

Elementos Arquiteturais do Substrato da Lagoa dos Patos Revelados por Sísmica de Alta Resolução

JAIR WESCHENFELDER¹; IRAN C. S. CORRÊA¹; SALVADOR ALIOTTA²

1.Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Caixa Postal 15001,
CEP 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil.

2.Instituto Argentino de Oceanografía, Complejo CRIBABB, Camino Carindanga km 7, 8000,
Bahia Blanca, Argentina.

(Recebido em 04/05. Aceito para publicação em 09/05)

Abstract- A high-resolution seismic survey was performed on the Lagoa dos Patos, southern Brazil. The survey was conducted aboard the research vessel LARUS of the Fundação Universidade Federal do Rio Grande. The seismic profiles were obtained using a 3.5 kilohertz frequency, which provided a rather good penetration depth and resolution of the records. Results of the seismic records allowed the determination and mapping of seismic facies and seismic sequences, as well as related architectural elements, which were identified basically through the configuration patterns of the seismic reflectors. The analysis of the seismic records allowed the identification of the architectural elements that build up the sedimentary pile accumulated in the coastal prism of the State of Rio Grande do Sul, contributing to a better understanding of the geological evolution of the southern Brazilian coastal plain during the Quaternary period.

Keywords- 3.5 Khz Seismic; Seismic Sequences; Seismic Facies; Coastal Plain; Southern Brazil.

INTRODUÇÃO

Dados sísmicos obtidos com perfiladores de fundo e subfundo, operando em alta frequência, são amplamente utilizados em estudos interpretativos dos ambientes de sedimentação. Os padrões de resposta acústica servem como base para a interpretação dos processos erosivo-deposicionais ocorridos. Esses equipamentos geralmente são configurados para operarem com frequências de 3,5 a 12 kHz que permitem uma alta resolução (submétrica) dos refletores de subsuperfície, mas com baixa penetração no pacote sedimentar (geralmente inferior a 30 m). A técnica pode ser empregada em levantamentos de fundo e subfundo nos mais diversos ambientes subaquáticos, marinhos ou continentais.

Nas últimas décadas, perfis sísmicos de alta frequência têm sido utilizados na caracterização dos processos sedimentares de fundo e subfundo marinho em diversas partes do mundo (Costa e Figueiredo, 1998; Damuth, 1975; 1980; Damuth e Hayes, 1977; Flood, 1980; Lee *et al.*, 2002). Na costa atlântica sul-americana podemos citar os levantamentos sísmicos de alta frequência realizados no estuário de Bahia Blanca, Argentina (Aliotta *et*

al., 2002; 2004), em ambientes costeiros mais protegidos como na Baía de Guanabara, Rio de Janeiro (Baptista Neto *et al.*, 1996; Quesada *et al.*, 2000), e na Plataforma Continental do Amazonas, norte do Brasil (Costa e Figueiredo, 1998; Figueiredo *et al.*, 1996).

Para a região costeira do estado do Rio Grande do Sul (RS), são poucos os trabalhos publicados que utilizaram dados sísmicos de alta resolução na investigação da pilha sedimentar. Toldo (1994) e Toldo *et al.* (2000) estudaram a sedimentação holocênica na Lagoa dos Patos com o auxílio de ecogramas de 7 kHz. Um refletor de subsuperfície que marcaria o limite Pleistoceno/Holoceno, no interior da lagoa, foi mapeado nesses perfis de alta frequência. Segmentos desses ecogramas também foram utilizados por Ortiz (1995) na identificação do canal fluvial pleistocênico do Rio Camaquã, o qual desemboca na margem oeste da Lagoa dos Patos. Resultados de um levantamento sísmico de alta resolução foram apresentados por Corrêa *et al.* (2003), os quais revelaram a presença de estruturas de barreira no subfundo do canal de acesso à Lagoa dos Patos, em Rio Grande.

O presente trabalho objetiva analisar os re-

sultados de um levantamento sísmico de alta frequência (3,5 kHz) realizado no interior da Lagoa dos Patos, na planície costeira média do RS (Fig. 1). O estudo permitiu o reconhecimento e o mapeamento de fácies e seqüências sísmicas, fornecendo

novos subsídios aos estudos relacionados à evolução geológica e paleogeográfica da região. É o conjunto de dados sísmicos de alta resolução mais consistente, coletado até o momento, para a planície costeira do RS.

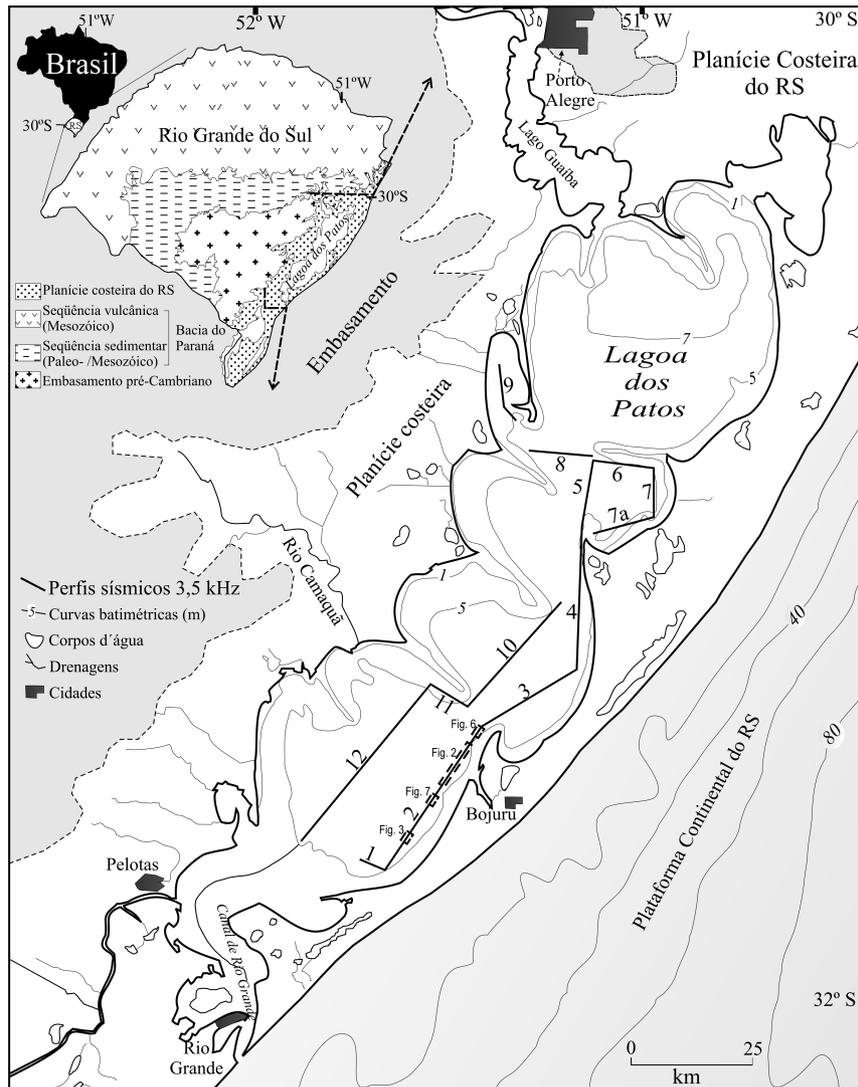


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo. Linhas de 1 a 12 são perfis sísmicos de 3,5 kHz levantados no interior da Lagoa dos Patos. No mapa é indicada a posição dos registros sísmicos das figuras 2, 3, 6 e 7, discutidas no texto.

CONTEXTO GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO

A planície costeira do RS é formada por uma extensa e diversificada faixa ambiental alongada na direção SO-NE do estado. É uma ampla área plana de terras baixas, com aproximadamente 33.000 km², em grande parte ocupada por um enorme sistema de lagos costeiros. Apresenta 600 km de extensão e largura em torno de 60 a 70 km na sua porção centro-sul e de 15 a 20 km na sua porção norte (Fig. 1).

O corpo lagunar da Lagoa dos Patos, com superfície em torno de 10.000 km², é um dos aspectos mais marcantes na fisiografia do estado. A laguna é a bacia de captação da rede de drenagem da Bacia do Sudeste do RS e do Nordeste da República do Uruguai. A extensão superficial total da bacia de captação alcança 180.000 km², cujas águas captadas desembocam diretamente no Oceano Atlântico através do Canal de Rio Grande, no extremo sul da laguna.

As fácies sedimentares da planície costeira do RS tem sido agrupadas dentro do sistema de

leques aluviais e do sistema tipo laguna-barreira (Villwock *et al.*, 1986). A parte proximal do sistema de leques aluviais são depósitos resultantes de processos predominantemente gravitacionais, gradando para depósitos aluvionares em sua porção mais distal. O sistema de leques aluviais marca a passagem entre as terras altas do embasamento da bacia de Pelotas e os sistemas deposicionais costeiros (Villwock e Tomazelli, 1995; Tomazelli e Villwock, 2000). Uma correlação entre os períodos de mar alto, a formação de quatro sistemas deposicionais do tipo laguna-barreira e os principais picos da curva isotópica do oxigênio de Imbrie *et al.* (1984) foi estabelecida no trabalho de Villwock e Tomazelli (1995).

Em linhas gerais o modelo evolutivo proposto por Villwock *et al.* (1986), para a região costeira do RS, concebe um pacote de sedimentos clásticos terrígenos que se acumulou, a partir do final do Terciário, em um sistema de leques aluviais coalescentes desenvolvido ao longo da margem leste de terrenos topograficamente mais elevados. As porções mais distais dos leques aluviais foram retrabalhadas por ciclos transgressivos e regressivos do nível do mar, correlacionáveis aos quatro últimos eventos glaciais do final do Cenozóico.

A formação do imenso corpo lagunar da Lagoa dos Patos foi propiciada pelos eventos de variação do nível do mar do final do Pleistoceno e do Holoceno. Os depósitos sedimentares que delimitam a Lagoa dos Patos tem sido relacionados aos quatro últimos eventos transgressivo-regressivos, responsáveis pela formação de quatro sistemas deposicionais do tipo laguna-barreira: os sistemas I (mais antigo), II e III foram formados no Pleistoceno Superior, enquanto o sistema IV está em formação desde o início do Holoceno (Tomazelli e Villwock, 2000).

Estudo detalhado sobre a sedimentação, padrão de ondas e dinâmica sedimentar da Lagoa dos Patos foi apresentado por Toldo (1994). É um corpo d'água costeiro bastante extenso, raso (profundidade média de 6 m), muito pouco influenciado pela maré astronômica (amplitude < 45 cm) e abrigado do ambiente dominado por ondas do oceano adjacente. Uma característica marcante são os esporões arenosos fixados às margens lagunar e que se projetam vários quilômetros para o seu interior. Elementos morfológicos e sedimentológicos levaram Toldo (1994) e Toldo *et al.* (2000) a dividirem a Lagoa dos Patos em dois setores distintos: o primeiro setor é a margem arenosa e o segundo é a parte plana e lamosa do seu interior. Profundidades entre 5 e 6 metros separam os dois

setores, com o primeiro deles ocupando em torno de 40 % em área. Ainda segundo esses autores, tanto o piso como as margens da laguna são vulneráveis a ação das ondas, cujas alturas significativas podem atingir até 1,6 m.

MATERIAIS E MÉTODOS

Aquisição dos dados sísmicos

O levantamento dos perfis sísmicos de alta resolução foi realizado na Lagoa dos Patos, em dezembro de 2002, a bordo da Lancha Oceanográfica LARUS da Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG). Foram levantados em torno de 400 km de perfis sísmicos, distribuídos em vários trechos (Fig. 1). A rota e o posicionamento dos perfis foram definidos por um sistema de posicionamento por satélite (DGPS).

Os dados sísmicos foram obtidos com um equipamento perfilador de subsuperfície *GeoAcoustics*, sistema analógico e digital, que pode operar no intervalo de frequência de 2 a 12 kHz. Esse sistema de aquisição é composto basicamente por transmissor (*Geopulse 5430A*), receptor (*Geopulse 5210A*), transdutor (*Geopulse 132B*) de quatro elementos, impressora (*EPC HSP1086*), unidade de processamento (*GeoPro*) e unidade digital com software de aquisição (*Sonarwiz*). O transdutor foi fixado na lateral da embarcação, servindo ao mesmo tempo como emissor e receptor do sinal acústico. Após testes preliminares para definir alguns dos parâmetros de aquisição em função das condições locais, optou-se pela frequência de 3,5 kHz, potência de 5 kW e intervalo de disparo de 125 ms. Durante o levantamento os dados sísmicos foram gravados no formato digital SEG-Y e simultaneamente impressos em papel termicamente ativado.

Reconhecimento e mapeamento de seqüências e fácies sísmicas

O reconhecimento e o mapeamento das seqüências e fácies sísmicas, assim como dos diversos elementos arquiteturais a elas associados, tiveram como base a análise da configuração interna dos refletores, a terminação lateral das superfícies sísmicas e a geometria externa dos pacotes, em concordância com as linhas gerais estabelecidas pela Sismoestratigrafia (Mitchum *et al.*, 1977). A metodologia permite uma interpretação geológica sistemática dos perfis sísmicos, fornecendo informa-

ções à cerca dos processos de sedimentação, variações relativas do nível do mar, paleotopografia, entre outras.

Para avaliar a profundidade dos refletores sísmicos foi considerada uma velocidade média de deslocamento do sinal acústico de 1650 m/s no pacote sedimentar e de 1500 m/s na água (Jones, 1999).

RESULTADOS

A análise conduzida no conjunto de dados sísmicos possibilitou o estabelecimento de diversas fácies e seqüências sismo-deposicionais. Discordâncias marcantes, evidenciadas principalmente por superfícies de truncamento dos refletores sísmicos, serviram de base para o reconhecimento de três seqüências sísmicas: seqüências **I**, **II** e **III**, da mais antiga para a mais recente. Definidas as seqüências sísmicas, foi possível estabelecer as diversas fácies sísmicas que as constituem.

O perfil 2 foi levantado praticamente paralelo à margem lagunar leste da Lagoa dos Patos, de sudoeste para nordeste, por uma extensão de 38 km. A profundidade média da lâmina d'água ao longo do perfil é de 6 metros, com exceção da parte inicial e final da linha sísmica onde a profundidade decresce para em torno de 5 metros devido à aproximação da margem lagunar (Fig. 1). O perfil sísmico 2 será abordado de forma mais detalhada neste trabalho pelo fato de demonstrar de forma mais clara, devido à sua boa resolução sísmica, a relação espacial e temporal entre as seqüências sismo-deposicionais I, II e III, assim como das diversas fácies sísmicas constituintes dessas três seqüências (Fig. 2).

Seqüência I

A seqüência **I** é a mais profunda das observadas nos registros sísmicos. Não foi possível definir o limite inferior desta unidade, que provavelmente localiza-se em profundidades superiores as que foram registradas pelo levantamento sísmico. O limite superior desta seqüência encontra-se a uma profundidade média de 17 m abaixo da lâmina d'água e é marcado por uma superfície de descontinuidade truncando os refletores sísmicos (Fig. 2b).

Por ser relativamente profunda, a atenuação do sinal acústico e a presença recorrente da reflexão múltipla do fundo lagunar dificultou o reconhecimento detalhado dos elementos arquiteturais que compõem a seqüência **I**. Desta forma, todo o pacote sedimentar constituinte da seqüência I foi designado como fácies sísmica **a**. A fácies sísmica **a** se caracteriza basicamente por refletores múltiplos, paralelos a sub-paralelos e com boa continuidade lateral. O espaçamento e a intensidade das reflexões são irregulares. Em alguns setores os refletores são mais fracos, mais irregulares e com pouca continuidade lateral (Fig. 2b e 3).

Seqüência II

A seqüência **II** se encontra delimitada na base e no topo por superfícies de descontinuidade bem marcantes nos registros sísmicos. Em termos gerais o limite inferior da seqüência **II** é marcado por uma superfície erosiva com boa continuidade lateral, praticamente horizontal, truncando em baixo

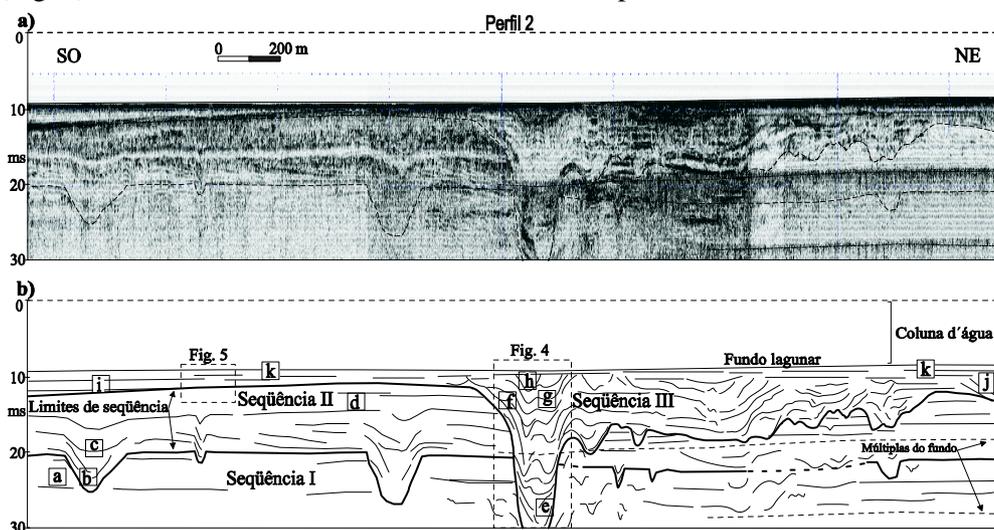


Figura 2 – Segmento do perfil 2 mostrando as fácies e seqüências sismo-deposicionais identificadas (ver na figura 1 a localização do registro sísmico). Profundidade em tempo de ida e volta, em milissegundos (ms). **a)** registro sísmico original; **b)** perfil interpretado.

ângulo os refletores da fácies sísmica **a** sotoposta (Fig. 2b). Em certos locais este limite inferior é mais irregular, onde truncamentos em alto ângulo dos refletores da fácies **a** marcam a superfície basal de canais escavados no pacote sedimentar da seqüência **I** sotoposta (Fig. 3). O limite superior é bastante irregular devido a canais ‘escavados’ nesta seqüência pela sobreposta (**III**) (Fig. 4). Desta forma, a espessura desta unidade nos registros sísmicos é bastante variável; em alguns locais ela não ocorre (foi erodida), como mostrado no bom exemplo da figura 4, enquanto em outros locais pode atingir até 12 m de espessura. Estima-se uma espessura média de 8 a 10 metros para esta unidade.

As fácies sísmicas **b**, **c** e **d** constituem a seqüência **II**. As fácies sísmicas **b** e **c** são de preenchimento de canal, cuja morfologia é marcada por fácies sísmicas preenchendo uma feição com relevo notavelmente negativo no pacote sedimentar sotoposto. Um paleocanal mapeado na parte inicial do perfil 2 é mostrado na figura 3, exibindo as características sísmicas e a relação espaço-temporal entre as 3 fácies da seqüência **II**.

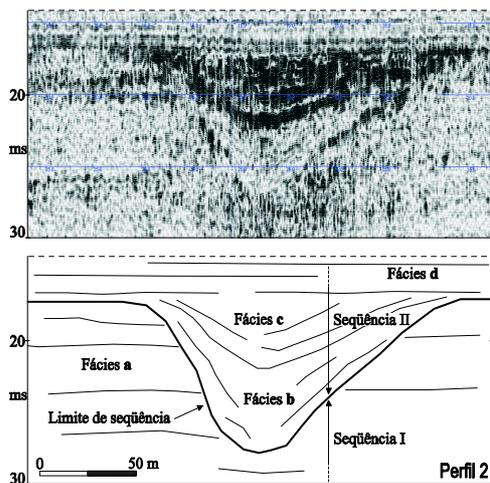


Figura 3 – Elementos arquiteturais identificados em um segmento do perfil 2 (ver na figura 1 a localização do registro sísmico): fácies **a**, **b**, **c** e **d**; seqüências **I** e **II**. Profundidade em tempo de ida e volta, em milissegundos (ms).

A fácies **b** é uma unidade sísmica acusticamente laminada a semitransparente, constituída por refletores fracos e com pouca continuidade lateral. As superfícies sísmicas são fortemente inclinadas em direção ao fundo do canal. Lateralmente os refletores terminam, em baixo ângulo, sobre o limite da seqüência deposicional. A fácies sísmica **c** é constituída por refletores fortes e com boa continuidade lateral. O aspecto geral desta unidade é mais opaco do que a fácies **b** sotoposta.

Os refletores inferiores são levemente inclinados em direção ao fundo do canal e assentam-se lateralmente em baixo ângulo (tipo “*onlap*”) sobre o limite de seqüência. Os refletores superiores são menos inclinados, tendendo a horizontais. Os de topo são truncados pelos refletores da fácies sísmica **d** sobreposta. A fácies sísmica **d** é constituída, sobretudo, por refletores paralelos a sub-paralelos, com boa continuidade lateral, horizontais a levemente inclinados. Verticalmente o pacote apresenta um padrão variável, intercalando reflexões fortes e contínuas com reflexões fracas, finamente laminadas, a semitransparentes.

Seqüência III

Os limites da seqüência **III** são definidos por uma superfície de descontinuidade bem marcada na base e no topo pelo refletor do fundo lagunar (Fig. 2). A espessura é variável desde alguns poucos metros (~ 2 m), podendo atingir valores superiores a 25 m no interior de vales e canais (como na parte central da figura 2). Geralmente o limite inferior de seqüência é marcado por uma superfície relativamente contínua e com forte reflexão do sinal acústico. É uma superfície de truncamento dos estratos sotopostos, posicionada em torno de 8 metros de profundidade perto da margem lagunar, inclinándose em direção às partes mais internas da laguna, onde atinge profundidade média de 15 a 18 m. Em vários locais, no entanto, a superfície basal da seqüência **III** apresenta uma morfologia bastante irregular, mostrando a presença de inúmeros canais profundamente escavados nos estratos sedimentares das seqüências **II** e, inclusive, **I** sotopostas. A exemplo do relatado na seqüência **II**, a morfologia característica de canal é marcada por fácies sísmicas preenchendo um relevo fortemente rebaixado na superfície topográfica original. A base do canal é marcada por uma superfície de truncamento dos refletores sotopostos, que é a superfície limite da seqüência **III**. Constituem esta seqüência as fácies sísmicas de **e** até **k** (Fig. 2b).

As fácies sísmicas **e**, **f**, **g** e **h** são de preenchimento de canal (Fig. 4). A fácies **e** ocorre na base do canal e caracteriza-se por refletores assentados em baixo ângulo sobre a superfície de base do canal e fortemente mergulhantes em direção ao centro do mesmo. A configuração sísmica é bastante variável, apresentando desde setores acusticamente semitransparentes até opacos. Os refletores são descontínuos, fortes e fracos, delineando montículos, superfícies de progradação e outros modelos

complexos de preenchimento de canal. A fácies **f** é bem laminada, intercalando refletores com resposta acústica de intensidade média e fraca. Os refletores são contínuos, paralelos, delineando superfícies onduladas, assentando-se em baixo ângulo sobre refletores da fácies sotoposta **e**. Semelhante à fácies **f**, a fácies **g** apresenta superfícies sísmicas onduladas, paralelas e contínuas. No entanto, o aspecto geral desta unidade é mais opaco, com reflexões fortes intercalando outras mais fracas. Na base, as terminações laterais são em “*onlap*” de baixo ângulo sobre a fácies sotoposta, passando no topo para uma aparente concordância com as fácies adjacentes. A fácies **h** apresenta aspecto geral opaco, com refletores fortes, semicontínuos, delineando superfícies onduladas paralelas. As superfícies sísmicas passam lateralmente para concordantes com os refletores de fácies adjacentes, sendo recobertas no topo pela fácies sísmica **k**. Em alguns locais os refletores de topo praticamente são interceptados pelo refletor atribuído ao fundo lagunar.

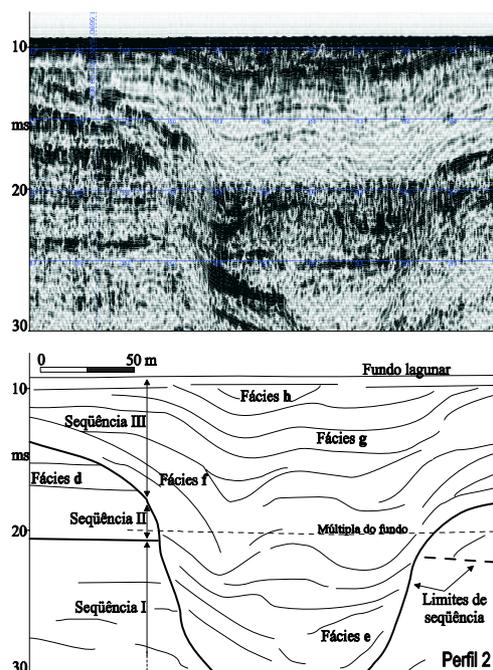


Figura 4 – Detalhe da figura 2 - elementos arquiteturais identificados em um segmento do perfil 2: fácies **d**, **e**, **f**, **g** e **h**; seqüências **I**, **II** e **III**. Profundidade em tempo de ida e volta, em milisegundos (ms).

A fácies **i** é acusticamente bem laminada, com refletores fortes e fracos, paralelos a levemente subparalelos e de grande continuidade lateral (Fig. 5). Foi reconhecida em praticamente todos os perfis sísmicos, principalmente nas partes mais internas da Lagoa dos Patos. Em direção à margem lagunar os

refletores assentam-se em baixo ângulo sobre o forte refletor limite da seqüência deposicional. Os refletores mergulham suavemente em direção as partes mais internas da laguna, onde esta unidade sísmica pode atingir espessuras médias de 8 a 10 m em lâmina d’água com 6 a 7 m de profundidade. A fácies **k** se distribui por toda a área levantada pela sísmica, apresentando uma espessura média de 3 a 5 m. Os refletores são contínuos, horizontais a levemente inclinados, paralelos, de grande extensão lateral e assentam-se concordantes à fácies sotoposta **i**. Esta unidade sísmica acunha-se em direção a margem lagunar, passando para espessuras inferiores a resolução sísmica. Ainda em direção à margem, alguns refletores aparentemente assentam-se em “*onlap*” diretamente sobre o forte refletor limite de seqüência. As espessuras maiores, de até 6 m, ocorrem nas partes mais internas e profundas da laguna. Quando comparada com a fácies sotoposta **i**, a **k** apresenta uma resposta acústica menos clara, menos distinta e com um aspecto geral mosqueado e irregular.

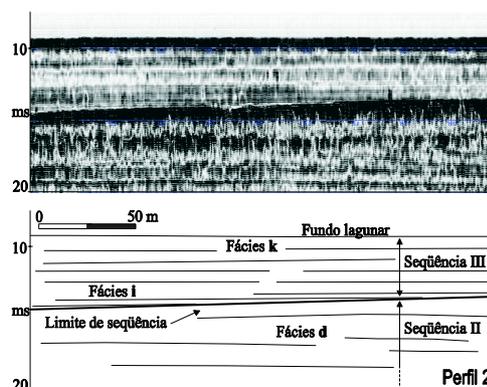


Figura 5 – Detalhe da figura 2 - elementos arquiteturais identificados em um segmento do perfil 2: fácies **d**, **i**, e **k**; seqüências **II** e **III**. Profundidade em tempo de ida e volta, em milisegundos (ms).

A fácies sísmica **j** foi reconhecida em áreas próximas aos pontais arenosos da Lagoa dos Patos, sobretudo nos perfis 2, 4, 6 e 11. É uma fácies composta por refletores com morfologia do tipo oblíquo-tangencial, com superfícies sísmicas bem marcadas, fortes e fracas. As superfícies são, em geral, fortemente mergulhantes no topo do pacote, suavizando em direção a base. Em alguns lugares esta fácies assenta-se em “*downlap*” sobre a descontinuidade de limite de seqüência. Alguns refletores praticamente atingem o fundo lagunar, confundindo-se ou intercalando-se com àqueles da fácies sísmica **k** sobreposta (Fig.6).

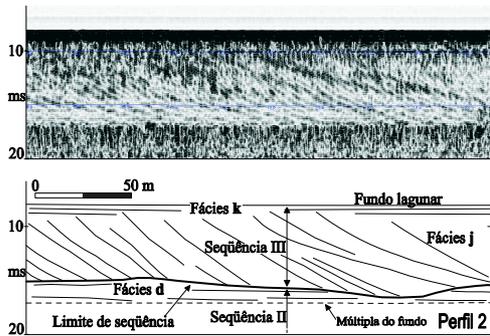


Figura 6 – Elementos arquiteturais identificados no setor nordeste do perfil 2 (ver na figura 1 a localização do registro sísmico): fácies d, j, e k; seqüências II e III. Profundidade em tempo de ida e volta, em milissegundos (ms).

A resposta sísmica relacionada ao gás nos sedimentos

Anomalias acústicas, apontadas em diversos trabalhos como ocasionadas pela presença de gás no pacote sedimentar (Figueiredo *et al.*, 1996; Judd e Hovland, 1992; Aliotta *et al.*, 2002), ocorrem nos perfis sísmicos de 3,5 kHz da Lagoa dos Patos. Tendo como base as características dessas configurações sísmicas anômalas foi possível, em um trabalho desenvolvido por Weschenfelder *et al.* (2005a; b), estabelecer dois tipos de ocorrências de gás no corpo lagunar: **bolsões de gás** (*‘pocket gas’*) e **gás disseminado** (*‘acoustic turbid zone’*). Dependendo da concentração de gás nos sedimentos, pode ocorrer gradação entre esses dois tipos ou, até mesmo, passarem gradualmente ou abruptamente para setores aparentemente **sem gás** (Fig. 7).

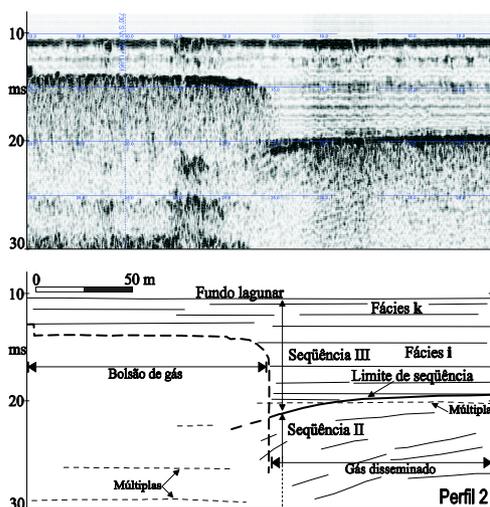


Figura 7 – Resposta sísmica anômala devido a presença de gás em um trecho intermediário do perfil 2 (ver na figura 1 a localização do registro sísmico). Profundidade em tempo de ida e volta, em milissegundos (ms).

As acumulações de gás nos sedimentos (*‘fácies gasosa’*) ocorrem nas 3 seqüências sísmicas estabelecidas neste trabalho, com concentrações maiores nas partes mais internas da Lagoa dos Patos. Na região mais central da laguna, geralmente onde a superfície deposicional original era mais rebaixada, bolsões de gás ocorrem por toda a extensão vertical dos registros sísmicos, atravessando as 3 seqüências deposicionais. Em alguns setores os bolsões de gás aparentemente atingem o fundo lagunar, causando ondulações na forma de montículos achatados no refletor atribuído à interface água-fundo. Uma descrição mais detalhada sobre as acumulações de gás raso nos sedimentos do substrato da Lagoa dos Patos é apresentada no trabalho já citado de Weschenfelder *et al.* (2005a).

ANÁLISE E DISCUSSÃO

O estudo detalhado de registros sísmicos de alta resolução contribui significativamente no reconhecimento e o mapeamento dos elementos arquiteturais construtivos dos ambientes deposicionais costeiros. Levando em consideração principalmente a configuração sísmica dos refletores, podem ser estabelecidos os limites de unidades sísmicas, como as seqüências sísmicas e suas fácies sísmicas constituintes. Superfícies de truncamento dos refletores, descontinuidades sísmicas, limites de seqüências entre outros elementos arquiteturais são estabelecidos. O mapeamento de paleovales e paleocanais permite que antigos sistemas de drenagens sejam reconstruídos e, quase sempre, vinculados aos sistemas atuais. O reconhecimento e o mapeamento nos registros sísmicos dos elementos arquiteturais são de grande valia para o estabelecimento de modelos evolutivos e deposicionais do espesso prisma costeiro acumulado nas vastas planícies costeiras de borda das bacias sedimentares.

Uma classificação para dados sísmicos de alta resolução e frequência (3,5 kHz) foi proposta nos trabalhos de Damuth (1975) e Damuth e Hayes (1977). A classificação proposta por esses autores em tipos de ecos é puramente descritiva, não fornecendo uma relação direta entre o ecograma e a possível interpretação do ambiente deposicional. A interpretação de registros sísmicos em termos de seqüências sismo-deposicionais foi apontada por Mitchum *et al.* (1977) e em trabalhos posteriores.

Os dados sísmicos de alta frequência levantados na Lagoa dos Patos apresentaram uma boa relação da profundidade para a resolução do sinal

acústico. Desta forma, a boa qualidade do conjunto de dados sísmicos possibilitou o reconhecimento e o mapeamento dos elementos arquiteturais do substrato lagunar. Portanto, além de descritivo, o estabelecimento de seqüências e fácies sísmicas apresenta também uma conotação genética-interpretativa destas unidades sísmicas com os ambientes de sedimentação. Podemos aqui citar como exemplo uma fácies denominada de 'preenchimento de canal', cuja classificação claramente estabelece elementos descritivos morfológicos da unidade sísmica e sedimentar como também elementos interpretativos e genéticos do ambiente sedimentar.

Em trabalho desenvolvido por Weschenfelder (2005), foram identificados, de forma pioneira, importantes sistemas de paleodrenagem que dissecaram a planície costeira média RS no final do Quaternário. São antigos sistemas de drenagem que tiveram um papel importante na arquitetura deposicional, na distribuição das fácies sedimentares e na geração do espaço de acomodação do prisma costeiro depositado na borda oeste da bacia marginal de Pelotas.

As superfícies de dissecação dos sistemas de paleodrenagem estabelecidos por Weschenfelder (2005) são as superfícies erosivas que marcam os limites entre as seqüências **I**, **II** e **III** aqui estabelecidas e que foram formadas por processos vinculados aos principais eventos regressivos do nível do mar do final do Quaternário. São, portanto, superfícies com significado cronoestratigráfico, que registram os eventos de regressão forçada ocorridos na região costeira do RS. As superfícies produzidas nesses processos erosivos tem sido tipicamente usadas para dividir o registro geológico em seqüências sedimentares delimitadas por superfícies cronoestratigráficas (Talling, 1998).

Baseados em dados sismológicos, geocronológicos, sedimentológicos e paleontológicos, Weschenfelder *et al.* (2004) estabeleceram vários estágios de desenvolvimento paleoambiental para região de Bojuru, na planície costeira média do RS. As fácies sedimentares de preenchimento de canal **e**, **f**, **g** e **h** aqui estabelecidas, da seqüência **III**, foram consideradas no trabalho desses pesquisadores. Apresentaram também duas idades absolutas de carbono em sedimentos orgânicos correlacionáveis às fácies de preenchimento de canal da seqüência **III**. Desta forma, os sedimentos basais do canal teriam sido depositados por volta de 9400 anos antes do presente (AP) (~ 23 m de profundidade) e os do meio para o topo em torno de 7350 anos AP (~ 5 m de profundidade). Essas datações foram feitas em amostras testemunhadas no pacote sedimentar de

preenchimento do canal da 'Barra Falsa', localizado perto da cidade de Bojuru.

Considerando que os sedimentos de preenchimento dos canais, que marcam a base da seqüência **III**, foram depositados no Holoceno, torna-se possível datar relativamente os demais eventos. Desta forma, a superfície erosiva que marca o limite de seqüência **II-III** pode ser vinculada ao último grande evento regressivo do final do Pleistoceno (~18 ka AP - estágio isotópico 2 de Imbrie *et al.*, 1984). O limite entre as seqüências **I** e **II** é marcado por uma superfície erosiva mais antiga e pode ser vinculada, portanto, a um evento regressivo significativo anterior (~130 ka AP - estágio isotópico 6 de Imbrie *et al.*, 1984).

Tomando os dois limites de seqüência como marcadores dos períodos de mar baixo, podemos considerar que as fácies sísmicas de **a** a **k** são relacionadas aos processos sedimentares de períodos de mar relativamente alto (transgressivo-alto-regressivo), dentro dos ciclos regressivo-transgressivos.

A seqüência **I** (fácies **a**) provavelmente vincula-se a um ambiente de barreira arenosa costeira que foi dissecado por vales e canais fluviais durante o evento regressivo do Pleistoceno Médio (?). Este evento regressivo foi o responsável pela formação da superfície erosiva do limite de seqüência **I-II**, superfície esta que trunca os refletores sotopostos. O evento transgressivo posterior afogou os vales e canais da regressão anterior. São depositadas então as fácies, provavelmente fluviais e estuarinas, **b** e **c** da seqüência **II**. O nível do mar ascendente transgride a planície costeira, possibilitando a deposição de sedimentos praias e marinhos rasos sobre extensas áreas (fácies **d**). Durante o rebaixamento do nível do mar que se segue, o sistema fluvial avança em direção à plataforma continental, dissecando a planície costeira e escavando o pacote sedimentar recém depositado. Este período regressivo do final do Pleistoceno é o responsável pela formação da superfície erosiva limite entre a seqüência **II** e **III**. Este limite de seqüência marca a base de grandes vales e canais, como o antigo canal da 'Barra Falsa' apresentado na figura 4 deste trabalho.

O canal atual da 'Barra Falsa' é um remanescente geomorfológico de um antigo canal de ligação entre a Lagoa dos Patos e o Oceano Atlântico (Toldo *et al.*, 1991). O grande canal soterrado da figura 4 representa o paleocanal da Barra Falsa. Este canal e outros similares e contemporâneos foram escavados durante o último grande evento regressivo do final do Pleistoceno, quando o

nível do mar recuou para 120 m abaixo da posição atual. No decorrer da última transgressão marinha, os canais foram progressivamente afogados e preenchidos por sedimentos fluviais, estuarinos e marinhos (fácies **e**, **f**, **g** e **h**) (Weschenfelder *et al.*, 2004). Lateralmente aos canais depositavam-se pacotes de sedimentos vinculados ao afogamento da planície costeira, provavelmente marinhos rasos (fácies **i**). As fácies sedimentares de crescimento de pontais arenosos fixados à margem lagunar, assim como do crescimento e migração de barreiras arenosas costeiras, estão representadas provavelmente pela fácies sísmica **j**. A redistribuição do estoque sedimentar durante o período de mar alto e início da fase regressiva do Holoceno, em torno de 5000 anos AP, ocasionou o fechamento dos canais de ligação (*inlets*) entre o corpo lagunar e o mar aberto, restando somente o canal de Rio Grande. A Lagoa dos Patos assume a sua configuração atual, comportando-se como um ambiente de sedimentação lagunar (fácies **k**).

Esse modelo para o desenvolvimento das seqüências deposicionais na região costeira do RS, em resposta às mudanças do nível do mar, se assemelha a diversos outros já apresentados para ambientes transicionais (Blum e Törnqvist, 2000; Shanley e McCabe, 1993, 1994; Summerfield, 1985). Normalmente são modelos que ilustram o conceito de incisão e *bypass* sedimentar durante a queda do nível de base, seguido por preenchimento de vales incisivos durante períodos de subida do nível de base, evoluindo para transgressão e afogamento do sistema costeiro em períodos de mar alto. O empilhamento sedimentar dos vales e canais incisivos geralmente inicia com depósitos fluviais amalgamados na base, passando para depósitos flúvio-estuarinos influenciados pela maré e finalmente, no topo, depósitos marinhos com pouca influência fluvial ou marinhos francos (Blum e Törnqvist, 2000).

O comportamento geoacústico dos sedimentos do substrato da Lagoa dos Patos foi afetado pela presença de gás no pacote sedimentar. As acumulações de gás são detectadas nos perfis sísmicos através de anomalias acústicas registradas na forma de reflexões anômalas. Ocorrências do tipo 'bolsão de gás' e 'gás disseminado' são diferenciadas pelas características das configurações anômalas nos registros sísmicos. As acumulações de gás são geralmente controladas pela distribuição espacial da fácies sedimentares, sua permeabilidade e seu conteúdo original de matéria orgânica.

O gás, tanto na forma de bolsões como disseminado, ocorre principalmente em setores mais

interiorizados à Lagoa dos Patos, quase sempre associado à regiões de paleotopografia mais rebaixada e vinculadas provavelmente a antigos canais e vales fluviais. Os sistemas de canais e vales fluviais foram formados durante eventos regressivos do nível mar, posteriormente preenchidos por processos sedimentares relacionados aos eventos transgressivos subsequentes. A origem do gás presente no pacote sedimentar do substrato da Lagoa dos Patos está intimamente ligada aos ambientes de sedimentação e aos processos evolutivos responsáveis pela formação e individualização de um complexo sistema de canais, lagunas e barreiras costeiras durante os múltiplos eventos regressivos e transgressivos do Quaternário (Weschenfelder, 2005; Weschenfelder *et al.*, 2005a; b).

O estabelecimento de seqüências e fácies sísmicas e o reconhecimento de diversos elementos arquiteturais da pilha sedimentar do substrato da Lagoa dos Patos trazem novos e significativos subsídios para os estudos relacionados à evolução costeira de ambientes transicionais. São elementos que deverão ser incorporados no refinamento dos modelos evolutivos correntemente em uso para a planície costeira do RS. Estudos futuros deverão levar em consideração também as ocorrências de sistemas de paleodrenagem e de grandes acumulações de gás raso no prisma sedimentar costeiro do estado, permitindo a construção de modelos evolutivos que possam ser usados como análogos em sistemas sedimentares similares.

CONCLUSÕES

O levantamento sísmico de alta resolução (3,5 kHz) realizado na Lagoa dos Patos permitiu o reconhecimento de importantes elementos arquiteturais que compõem o prisma sedimentar raso acumulado na planície costeira do estado do Rio Grande do Sul.

Através do mapeamento de descontinuidades marcantes, delineadas nos registros sísmicos por superfícies de truncamento de refletores, foram reconhecidas 3 seqüências sísmicas e suas fácies constituintes. Os limites dessas seqüências sismo-deposicionais são superfícies erosivas formadas por processos vinculados a eventos significativos de rebaixamentos do nível do mar do final do Quaternário. O limite de seqüência **II-III** foi formado durante o último grande evento regressivo do final do Pleistoceno, enquanto o limite entre as seqüências **I** e **II** foi formado por um evento regressivo anterior. Os pacotes sedimentares representa-

tivos das seqüências **I**, **II** e **III** foram depositados por processos vinculados aos períodos de nível do mar relativamente alto em relação a essas fases regressivas.

O reconhecimento e o mapeamento de seqüências e fácies sísmicas contribui de forma significativa no estudo da evolução paleogeográfica dos sistemas deposicionais costeiros do sul do Brasil. Os resultados trazem informações novas e significativas para o melhor entendimento da evolução geológica dos sistemas de barreiras costeiras reconhecidos para a planície costeira do RS. Os elementos arquiteturais mapeados e aqui apresentados deverão ser incorporados no refinamento dos modelos evolutivos vigentes e naqueles a serem construídos para a região costeira do RS. Esses modelos devem levar em consideração as recentes descobertas de importantes sistemas de paleodrenagem e de grandes acumulações de gás raso na pilha sedimentar da região da Lagoa dos Patos. Os modelos evolutivos gerados poderão ser usados como análogos para estudos de sistemas sedimentares similares, especialmente os ambientes transicionais de borda de bacia sedimentar.

Agradecimentos- O estudo foi conduzido com apoio financeiro do CNPq (Processos nº 300569/99-8, 470106/2001-8, 300301/2003-0 e 470457/2003-1) e pela bolsa de Apoio Técnico – AT (Processo nº 501655/2003-4), FAPERGS (Processos nº 02/572.2 e 02/50083.8) e CAPES (CAPES/SECyT 056/04). O primeiro autor agradece ao CNPq pela bolsa de doutorado concedida (Processo nº 201044/97-8). O embarque e a aquisição dos dados sísmicos contou com o apoio do Laboratório de Oceanografia Geológica da FURG e da empresa GEOWORK.

REFERÊNCIAS

- Aliotta, S.; Lizasoain, G. & Ginsberg, S. 2002. Hallazgo de acumulaciones de gas con sísmica de alta resolución en sedimentos del estuario de Bahía Blanca, Argentina. In: Cabaleri, N.; Cingolani, C.A.; Linares, E.; López de Luchi, H.O.; Osters, H.A. & Pararello, H.O. (eds.). In: CONGRESO GEOLÓGICO ARGENTINO, 15., 2000. **Actas....** Buenos Aires, v.2, p. 315-318. CD-ROM. Article nº 146.
- Aliotta, S.; Lizasoain, G. & Ginsberg, S. 2004. Dinámica sedimentaria y evolución morfológica de un profundo canal del estuario de Bahía Blanca. **Revista de la Asociación Geológica Argentina**, 59(1):14-28.
- Baptista Neto, J.A.; Silva, M.A.M. & Figueiredo Jr., A.G. 1996. Sísmica de alta frequência e o padrão de distribuição de sedimentos na enseada de Jurujuba (Baía de Guanabara)-RJ/Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, 14(1):51-57.
- Blum, M.D. & Törnqvist, R.E. 2000. Fluvial responses to climate and sea-level change: a review and look forward. **Sedimentology**, 47(1):2-48.
- Corrêa, I.C.S.; Aliotta, S. & Weschenfelder, J. 2003. Evidências de estruturas de barreira no canal de acesso à laguna dos patos. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 9., 2003, Recife, PE, Brasil. **Boletim de resumos expandidos...** Recife, ABEQUA, 3p.
- Costa, E.A. & Figueiredo, A.G. 1998. Echo-character and sedimentary processes on the Amazon Continental Shelf. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 70(2):187-200.
- Damuth, J.E. 1975. Echo character of the western Equatorial Atlantic floor and its relationship to the dispersal and distribution of terrigenous sediments. **Marine Geology**, 18:17-45.
- Damuth, J.E. 1980. Use of high-frequency (3.5–12 kHz) echograms in the study of near-bottom sedimentation processes in the deep sea: a review. **Marine Geology**, 38:51-75.
- Damuth, J.E. & Hayes, D.E. 1977. Echo character of the East Brazilian Continental Margin and its relationship to sedimentary processes. **Marine Geology**, 24:73-95.
- Figueiredo, A.G.; Nittrouer, C.A. & Costa, E.A. 1996. Gas-charged sediments in the Amazon Submarine Delta. **Geo-Marine Letters**, 16:31-35.
- Flood, R.D. 1980. Deep sea sedimentary morphology: modelling and interpretation of echo-sounding profiles. **Marine Geology**, 38:77-92.
- Imbrie, J.; Hays, J.D.; Martinson, D.G.; McIntyre, A.; Mix, A.C.; Morley, J.J.; Pisias, N.G.; Prell, W.L. & Shackleton, N.J. 1984. The orbital theory of Pleistocene climate: support from a revised chronology of the marine $\delta^{18}\text{O}$ record. In: Berger, A.L.; Imbrie, J.; Hays, J.; Kukla, G. & Saltzman, B. (eds). **Milankovitch and Climate**. Reidel, Boston, Parte 1, p. 269-305.
- Jones, E.J.W. 1999. **Marine Geophysics**. New York, John Wiley, 466p.
- Judd, A.G. & Hovland, M. 1992. The evidence of shallow gas in marine sediments. **Continental Shelf Research**, 12(10):1081-1096.
- Lee, S.H.; Chough, S.K.; Back, G.G. & Kim, Y.B. 2002. Chirp (2-7 kHz) echo characters of the South Korea Plateau, East Sea: styles of mass movement and sediment gravity flow. **Marine Geology**, 184(3):227-247.
- Mitchum, R.M., Jr.; Vail, P.R. & Sangree, J.B. 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 6: Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. In: Payton, C.E. (ed.). **Seismic Stratigraphy: Applications to Hydrocarbon Exploration**. Tulsa, American Association of Petroleum Geologists Memoir, v. 26, p.117-133.
- Ortiz, J.D.R. 1995. **O preenchimento sedimentar do vale inciso do Rio Camaquã, Quaternário da Província Costeira do RS**. Porto Alegre, 182p. Dissertação de Mestrado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Quaresma, V.S.; Dias, G.T.M. & Baptista Neto, J.A. 2000. Caracterização da ocorrência de padrões de sonar de varredura lateral e sísmica de alta frequência (3,5 e 7,0 kHz) na porção sul da Baía de Buanabara - RJ. **Brazilian Journal of Geophysics**, 18(2):201-214.
- Shanley, K.W. & McCabe, P.J. 1993. Alluvial architecture in a sequence stratigraphic framework: na example from the the Upper Cretaceous ou southern Utah, U.S.A. In: Flint, S.S. & Bryant, I.D. (eds). **Quantitative modelling of clastic hydrocarbon reservoirs and outcrop analogs**. Oxford, Blackwell, p. 21-55. (Special Publication International Association Sedimentologist, v. 15).
- Shanley, K.W. & McCabe, P.J. 1994. Perspectives on the se-

- quence stratigraphy of continental strata: report of a working group at the 1991 NUNA Conference on high resolution sequence stratigraphy. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, **74**:544-568.
- Summerfield, M.A. 1985. Plate tectonics and landscape development on the African continental. In: Morisawa, M. & Hack, J. (eds.). **Tectonic Geomorphology**. Boston, Allen and Unwin, p. 27-51.
- Talling, P.J. 1998. How and where do incised valley form if sea level remains above the shel edgee? **Geology**, **26**(1):87-90.
- Toldo, E.E., Jr. 1994. **Sedimentação, predição do padrão de ondas e dinâmica sedimentar da antepraia e zona de surfe do sistema lagunar da Lagoa dos Patos**. Porto Alegre, 143p. Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Toldo, E.E., Jr.; Ayup-Zouain, R.N.; Corrêa, I.C.S. & Dillenburg, S.R. 1991. Barra falsa: hipótese de um paleocanal holocênico de comunicação entre a laguna dos Patos e o Oceano Atlântico. **Pesquisas**, **18**(2):99-103.
- Toldo, E.E., Jr.; Dillenburg, S.R.; Corrêa, I.C.S. & Almeida, L.E.S.B. 2000. Holocene sedimentation in Lagoa dos Patos lagoon, Rio Grande do Sul, Brazil. **Journal of Coastal Research**, **16**(3):816-822.
- Tomazelli, L.J. & Villwock, J.A. 2000. O Cenozóico no Rio Grande do Sul: Geologia da Planície Costeira. In: Holz, M. & De Ros, L.F. (eds.). **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alebre, IG/UFRGS, p. 375-406.
- Villwock, J.A. & Tomazelli, L.J. 1995. Geologia costeira do Rio Grande do Sul. **Notas Técnicas**, **8**:1-45.
- Villwock, J.A.; Tomazelli, L.J.; Loss, E.L.; Dehnhardt, E.A.; Horn Filho, N.O.; Bachi, F.A. & Dehnhardt, B.A. 1986. Geology of the Rio Grande do Sul Coastal Province. **Quaternary of South America and Antarctic Peninsula**, **4**:79-97.
- Weschenfelder, J. 2005. **Processos sedimentares e variação do nível do mar na região costeira do Rio Grande do Sul, Brasil**. Porto Alegre, 141p. Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Weschenfelder, J.; Corrêa, I.C.S.; Aliotta, S.; Pereira, C.M. & Vasconcellos, V.E.B. 2005a. Shallow gas accumulations in the sediments of the Patos lagoon area, southern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências** (Inédito).
- Weschenfelder, J.; Corrêa, I.C.S.; Ayup-Zouain, R.N.; Pereira, C.M. & Vasconcellos, V.E.B. 2005b. Gas accumulations revealed by high-resolution seismics in the Patos lagoon, southern Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GAS IN MARINE SEDIMENTS, 8., 2005. **Anais ...** Vigo, Espanha. Universidade de Vigo, p.133.
- Weschenfelder, J.; Medeanic, S.; Corrêa, I.C.S. & Aliotta, S., 2004. Holocene paleoenvironment of the Bojuru region, southern Brazil. **Journal of Coastal Research** (Inédito).

