

Universidade Federal do Paraná  
Programa de Pós-Graduação em Geologia

**ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA DA BARREIRA COSTEIRA DE GUARATUBA, PR**

JOSÉ EDUARDO GHENO BECKER

Orientador: Prof. Dr. Rodolfo José Angulo, UFPR

Co-Orientadores: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Cristina de Souza, UFPR

Prof. Dr. Eduardo Guimarães Barboza, UFRGS

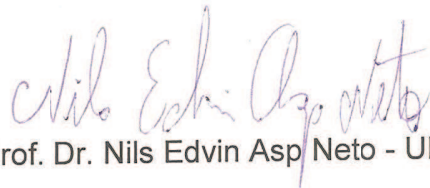
**Curitiba - 2012**

# TERMO DE APROVAÇÃO

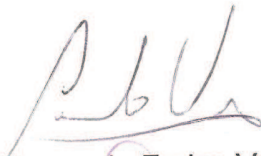
## JOSÉ EDUARDO GHENO BECKER

*"Análise Estratigráfica da Barreira Costeira de Guaratuba, PR"*

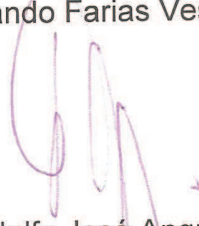
Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Geologia, área de concentração em Geologia Ambiental, da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada por:



Prof. Dr. Nils Edvin Asp Neto - UFPA



Prof. Dr. Fernando Farias Vesely – UFPR



Prof. Dr. Rodolfo José Angulo - UFPR  
Presidente

Curitiba, 30 de abril de 2012.

## **Agradecimentos**

Especialmente aos meus pais: José Vilmar Becker, Neusa Terezinha Gheno Becker e Bárbara Alice Gheno Becker, minha irmã.

Aos orientadores Rodolfo José Angulo, Maria Cristina de Souza pelo suporte prestado e amizade construída. Ao Eduardo Guimarães Barboza que desde a graduação presta apoio e orientação.

Aos colegas de laboratório, Bruno Ivan Simioni, Fábio Macedo de Lima, Luiz Sielski de Oliveira, Raissa Nogueira pelo indispensável apoio durante as campanhas de campo e pela amizade.

## Resumo

A planície costeira do Paraná possui cerca de 90 km de costa oceânica e sua continuidade é interrompida pelas desembocaduras dos estuários de Paranaguá e Guaratuba. A área de estudo situa-se na barreira holocênica de Guaratuba, limitada a sul pelo rio Saí Guaçú, a oeste por depósitos paleoestuarinos e a norte pela baía de Guaratuba. O objetivo do projeto foi descrever os depósitos da barreira em superfície, na forma de cortes em afloramentos, e de sub superfície a partir de estudos diretos e indiretos de investigação. Dados indiretos coletados através do método geofísico GPR mostram diferentes padrões de empilhamento dos refletores. Com a intenção de agrupar áreas com padrões de refletores semelhantes, foi proposta a criação de três Domínios principais, gerados sob condições similares. Os refletores interpretados como depósitos pleistocênicos possuem similaridades no Domínio Central e Interno, principalmente no limite superior, onde truncamentos erosivos são comuns. Sobre os depósitos pleistocênicos, no Domínio Central os refletores mostram influência de tempestades em um ambiente estuarino enquanto no Domínio Interno os refletores registram o preenchimento do estuário, sem intervenção nítida de tempestades. O Domínio Externo, por fim, agrupa a área onde nota-se a fase francamente regressiva da barreira. Os refletores neste Domínio apresentam forte influência de tempestades no registro. Testemunhos de sondagem e descrição de afloramento mostram que estas tempestades remobilizaram sedimentos grossos provenientes da plataforma que acabaram sendo depositados na zona de estirâncio (*foreshore*). A ocorrência lateral de dois padrões de empilhamento distintos, próximo do que seria o limite do Domínio Externo a oeste, indica o provável máximo transgressivo no setor. Observa-se que existe uma relação erosiva entre os depósitos, estuarinos a oeste e marinhos a leste. Este comportamento provavelmente é ligado à maior taxa de aporte sedimentar no estuário, que enquanto diminuía o espaço de acomodação, a linha de costa continuava a se deslocar para o continente, por não possuir contribuições sedimentares significativas.

**Palavras Chave:** GPR, Holoceno, Barreiras Costeiras

## Abstract

The coastal plain of Paraná has 90 km of ocean coastline and its continuity is interrupted by the mouths of Paranaguá and Guaratuba estuaries. The study area is located in Guaratuba Holocene barrier, bounded on south by the Saí Guaçu River, on west by paleoestuarine deposits and by the Guaratuba Bay on north. The project objective was to describe both surface and subsurface deposits using direct and indirect research. Indirect data collected with the geophysical method, GPR show different stacking patterns of reflectors. To group areas with similar patterns of reflectors, the creation of three main domains was proposed. Reflectors interpreted as Pleistocene deposits have similarities in Central and Inner Domains, especially at the upper limit, where erosional truncations are common. Over the Pleistocene deposits, in the Central domain, reflectors show an influence of storms on estuarine environment while the reflectors in the Internal Domain record the filling of the estuary, without storm registrations. Cores taken by vibrocore and outcrop descriptions show that these storms removed coarse sediments from the platform that ended up being deposited in the foreshore. The occurrence of two distinct stacking reflector patterns near the boundary of the External Domain to the west indicates the probable maximum transgressive in this sector of the coast. There is an erosive relationship between the estuarine and marine deposits. This behavior is probably linked to higher rates of sand supply in the estuary. While the accommodation space was decreasing in the estuary, the shoreline continued to move to the mainland in response to the absence of significant sedimentary contributions.

**Key Words:** GPR, Holocene, Coastal Barriers

## Sumário

1. Introdução.....	4
2. Fundamentação Teórica.....	5
2.1. Barreiras.....	5
2.2 Estuários.....	7
3. Contexto Geológico.....	10
3.1 Geologia Regional.....	10
3.2 Barreira holocênica no Paraná.....	11
3.3 Área de Estudo.....	12
4. Materiais e Métodos.....	13
4.1 Vibrotestemunhagem.....	14
4.2 Análises Granulométricas.....	14
4.3 Levantamento Planialtimétrico.....	16
4.4 GPR.....	16
4.4.1 Processamento dos dados de GPR.....	19
4.5 Interpretação dos Radargramas.....	19
5. Resultados.....	21
5.1 Radargramas.....	21
5.2 Testemunhos de sondagem.....	28
5.3 Descrição de afloramento.....	31
6. Discussões.....	33
6.1. Depósitos pleistocênicos.....	33
6.2. Fase Transicional.....	36
6.3. Fase Progradacional.....	39
6.4. Correlação entre os resultados.....	42
7. Conclusões.....	43
8. Referências Bibliográficas.....	45

## Lista de Figuras e Tabelas

Figura 1: Mapa geológico da área de estudo. (Modificado de Angulo, 1992).....	5
Figura 2: Altura de onda na costa do Rio Grande do Sul. A barreira apresenta comportamento regressivo, em consequência de menores alturas nos embaixamentos. Nas projeções costeiras, onde a barreira apresenta um comportamento transgressivo, ocorrem as maiores alturas de onda (modificada de Dillenburg <i>et al.</i> 2005) .....	7
Figura 3: Modelo de costa de acordo com o comportamento da linha de costa, potência de ondas, correntes fluviais e de maré (Modificado de Boyd <i>et al.</i> 1992). .....	9
Figura 4: Imagem Landsat 7 ETM +. Localização da área de estudo .....	13
Figura 5: Imagem da perfuração de um dos testemunhos do trabalho. ....	14
Figura 6: Imagem do console do GPR modelo SIR 3000 utilizado para o trabalho. ....	17
Figura 7: Imagem da antena de 400 MHz. ....	17
Figura 8: Exemplo de como é realizada a aquisição dos radargramas .....	18
Figura 9: Representação esquemática do método utilizado para o levantamento das linhas. Tx e Rx representam as antenas, transmissora e receptora, respectivamente. (Modificado de Baker <i>et al.</i> , 2007). ....	18
Figura 10: Terminologia para a descrição e a definição das radarfácies (Modificado de Neal, 2004) .....	20
Figura 11: Localização dos radargramas representativos utilizados no trabalho. I- O domínio externo; II- O domínio central e III – O domínio interno .....	22
Figura 12: Trechos representativos do radargrama da linha apresentada: (I) setor mais interno onde se observa a radarfácies C; (II) setor mais externo, onde se observam os refletores da radarfácies A migrando em baixo ângulo para leste (indicado pela seta) e a mudança de inclinação do angulo dos refletores na radarfácies D (área destacada em amarelo). ....	23
Figura 13:Radargrama do domínio externo com o registro de dois ambientes deposicionais distintos .....	24
Figura 14: Radargrama representando o Domínio Central.....	26
Figura 15: Seção representativa do radargrama apresentado. Acima a seção sem interpretação; Abaixo, as radarfácies e seus prováveis limites. Destaque para as estratificações cruzadas do tipo Swaley e para a superfície em	

vermelho a qual marca uma mudança no padrão de empilhamento do radargrama.....	27
Figura 16: Locais onde foram realizadas as sondagens com as profundidades alcançadas e a relação com o radargrama .....	28
Figura 17: Localização dos testemunhos obtidos na área de estudo.....	29
Figura 18: Perfis granulométricos dos testemunhos obtidos visualmente. Em vermelho, o intervalo correspondente ao preenchimento do testemunho e em marrom o intervalo interpretado como aterro. ....	30
Figura 19: Imagem do Ts – B no intervalo de 2,44 m a 2,75 m. A linha tracejada demarca o intervalo de ocorrência da gradação normal. FF e FG indicam o intervalo de onde foram coletas amostras para análises granulométricas.....	31
Figura 20: Imagem do afloramento e as três fácies individualizadas .....	32
Figura 21: Representação esquemática do substrato pleistocênico na área de estudo.....	35
Figura 22: Outra seção do mesmo radargrama apresentado no Domínio Central. Nessa seção é nítido o contato erosivo existente entre os refletores plano paralelos com mergulho para NE e os refletores ondulados com nítidos truncamentos entre si.....	36
Figura 23: Representação esquemática de um depósito de washover e suas duas principais componentes .....	38
Figura 24: Radarfácies com registro da incidência de tempestades na costa..	41

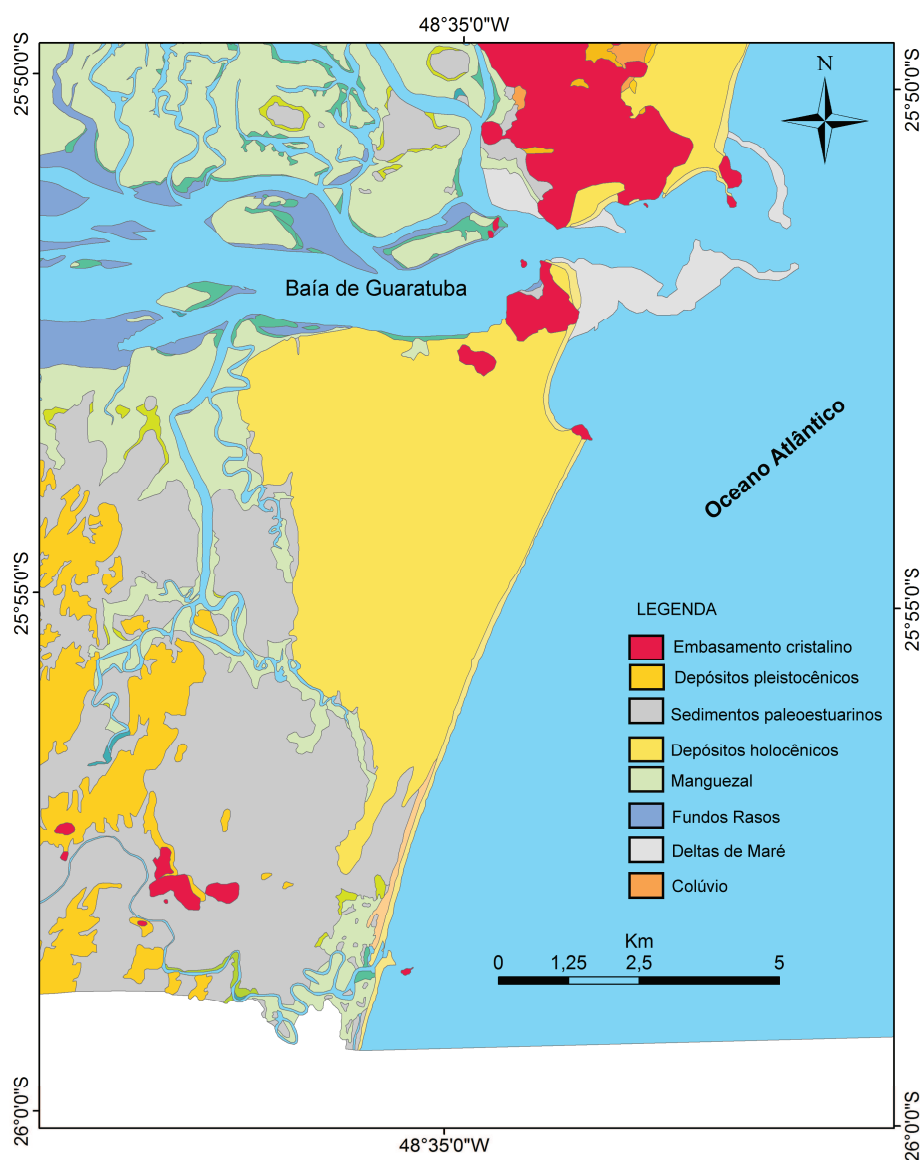
## 1. Introdução

A preocupação por parte das populações que vivem em cidades costeiras com avanços da linha de costa para o continente e ressacas é crescente. Apesar disso, tanto em curta escala de tempo (anos e décadas) como também em grande escala de tempo (séculos e milênios) sabidamente zonas costeiras são dinâmicas. A subida relativa do nível do mar em longa escala de tempo no Brasil, durante o Holoceno, atingiu o seu máximo de  $3,5\text{m} \pm 1\text{m}$  acima do atual entre 7.000 e 5.000 anos antes do presente (AP). O nível eustático manteve-se no seu máximo, ou próximo, até 3.500 anos AP, quando começou a cair até o nível em que se encontra hoje (Angulo *et al.* 2006). A presença dos estuários de Paranaguá e de Guaratuba são evidências desta subida do nível do mar no Paraná.

Dados geofísicos levantados sobre a barreira de Guaratuba através do *Ground Penetrating Radar* (GPR) mostram evidências de comportamentos distintos quanto à geração de espaço de acomodação entre os sistemas deposicionais estuarinos e marinhos, durante o período que marcaria o final da subida eustática e início da descida. Em seguida, a partir da descida eustática, os estuários passaram a ser francamente preenchidos e na costa iniciou-se o desenvolvimento da barreira holocênica progradacional.

Na fase progradacional da barreira foram encontrados diversos sinais de tempestades nos registros de GPR. Esses eventos também foram notados e descritos em afloramentos na forma de cortes de estradas e em testemunhos de sondagem.

Nesse contexto, o objetivo geral do trabalho foi caracterizar o registro que as variações do nível do mar deixaram na barreira holocênica em Guaratuba, mapeada por Angulo (1992) (fig.1). O estudo foi realizado de forma a examinar indiretamente os depósitos em questão através de geofísica de alta resolução e, diretamente com a retirada de testemunhos de sondagem. Além da descrição de afloramentos existentes na área.



**Figura 1:** Mapa geológico da área de estudo. (Modificado de Angulo, 1992)

## 2. Fundamentação Teórica

### 2.1. Barreiras

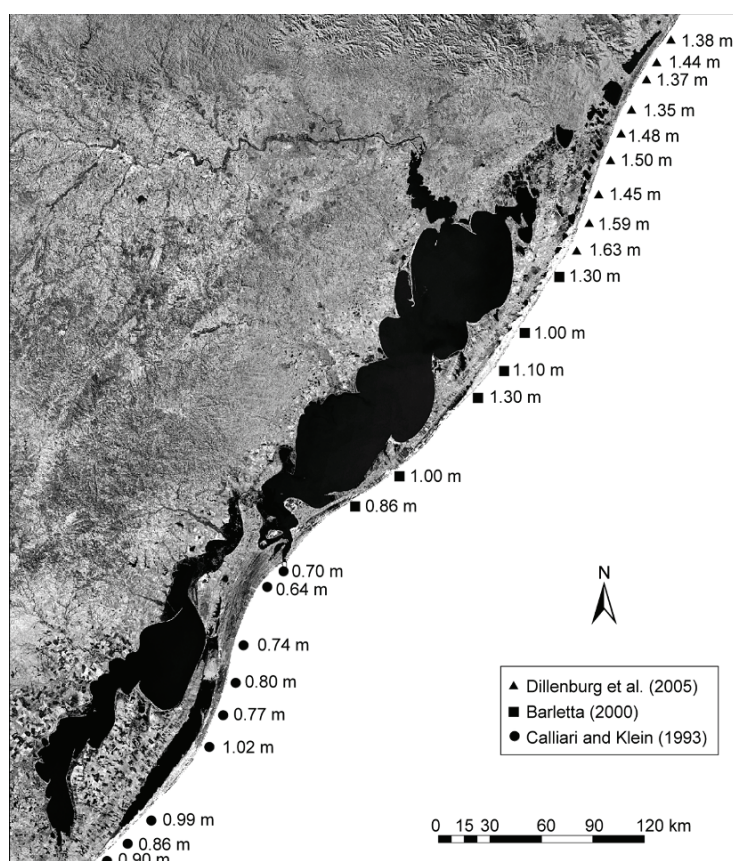
Na sua definição, barreiras costeiras são depósitos subaquosos e subaéreos de areia e/ou seixo paralelos a linha de costa, formadas a partir da interação de ondas, marés e processos eólicos (Hesp & Short, 1999).

Para determinar o tipo da barreira, sua formação e evolução, é necessário levar em conta fatores de influência global, regional e local. O

principal fator de influência global que controla a formação e o tipo de barreira são as variações eustáticas. De acordo com Hesp & Short (1999) grande parte das barreiras modernas foi formada durante o Holoceno Meso – Superior, no estágio final da última transgressão marinha. O comportamento das barreiras permanece retrogradacional em locais onde o nível do mar continua subindo e/ou o balanço sedimentar é menor que a taxa de elevação eustática. Nos locais onde o nível eustático apresenta comportamento de rebaixamento ou estável e o balanço sedimentar é positivo, nota-se um comportamento progradacional.

Os fatores regionais e locais que condicionam a formação das barreiras costeiras são: espaço de acomodação, disponibilidade de sedimentos e a ação das ondas (Hesp & Short, 1999). O espaço de acomodação é importante pois é nesse espaço que irá se depositar o sedimento que formará a barreira. A disponibilidade de sedimentos é outra variável importante, pois além de controlar a formação, ela também regula o tipo e a estabilidade da barreira. Em condições de nível do mar estável, um balanço positivo de sedimentos resulta num deslocamento da linha de costa no sentido da bacia (regressão), enquanto que um balanço negativo resulta num deslocamento da linha de costa no sentido do continente (transgressão). Quando existe um equilíbrio entre a variação do nível do mar e o aporte sedimentar, situação pouco comum, a linha de costa permanece estável.

A última condicionante para a formação, a ação das ondas, controla também o tipo de barreira na medida em que ela regula o balanço sedimentar. O regime de ondas controla diretamente a taxa de transporte longitudinal e transversal na costa (Hesp & Short, 1999). O Rio Grande do Sul, por exemplo, possui uma típica costa aberta, dominada por ondas onde de acordo com Dillenburg *et al.* (2003, 2009) a coexistência de barreiras regressivas e transgressivas está associada a diferenças no gradiente de potência (altura e ângulo de ataque) de ondas (fig. 2).



**Figura 2:** Altura de onda na costa do Rio Grande do Sul. A barreira apresenta comportamento regressivo, em consequência de menores alturas nos embaixamentos. Nas projeções costeiras, onde a barreira apresenta um comportamento transgressivo, ocorrem as maiores alturas de onda (modificada de Dillenburg *et al.* 2005)

## 2.2 Estuários

Regiões estuarinas são importantes em diversos aspectos. Ao redor do mundo os estuários são utilizados na locação de portos, como no estuário de Paranaguá, e também na ocupação humana. Sob o ponto de vista econômico, vales incisos associados a depósitos estuarinos são importantes fontes de hidrocarbonetos em reservatórios clásticos.

A interação de processos como correntes de marés, ondas e canais fluviais somados a variação dos mesmos em um curto espaço físico, fazem com que os ambientes estuarinos sejam complexos (Boyd *et al.* 2006).

Dalrymple *et al.* (1992), ao levar em conta esses processos, definiu um estuário como *'uma projeção marinha formada pelo afogamento de um vale fluvial com sedimentos provenientes tanto de fontes fluviais quanto marinhas e as fácies formadas nesse ambiente são produtos da influência de marés, ondas e da dinâmica fluvial'*. Nessa definição nota-se a tentativa do autor de esclarecer que tipo de associação de fácies seria criada no ambiente estuarino através da caracterização dos possíveis processos atuantes. Essa seria a primeira definição de um estuário com base na geologia. A definição mais usada anteriormente foi proposta por Pritchard (1967), a qual era baseada na variação da salinidade dentro de um estuário.

De acordo com Dalrymple *et al.* (1992), para classificar um estuário é necessário analisar, em duas etapas, a relação entre o estuário e outros sistemas deposicionais costeiros adjacentes. A primeira, seria estabelecer quais os processos predominantes durante a deposição e, em segundo, as variações que ocorrem nos depósitos em resposta a variações do nível do mar. O autor defende que os processos que atuam no ambiente estuarino condicionam a classificação do mesmo, assim como para as barreiras. Assim, foi proposta a subdivisão dos estuários em dominados por ondas e dominados por marés. Ainda segundo o autor, incluir uma subdivisão de um estuário dominado por rio, seria desnecessário uma vez que a predominância da influência fluvial acarretaria apenas no preenchimento do estuário, sem alteração significativa na morfologia.

### **Estuários dominados por ondas**

Nos estuários dominados por ondas as correntes de maré são de menor expressão comparadas à energia das ondas. A ação das ondas na área próxima a boca do estuário associada a corrente de maré transportam o sedimento tanto transversalmente quando longitudinalmente à linha de costa, como resultado desenvolve-se barreiras de pontais na boca do estuário. Dalrymple *et al.* (1992) definem que o perfil ideal de um estuário dominado por ondas apresenta dois máximos de energia, um na desembocadura devido à energia das ondas e o outro na cabeceira resultado das correntes fluviais.

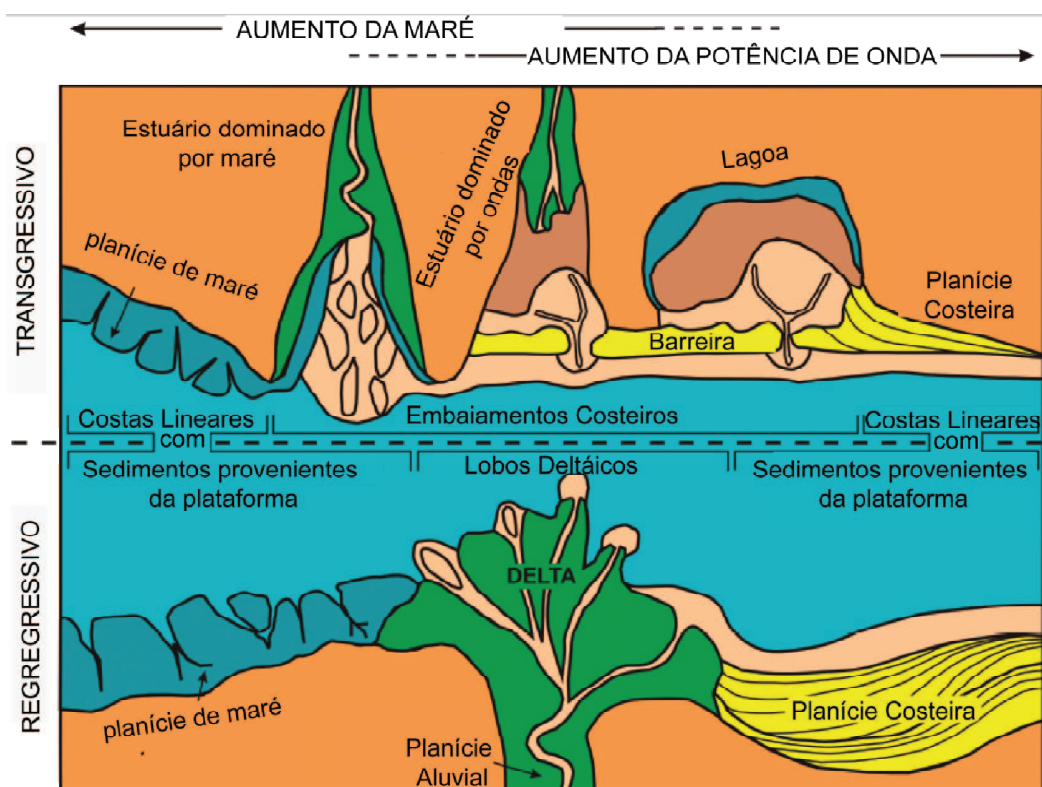
Assim, existe a tendência de formação de uma bacia central, propícia ao acúmulo de sedimentos, resultado da baixa energia do fluxo. Essa área onde

preferencialmente ocorre o acúmulo de sedimentos é controlada então pelo espaço de acomodação, em função da configuração geológica/estrutural.

### Estuários dominados por maré

Os estuários dominados por marés possuem as correntes de maré como principal processo controlador dos depósitos. A principal feição encontrada nesses estuários é o desenvolvimento de barras arenosas longitudinais (Hayes, 1975), as quais diminuem progressivamente a energia das ondas que atingem o estuário.

Boyd *et al.* (1992) estabeleceram uma classificação de costa englobando estuários dominados por ondas ou por marés, baseado no comportamento transgressivo/regressivo da costa somado as condicionantes de potência de ondas, correntes fluviais e de maré (fig. 3).



**Figura 3:** Modelo de costa de acordo com o comportamento da linha de costa, potência de ondas, correntes fluviais e de maré (Modificado de Boyd *et al.* 1992).

### 3. Contexto Geológico

#### 3.1 Geologia Regional

Segundo Angulo (1992) existem dois domínios geológicos principais na província costeira do Paraná, são eles: as rochas do embasamento cristalino e a cobertura sedimentar cenozóica. De acordo com Mineropar (1989) as rochas do embasamento possuem idades que vão desde o Arqueano até o Mesozóico e são representadas por complexos granulíticos e gnáissicos que formam a cadeia de montanhas denominada 'Serra de Mar', e por fim, rochas hipabissais básicas.

Zalán & Oliveira (2005) propõem que a evolução da Serra do Mar teve dois estágios. Segundo os autores no primeiro estágio essa área passou por um grande evento de soerguimento no Cretáceo Superior (89-65 Ma), que deu origem a um mega planalto, com cerca de 300.000 km<sup>2</sup>. Já no Cenozóico (58-20 Ma), o soerguimento foi seguido por um colapso gravitacional deste mega planalto que resultou numa série de riftes paralelos a linha de costa, o Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil. Ainda de acordo com os autores, baías como a de Guanabara e de Paranaguá se estabelecem hoje sobre grábens formados a partir do abatimento da Serra do Mar

Um recente estudo geofísico estabeleceu um modelo gravimétrico-magnético para o gráben de Paranaguá (Castro *et al.* 2008). No modelo foi estimada a espessura sedimentar ao longo do gráben e definidos altos e baixos estruturais. Nesse contexto, Guaratuba encontra-se em um alto estrutural, que estaria vinculado a um prolongamento para a plataforma interna do Arco de Ponta Grossa.

Pertencentes à Bacia de Santos, os depósitos sedimentares que ocorrem na PCP (planície costeira do Paraná) podem ser reunidos em dois grupos de acordo com sua origem: os depósitos continentais e os costeiros (Angulo, 1992). Os sedimentos costeiros foram depositados em resposta às variações do nível mar e os depósitos sedimentares continentais que ocorrem principalmente na forma de leques aluviais e colúvios próximos às áreas de maiores altitudes.

### 3.2 Barreira holocênica no Paraná

Ao longo dos aproximadamente 90 km de costa oceânica no Paraná a continuidade da barreira holocênica é interrompida pelas desembocaduras das baías de Paranaguá e Guaratuba. Os depósitos aflorantes são típicos de costas regressivas, com cordões litorâneos. A atual delimitação da área de ocorrência dos depósitos holocênicos na PCP deu-se com a evolução do conhecimento desde o primeiro mapa geológico gerado e a aplicação de técnicas de datação radiométrica. A análise da geomorfologia e a incorporação de dados geocronológicos foram os principais métodos pelos quais Martin & Suguio (1986), Martin *et al.* (1988) e Angulo (1992) delimitaram os depósitos da PCP.

Bigarella (1946) produziu o trabalho pioneiro com objetivo de caracterizar os depósitos da planície costeira do Paraná. Nesse estudo, o autor descreve os sedimentos de origem continental e marinha da PCP. Dentro do grupo de origem marinha foram descritos com detalhe os cordões litorâneos da barreira existente no balneário de Caiobá.

Em seguida, o primeiro trabalho de investigação direta de sub-superfície foi realizado por Maack (1949). O autor descreveu os sedimentos amostrados através de uma sondagem geotécnica realizada em Praia de Leste. A sondagem perfurou 101 m de sedimentos, atingindo o embasamento cristalino.

Souza (2005) trabalhou em afloramentos existentes em duas cavas utilizadas para a extração de areia, na barreira holocênica em Praia de Leste. Nesse trabalho foi definida a ocorrência de 17 fácies e cinco associações de fácies (plataforma interna, face litorânea inferior, face litorânea média, face litorânea superior, e praia subaérea e inter maré). De acordo com a autora, a barreira neste setor evoluiu em três estágios: crescimento de esporões para o quadrante sudoeste no primeiro momento, com o rebaixamento mais acelerado do nível do mar até 4.000 anos AP. Com o nível do mar estável, entre 4.000 e 2.500 anos A.P., o crescimento dos esporões seria para o quadrante nordeste e alternados com progradação da costa. O último estágio seria de 2.500 anos AP. até o presente, onde a franca queda do nível do mar formou os depósitos de cordões litorâneos atuais.

No setor de Paranaguá, Lessa *et al.* (2000) definiram a estratigrafia e a evolução tridimensional da barreira a partir de dados de sondagens geotécnicas, vibrotestemunhos e descrições de afloramentos. De acordo com os autores, há  $4.300 \pm 70$  AP a desembocadura do estuário de Paranaguá situava-se a cerca de 10 km a Sul da atual, essa migração seria vinculada a ação da deriva litorânea de sul para norte. Esta corrente seria responsável pelo transporte dos sedimentos provenientes da erosão de barreiras situadas a sul.

### 3.3 Área de Estudo

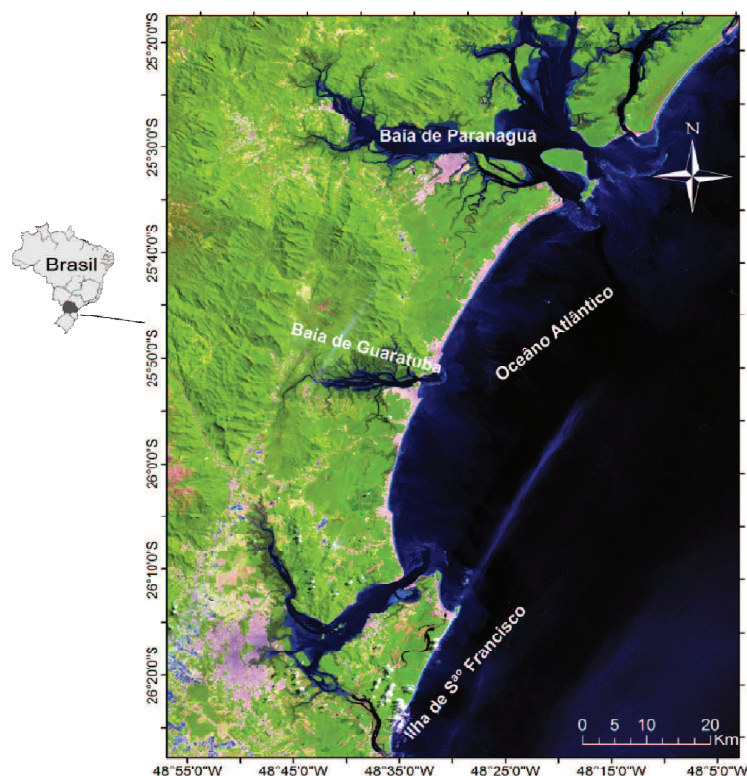
A área de estudo concentra-se no setor sul da PCP, na barreira holocênica existente entre as desembocaduras da Baía de Guaratuba e do rio Saí-Guaçu (fig. 4). Bigarella (1954) propõe através da identificação de terraços com altitudes superiores e inferiores a 3,5 m, a primeira reconstrução paleogeográfica da região durante o último máximo transgressivo.

Posteriormente, Angulo (1992), no mapeamento dos depósitos sedimentares existentes em toda a PCP, propõe um modelo de evolução para a região de Guaratuba. De acordo com o autor, durante o último máximo transgressivo, teria se formado uma barreira do tipo ilha-barreira e a regressão da linha de costa teria originado a deposição de cordões na face externa desta barreira.

Souza *et al.* (2001) apresentaram considerações sobre a área de estudo, sobretudo quanto à evolução paleogeográfica. Os autores vão de acordo com a interpretação de que durante o último máximo transgressivo formaram-se esporões e ilhas-barreiras na área. Além disso, interpretam que a desembocadura do rio Saí-Guaçu estaria associada com os depósitos desse tipo de barreira.

Apesar de ser uma área já estudada, ainda se carece de informações sobre a estratigrafia da barreira em Guaratuba. Para compreender melhor este setor da costa, estudos de investigação indireta foram realizados através da aquisição de linhas de GPR – (*Ground Penetrating Radar*). Foram ainda realizados cinco testemunhos de sondagem e descritos afloramentos da porção sul da barreira.

O objetivo deste trabalho é compreender a estratigrafia da barreira costeira de Guaratuba e para isso, foram caracterizados os padrões encontrados nas linhas de GPR e definir a locação dos testemunhos de sondagem.



**Figura 4:** Imagem Landsat 7 ETM +. Localização da área de estudo

#### 4. Materiais e Métodos

A condução do trabalho de investigação e coleta de dados seguiu uma ordem preferencial. Inicialmente, um total de 68 linhas de GPR adquiridas em convenio com o Centro de Estudos Costeiros e Oceânicos (CECO-UFRGS) foram processadas e analisadas. Dessas linhas, as mais representativas quanto aos padrões de refletores foram selecionadas para interpretação e utilização no trabalho.

A partir das linhas selecionadas foram selecionados alvos para locação dos testemunhos de sondagem, estes adquiridos com vibrotestemunhador.

#### 4.1 Vibrotestemunhagem

O equipamento vibrotestemunhador utilizado para o trabalho consiste em um motor estacionário quatro tempos através do qual é acoplado um mangote de construção (fig. 5). Com uma braçadeira o mangote é conectado a um tubo de alumínio de seis metros de comprimento e 7,5 cm de diâmetro. Desta forma o peso, somado a vibração criada pelo mangote, faz com que o o tubo de alumínio penetre o substrato. Os testemunhos de sondagem foram coletados através do vibrotestemunhador do LECost – UFPR.



**Figura 5:** Imagem da perfuração de um dos testemunhos do trabalho.

#### 4.2 Análises Granulométricas

Uma série de etapas laboratoriais é realizada a fim de preparar a amostra para iniciar o processo de análise granulométrica. Tem-se por início a secagem da amostra em uma estufa a 60° C seguido do seu quarteamento, que consiste na separação em partes iguais, de uma amostra de segurança e uma amostra que segue para a análise.

Segundo Suguio (1973), são três as operações envolvidas para a realização de análises granulométricas. O primeiro passo é a obtenção da distribuição das partículas dentro dos intervalos granulométricos. Em segundo lugar, é a geração de gráficos de frequência e diagramas contendo as distribuições granulométricas das partículas. E por fim o cálculo de parâmetros estatísticos da amostra.

As partículas de tamanho areia foram segregadas pelo método do peneiramento. Nesse método as peneiras utilizadas são dispostas em meio intervalo, ou seja, é utilizada uma peneira a mais além das que compõem o intervalo inteiro (exemplo: no intervalo de areia média, 0,250 mm/0,125 mm, utilizou-se a peneira com malha de 0,177 mm). Esse refinamento é importante para o cálculo de parâmetros estatísticos, pois diminui a margem de erro (intervalo de confiança) da curva de Gauss, gerada a partir da distribuição dos grãos dentro dos intervalos granulométricos.

O segundo passo para a análise granulométrica pode ser realizado junto com a última etapa. Os valores de distribuição das partículas nos intervalos de tamanho são inseridos em um programa específico, *Sysgran* (Camargo, 2006). Esse programa executa os cálculos de frequência simples e acumulada da amostra, determina também um gráfico na forma de histograma e por fim estabelece, a partir da curva de Gauss, os parâmetros estatísticos da amostra de acordo com Folk & Ward (1957). Os mais relevantes são o da moda, que é o pico da frequência simples, a mediana e o desvio padrão ( $\delta$ ), que indica o grau de seleção da amostra em uma relação inversamente proporcional. Um desvio padrão alto significa um baixo grau de seleção.

Todas as etapas laboratoriais necessárias para a análise granulométrica foram realizadas no Laboratório de Estudos Sedimentológicos, LabESed - UFPR.

### 4.3 Levantamento Planialtimétrico

O levantamento planialtimétrico consistiu na coleta da altitude e do posicionamento geográfico das linhas de GPR em campo.

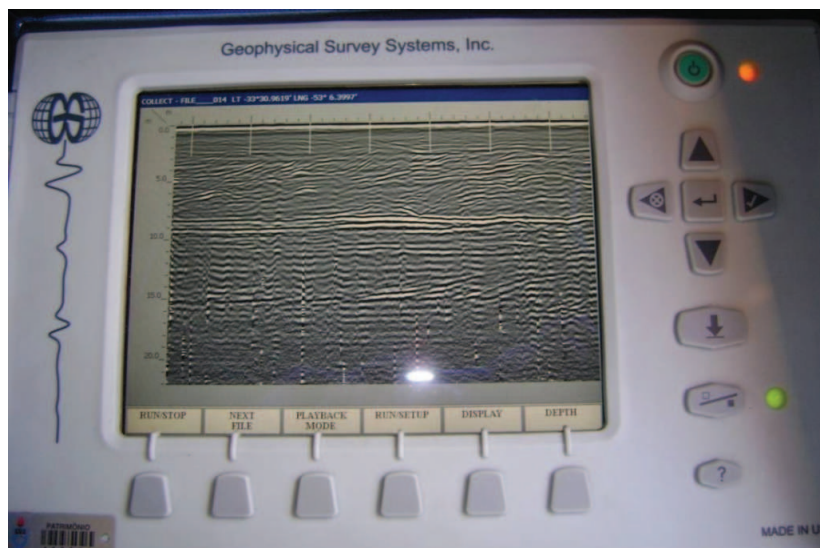
A ferramenta utilizada nesse levantamento foi o Sistema de Posicionamento Global Diferencial (DGPS – *Differential Global Positioning System*). O DGPS é um sistema de posicionamento global baseado em 24 satélites (NAVSTAR) operados pelo Departamento de defesa dos Estados Unidos que permite a correção diferencial dos valores obtidos em tempo real ou no pós-processamento. O equipamento de DGPS utilizado para o trabalho foi da marca *Trimble*<sup>®</sup>, ajustado para coletar dado de posicionamento por segundo, e o seu receptor modelo Pro-XRS.

A correção diferencial dos dados obtidos foi realizada somente no pós-processamento. Com coordenadas de um ponto conhecido, fornecidas na internet, obtidas de hora em hora nos dias da coleta foi possível iniciar a correção. Com o programa *Pathfinder*<sup>®</sup>, além do tratamento dos dados, é possível escolher que tipo de informação inserir no banco de dados (exemplo: altitude, coordenadas, data/hora, distância horizontal) e assim gerar um banco de dados em um sistema de informações geográficas (SIG). A partir daí, com uma imagem georreferenciada, é possível obter a localização exata das áreas onde foram levantadas as linhas com o GPR.

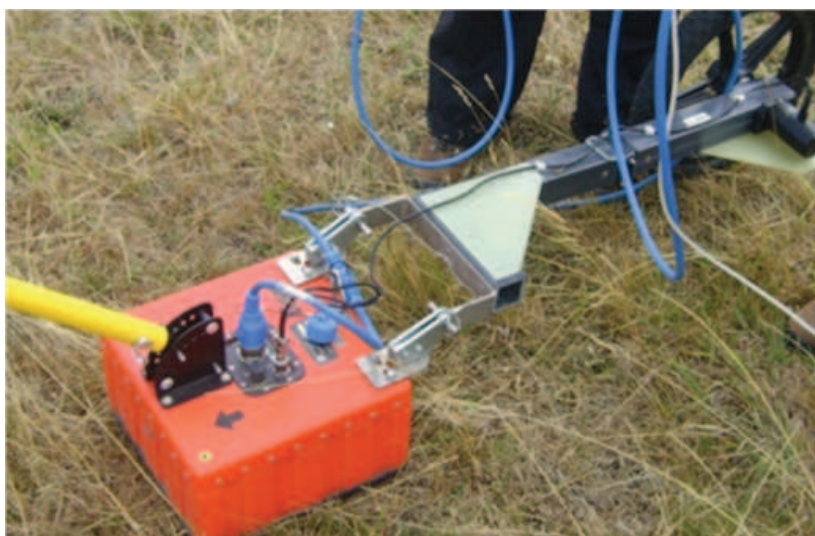
### 4.4 GPR

O GPR (*Ground Penetrating Radar*) é um aparelho geofísico que se baseia na interação de ondas eletromagnéticas em meios com propriedades dielétricas distintas. A onda ao ser lançada pela antena geradora percorre o substrato até encontrar um substrato com outra composição ou qualquer outra mudança que faça com que a onda mude a sua velocidade. Essa mudança na velocidade faz com que parte da onda seja refletida que então é captada pela antena receptora, e armazenada no console. O presente trabalho utilizou para a aquisição das linhas o GPR fabricado pela GSSI, modelo SIR 3000 (fig. 6) e antena blindada com frequência de 400 MHz (fig. 7). Ainda é acoplado o DGPS ao console do GPR o que possibilita a orientação, em tempo real, com alta

precisão das linhas no campo (fig. 8). O mapa produzido por Angulo (1992) serviu como base para a navegação e aquisição dos radargramas.



**Figura 6:** Imagem do console do GPR modelo SIR 3000 utilizado para o trabalho.

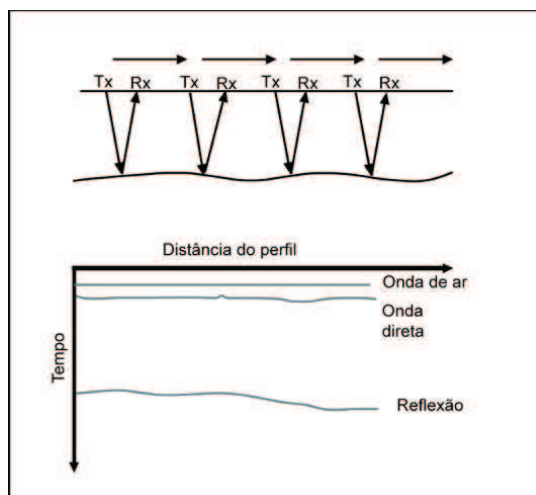


**Figura 7:** Imagem da antena de 400 MHz.



**Figura 8:** Exemplo de como é realizada a aquisição dos radargramas

A aquisição dos radargramas foi feita segundo o método do *Common Offset*, que estabelece que a distância entre a antena de recepção e a antena de geração permanece constante durante a aquisição (fig 9).



**Figura 9:** Representação esquemática do método utilizado para o levantamento das linhas. Tx e Rx representam as antenas, transmissora e receptora, respectivamente. (Modificado de Baker *et al.*, 2007).

#### 4.4.1 Processamento dos dados de GPR

A etapa pós - campo consistiu no processamento e na interpretação dos dados coletados em campo. O processamento dos dados juntamente com a interpretação foi realizado com o programa Radan<sup>®</sup> (*Radar data Analyser*). Através desse programa foi trabalhada a relação sinal – ruído das linhas. Para isso as etapas de processamento foram da seguinte forma: *BackGround Removal* – FIR; Passa Banda – IIR; *Range Gain* e por fim a correção topográfica da linha.

O primeiro filtro, *Background Removal*, é utilizado para remover linhas retas que não fazem parte do registro. No trabalho foram removidas as linhas que se repetiam por 400 scans. O filtro seguinte foi o Passa Banda, que consiste em definir a frequência superior e inferior da antena. Para a antena de 200 MHz adotou-se a frequência superior de 300 MHz e a inferior de 100 MHz. O terceiro filtro é o *Range Gain*, onde se aumenta o ganho da seção a fim de facilitar a sua visualização. A última etapa do processamento é a correção topográfica da seção. Nessa fase são incorporados os dados obtidos com o DGPS de coordenadas geográficas, altitudes, distância horizontal e data.

#### 4.5 Interpretação dos Radargramas

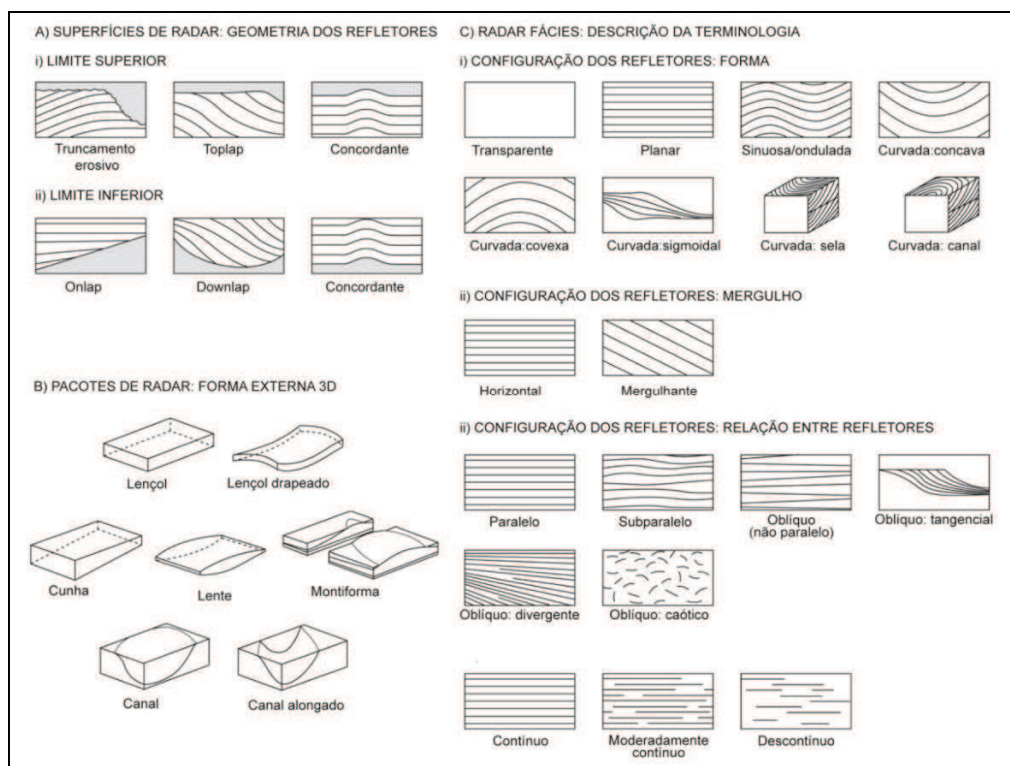
Após a etapa do processamento, realizou-se então a interpretação dos radargramas. O princípio adotado para tal foi o da sismo-estratigrafia, apresentado por Vail *et al.* (1977). A aplicação dessa técnica de interpretação, criada a partir de dados sísmicos também em dados de radar foi exposta por Gawthorpe *et al.* (1993), dada a clara semelhança entre os diferentes registros.

Posteriormente, Neal (2004) propõe a uniformização dos termos utilizados na interpretação dos dados provenientes do GPR. Esses termos são equivalentes aos utilizados na sismoestratigrafia, apenas adicionado do termo radar (ex. radarfácies).

O conceito de radarfácies, é definido por Neal (2002) como um conjunto de refletores de 2 ou 3 dimensões separados por superfícies de radar e são caracterizados por diferenças na continuidade e amplitude dos refletores, forma externa e a velocidade da onda de radar. As terminações, configuração interna

e externa dos refletores têm a mesma terminologia utilizada na sismo-estratigrafia (fig. 10). Assim, Neal (2004) define os conceitos da estratigrafia de radar e recomenda as seguintes etapas para a descrição das radarfácies:

- Configuração interna / externa dos refletores
- Terminação dos refletores
- Mergulho dos refletores
- Relação entre os refletores
- Continuidade dos refletores



**Figura 10:** Terminologia para a descrição e a definição das radarfácies (Modificado de Neal, 2004)

## 5. Resultados

### 5.1 Radargramas

Os radargramas interpretados apresentam significativas diferenças na configuração dos refletores de acordo com a sua posição na planície costeira estudada. Assim, o presente trabalho propõe a individualização de pelo menos três domínios dos quais serão apresentados os radargramas representativos e as radarfácies encontradas.

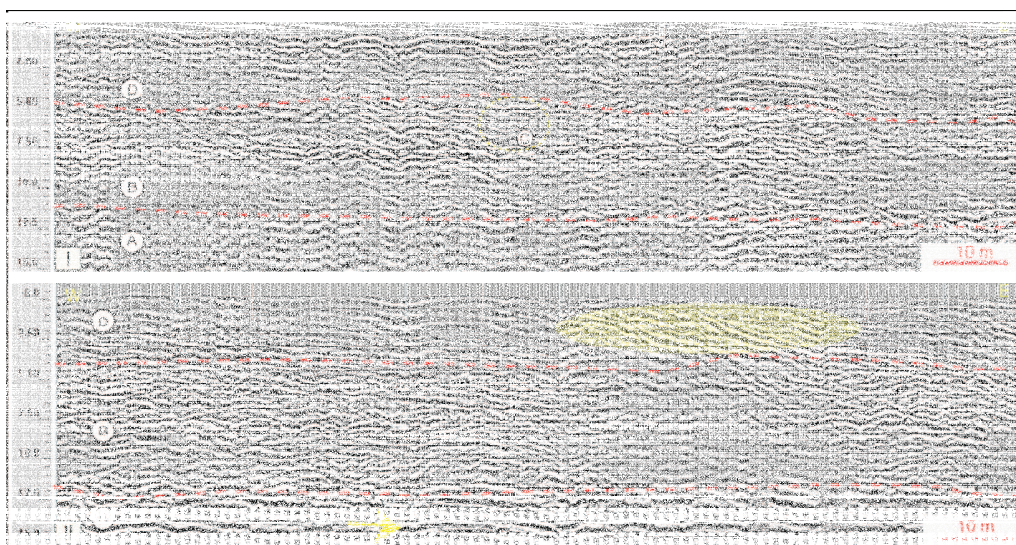
#### Domínio Externo

O Domínio Externo (Fig. 11) ocorre ao longo da margem voltada para o Oceano Atlântico com comprimento aproximado de 2 km. No radargrama mais extenso do domínio foram distinguidas quatro radarfácies (Fig. 12). A radarfácies A ocorre entre 15 m e 12 m de profundidade e apresenta refletores contínuos, na escala de dezenas de metros, paralelos entre si, sub - horizontalizados com mergulho para leste. A radarfácies B ocorre entre os 12 m e 4 m aproximadamente. Os refletores nessa radarfácies, em geral, são sub - horizontais por vezes com ângulo de mergulho maior. São contínuos lateralmente, mas em geral, truncados por outros refletores. A radarfácies C possui aproximadamente 10 m de largura e apesar de sua pequena dimensão foi individualizada porque seus refletores apresentam cliniformas diferentes das adjacentes. Os quais mostram relações de truncamento erosivo (*toplap*) e de preenchimento (*onlap*).

A radarfácies D ocorre ao longo de toda a seção, entre 4 m e a superfície. Nessa radarfácies nota-se a progradação das cliniformas aparente para leste e mudanças no ângulo de mergulho dos refletores. Em algumas seções do radargrama os refletores com mergulhos sub - horizontais são truncados por refletores em ângulos de 4°, 9° até 14°.



**Figura 11:** Localização dos radargramas representativos utilizados no trabalho. I- O domínio externo; II- O domínio central e III – O domínio interno



**Figura 12:** Trechos representativos do radargrama da linha apresentada: (I) setor mais interno onde se observa a radarfácies C; (II) setor mais externo, onde se observam os refletores da radarfácies A migrando em baixo ângulo para leste (indicado pela seta) e a mudança de inclinação do ângulo dos refletores na radarfácies D (área destacada em amarelo).

Ainda dentro do domínio externo, numa seção onde se atingiu a maior distância no sentido do continente (Fig. 11), nota-se uma brusca mudança no padrão dos refletores (Fig. 13). Na base da seção nota-se que clinoformas mergulham para Oeste por aproximadamente 30, 40 m. Cerca de 2 metros acima, uma superfície mapeável, de grande continuidade lateral marca uma mudança no padrão de empilhamento. Acima desta superfície os refletores tornam-se essencialmente oblíquos e o mergulho apresentado aumenta conforme diminui a profundidade.

Outra superfície, mais difícil de ser mapeada, é evidenciada por alguns truncamentos erosivos causados por ela. A partir dela é nítida a mudança no padrão dos refletores sotopostos e sobrepostos a ela. Abaixo dela os refletores apresentam mergulho sub-horizontal para Oeste e certa continuidade lateral. Já acima, os refletores mergulham com ângulos variáveis para Leste.

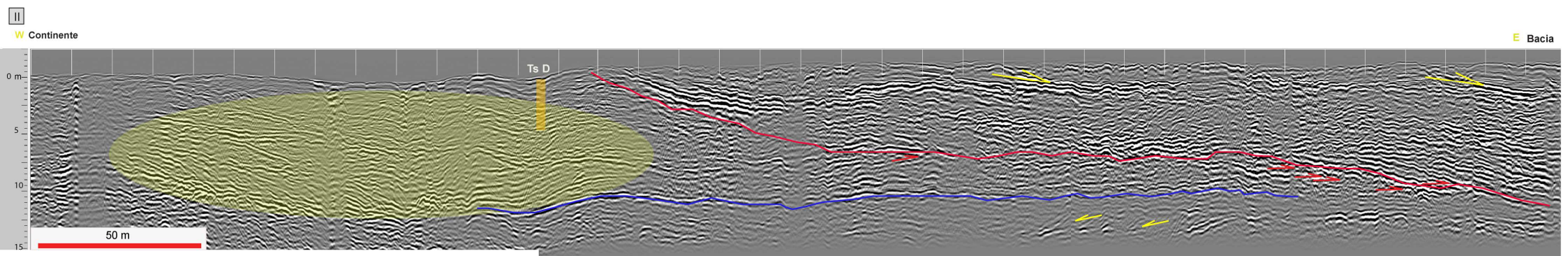
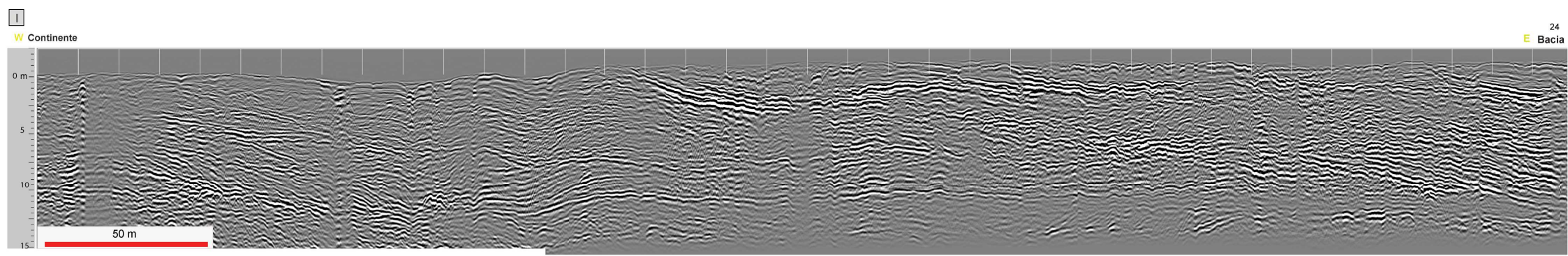
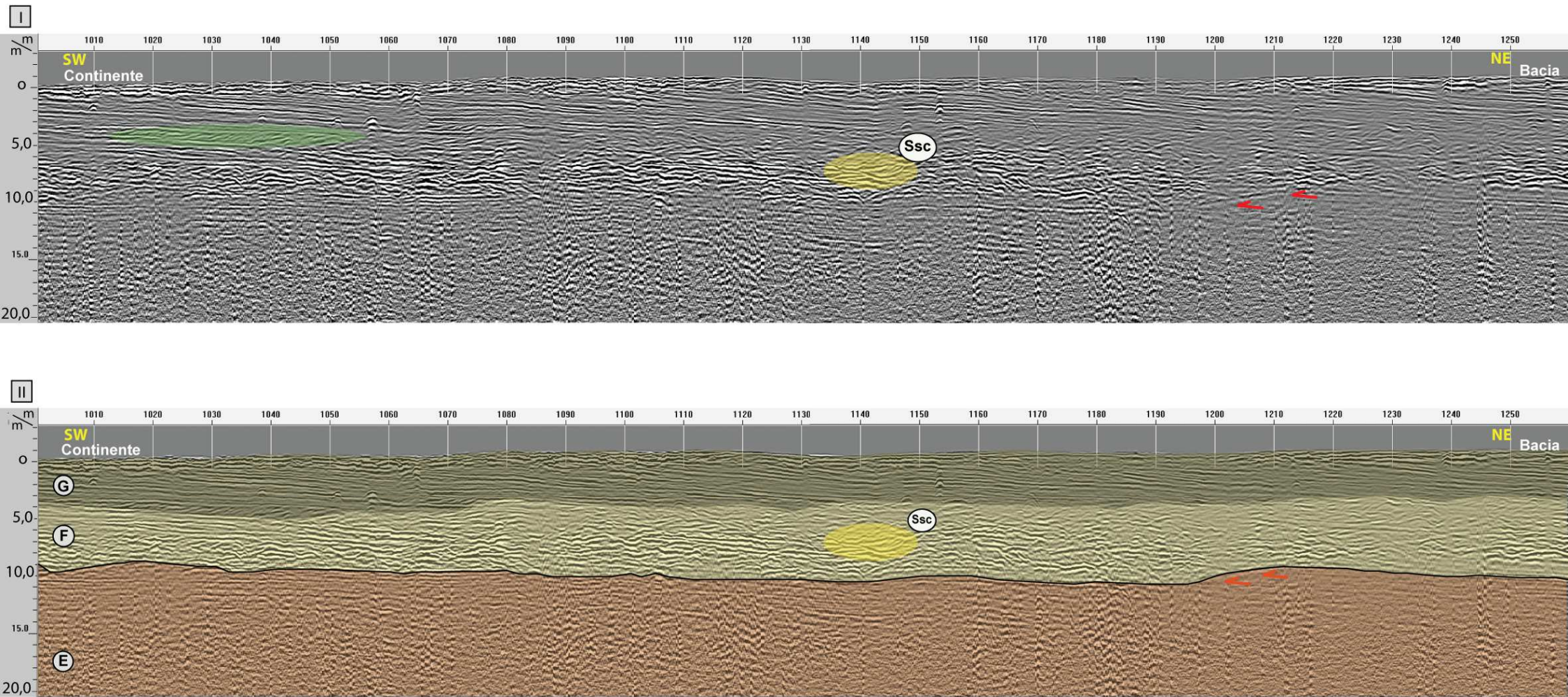


Figura 13: I - Seção do radargrama sem interpretação; II - A mesma seção com interpretação onde as setas vermelhas representam a terminação dos refletores. As setas amarelas mostram o mergulho de clinoformas. A situada próximo de 12 m de profundidade mostra clinoformas migrando no sentido do continente e estariam relacionadas a deltas de maré ou esporões. A superfície em azul representa uma provável superfície de inundação máxima associada, pelo padrão de refletores encontrado antes e depois dela, a um ambiente estuarino. Nota-se que acima desta superfície (destacado em amarelo), os refletores tomam forma oblíqua e com o ângulo de mergulho aumentando na medida em que se diminui a profundidade, esse comportamento seria resposta de canais ao rebaixamento do nível de base. A superfície em vermelho, marcada por vários truncamentos erosivos, mostra uma mudança no padrão de empilhamento dos refletores sobrepostos a ela. Um padrão semelhante ao descrito nas radarfácies B e D. Por fim, em laranja o testemunho D.

### **Domínio Central**

O Domínio Central compreende uma área aproximadamente central da barreira holocênica de Guaratuba (Fig. 11). O radargrama representativo do Domínio Central possui três radarfácies distintas (Fig. 14). A radarfácies E possui cerca de 10 m de espessura e apresenta os refletores lateralmente contínuos, na escala de dezenas de metros, sub - horizontais e paralelos entre si. Sobreposta a ela, em contato erosivo, com aproximadamente 5 m de espessura ocorre a radarfácies F, com refletores que na sua grande maioria apresentam moderada ondulação e destacada relação erosiva entre si. Destas, se destacam algumas estruturas interpretadas como estratificações do tipo *Swaley* (Fig. 14).

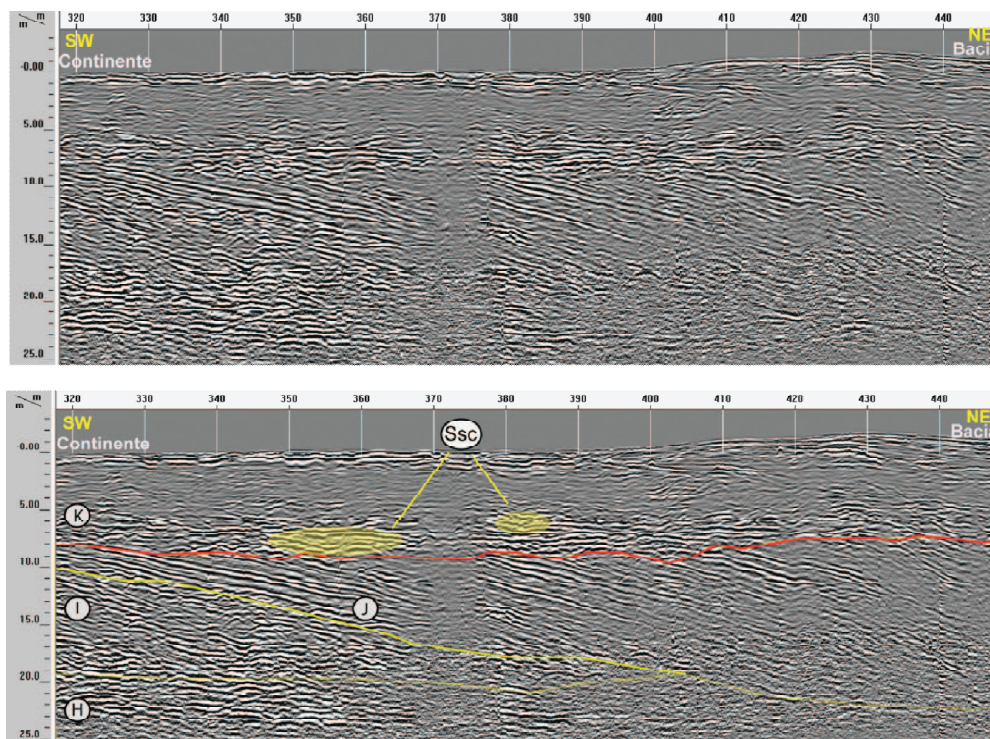
Por fim, a radarfácies G que ocorre dos 3 m de profundidade até a superfície e possui seus refletores lateralmente contínuos, paralelos entre si e com destacado mergulho sub – horizontal para Norte. Nessa radarfácies, próxima ao contato com a radarfácies sotoposta, ocorre pelo menos duas camadas com nítida progradação de clinofórmias para Sul. A mais evidente delas possui refletores com altura aproximada de 1 metro e extensão de cerca de 30 m em típica estratificação sigmoidal (Fig. 14).



**Figura 14:** I - Seção representativa do radargrama, sem interpretação das radarfácies. Destacado em verde, o mergulho das clinoformas no sentido do continente. Em amarelo, uma das ocorrências da estratificação cruzada do tipo Swaley que ocorre ao longo da seção. II - A mesma seção do radargrama com as radarfácies interpretadas. A radarfácies E com refletores truncados por refletores

### Domínio Interno

O Domínio Interno representa uma porção da barreira limitada a norte pela Baía de Guaratuba e, a Oeste, pelos manguezais e os depósitos paleoestuarinos. A altitude média do terreno aonde foram adquiridos os radargramas é 5 m, medidos através do *DGPS*, nesse domínio foram diferenciados quatro radarfácies (Fig. 15).



**Figura 15:** Seção representativa do radargrama apresentado. Acima a seção sem interpretação; Abaixo, as radarfácies e seus prováveis limites. Destaque para as estratificações cruzadas do tipo Swaley e para a superfície em vermelho a qual marca uma mudança no padrão de empilhamento do radargrama.

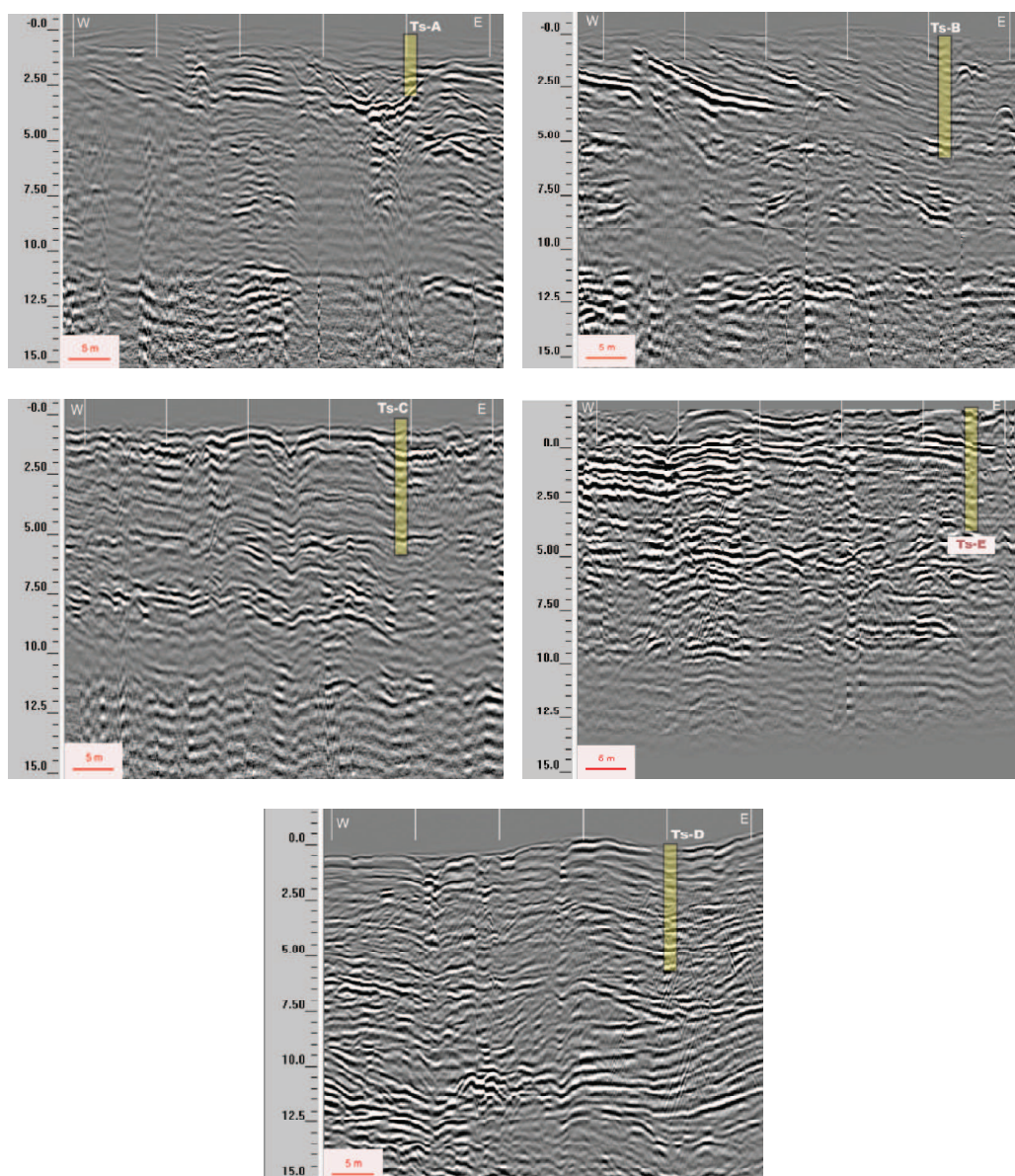
A radarfácies H ocorre entre 25 m e 20 m de profundidade. Seus refletores possuem continuidade lateral na escala de dezenas de metros, paralelos entre si e com mergulho sub – horizontal para NE. Já próximo ao limite superior da radarfácies, os refletores possuem forma levemente ondulada e nota-se a relação de truncamento erosivo mais evidente. A radarfácies I é caracterizada por refletores com geometria essencialmente ondulada com pequena continuidade lateral e mergulho que varia de sub - horizontal até 5°.

A radarfácies J possui seus refletores com expressiva continuidade lateral, na ordem de dezenas de metros, destacado mergulho das cliniformas para NE em ângulo praticamente padrão de 6°. Por fim, a radarfácies K, que apresenta

um contato erosivo com a radarfácies sotoposta J. Os refletores nesta radarfácies possuem geometria essencialmente ondulada com baixa continuidade lateral causada por sucessivos truncamentos erosivos

### 5.2 Testemunhos de sondagem

De acordo com o que foi observado nos radargramas, cinco pontos foram selecionados para a realização dos testemunhos de sondagem. (Fig. 16, Fig. 17).



**Figura 16:** Locais onde foram realizadas as sondagens com as profundidades alcançadas e a relação com o radargrama

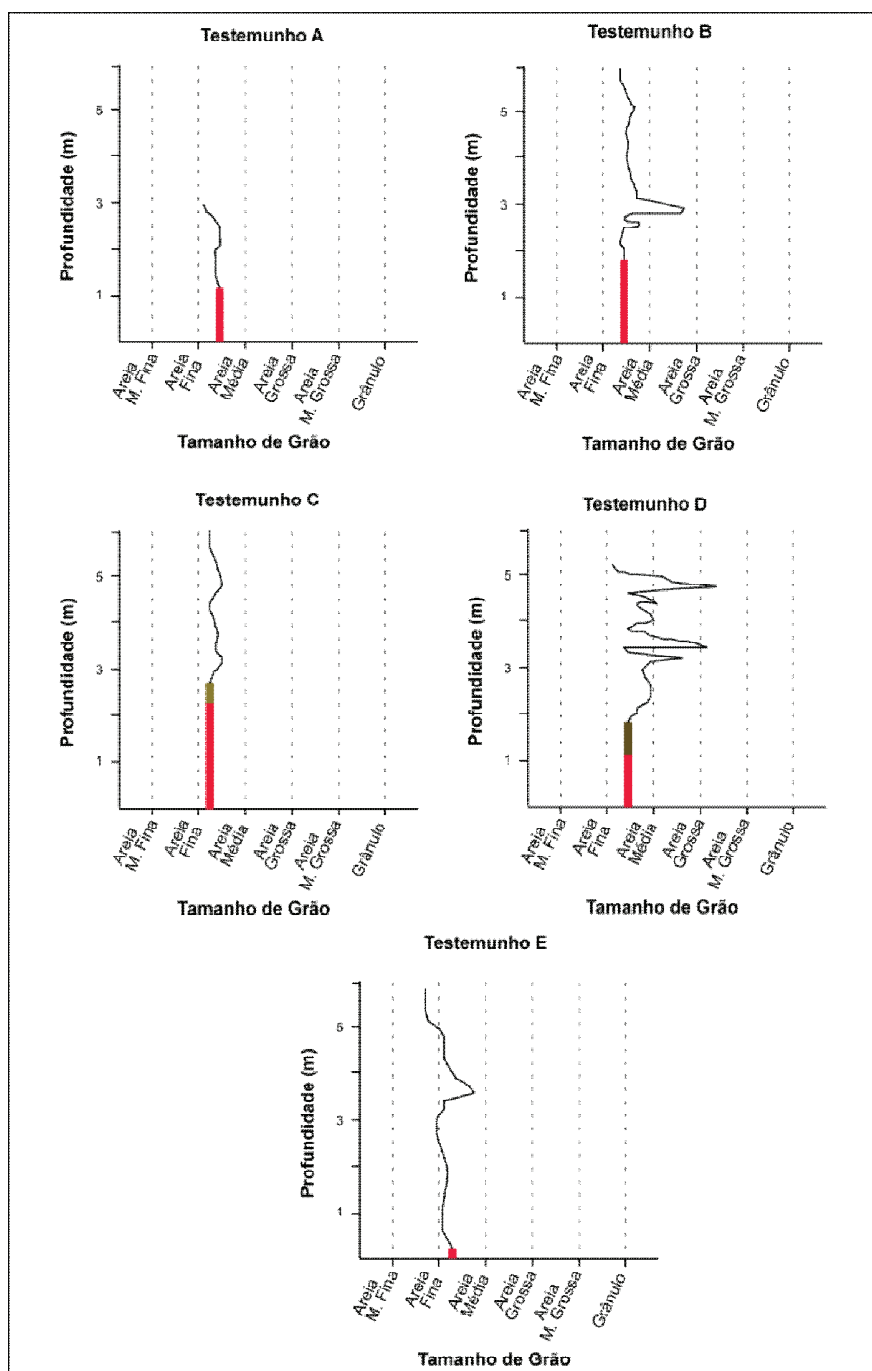


**Figura 17:** Localização dos testemunhos obtidos na área de estudo

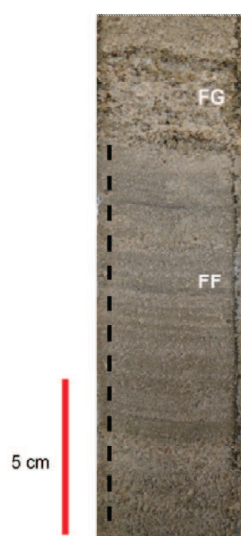
Os testemunhos de sondagem A, B e C foram extraídos sobre o radargrama I apresentado acima, no domínio externo. Os testemunhos D e E foram retirados sobre outro radargrama, porém no testemunho E com mesma orientação e padrão de refletores. Já o testemunho D foi plotado na seção com padrão de refletores diferente das demais seções, na porção mais adentro do continente no domínio externo.

Algumas propriedades dos sedimentos foram analisadas durante a descrição dos testemunhos, dentre elas o tamanho de grão, que possibilitou a geração de perfis granulométricos (Fig. 18).

Em nenhum dos testemunhos foram encontrados materiais como, conchas e matéria orgânica passíveis de serem datados. Além disso, houve alguns problemas como excessiva compactação do sedimento, deformação do cano na retirada e, no caso do testemunho D, houve o rompimento do cano durante o processo de retirada do testemunho. Esses problemas contribuíram para praticamente não preservar estruturas sedimentares nos testemunhos. A estrutura preservada que mais se destaca é a gradação normal encontrada no testemunho B (Fig. 19), da qual foram separadas alíquotas das camadas de areia grossa e areia fina para a realização de análises granulométricas.



**Figura 18:** Perfis granulométricos dos testemunhos obtidos visualmente. Em vermelho, o intervalo correspondente ao preenchimento do testemunho e em marrom o intervalo interpretado como aterro.



**Figura 19:** Imagem do Ts – B no intervalo de 2,44 m a 2,75 m. A linha tracejada demarca o intervalo de ocorrência da gradação normal. FF e FG indicam o intervalo de onde foram coletas amostras para análises granulométricas.

**Tabela 1:** Parâmetros estatísticos encontrados nas amostras

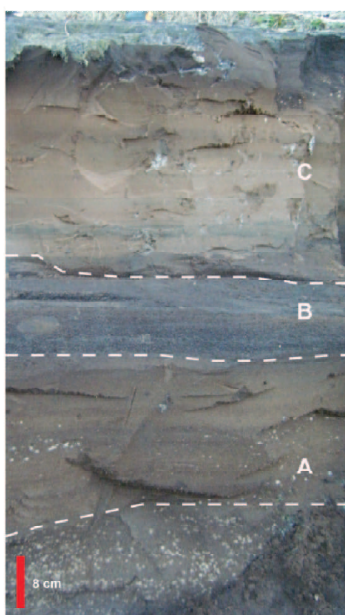
Fácies	Tamanho Médio (phi)	Grau de seleção	Assimetria
FG	0,0896	1,1670	0,1862
FF	2,1030	0,5442	0,0824

De acordo com Folk & Ward (1967), o tamanho médio encontrado na amostra FG é areia grossa. Enquanto o tamanho médio para a amostra FF é areia fina. O grau de seleção para as amostras FF e FG ficou como moderadamente bem selecionado e mal selecionado, respectivamente. Por fim, o resultado da assimetria encontrado foi aproximadamente simétrica, para ambas as amostras.

### 5.3 Descrição de afloramento

Foi identificado um afloramento na área de estudo distante cerca de 200 m a Sul do local onde o radargrama representativo do domínio externo foi adquirido. O afloramento possui aproximadamente 15 m de comprimento e cerca de 1,20m de altura. Laminações centimétricas plano - paralelas, levemente onduladas ocorrem ao longo de todo afloramento.

Ao descrever o afloramento notaram-se diferenças em características como mineralogia, tamanho de grão e presença de ictiofósseis. A partir destas diferenças foram distintas 3 fácies no afloramento (Fig. 20). A fácies A possui cerca de 0,6 m e é composta por areia média a grossa com alguns níveis de destacados de minerais pesados. A fácies B possui aproximadamente 0,3 m e possui grande concentração de minerais pesados associados ao material siliciclástico de tamanho grosso. Nesta fácies ainda nota-se a presença de formas cilíndricas a elípticas compostas por areia com tamanho de grão fino a médio, interpretados como vestígio icnofóssil do crustáceo *Callichirus*.



**Figura 20:** Imagem do afloramento e as três fácies individualizadas

A última fácies descrita é bastante similar com a fácies A na quantidade de minerais pesados e na presença de laminações plano – paralelas. O parâmetro que difere elas é o tamanho de grão, que no caso da fácies C é composta por areia fina a média.

Amostras destas três fácies foram coletadas e em laboratório, realizada a análise granulométrica (Tab. 2). Os resultados serviram principalmente para classificar com precisão, assim como as amostras do testemunho segundo Folk & Ward (1957), o tamanho médio, grau de seleção e assimetria dos grãos nas diferentes fácies.

Quanto ao tamanho médio, como resultado foi obtido areia grossa para as duas primeiras fácies e areia fina para a fácies C.

**Tabela 2:** Resultado dos parâmetros estatísticos das fácies descritas em afloramento

Fácies	Tamanho Médio ( $\phi$ )	Grau de seleção	Assimetria
A	0,8001	0,6716	-0,08365
B	0,7338	0,9781	0,07786
C	1,9280	0,4090	-0,04244

O grau de seleção das amostras caiu em três campos diferentes de classificação. A Fácies A é classificada como moderadamente selecionada, a B como bem moderadamente selecionada e C como bem selecionada.

O último parâmetro obtido através da curva de frequência acumulada é a assimetria, que mostra a dispersão da curva conforme a distribuição dos intervalos granulométricos. A fácies A é classificada como aproximadamente simétrica, a B como positiva e a Fácies C como aproximadamente simétrica.

## 6. Discussões

A divisão da área de estudo, a partir da interpretação dos radargramas (Tab. 3), em três domínios mostra a influência de diferentes processos que atuaram durante a formação dos depósitos sedimentares da barreira.

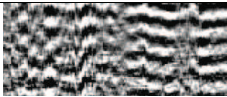
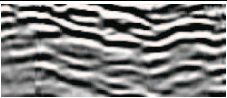





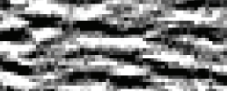



A descrição das radarfácies tornou possível interpretar, a partir destes processos atuantes, os possíveis ambientes deposicionais existentes. Com a importante ressalva de que a interpretação foi realizada praticamente com dados geofísicos e, portanto, sem dados concretos que atestem as interpretações. Sendo assim foram adotadas algumas premissas, a principal delas foi atentar para a localização dos radargramas e os ambientes deposicionais adjacentes que pudessem exercer influência.

### 6.1. Depósitos pleistocênicos

Os depósitos pleistocênicos aflorantes na planície costeira que circunda a área de estudo ocorrem comumente com geometria alongada, compostas por cristas e cavas, esta última preenchida por depósitos paleoestuarinos (Fig. 21). Esse padrão de cristas e cavas com idade pleistocênica foi reconhecido também no litoral de paulista, no trabalho de Martin *et al.* (1979/80) onde os autores propuseram modelos evolutivos para as barreiras holocênicas nos litorais fluminense, baiano além do paulista. Com base em testemunhos de sondagem realizados em cavas de areia em Praia de Leste no Paraná, Souza

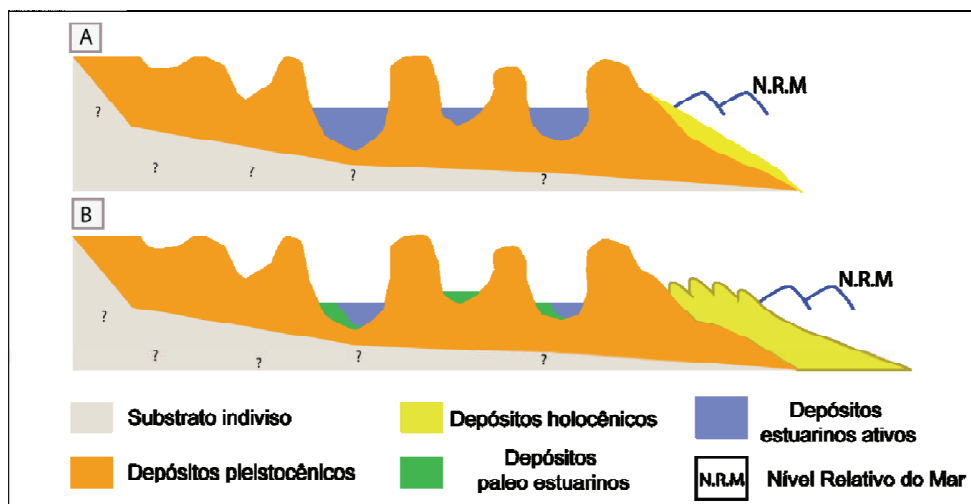
(2005) determinou a partir de datações radiométricas em lamas a superfície de ravinamento que marca o contato entre depósitos pleistocênicos e holocênicos na profundidade de 8 m.

**Tabela 3:** Síntese das radarfácies descritas e sua representação gráfica

<b>Radarfácies</b>	<b>Descrição</b>	<b>Representação</b>
<b>A</b>	Refletores contínuos, na escala de dezenas de metros, paralelos entre si e sub-horizontais com mergulho para leste	
<b>B</b>	Refletores sub-horizontais, por vezes com ângulo de mergulho maior. Por vezes são contínuos, mas em geral, truncados por outros refletores	
<b>C</b>	Refletores em estrutura de 'corte e preenchimento	
<b>D</b>	Refletores apresentam-se com progradação das cliniformas para leste e por vezes, destacada mudança no ângulo de mergulho dos refletores	
<b>E</b>	Refletores contínuos lateralmente, com baixo ângulo de mergulho que apresenta o contato superior muitas vezes truncado	
<b>F</b>	Refletores de geometria ondulada, com pouca continuidade lateral e presença de estratificação cruzada Swaley	
<b>G</b>	Refletores lateralmente contínuos, paralelos entre si e com destacado mergulho sub – horizontal para Norte	
<b>H</b>	Refletores sub-horizontais, muitas vezes truncados, com baixo mergulho para SE	
<b>I</b>	Refletores apresentam 3° de mergulho para SE com grande continuidade conforme ganham profundidade	
<b>J</b>	Refletores com expressiva continuidade lateral, destacado mergulho das cliniformas para NE em ângulo de 6°	
<b>K</b>	Refletores com mergulhos sub-horizontais e, na maioria das vezes são truncados, nota-se também a ocorrência de estratificação do tipo Swaley	

Seguindo o trabalho de Roy (1994) e posteriormente, Dillenburg (2000) sobre a importante influência que a morfologia do substrato exerce a autora reconheceu também o papel preponderante que a morfologia do substrato

exerceu para a atual configuração da costa entre o norte de Santa Catarina e o Sul de São Paulo.



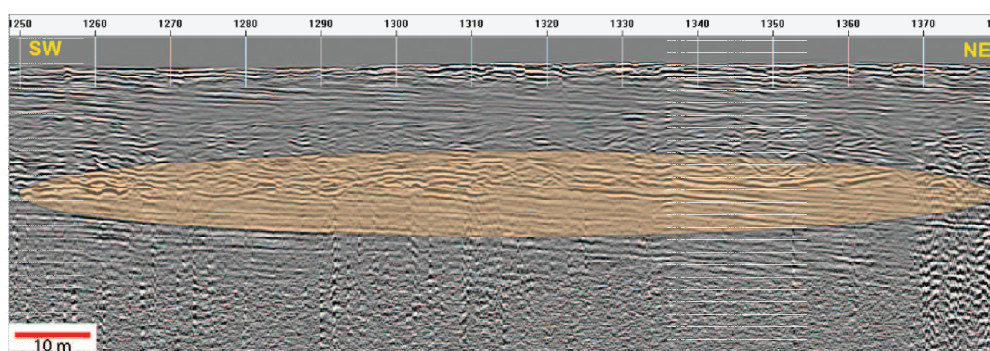
**Figura 21:** Representação esquemática do substrato pleistocênico na área de estudo. Em A, o momento de máximo transgressivo onde as cavas estão afogadas por estuários enquanto que a barreira holocênica de pouca espessura acopla no substrato pleistocênico. Já em B, na fase regressiva, as cavas encontram-se total ou parcialmente preenchidas (Modificado de Martin *et al.* 1979/80).

Souza (2005) também identificou no seu trabalho que o substrato pleistocênico por onde a barreira holocênica depositou-se aumenta sua profundidade de Oeste para Leste. Quanto à propriedade física dos sedimentos pleistocênicos e holocênicos, a autora ressalta que a distinção a olho nu dos depósitos é complicada pelo fato destas propriedades não apresentarem significativas diferenças.

A partir destas informações sobre a característica do substrato pleistocênico, foi feita a tentativa de encontrar seu registro em sub superfície, através do GPR. A possibilidade encontrada seria dentro dos Domínios Central, marcada pela radarfácies E e Interno pelas radarfácies H, I e J.

No Domínio Central, apesar dos refletores da radarfácies E apresentarem comportamento semelhante ao descrito na radarfácies A, o limite superior desta radarfácies é marcado por uma superfície erosiva bem destacada em algumas seções do radargrama representativo do Domínio Central (Fig. 22). Nota-se na seção que não existe mudança significativa no sinal do GPR quando atinge essa camada. Isso se deve muito provavelmente pela similaridade nas propriedades físicas entre os sedimentos holocênicos e

pleistocênicos descritos por Souza (2005). Na costa sul de Santa Catarina, esse limite é muito bem marcado quando são analisados dados de GPR. Os sedimentos pleistocênicos apresentam finas películas de óxido de ferro no entorno de grande parte dos grãos (Silva 2011). Esse padrão de resposta também é observado no Rio Grande do Sul, onde Rosa (2010) credita esse comportamento à presença de argilas e/ou óxidos de ferro resultantes da ação da diagênese.



**Figura 22:** Outra seção do mesmo radargrama apresentado no Domínio Central. Nessa seção é nítido o contato erosivo existente entre os refletores plano paralelos com mergulho para NE e os refletores ondulados com nítidos truncamentos entre si.

No Domínio Interno as radarfácies H, I e J (ver Fig.14) representariam também o substrato pleistocênico, onde a radarfácies E seria correspondente a J. Como a qualidade do sinal nesse radargrama foi boa, foi possível atingir profundidades de até 25 m com boa resolução, esse aumento na janela possibilitou a distinção de outras duas radarfácies (H e I) que marcam outros momentos na evolução da barreira pleistocênica.

## 6.2. Fase Transicional

Definida a provável morfologia do substrato pleistocênico na área de estudo como uma topografia de altos (cristas) e baixos (cavas), as radarfácies sobrepostas logo acima a estes depósitos apresentam algumas semelhanças nos dois Domínios (Central e Interno).

O padrão encontrado nas radarfácies F (Domínio Central) e K (Domínio Interno) possuem características de que a sedimentação ocorreu sob a influência de tempestades. Nítidas estratificações cruzadas do tipo Swaley foram encontradas nesta radarfácies (Ver Figs. 13 e 14). Essas estruturas foram descritas pela primeira vez por Leckie & Walker (1982) em depósitos

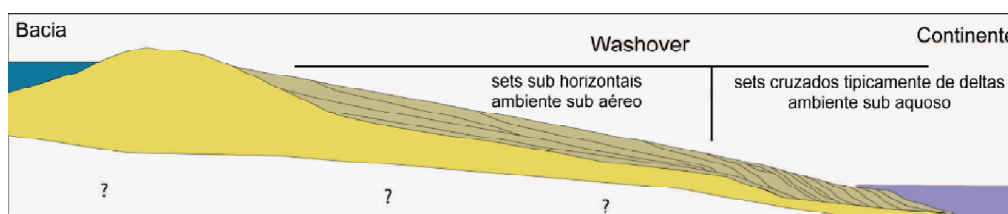
costeiros dominados por tempestades e marés do Cretáceo Inferior no Canadá. Segundo os autores esta estratificação é formada acima da base de ação de ondas de bom tempo. É definida como uma série de empilhamento sedimentar de geometria côncava com uma superfície basal erosiva, sobre a qual ocorre a sedimentação. Neste trabalho pioneiro já se relacionava a existência de estratificações do tipo Hummocky e Swaley. Para os autores, numa sucessão tipicamente regressiva, sob influência de tempestades, se presente, a estratificação do tipo Swaley se encontra sempre sobre a estratificação Hummocky. Através de experimentos em laboratório, Dumas & Arnott (2006) demonstraram que estas duas estruturas estão geneticamente ligadas. De acordo com estes autores as duas estruturas se formam sob condição de tempestade, com a ressalva de que a preservação da Hummocky depende de certa taxa de agitação, caso contrário a estrutura é erodida e preferencialmente apenas a Swaley é preservada.

Souza et al. (2012) apresentaram diversas estruturas sedimentares da barreira holocênica no setor de Praia de Leste, PR. A barreira estudada pelos autores possui comportamento regressivo iniciado a 7 – 6 k.a e através das estruturas descritas, entre elas a comum ocorrência da estratificação cruzada Swaley, revelam um ambiente dominado por tempestades. No trabalho, além de dados de afloramentos e testemunhos, também foram identificadas estas estruturas em seções adquiridas com o equipamento geofísico GPR.

Imediatamente acima a estas estruturas, no Domínio Central, alguns dos refletores da radarfácies G apresentam nítida migração das clinofórmulas para SW, sentido contrário a migração preferencial (Ver Fig. 13 - I). Diferentes possibilidades são abertas para explicar o comportamento dos refletores nessa radarfácies, por justamente não se ter outros dados senão os geofísicos.

A primeira possibilidade levantada é de que os refletores que migram para o continente seriam depósitos de deltas de washover, produto relacionado a processos de overwash. Definido por Leatherman (1979) overwash, é um processo onde ondas de tempestade ultrapassam a berma da praia e como resultado erodem e transportam sedimento para planícies eólicas, pântanos, lagos ou estuários. Os depósitos de washover, definidos por Schwartz (1982), possuem dois padrões principais (Fig 23). Quando depositado em um ambiente subaéreo, as camadas formam estratos horizontais a sub horizontais, com

migração no sentido do continente. Já quando esse fluxo atinge um corpo aquoso, a feição formada é de um delta que segundo apresentado pelo autor pode apresentar estratificações cruzadas tangenciais, tabulares e sigmoidais.



**Figura 23:** Representação esquemática de um depósito de washover e suas duas principais componentes: Estratos formados em condições subaéreas e subaquosas (Modificado de Schwartz, 1982)

Como definido pelo autor, a sobreposição de estratos sub horizontais em estratos tipicamente deltaicos faz parte da evolução do depósito. Porém, essa seqüência não é encontrada na radarfácies G. Os refletores que migram para o continente são imediatamente recobertos por refletores que migram em baixo ângulo, no sentido oposto. Nota-se ainda que os refletores sotopostos a esta feição também migram no sentido da Bacia.

Uma explicação para este comportamento do padrão de empilhamento leva em conta o ambiente deposicional e os processos atuantes sobre os depósitos dentro ainda da Fase Transicional.

### **Fase Marinha**

Ainda na radarfácies F e K, no Domínio Central e Interno respectivamente, o padrão ondulado com diversos truncamentos erosivos e a descrição de estratificações do tipo Swaley sugere que a costa era desprotegida e mais aberta, e que nível relativo do mar era alto o suficiente para que tempestades deixassem registro no substrato

### **Fase Transicional – Estuarina**

Já na radarfácies G, no Domínio Central, a costa aparentava certa proteção contra tempestades. Proteção essa que deveria ser próxima da área onde o radargrama foi levantado, no sentido da Bacia. Esta proteção permitiu o desenvolvimento de um extenso ambiente subaquoso relativamente raso, estuarino, no qual a taxa de aporte sedimentar rapidamente superou a taxa de subida do nível do mar. Esta constatação é marcada pela migração dos refletores no sentido da Bacia, logo no limite inferior da radarfície G. Interpreta-

se o ambiente deposicional como estuarino pelo fato de não se encontrar nos refletores diretamente adjacentes, assinaturas que indiquem a sucessão de um ambiente marinho.

Outro registro que indica a provável existência de uma barreira próxima à área em questão são os depósitos de washover. A ausência de estratos sub horizontais com mergulho para o continente nos depósitos de washover descritos no registro do radargrama provavelmente refletem uma extensa área alagada que ocorria na época, com pouca porção de terra emersa. Sobre esta área emersa os processos de overwash ocorriam, transportando sedimento para a retrobarreira.

### **6.3. Fase Progradacional**

A última fase evolutiva da barreira holocênica na região de Guaratuba, marcada pela progradação do sistema, ocorre essencialmente no Domínio Externo. A sucessão vertical das radarfácies mostra o típico comportamento progradacional da barreira, onde radarfácies correspondentes a ambientes costeiros proximais se depositam sobre radarfácies correspondentes a ambientes costeiros distais.

O padrão de refletores encontrados na radarfácies A sugere que os sedimentos que a compõe teriam se depositado num ambiente subaquoso, de baixa energia, possivelmente por decantação de partículas finas. Na radarfácies B, o padrão ondulado dos refletores e a constante relação de truncamento erosivo entre eles possibilitam interpretar que a deposição dos sedimentos teria ocorrido também em ambiente subaquoso, porém, sob influência direta da ação de ondas com o leito marinho.

Na radarfácies C, o padrão de corte e preenchimento descrito sugere dinâmica relacionada a um canal, provavelmente um sangradouro. A configuração dos refletores encontrados na radarfácies D sugere que seus sedimentos foram depositados num ambiente transicional, subaéreo/praiial e de alta energia. É comum encontrar no registro desta radarfácies mudanças nos ângulos dos refletores. Esta mudança se deve à incidência de tempestades na costa que, de acordo com sua energia, causa uma mudança no perfil de equilíbrio praiial. Essa mudança no perfil de equilíbrio é notada também em profundidade, com a mudança na espessura das radarfácies A e B (Fig. 24)

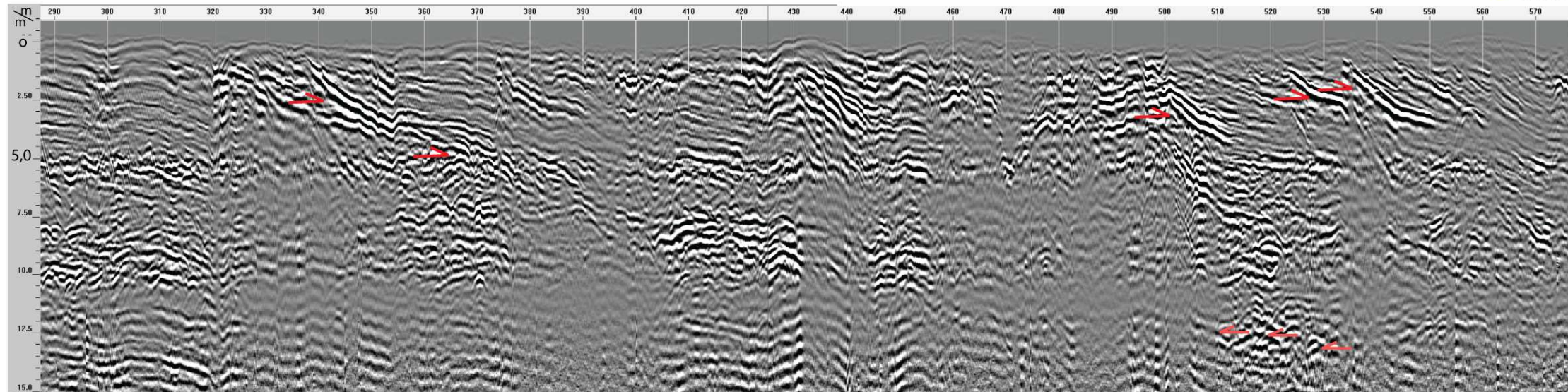
O limite Oeste do Domínio Externo (ver anexo I) possui uma mudança lateral no padrão de empilhamento dos refletores que chama a atenção. Uma superfície ligeiramente bem marcada por sucessivos truncamentos erosivos separa dois padrões diferentes de refletores.

Os refletores situados abaixo da superfície possuem o registro da existência de um ambiente subaquoso, estuarino, e a resposta deste ambiente para as variações do nível de base. Na porção basal do radargrama clinofórmias migram no sentido do continente e imediatamente acima nota-se refletores plano paralelos. Essa sucessão vertical possivelmente marca dois momentos da barreira. No primeiro momento, a fase retrogradacional da barreira marcada pelo registro destas clinofórmias que migram para o continente e que provavelmente estariam associados a depósitos de washovers preservados na retrobarreira. Em um segundo momento, a fase agradacional da barreira, interpretada assim a partir dos refletores contínuos lateralmente e plano paralelos, encontrados logo acima das clinofórmias que migram para o continente. Dentro desta sucessão, é possível marcar outra superfície, a partir da qual nitidamente ocorre ajuste no perfil de equilíbrio das clinofórmias. Clinofórmias estas nitidamente relacionadas à dinâmica de ambiente estuarino onde o balanço positivo de sedimentos e o rebaixamento do nível de base preenchem os canais.

Acima da superfície marcada pelos truncamentos erosivos ocorrem refletores com padrões muito semelhantes aos refletores essencialmente marinhos / costeiros descritos nas radarfácies B e D. Este provável contato erosivo entre depósitos estuarinos e marinhos pode estar relacionado com a diferença no balanço sedimentar dos dois ambientes. Enquanto o balanço positivo de sedimento no estuário começou a igualar, e em seguida superar a taxa de criação de espaço de acomodação, no mar, o balanço negativo de sedimento promoveu uma transgressão da linha de costa. Essa transgressão teria sido curta, ligada justamente ao baixo aporte sedimentar que chega à plataforma, mas suficiente para erodir os depósitos estuarinos.

W Continente

E Bacia



W Continente

E Bacia

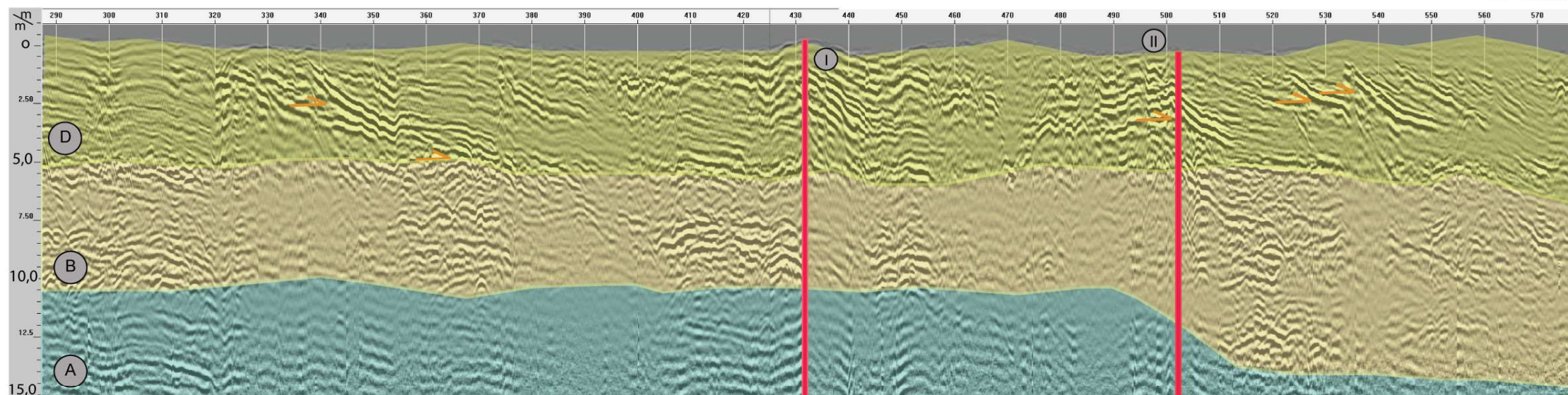


Figura: 24 - Imagem do radargrama processado, as setas vermelhas indicam os refletos com truncamento erosivo  
 II - Imagem da mesma seção porém com interpretação das radarfácies; As barras vermelhas indicam dois momentos distintos; À esquerda, uma fase de menor incidência de tempestades e a direita, uma fase onde ocorre o aumento na incidência de tempestades, marcadas na radarfácies D e que refletem também costa a dentro pelo aumento na espessura da radarfácies B.

#### **6.4. Correlação entre os resultados**

A análise das descrições de afloramento, dos radargramas e dos testemunhos de sondagem realizados na porção progradacional da barreira permite a comparação de alguns resultados.

Nas três abordagens realizadas, foi notado o registro da incidência de tempestades durante a progradação da barreira. As areias do afloramento possuem propriedades estatísticas similares as encontradas no testemunho. A gradação normal encontrada em ambas as abordagens mostram que sob tempestades, sedimentos de maior granulometria são remobilizados da plataforma e depositados na praia. De acordo com Noernberg (2001) essencialmente plumas de sedimentos finos deixam os estuários para o mar. Como é de se esperar, sedimentos com maiores tamanhos de grão, provenientes de contribuições fluviais, são depositados nas cabeceiras dos estuários enquanto os sedimentos finos depositam-se nas áreas protegidas. Portanto, apesar da costa no Paraná possuir dois estuários, o aporte sedimentar de material grosso gerado por eles é muito pequeno.

Por isto, acredita-se que as areias grossas encontradas no registro são provenientes da própria plataforma, e como hoje não exista uma significativa contribuição de sedimentos para a plataforma, os sedimentos relictos são constantemente remobilizados por tempestades.

## 7. Conclusões

A barreira holocênica na região de Guaratuba mostrou ter uma relativa complexidade na sua evolução, dado a quantidade de processos e componentes que influenciaram sua configuração até o estágio em que ela se encontra hoje.

A subdivisão da barreira em três domínios foi proposta de acordo com o empilhamento dos refletores e em consequência, das radarfácies descritas. O Domínio Interno, assim como o Domínio Central, possuem os depósitos pleistocênicos relativamente rasos e destacada relação erosiva com os depósitos holocênicos sobrepostos. O Domínio Central possui na sua porção superior o registro de um ambiente estuarino ainda suscetível a processos de *overwashes*. Registro diferente da porção superior do Domínio Interno, onde se encontra a fase de colmatação do estuário, sem influência de tempestades.

O Domínio Externo, o último agrupamento proposto, engloba a fase de franca progradação da barreira holocênica. Neste Domínio encontrou-se o registro de sucessivas tempestades que atingiram a costa. No radargrama essa assinatura é marcada por refletores em ângulos maiores que os adjacentes, com nítido contato erosivo. Já nas fácies sedimentares, o registro é marcado pela ocorrência de sedimentos grossos por vezes com alta incidência de minerais pesados (como no caso do afloramento).

Por fim, onde seria o limite do Domínio Externo, foi descrito o contato entre refletores que correspondem a um ambiente estuarino com refletores que indicam um ambiente marinho. Contato que marca o que seria o máximo transgressivo neste setor da costa. A relação erosiva descrita do contato evidencia dois comportamentos distintos quanto à taxa de criação de espaço de acomodação entre os ambientes, estuarino e marinho. Em um provável momento em que o nível eustático desacelerava sua taxa de subida, antes de iniciar a descida, a alta taxa de aporte sedimentar no estuário superou a taxa de criação de espaço de acomodação. Esse comportamento não foi seguido pela linha de costa que continuou se deslocando no sentido do continente, pois a taxa de aporte sedimentar não foi suficiente para superar a taxa de criação de espaço de acomodação.

Como o estudo abordou essencialmente a geofísica, a ausência de dados concretos não permitem dizer com exatidão quando a linha de costa começou a se deslocar no sentido da Bacia e se a barreira retrogradante foi preservada. Trabalhos futuros poderão seguir nessa linha, ao tentar caracterizar com maior detalhe esse comportamento da linha de costa além de refinar os limites dos Domínios propostos neste trabalho.

## 8. Referências Bibliográficas

- Angulo R.J., 1992. *Geologia da planície costeira do Estado do Paraná*. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo
- Angulo R.J., Lessa G.C., Souza M.C. 2006. A critical review of mid- to late-Holocene sea-level fluctuations on the eastern Brazilian coastline. *Quaternary Sciences Review* **25**:486–506
- Bigarella J.J. 1946. Contribuição ao estudo da planície litorânea do Estado do Paraná. *Arquivos de Biologia e Tecnologia* **1**:75–11
- Bigarella J.J. 1954. Os sambaquis na evolução da paisagem litorânea sul brasileira. *Arquivos de Biologia e Tecnologia*, **IX**:200-221
- Boyd R., Dalrymple R.W., Zaitlin B.A. 2006. Estuarine and incised valley facies models. In: Posamentier H.W., Walker R.G., (eds) *Facies models revisited*, *SEPM*
- Camargo M. G., 2006. Sysgran: Um sistema de código aberto para análises granulométricas do sedimento. *Revista Brasileira de Geociências*, n 36, v 2, pg 371-378.
- Castro L.G., Ferreira F.J.F., Angulo R.J., 2008. Modelo gravimétrico-magnético do gráben de Paranaguá –PR, Brasil. *Revista brasileira de geofísica*. Vol. 26 n° 3
- Dillenburg S.R., Tomazelli, L.J., Clerot, L.C.P. 2003. Gradients of wave energy as the main factor controlling the evolution of the coastal of Rio Grande do Sul in southern Brazil during the Late Holocene. In: 5<sup>th</sup> International Symposium on Coastal Engineering and Science of Coastal Process, 2003, Clearwater. *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on Coastal Engineering and Science of Coastal Process*. New York: American Society of Civil Engineers, 2003. v.1.
- Dillenburg, S.R., Martinho, C.T., Tomazelli, L.J., Dorneles, L., Silva, D.B. 2005. Gradientes de altura de ondas ao longo da costa do Rio Grande do Sul. *Anais... 10º Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário*. CD-ROM extended abstract n° 84, 6p.

- Dillenburg, S.R., Barboza, E.G., Tomazelli, L.J., Hesp, P.A., Clerot, L.C.P., Ayup-Zouain, R.N. 2009. The Holocene coastal barriers of Rio Grande do Sul. In SR Dillenburg and PA Hesp (eds.). *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*. Springer, 380 p.
- Gawthorpe, R.L., Collier, R.E.L., Alexander, J., Leeder, M., Bridge, J.S., 1993. Ground penetrating radar: application to sandbody geometry and heterogeneity studies. In: North, C.P., Prosser, D.J. (Eds.), *Characterization of Fluvial and Aeolian Reservoirs*. Geol. Soc. Lond. Spec. Publ., vol. 73, pp. 421–432.
- Hesp P.A., Short A.D. 1999. Barrier morphodynamics. In: Short AD (ed) *Handbook of beach and shoreface morphodynamics*. John Wiley & Sons Ltd., England, pg 307–333
- Dalrymple R.W., Zaitlin B.A., Boyd R. 1992. Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications. *Journal of sedimentary petrology*, v. 62 n° 6.
- Dumas S., Arnott R.W.C., 2006. Origen of Hummocky and Swaley cross-stratification. The controlling influence of unidirection current strength and agraddation rate. *Geology*. V. 34, n. 12, pg 1073-1076.
- Folk R.L. & Ward W.C. 1957. Brazos River Bar: Study and significance of grain size parameters. *Journal Sedimentary Petrology*, 27 (1):03-26.
- Leckie D.A., Walker, R.G., 1982. Storm and tide dominated shorelines in Late Cretaceous Moosebar- Lower Gates interval outcrop equivalents old deep gas trap in western Canada. *AAPG Bulletin* 66, 138-157
- Leatherman S.P. 1977. Barrier dune systems: a reassessment. *Sedimentary Geology*. 24, 1-16
- Miall A.D. 1978. Lithofacies types and vertical profile models in braided river deposits: a summary. In. Miall A.D. (ed). *Fluvial Sedimentology*. Can. Soc. Petrol. Geol. Mem., 5:597-604.
- Neal A., Pontee N.I., Pye K., Richards J., 2002. Internal structure of mixed-sand-and-gravel beach deposits revealed using Ground Penetrating Radar. *Sedimentology*, 49: 784 – 804

- Neal A. 2004. Ground Penetrating Radar and its use in sedimentology: Principles, problems and progress. *Earth Science Review*, 66:261–330
- Noernberg M.A. 2001. Processos morfodinâmicos no complexo estuarino de Paranaguá – Paranaguá – Brasil. Um estudo a partir de dados in situ e LandSat TM. Tese de Doutorado. UFPR. Curitiba. 180p.
- Pritchard D.W. 1967. What is an estuary? Physical viewpoint, *in* Lauff, G.H. ed. Estuaries: American association for the advancement of science, Vol. 83
- Roy P.S., Cowell P.J., Ferland M.A., Thom B.G., 1994. Wave-Dominated Coasts. In: Carter R.W.G., Woodroffe C.D., (eds) *Coastal Evolution: Late Quaternary Shoreline Morphodynamics*. Cambridge University Press, Cambridge, pg 121-186.
- Rosa M.L.C.C., 2010. *Estratigrafia de sequências: aplicação das ferramentas na alta frequência. Um ensaio na Planície Costeira do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre. 67p. Exame de qualificação de Doutorado. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Schwartz R.K., 1982. Bedform and stratification characteristics of some modern small-scale washover sand bodies. *Sedimentology*, 29, pg 835-849.
- Silva A.B., 2011. *Análise Estratigráfica da barreira Transgressiva holocênica na região da lagoa do Sombrio, SC*. Porto Alegre. 65 pg. Dissertação de Mestrado. IGEO/UFRGS.
- Souza M.C., Angulo R.J., Pessenda L.C.R. 2001. Evolução paleogeográfica da planície costeira de Itapoá, litoral norte de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Geociências* **31**, 223-230.
- Souza M.C. 2005. *Estratigrafia e evolução das barreiras holocênicas paranaenses, sul do Brasil*. Programa de pós-graduação em Geologia, UFPR, tese de doutorado, 95p.
- Souza M.C., Angulo R.J., Assine M.L., de Castro D.L. 2012. Sequence of fácies at a Holocene storm-dominated regressive barrier at Praia de Leste, southern Brazil. *Marine Geology*, pg. 291-294

Vail P.R., Mitchum Jr., R.M. 1977. Seismic Stratigraphy and Global changes of Sea Level Parte I: Overview. In: Payton, C.E. (Ed.), *Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon*. AAPG Memoir 26: p. 51-52

Zalan P.V., Oliveira J.A.B. 2005. Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil. *Bol Geoc Petrobras* 13:269–300