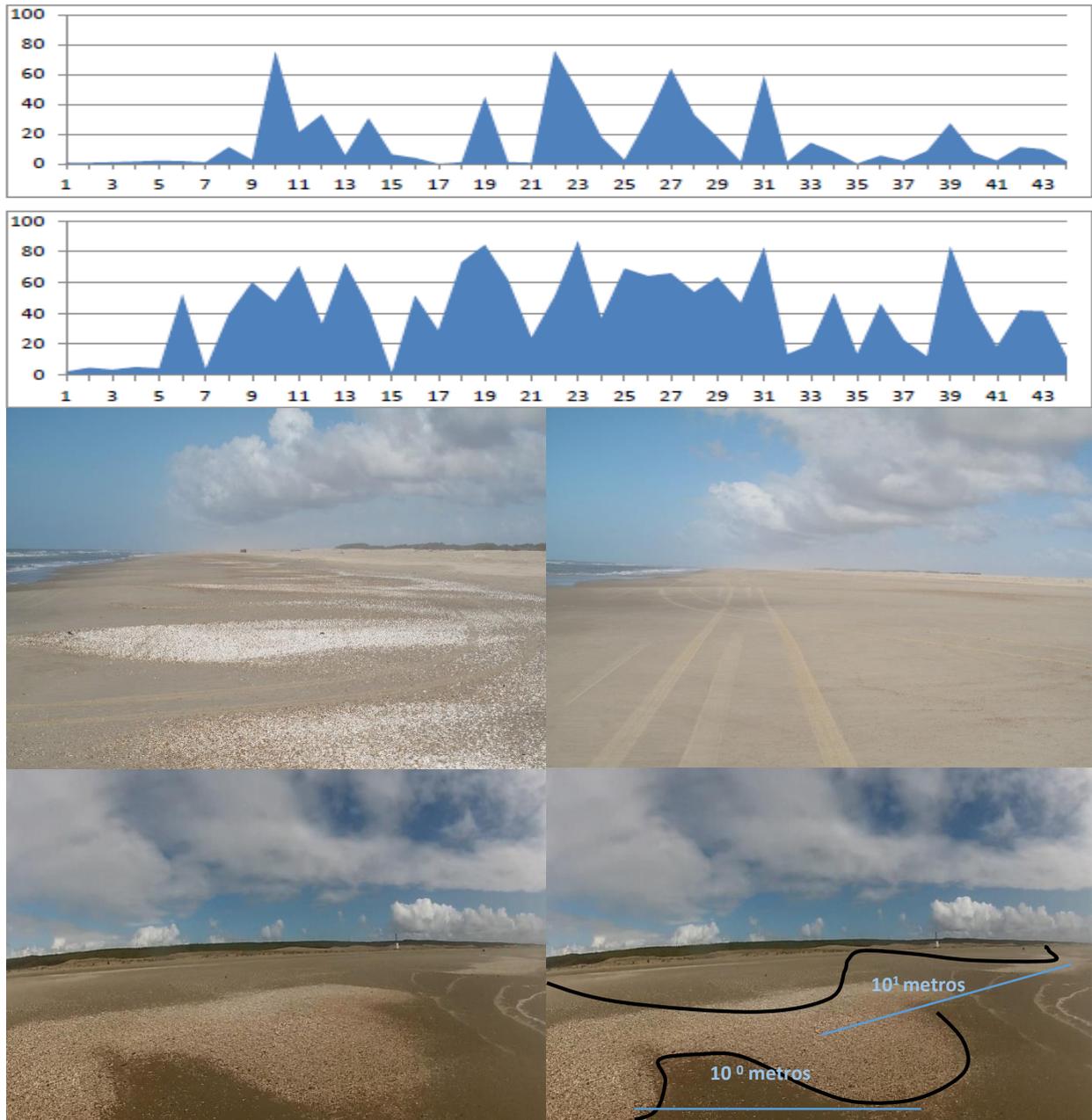


Fig.35.A: Gráfico de porcentagem de carbonato (eixo vertical - % de carbonato; eixo horizontal – pontos de amostragem) dos sedimentos da face praial e degrau da praia (ordem de 10^3 metros); B: depósitos referentes aos picos no teor de carbonato dos gráficos acima, enquanto que C mostra a ausência de depósitos, correspondendo às cavas do gráfico; D: imagem de depósitos biodetríticos mostrando duas escalas de ritmicidade, uma na ordem de metros outro na ordem de dezena de metros (linhas pretas representam o caráter ondulatório dos depósitos e as linhas azuis o comprimento destas “ondas”).

Coco e Murray (2007) descrevem a presença de formas de leito ordenadas na plataforma interna como sendo um exemplo intrigante de uma diferente instabilidade morfodinâmica; uma que não é dirigida por interações entre fluxo e topografia, mas que, ainda sim, resulta no desenvolvimento de padrões rítmicos. No caso dessas formas de leito, ou *bedforms*, a instabilidade é dirigida por variações na composição sedimentar e o papel de mudanças topográficas é secundário. De acordo com os autores, esta foi a primeira vez que a composição sedimentar é hipotetizada a ser a causa do surgimento de padrão.

No caso dos depósitos carbonáticos encontrados na praia dos Concheiros, o padrão rítmico formado por eles também seriam dirigidos por variações na composição sedimentar. O surgimento desses padrões rítmicos sedimentares da região pode ser atribuído a ondas marginais, no caso da hipótese do molde forçante; no caso da hipótese de mecanismos de auto-organização, uma instabilidade inicial poderia levar à formação dos depósitos rítmicos pela ação de *feedbacks* positivos. Por exemplo: em uma região que sofresse uma pequena deposição inicial de bioclastos, a presença de material mais grosso, que leva a uma maior porosidade e, portanto, a uma maior infiltração, favoreceria uma maior deposição, concentrando assim ainda mais sedimentos carbonáticos, fazendo com que este depósito expandisse.

Existe ainda na literatura uma terceira hipótese para a formação de padrões rítmicos na geomorfologia. A hipótese do molde quasi-forçante, onde uma forçante (onda marginal por exemplo) seria necessária como uma perturbação inicial, que imprimiria a escala na qual as interações não-lineares e os processos de *feedback* do mecanismo de auto-organização agiria, acarretando na formação de padrões. Vários autores (De Schipper, 2011; Prsuzak et al, 2006; Coco et al, 2001) são adeptos desta terceira hipótese, por não descartar nenhuma das duas anteriores e sim, as unir. Esta hipótese parece ser a mais provável, pois observações de campo feita por esses autores mostra que a ritmicidade aumenta de comprimento, com o aumento da energia de onda (período e altura)., Modelagens numéricas também mostram que os mecanismos de auto-organização também são capazes de gerar padrões rítmicos, necessitando apenas de uma perturbação inicial. De acordo com Prsuzak et al (2006), baseando-se em observações de campo, foi constatado que, para condições de baixo nível energético de ondas, o fator dominante na geração de ritmicidade parece ser o mecanismo de auto-organização, enquanto que com o aumento da intensidade do clima de ondas, moldes hidrodinâmicos longitudinais do tipo onda marginal devem prevalecer e se tornam o mecanismo decisivo na geração de ondulações rítmicas da linha de costa e de padrões de deposição.

Padrões, regulares ou irregulares, podem se auto organizar no tempo assim como no espaço. No que pode ser chamado também de comportamento autogênico, interações internas do sistema, gera mudanças, ou até variações abruptas, no estado deste sistema. Modelos recentes de evolução geomorfológica mostram que, ao contrário de suposições prevalecentes, grandes eventos podem ocorrer sem uma mudança-gatilho na forçante do sistema. Esta concepção pode alterar nossa

interpretação de paleoclimas e nível do mar, assim como nossas expectativas de como a superfície terrestre irá responder no futuro. (Murray *et al*, 2009)

Na praia dos Concheiros, a composição sedimentológica parece estar variando numa escala decadal. Figueiredo Jr. (1975), percorrendo a praia do Farol do Albardão até o Chuí, encontrou na zona de lavagem (face praial) diversos depósitos biodetríticos de forma alongada, medindo por vezes alguns quilômetros, de largura nunca superior a 5 metros e espessura máxima de 5cm. No trabalho de Serau (1999), pode-se observar pela imagem de 1994 que os depósitos biodetríticos parecem ser mais espessos e largos (fig.36). Já de 2010 para os dias atuais, observações visuais e imagens digitais, além de coletas de sedimento (Damião, 2013), mostram que os Concheiros estão se “diluindo”, ou diminuindo sua concentração, em comparação com estudos feitos na década de 1990 (Calliari e Klein, 1993; Asp, 1996; Klein, 1996; Serau, 1999). Uma seção longitudinal da praia utilizando o GPR, com uma antena de 400MHz, mostra uma variação estratigráfica nítida (fig.37).

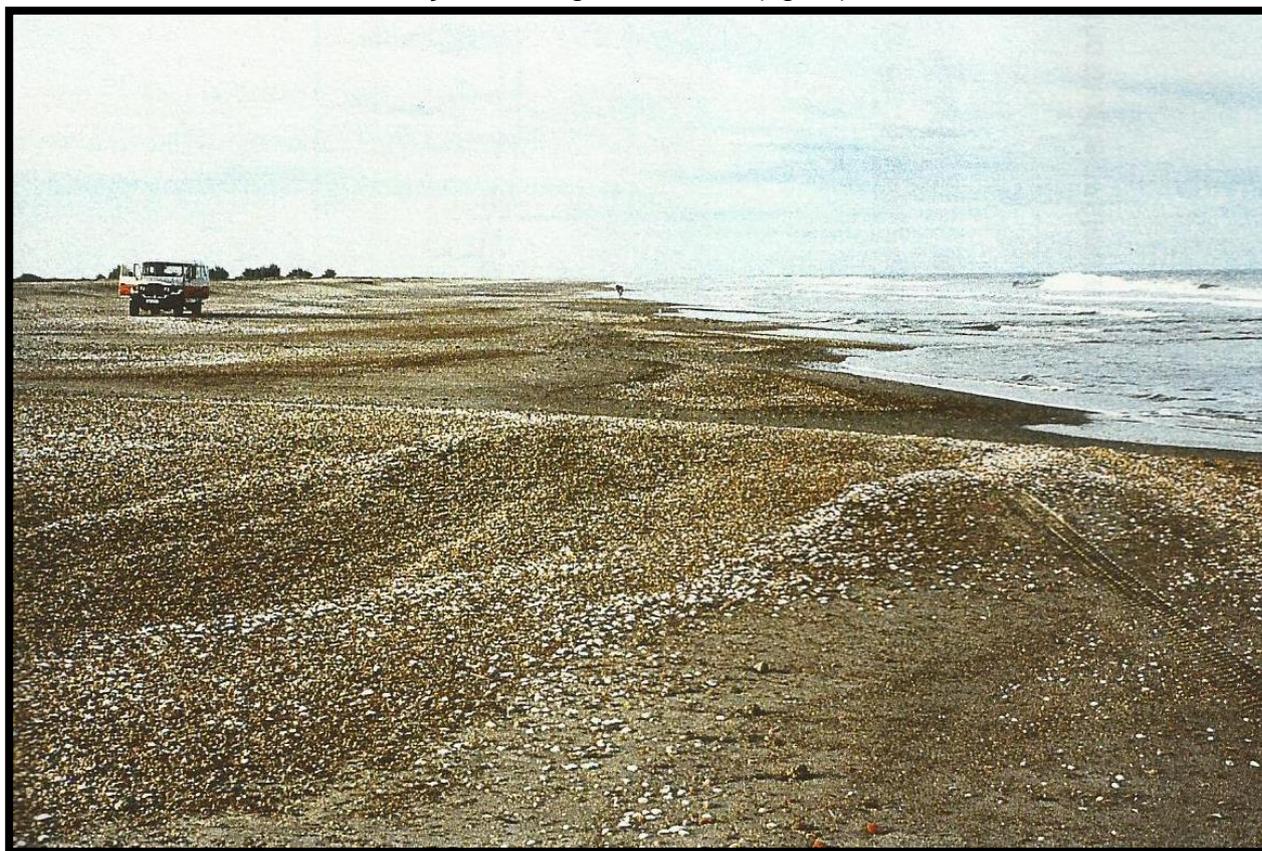


Fig.36 - Face praial da Praia dos Concheiros em 1994 (Serau,1999). Nota-se que havia uma maior abundância de bioclastos nesta época do que nos dias atuais e aparentemente do que em 1975 também.

Parece existir uma variação interdecadal na composição sedimentar e, portanto, na morfologia da Praia dos Concheiros. A variação morfológica fica evidenciada pela comparação da declividade praial calculada em 1/30 neste trabalho com a declividade de 1/13 encontrada por Calliari e Klein (1993). Esse fato pode estar associado a variações interdecadais no clima de ondas e de ventos, ou a outro tipo de forçante, como variações no *input* de material carbonático. Esta variação pode ainda estar relacionada a mudanças intrínsecas do sistema, ocasionadas por comportamentos autogênicos, nos quais interações não-lineares e *feedbacks* entre

a hidrodinâmica e a morfo-sedimentologia da praia, acarretam esse tipo de padrão rítmico temporal, que ocorre em várias escalas, desde a escala de *swash*, passando pela escala de evento ou *swell*, até variações interanuais e interdecadais.

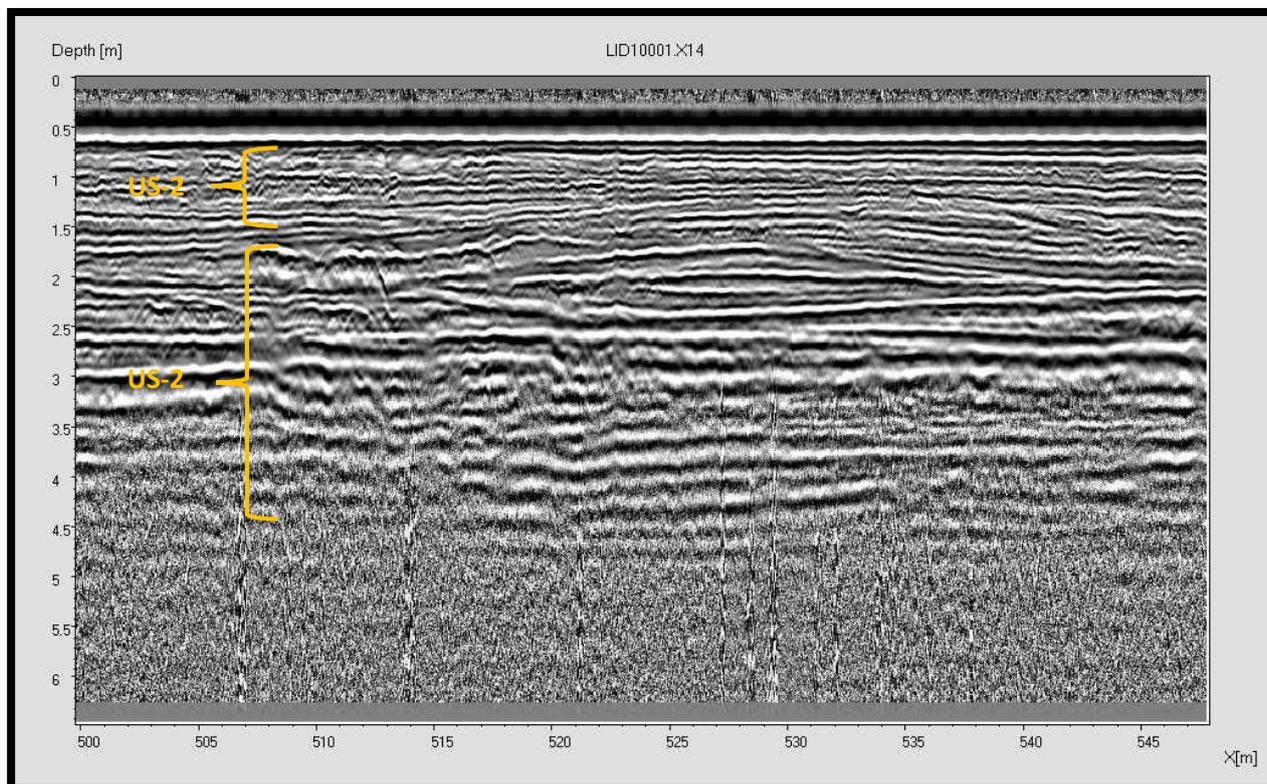


Fig.37 - Seção longitudinal da praia imageada utilizando GPR, com uma antena de 400MHz. Nota-se duas unidades sísmológicas diferentes (US-1 e US-2). Uma mais rasa com intercalações mais finas e outra mais profunda, com intercalações mais grossas.

Essa oscilação da sedimentologia praial fica registrada na estratigrafia, configurando dessa forma um padrão rítmico espacial na dimensão vertical, como pode ser observado na imagem do GPR (fig.37). Esse padrão rítmico vertical ocorre também em diferentes escalas, desde centímetros entre as camadas de intercalação das lâminas de sedimento, até metros entre as diferentes unidades sísmológicas. É bem provável que a unidade sísmológica mais profunda, que ocorre mais ou menos a partir de 2m na imagem do GPR, seja correspondente a maiores concentrações de material carbonático, provavelmente referente à década de 1990; enquanto que a unidade sísmológica mais rasa corresponde a sedimentos ocorrentes atualmente.

Depósitos sedimentares nos permitem investigar mais distante no passado. Depósitos rasos representam resultados de mudanças de relativo curto prazo, enquanto registros estratigráficos mais profundos nos mostram processos de longo prazo. Esses registros geralmente têm sido interpretados como mudanças nas condições forçantes (meteorológica, climática, oceanográfica, glácio-eustática e tectônica, por exemplo). Com novas perspectivas teóricas, pesquisadores começam a entender o registro sedimentar como representação de uma “complexidade

fossilizada”, onde os padrões preservados são resultados de comportamentos autogênicos, às vezes interagindo com eventos forçantes. (Murray *et al*, 2009)

Distinguir o papel das mudanças das forçantes e da dinâmica autogênica (auto-organização) por meio de um leque de escalas requer uma síntese deliberada de esforço em modelagem numérica e observações de evolução, no passado e no presente, da superfície terrestre. O entendimento de eventos paleoclimáticos e de como a superfície terrestre irá responder a futuras mudanças requer essa distinção entre comportamentos auto organizados dos forçados. Mudanças climáticas alteram o contexto no qual os sistemas da superfície terrestre operam, tendendo a transformar paisagens e regimes ecossistêmicos. (Murray *et al*, op.cit.).

A lente analítica de fenômenos emergentes realça a ideia de que estudar as unidades fundamentais do sistema (os processos de pequena escala dentro de uma paisagem, por exemplo) pode não ser suficiente para entender como um sistema funciona em maiores escalas. O comportamento coletivo de componentes de menor escala sintetizam-se em novas interações, que produzem estruturas e comportamentos de maior escala. Essas estruturas emergentes podem, por sua vez, influenciar os processos de menor escala. Portanto, quando *feedbacks* não-lineares levam a uma auto-organização de padrões e comportamentos de larga escala, a causalidade se estende nas duas direções através das escalas (Murray *et al*, 2009).

Portanto, a consciência de localizações espaciais de larga escala, as mudanças autogênicas associadas e como esses aspectos de auto-organização de linhas de costas arenosas interagem com variações nas forçantes de tempestades e de nível do mar permitem estratégias de gerenciamento mais efetivas.

5. Conclusões

Os depósitos de bioclastos na face praial dos Concheiros são a parte emersa de uma feição deposicional muito maior, que varia espacial e temporalmente em várias escalas diferentes. Na escala geológica, a posição geográfica da barreira e a quantidade de material carbonático produzido variam com as flutuações glácio-eustáticas do nível do mar e com as mudanças climáticas associadas. Em períodos decadais, a espessura e concentração destes depósitos de sedimento biogênico sofrem alterações, podendo ser causadas tanto por flutuações climáticas e oceanográficas, como por comportamentos autogênicos intrínsecos ao sistema. Esses depósitos possuem variações sazonais da morfo-sedimentologia causadas pela variação do clima de ondas e de ventos. Além disso, a cada passagem de uma ondulação energética, suas características morfológicas e sedimentológicas podem mudar drasticamente. Ainda, no decorrer dessa ondulação, cada série ou grupo de onda acarreta em empilhamento de água na face praial (*set-up*) de forma intermitente. Por fim, mas não menos importante, o espraiamento da onda na zona de *swash* é que efetivamente distribui o sedimento pela face praial, tanto no sentido transversal quanto no longitudinal.

Todos esses processos e mecanismos que atuam no transporte de sedimento deixam suas assinaturas impressas na estratigrafia da praia. Dessa maneira, o estudo da estrutura interna da praia é de fundamental importância. Mas para realizar isso de forma não invasiva, o melhor método disponível atualmente é o GPR, como foi evidenciado neste estudo.

Outra característica interessante na área de estudo é a distribuição longitudinal dos depósitos de cascalho biodetrítico, que ocorre de forma descontínua e rítmica. Esta ritmicidade dos depósitos ocorre em diversas escalas, e, assim como outros padrões rítmicos encontrados, tanto na Praia dos Concheiros, como em outras praias, podem ter sua formação atribuída a dois mecanismos. O primeiro é o molde forçante, no qual estruturas organizadas espacialmente na hidrodinâmica ou no embasamento geológico imprime sua forma no sedimento inconsolidado. O segundo é o comportamento autogênico, ou mecanismo de auto-organização, onde interações não-lineares simples podem levar à formação de padrões aparentemente complexos por meio de *feedbacks* entre hidrodinâmica e a morfo-sedimentologia.

Para um melhor entendimento da zonação sedimentar na face praial e dos processos envolvidos, necessita-se de amostragens mais periódicas desta região, com uma melhor resolução espaço-temporal, para que sirva de *input* em modelos morfodinâmicos e de transporte sedimentar. Assim, o método de determinação granulométrica desenvolvido por Rubin (2004), exibido neste estudo, se mostra extremamente eficaz por sua rapidez e baixo custo, sem perder acurácia. Novos métodos de extração automatizada de informações sedimentológicas a partir de imagens digitais estão sendo desenvolvidos com base em Rubin (2004). Portanto, por meio da evolução tecnológica, tanto dos equipamentos fotográficos quanto dos algoritmos e códigos numéricos, uma quantidade maior de informações precisas

podem ser extraídas automaticamente, mostrando um caminho promissor na amostragem textural e sedimentológica de ambientes com sedimento inconsolidado.

Sugestões para futuros trabalhos:

- Utilizando a metodologia de extração automatizada de granulometria a partir de imageamento digital, amostrar a face praial ao longo de toda a Praia dos Concheiros com melhor resolução espaço-temporal para investigar como ocorre o aparecimento e em quais escalas espaciais se dá a distribuição rítmica dos depósitos de cascalho biodetrítico (sedimentos do grupo de Fator 4). A partir daí, com novas ferramentas de modelagem numérica, além de dados de parâmetros hidrodinâmicos, morfológicos e sedimentares, pode-se tentar chegar a um consenso sobre qual é o mecanismo dominante nesta distribuição, auto-organização ou molde forçante.

- Fazer um estudo mais aprofundado da estrutura interna da praia utilizando o GPR, além de fazer um testemunho utilizando um *vibra-core*, para saber com certeza os tipos de sedimentos envolvidos e como se comporta a estratigrafia de sub-superfície ao longo de toda área de estudo.

- Analisar as variações climatológicas e meteoro-oceanográficas ao longo das décadas para descobrir se há algum tipo de variação em escalas interanuais a interdecadais para tentar associá-las às variações estratigráficas da área de estudo.

- Estudar a morfo-sedimentologia da porção sub-aquosa da área de estudo, desde a antepraia até o degrau da praia, para entender melhor como ocorre a zonação sedimentológica e como varia a morfologia dessa zona, espacial e temporalmente.

Referências Bibliográficas

ABREU, J.G.N. e CALLIARI, L.J. 2005. Paleocanais na plataforma continental interna do Rio Grande do Sul: evidências de uma drenagem fluvial pretérita. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 23, n. 2, p. 123-132.

ABSALONSEN, L. e TOLDO Jr, E.E. 2007. A influência da inflexão costeira na variabilidade da Linha de Praia em Mostardas-RS. *Pesquisas em Geociências*. Vol. 34, n. 1 (jan./jun. 2007), p. 3-18.

ARAÚJO, R.O.S., 2002. Caracterização sedimentar lateral e transversal da praia dos Concheiros do Albardao, RS. Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica. Fundação Universidade Federal do Rio Grande

ASP, N.E.; 1996. Avaliação da Potencialidade de Depósitos de Calcário Biodetrítico da Costa e Plataforma Interna do Rio Grande do Sul. Rio Grande. 53p. Monografia de Conclusão do Curso de Oceanologia, Universidade Federal do Rio Grande.

BARNARD, P. L., D. M. RUBIN, J. HARNEY, e N. MUSTAIN, 2007. Field test comparison of an autocorrelation technique for determining grain size using a digital “beachball” camera versus traditional methods, *Sediment. Geol.*, 201, 180–195.

BERES, M., e F.P. HAENI, 1991. Application of ground penetrating radar methods in hydrogeologic studies. *Ground Water*, vol. 29, no. 3, p. 375-386.

BRISTOW, Charlie S. e JOL, Harry M, 2003. An introduction to ground penetrating radar (GPR) in sediments. *Geological Society, London, Special Publications*, v. 211, n. 1, p. 1-7.

BUSCOMBE, Daniel; 2008. Estimation of grain-size distributions and associated parameters from digital images of sediment. *Sedimentary Geology*, v. 210, n. 1, p. 1-10.

BUSCOMBE, D., e MASSELINK, G., 2006. Concepts in gravel beach dynamics. *Earth-Science Reviews*, 79(1), 33-52.

BUSCOMBE, Daniel e MASSELINK, Gerhard, 2009. Grain-size information from the statistical properties of digital images of sediment. *Sedimentology*, v. 56, n. 2, p. 421-438.

BUSCOMBE, D., D. M. RUBIN, e J. A. WARRICK, 2010. A universal approximation of grain size from images of non-cohesive sediment, *J. Geophys. Res.*, 115, F02015, doi: 10.1029/2009JF001477.

BUTT, T. e RUSSELL, P., 2000. Hydrodynamics and cross-shore sediment transport in the swash-zone of natural beaches: a review. *Journal of Coastal Research*, 16(2), 255-268. Royal Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.

CALLIARI, L.J., 1980. Aspectos Sedimentológicos e Ambientais na Região Estuarial da Lagoa dos Patos. Curso de pós-graduação em Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado. 190p.

CALLIARI, L.J. e KLEIN, A.H.F. 1993. Características Morfodinâmicas e Sedimentológicas das Praias Oceânicas entre Rio Grande e Chuí, RS. *Pesquisas*, 20(1): 48-56pp.

CALLIARI, L.J. 1994. Cross-Shore and Longshore Sediment Size Distribution on Southern Currituck Spit, North Carolina: Implications for Beach Differentiation. *Journal of Coastal Research*. 10(2): 360-373pp.

CALLIARI, L.J. e KLEIN, A.H.F. 1995. Variabilidade das praias Oceânicas entre Cassino e Chuí. *Publicação especial Inst. Oceanogr. São Paulo*. 11: 55-63pp.

CALLIARI, L.J.; TOZZI, H.A.M e KLEIN, A.H.F. 1998. Beach Morphology and Coastline Erosion Associated with Storm Surges in Southern Brazil – Rio Grande to Chuí, RS. *An. Acad. Bras.* 70:2 231-247pp.

CARON, F. 2007. Depósitos Sedimentares Associados à Desembocadura do Arroio Chuí (Planície Costeira do Rio Grande do Sul) e suas Relações com as Variações do Nível do Mar durante o Holoceno. Dissertação de Mestrado em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 63p.

COCO, G.; HUNTLEY, D., e O'HARE, T.J., 1999. Beach cusp formation: analysis of a self-organization model. *Coastal Sediments 1999: The 4th International Symposium on Coastal Engineering and Science of Coastal Sediment Processes* (Hauppauge, New York, ASCE) pp. 2190–2205.

COCO, G.; HUNTLEY, D., e O'HARE, T.J., 2001. Regularity and randomness in the formation of beach cusps. *Marine Geology*, 178, 1–9.

CORRÊA, I.C.S. 1983. Depósitos de Material Carbonático da Plataforma Continental Interna do Rio Grande do Sul, Brasil. *Proceedings, International Conference on Marine Resources of The Pacific*. Viña del Mar, Chile. Arana, P.M. (ed.) p.155-163

COSTAS, S., ALEJO, I., RIAL, F., LORENZO, H., e NOMBELA, M. A., 2006. Cyclical evolution of a modern transgressive sand barrier in northwestern Spain elucidated by GPR and aerial photos. *Journal of Sedimentary Research*, 76 (9), 1077-1092.

DAMIÃO, A.L.A, 2013. Delimitação espacial e análise sedimentológica da Praia dos Concheiros, RS. Monografia de Conclusão do Curso de Oceanologia, Universidade Federal do Rio Grande. 49pp.

DE SCHIPPER, M.A. et al., 2011. On the initiation of nearshore morphological rhythmicity. *Coastal Engineering Proceedings*, v. 1, n. 32, p. sediment. 47.

FIGUEIREDO JR, A.G. 1975. Geologia dos Depósitos Calcários Biodetríticos da Plataforma do Rio Grande do Sul. Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado. 72p.

GODOLPHIM, M.F. 1976. Geologia do Holoceno Costeiro do Município de Rio Grande, RS. Curso de Pós-Graduação em Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado. 146p.

KLEIN, AH da F, 1996. Concheiros do Albardão: variações espaço-temporais dos sedimentos e da morfologia praias. Porto Alegre, Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Master's thesis.

LIMA, L.G. 2008. Estratigrafia e Evolução da Barreira Holocênica na Praia do Hermenegildo, RS. Dissertação de Mestrado Porto Alegre. 71p, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

MARTINS, L.R. 1967. Aspectos texturais dos sedimentos praias e eólicos da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. Publicação Especial, Escola de Geologia, UFRGS, 13, 102p.

MARTINS, L.R.; MARTINS, I.R. e URIEN, C.M. 2003. Aspectos Sedimentares da Plataforma Continental na Área de Influência do Rio de la Plata. Gravel, v. 1, p. 68-80.

MARTINS DA SILVA, M.A. 1976. Mineralogia das Areias de Praia entre Rio Grande e Chuí, Rio Grande do Sul. Curso de Pós-Graduação em Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado. 93p.

MOTTA, V.F. 1963. Relatório-análise e previsão das alturas de ondas em Tramandai. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS (IPH/UFRGS). 30p.

MOUSTAFA, M. S. J., 1988. Swash induced zonation of a foreshore sediment size distribution. Msc Thesis, Faculty of the School of Marine Science, College of William and Mary, Virginia, U.S.A. 139p.

MURRAY, A. Brad et al., 2009. Geomorphology, complexity, and the emerging science of the Earth's surface. *Geomorphology*, v. 103, n. 3, p. 496-505.

NEAL, Adrian, 2004. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-science reviews*, v. 66, n. 3, p. 261-330.

NEAL, A., PONTEE, N. I., PYE, K., e RICHARDS, J., 2002. Internal structure of mixed-sand-and-gravel beach deposits revealed using ground-penetrating radar. *Sedimentology*, 49(4), 789-804.

NIMER, E., 1989. Climatologia do Brasil. 2ª edição, Departamento de Recurso Naturais e Estudos Ambientais (IBGE), Rio de Janeiro, Brasil. 421p.

NUBER, E., AH da F. KLEIN, and L. J. CALLIARI. 2006. Foreshore Morphodynamic Changes in a Bimodal Sediment Beach. *Journal of Coastal Research*. 660-663pp.

POMERANCBLUM, M. e COSTA, M.P.A. 1972. Integração de Informações sobre Minerais Pesados da Plataforma Continental Brasileira. *Cong. Bras. Geol*, v. 26.

PRUSZAK, Z.; ROZYN'SKI, G.; SZMYTKIEWICZ, M., and SKAJA, M., 2006. Field Observation of Edge Waves and Beach Cusps on the South Baltic Sea Coast. *Journal of Coastal Research*, 22(0), 000–000. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.

SERAU, A. K., 1999. Alterações Morfológicas e sedimentares induzidas por tempestades costeiras. Praia do Concheiros do Albardão, RS, Brasil. Tese de dissertação. 141p.

SONU, C. J., 1972: Bimodal composition and cyclic characteristics of beach sediment in continuously changing profiles. *Jour. Sedimentary Petrology*, 42:852-857.

SHORT, A.D., 1984. Beach and nearshore facies: southeast Australia. In: B. Greenwood and R.A. Davis, Jr. (Editors), *Hydrodynamics and Sedimentation in Wave-Dominated Coastal Environments*. *Mar. Geol.*, 60: 261--282.

RICHMOND, B. M. e SALLENGER JR., A. H., 1984. Cross-shore transport of bimodal sands. *Coastal Engineering*, chapter 134, p. 1997-2007

RUBIN, D.M., 2004. A simple autocorrelation algorithm for determining grain size from digital images of sediment. *Journal of Sedimentary Research*, v. 74, n. 1, p. 160-165.

SALLENGER Jr., A.H., 1979. Beach-cusp formation. *Mar. Geol.*, 29:23-37p

TOMAZELLI, L.J. 1990. Contribuição ao estudo dos sistemas deposicionais holocênicos do nordeste da província costeira do Rio Grande do Sul, com ênfase no sistema eólico. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado. Porto Alegre. 270p.

TOMAZELLI, L. e VILLWOCK, J. 1992. Considerações sobre o ambiente praias e 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. e VILLWOCK, J.A. 2005. Mapeamento geológico de planícies costeiras: o exemplo da costa do Rio Grande do Sul. *Gravel*, v. 3, p. 109-115.

TOZZI, H.A.M. 1995. Morfodinâmica da Praia do Cassino, Rio Grande, RS. Curso de Oceanologia. Universidade Federal do Rio Grande. Trabalho de Graduação. 56p.

VILLWOCK, J.A. 1987. Processos Costeiros e a formação das praias arenosas e campos de dunas ao longo da costa Sul e Sudeste Brasileira. *Anais, Simpósio sobre ecossistemas da costa sul e sudeste brasileira: síntese dos conhecimentos*. ACIESP, 54 (1).

WAINER, I.J. 1963. Análise e Previsão das Alturas de Onda em Tramandaí. Porto Alegre. 30p. Relatório, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Anexo

Seguem as rotinas de MATLAB para calcular e plotar a auto-correlação das amostras sedimentares, construir o arquivo de calibração, calcular a granulometria média e plotar a distribuição granulométrica.

```
%% Como construir arquivo de amostra:
% carregar imagem da amostra e calcular a autocorrelacao usando o começo da
rotina
ColorData = imread ('C:\...\fotol.jpg');
imshow(ColorData)
data = double(rgb2gray(ColorData));
data = (data./max(max(data))).*100;
data = round(data);
ImageWidth = size(data,2);
MaxOffset = 99;
ImageWidthToProcess = ImageWidth-MaxOffset;
for Offset = 1:MaxOffset
OffsetPlaquette = data(:,1+Offset:ImageWidthToProcess+Offset);
ObsAutocorrelation(Offset) = corr2(data(:,1:ImageWidthToProcess),
OffsetPlaquette);
end
% salva no arquivos ObsAutocorrelation
save ObsAutocorrelation.mat ObsAutocorrelation

%% Como construir arquivo de calibracao:
% calcular N autocdatas pra cada N fracao de grao - Calibracao
% fazer isso pra cada N
cd('C:\...')
%estou lendo a imagem e plotando ela
ColorData = imread ('Fotos_calibracao\.../0.125mm.jpg');
% imshow(ColorData)
data = double(rgb2gray(ColorData));
data = (data./max(max(data))).*100;
data = round(data);
ImageWidth = size(data,2);
MaxOffset = 99;
ImageWidthToProcess = ImageWidth-MaxOffset;
for Offset = 1:MaxOffset
OffsetPlaquette = data(:,1+Offset:ImageWidthToProcess+Offset);
AutoCData_0125(Offset) = corr2(data(:,1:ImageWidthToProcess),
OffsetPlaquette);
end

CalibrationData(:,11)=AutoCData_0125;
CalibrationData(:,10)=AutoCData_0177;
CalibrationData(:,9)=AutoCData_025;
CalibrationData(:,8)=AutoCData_035;
CalibrationData(:,7)=AutoCData_050;
CalibrationData(:,6)=AutoCData_071;
CalibrationData(:,5)=AutoCData_100;
CalibrationData(:,4)=AutoCData_141;
CalibrationData(:,3)=AutoCData_200;
CalibrationData(:,2)=AutoCData_283;
CalibrationData(:,1)=AutoCData_400;

save CalibrationData.mat CalibrationData
```

```

% Calculate Grain Size
load CalibrationData;

ymm = [4.00 2.83 2.0 1.41 1.0 0.71 0.5 0.35 0.177 0.125];

load ObsAutocorrelation;
MaxOffset = 20;
for Offset = 1:MaxOffset
    GrainSize = interp1(CalibrationData(Offset,1:length(ymm)), ...
ymm,ObsAutocorrelation(Offset));
end

MeanSize = mean(GrainSize)
MaxOffset = 99;
SizeDist = lsqnonneg(CalibrationData(1:MaxOffset,1:10), ...
ObsAutocorrelation(1,1:MaxOffset)')
plot (SizeDist)

plot (ObsAutocorrelation)

```