

Datação por Luminescência Opticamente Estimulada (LOE) de uma planície de cordões litorâneos do litoral norte do Rio Grande do Sul, Brasil

Optically Stimulated Luminescence (OSL) dating of a sand ridge plain in the northern littoral of Rio Grande do Sul, Brazil

Volney Junior Borges Bitencourt^{af}, Sérgio Rebello Dillenburg^{bg}, Eduardo Guimarães Barboza^{bh}, Rogério Portantiollo Manzolli^{ci}, Felipe Caron^{dj}, André Oliveira Sawakuchi^{ek}

^aPrograma de Pós-Graduação em Geociências (PPGGEO) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), ^bCentro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica (CECO) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), ^cResearch group in Environmental Management and Sustainability, Faculty of Environmental Sciences - Universidad De La Costa, ^dUniversidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) - Campus Caçapava do Sul, ^eInstituto de Geociências (IGc) - Universidade de São Paulo (USP)

^fvolney.bitencourt@ufrgs.br, ^gsergio.dillenburg@ufrgs.br, ^heduardo.barboza@ufrgs.br, ⁱrogeriomanzolli@gmail.com, ^jfelipecaron@unipampa.edu.br, ^kandreos@usp.br

Resumo

Neste trabalho, é utilizada a aplicação da Luminescência Opticamente Estimulada (LOE) para datar sedimentos em uma planície de cordões litorâneos arenosos de margem lagunar, na porção norte do litoral do Rio Grande do Sul (RS). Essa planície de cordões constitui parte da margem nordeste da Lagoa dos Quadros, segunda maior lagoa do sistema lagunar norte do RS. Um total de cinco amostras foram coletadas em diferentes cordões da planície, na porção de máxima progradação (região central da planície). Neste estudo, as idades de luminescência foram obtidas por doses equivalentes estimadas por protocolo SAR (*Single-Aliquot Regenerative dose*) aplicado a alíquotas de grãos de quartzo. Concentrações de K, U e Th para cálculo de taxas de dose foram medidas por espectrometria gama de alta resolução. As amostras estudadas apresentaram doses equivalentes entre 1,8 e 3,6 Gy e taxas de dose entre 0,442 e 0,806 Gy/ka. As idades obtidas variaram entre $2,6 \pm 0,2$ a $6,3 \pm 0,4$ ka. Foram definidos cinco intervalos com diferentes taxas de progradação na planície de cordões. Esses intervalos podem ser enquadrados em dois estágios: o primeiro marcado por um aumento na taxa de progradação média, e o segundo, com o decréscimo nas taxas. O primeiro estágio é caracterizado por uma grande disponibilidade de sedimentos que foram transportados para o interior da Lagoa dos Quadros, durante as fases de desenvolvimento dos depósitos eólicos da barreira holocênica, que se desenvolveu ao mesmo tempo, entre a lagoa e o Oceano Atlântico. O segundo estágio, com taxas que se situam num patamar de cerca de metade do primeiro estágio, provavelmente se desenvolveu em uma época mais úmida e, consequentemente, em um período com menor transporte de areias eólicas para o interior da lagoa; e também em um tempo em que os processos costeiros ativos da barreira oceânica holocênica já se encontravam muito distantes da Lagoa dos Quadros.

Palavras-chave: Cordão de praia; Cordão de duna frontal; Evolução costeira; Geocronologia; Holoceno.

Abstract

The application of Optically Stimulated Luminescence (OSL) dating to constrain the age of lagoonal sand ridges in the northern littoral of Rio Grande do Sul (RS), is tested in this work. These sand ridges make up part of the northeast margin of the Quadros Lagoon, the second largest lagoon of the north littoral of RS. Five samples from five ridges of the maximum progradational zone (central portion) were dated. In this work, luminescence ages were obtained through equivalent doses measured in quartz aliquots using the Single-Aliquot Regenerative dose (SAR) protocol. The concentrations of K, U and Th for dose rates calculation were measured with high-resolution gamma ray spectrometry. The studied samples show equivalent doses between 1.8 and 3.6 Gy and dose rates between 0.442 and 0.806 Gy/ka. The ages range from 2475 to 6745 years. It was possible to estimate the average rate of progradation of the studied plain. Five intervals were established with different progradation rates. These intervals were grouped in two stages with higher (growing) and a lower average rates of progradation. The first stage was characterized by a higher rate of sediment supply. This is probably due to a connection with the evolution of the initial aeolian deposits of the Holocene oceanic barrier, that started to develop approximately 1100 years before the studied sand ridge plain, between the lagoon and the Atlantic Ocean. The second stage, with lower rates, are probably related to a more humid period that has conditioned a lower aeolian transport into the lagoon, and also due to an increase of the distance between the active coastal processes of the oceanic barrier and the Lagoa dos Quadros.

Key-words: Beach ridge; Foredune ridge; Coastal evolution; Geocronology; Holocene.

1. Introdução

Cordões litorâneos regressivos são elementos geomorfológicos comuns em costas deposicionais holocênicas. Podem ser formados através de diversos processos, desde que haja um suprimento sedimentar adequado.

Sucessões de cordões registram diversas alterações ambientais ao longo da história evolutiva de planícies de cordões litorâneos (Tamura 2012); e, portanto, propiciam variadas possibilidades de estudos, dentre os quais podemos destacar seus usos para reconstruir o comportamento do nível do mar (Costas *et al.* 2016) e variações paleoclimáticas (Mauz *et al.* 2013), além de servirem como indicadores paleoambientais.

Na Planície Costeira do Estado do Rio Grande do Sul (PCRS), porção da parte emersa da Bacia de Pelotas, cordões litorâneos do tipo duna frontal (*foredune ridge*) e do tipo praia (*beach ridge*) ocorrem tanto em praias oceânicas de mar aberto (Dillenburg *et al.* 2009), quanto em lagoas e lagunas (Manzoli 2016, Bitencourt *et al.* 2016).

Embora muito difundida e utilizada em planícies de cordões litorâneos ao redor do mundo (*e.g.* Orford *et al.* 2003, Bristow & Pucillo 2006, Madsen *et al.* 2007, Rémillard *et al.* 2015, Hart *et al.* 2016), a aplicação da Luminescência Ópticamente Estimada (LOE) na datação de sedimentos siliciclásticos é relativamente recente em depósitos holocênicos da PCRS. Em relação aos cordões litorâneos, essa técnica foi aplicada somente em três estudos até então (Manzoli 2016, Milana *et al.* 2017 e Dillenburg *et al.* 2017) para o litoral do RS.

Através de datações por carbono-14 (^{14}C) das fácies basais lamosas (sobrepostas pelas fácies arenosas dos cordões), o início da progradação do sistema de cordões da Lagoa dos Quadros foi estimado em cerca de 6 ka (Bitencourt *et al.* 2016). Contudo, este é o primeiro trabalho com foco específico em determinar a cronologia da progradação da planície de cordões litorâneos da margem nordeste da Lagoa dos Quadros por meio de datações por LOE.

2. Área de Estudo

2.1. Contexto Geológico Regional

A Província Costeira do Rio Grande do Sul é formada por dois compartimentos geológicos distintos: o Embasamento Cristalino e a Bacia de Pelotas. A superfície relativamente plana, com suave mergulho no sentido do oceano, representando a porção emersa da bacia de Pelotas, constitui a denominada Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS). O embasamento é composto pelo complexo cristalino pré-Cambriano do Escudo Sul-Rio-Grandense (onde afloram rochas ígneas e metamórficas) e pelas sequências sedimentares e vulcânicas, de idades Paleozoicas e Mesozoicas da Bacia do Paraná (Villwock 1984, Tomazelli & Villwock 2000).

O modelo evolutivo dos pacotes sedimentares superficiais da Bacia de Pelotas (entre La Coronilla e o cabo de Santa Marta), que se expressam

superficialmente como a PCRS no litoral do RS foi proposto por Villwock *et al.* (1986). Esse modelo original foi revisado e modificado por trabalhos subsequentes: Villwock & Tomazelli (1995), Tomazelli & Villwock (2000), Rosa *et al.* (2011, 2017) e Lopes *et al.* (2014). O modelo (figura 1) considera que uma série de sistemas deposicionais do tipo laguna-barreira se desenvolveu por sucessivos ciclos de rebaixamento e elevação do nível relativo do mar (NRM) durante o Quaternário. Quatro sistemas deposicionais do tipo laguna-barreira foram preservados, denominados de I a IV (do mais antigo para o mais recente).

A barreira holocênica do Rio Grande do Sul, também denominada de barreira IV ou sistema laguna-barreira IV, foi implantada na sua localização geográfica atual, há aproximadamente 7 ka, como resultado da migração de uma barreira transgressiva, durante os estágios finais da Transgressão Marinha Pós-Glacial (TMP) (Dillenburg *et al.* 2000). A evolução deste sistema resultou na formação de várias lagoas costeiras no Litoral Norte do Rio Grande do Sul, dentre essas a Lagoa dos Quadros, segunda maior lagoa em termos de área do sistema lagunar norte da PCRS.

2.2. Localização da Planície de Cordões

A área de estudo deste trabalho consiste na planície de cordões litorâneos regressivos que constituem parte da margem nordeste da Lagoa dos Quadros, na porção norte do litoral do RS (figura 2). Conforme Bitencourt *et al.* (2016), essa planície de cordões litorâneos corresponde a uma sequência regressiva (*sensu* Roy *et al.* 1994), englobando depósitos de antepraia lagunar, de pós-praia/face de praia lagunar, eólicos e depósitos de leque de sobrelavagem. De modo progradação, cordões litorâneos do tipo duna frontal e cordões de praia (com um ocasional e pouco significativo capeamento eólico) se desenvolveram sobre um substrato composto por lamelas de fundo lagunar.

2.3. Aspectos Climáticos

O clima da área de estudo é temperado chuvoso, com meses quentes no verão e frios no inverno. Conforme a classificação de Koppen-Gaiger, o clima é do tipo *Cfa*, com precipitações médias entre 1000 – 1500 mm, bem distribuídos ao longo do ano (Strahler & Strahler 1987). Na porção norte da PCRS, o clima sofre influência orográfica imposta pela Serra Geral e possui temperatura média de 20° C, umidade em torno de 84% e precipitação média de 1322 mm·a⁻¹ (Hasenack & Ferrara 1989).

Os padrões de ventos na PCRS são determinados em larga escala pela interação do Anticiclone do Atlântico Sul e Anticiclone Móvel Polar. Isso resulta em características sazonais, com os meses mais quentes (primavera e verão) apresentando ventos mais frequentes oriundos do quadrante NE, enquanto nos meses mais frios (outono e inverno), ventos do quadrante S e SW são mais comuns, normalmente associados à intrusão de sistemas frontais Antárticos (Schwarzbold & Schafer 1984, Medeiros 1992,

Tomazelli 1993). Entretanto, a presença da Serra Geral modifica consideravelmente os padrões de ventos na área de estudo (Tomazelli *et al.* 2008). Além do mais, a circulação atmosférica e os padrões de pluviosidade são afetados episodicamente por eventos globais como o El Niño Oscilação Sul (ENOS) (Britto *et al.* 2008).

3. Materiais e Métodos

3.1. Amostragens

Um total de cinco amostras foram coletadas em cristas de diferentes cordões da planície (figura 3). Para tanto, foi escolhida a porção de máxima progradação (região

central). As amostragens foram feitas de modo horizontal em trincheiras. As amostras foram coletadas com canos de PVC de 30 cm de comprimento por três cm de diâmetro, na profundidade padrão de 30 cm abaixo da superfície do terreno. Esses canos foram recobertos por papel alumínio e por lona preta, antes de serem retirados das trincheiras e expostos à luz solar.

Os pontos de amostragem foram escolhidos a fim de representar diferentes subconjuntos (*sets*) de cordões. Tais subconjuntos são delimitados por truncamentos erosivos.

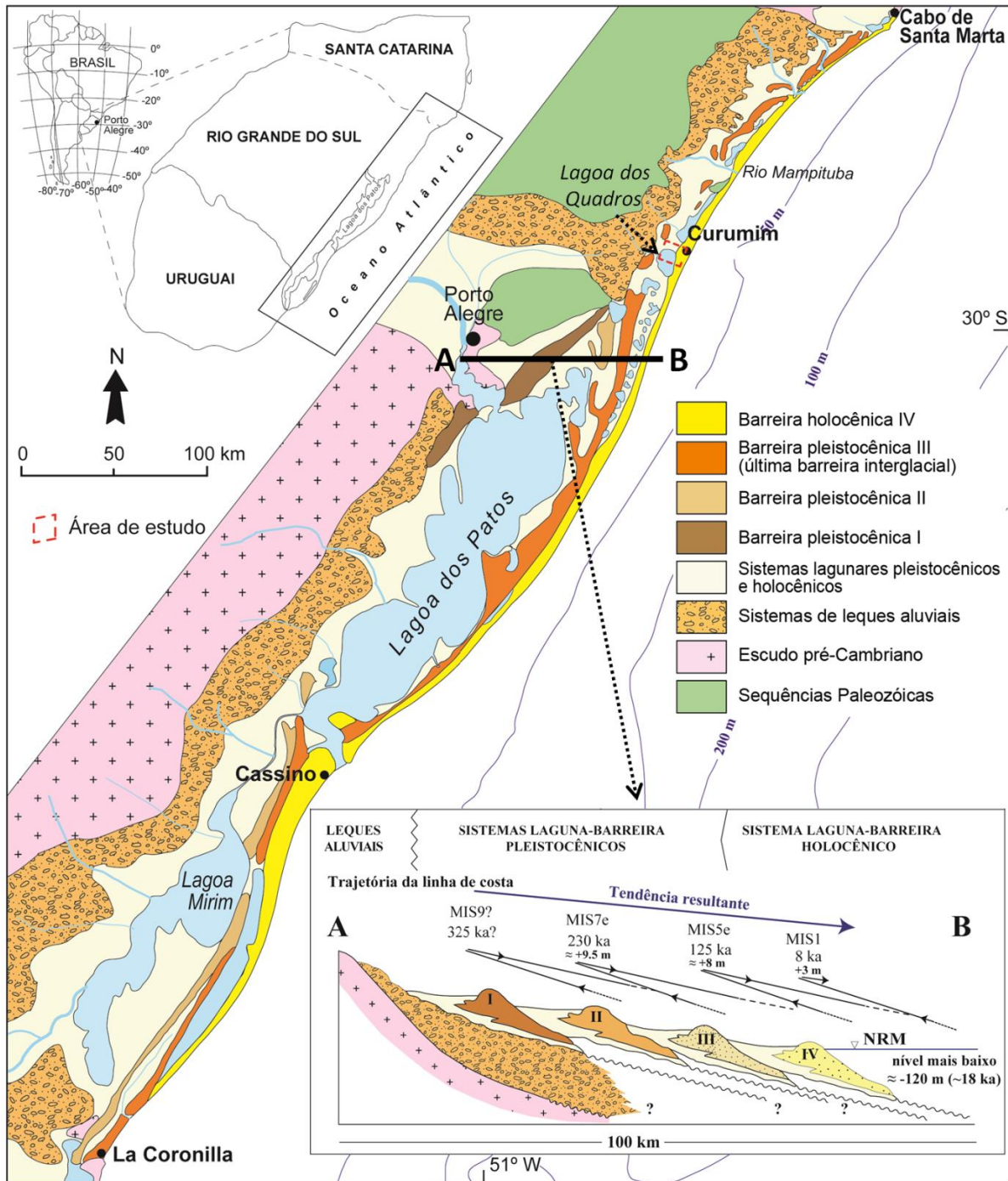


Figura 1: Desenho esquemático dos depósitos geológicos da Bacia de Pelotas. O retângulo vermelho marca a localização da área de estudo, que pode ser visualizada com maior detalhe na figura 2. (modificado de Dillenburg *et al.* 2017).

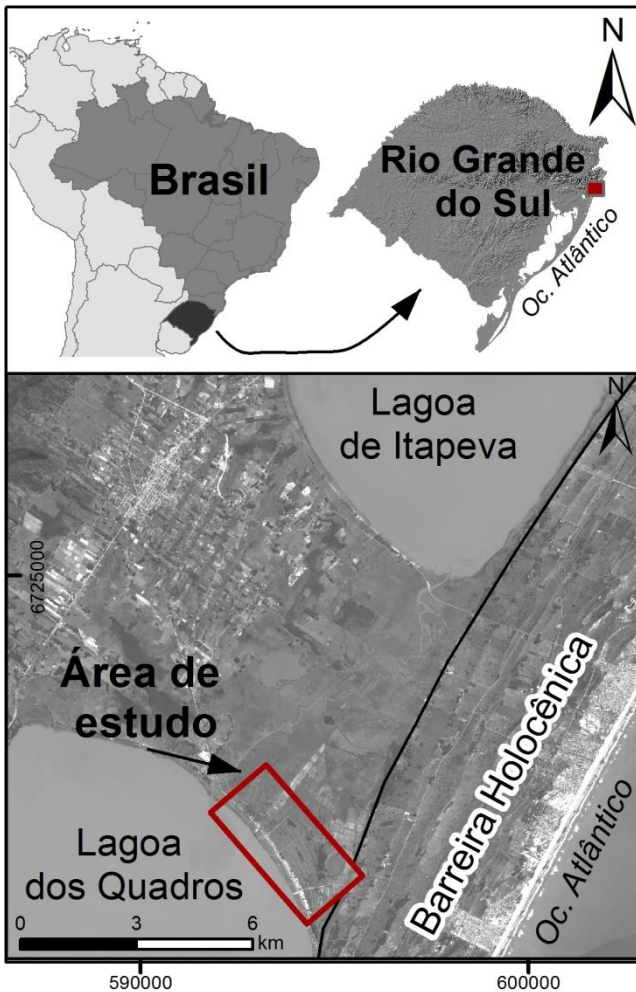


Figura 2: Localização geográfica da planície de cordões da margem nordeste da Lagoa dos Quadros, no extremo norte da PCRS (anexo a barreira de Curumim). (Imagem do satélite SPOT-5, banda pancromática; UTM 22S)

Imagens de satélites atuais (SPOT-5) e fotografias aéreas verticais de década de 40 (1:25000) foram utilizadas em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG) para estimar a idade dos cordões mais jovens.

3.2. Datação por LOE

A técnica de datação por LOE determina o período de tempo decorrido entre a última exposição direta de grãos minerais (usualmente quartzo e feldspato) à luz solar e o instante da análise em laboratório (Guedes *et al.* 2011, Sawakuchi *et al.* 2016). Ou seja, essa técnica de geocronologia absoluta fornece a idade de deposição do sedimento. Uma descrição pormenorizada da técnica pode ser encontrada em Wintle & Murray (2006).

As amostras obtidas na planície de cordões da Lagoa dos Quadros foram datadas no Laboratório de Espectrometria Gama e Luminescência (LEGaL), do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (USP). A taxa de dose (De) foi estimada por espectrometria gama (concentrações de U, Th e K) com detector HPGe em blindagem *ultralow background* em conjunto com a estimativa da radiação cósmica. A dose equivalente foi determinada pelo protocolo SAR

(*Single-Aliquot Regenerative-Dose*), proposto por Murray & Wintle (2000) e Wintle & Murray (2006), em alíquotas multigrãos de quartzo. As medidas de LOE foram realizadas num leitor Risø TL/OSL DA-20 equipado com fonte de radiação beta (Sr/Y), LED azuis para estimulação e filtros Hoya U-340 para detecção de luz na faixa do ultravioleta.

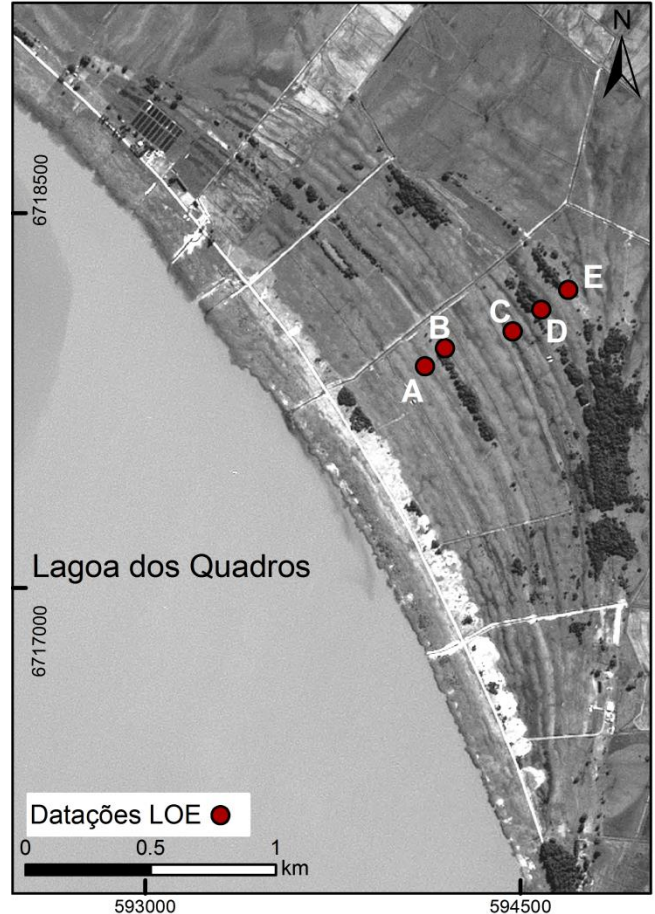


Figura 3: Vista em planta da planície de cordões com a localização dos pontos onde foram realizadas as amostragens. (Imagem do satélite SPOT-5, banda pancromática; UTM 22S).

A preparação das alíquotas de quartzo envolveu: (i) peneiramento a úmido para aquisição da fração 180-250 μm ; (ii) ataque com peróxido de hidrogênio (H_2O_2) para eliminação de matéria orgânica, ataque com ácido clorídrico (HCl) a [10%] para eliminação de CaCO_3 , ataque com ácido fluorídrico (HF) a [38%] por 40 min para eliminação da camada externa dos grãos de quartzo e redução da quantidade de feldspatos; (iii) separação de minerais pesados e leves ($\text{LMT} = 2,85 \text{ g/cm}^3$) e separação de quartzo ($\text{LMT} = 2,62 \text{ g/cm}^3$) e feldspatos remanescentes. A dose equivalente de cada amostra foi calculada pelo modelo de idade central (*Central Age Model*). Foram medidas 24 alíquotas por amostra. Somente alíquotas com teste de reciclagem (*recycling ratio*) entre 0,9 e 1,1; recuperação inferior a 5% e teste de feldspato com razão entre 0,9 e 1,1 foram consideradas para cálculo da dose equivalente.

4. Resultados e Discussão

Os resultados das análises geocronológicas por LOE estão sintetizados na tabela 1. As idades obtidas variaram entre $2,6 \pm 0,2$ a $6,3 \pm 0,4$ ka.

Em aproximadamente 6,5 ka ocorreu uma progradação total da ordem de 1200 m. A partir das idades, foram calculados cinco diferentes intervalos de progradação da planície de cordões (tabela 2). A figura 4 exibe as idades dos respectivos cordões representadas no perfil topográfico e a figura 5 mostra a curva de variação das taxas de progradação da planície de cordões.

A idade mais antiga ($E - 6,3 \pm 0,4$ ka) foi obtida na porção mais interna da planície de cordões, a uma distância de ~ 120 m do próximo cordão litorâneo datado ($D - 5,2 \pm 0,3$ ka). Entre esses dois cordões, a taxa média de progradação foi de $\sim 0,11 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ para o período de 1 ka. Considerando os erros das idades em LOE, a progradação dessa distância de 120 m ocorreu entre 6,7 a 4,9 ka atrás. Então, além a taxa média, temos a taxa

mínima e máxima de 0,07 e $0,41 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, respectivamente.

A idade do cordão mais interno (cordão E) é cerca de 1,1 a 0,3 ka mais jovem do que a idade da porção interna da barreira holocênica oceânica adjacente (Curumim), estimada por Dillenburg *et al.* (2004) e Hesp *et al.* (2007) em 7 ka.

O segundo intervalo, com cerca de 185 metros de distância entre os cordões D ($5,2 \pm 0,3$ ka) e C ($4,6 \pm 0,3$ ka), apresentou uma taxa média de progradação de $\sim 0,29 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$. Nesse intervalo, a taxa mínima foi de $0,15 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$. Contudo, não foi possível estimar uma taxa máxima devido à sobreposição das idades ocasionadas pelo erro. A seguir, entre as cristas dos cordões C e B, com uma diferença de idades de formação entre 1,3 a 0,3 ka e distanciados em aproximadamente 250 m, a taxa média de progradação foi de $\sim 0,31 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ para esse terceiro intervalo. Sendo a taxa mínima e máxima de $0,17$ e $0,85 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, respectivamente.

Tabela 1: Resultados da datação por LOE e Espectrometria Gama. (Localização dos pontos amostrais na figura 2)

Amostra	Nº LEGaL	Conteúdo de água (%) ^a	Alíquotas ^b	Dispersão (%) ^c	De (Gy) ^d	Taxa de Dose (Gy/ka) ^e	Idade (a) ^f
A	L0177	0,088	24	3,7	$2,1 \pm 0,02$	$0,806 \pm 0,058$	2668 ± 193
B	L0178	0,109	24	5,7	$1,8 \pm 0,0$	$0,468 \pm 0,029$	3848 ± 239
C	L0179	0,101	24	3,5	$2,0 \pm 0,0$	$0,429 \pm 0,026$	4663 ± 283
D	L0180	0,111	24	4,4	$3,6 \pm 0,0$	$0,680 \pm 0,046$	5291 ± 359
E	L0181	0,062	24	3,0	$2,8 \pm 0,0$	$0,442 \pm 0,028$	6342 ± 403

^a Conteúdo de água expresso como porcentagem de massa de sedimento seco.

^b Número de doses equivalentes replicadas para calcular a dose equivalente (De).

^c Dispersão calculada para a dose equivalente (De).

^d Radiação da dose equivalente (De).

^e Radiação da taxa de dose calculada para o ambiente.

^f Idade CAM (*central age model*) obtida através da divisão da dose equivalente (De) pela taxa de dose.

O quarto intervalo de taxa de progradação média foi calculado entre as idades das cristas dos cordões B e A (1180 anos e distância de 95 m), correspondendo a uma taxa média de $\sim 0,08 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ de progradação. Esse valor médio se situa entre a taxa mínima de $0,06 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ e a taxa máxima de $0,13 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$. O quinto intervalo corresponde a uma diferença de idade que varia entre $2,6 \pm 0,2$ ka em uma distância de 530 m, entre o cordão A e a linha de costa atual, equivalendo, portanto, a uma taxa média de progradação de cerca de $0,19 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ (com mínima de $0,18$ e máxima de $0,21$)

Tabela 2: Taxas mínimas, médias e máximas em $\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$ calculadas para os cinco intervalos especificados.

Intervalo	Taxa mín.	Taxa média	Taxa máx.
E – D	0,07	0,11	0,41
D – C	0,15	0,29	-
C – B	0,17	0,31	0,85
B – A	0,06	0,08	0,13
A – L. Costa	0,18	0,19	0,21

A formação dessa planície de cordões durante o Holoceno médio e tardio pode ser dividida em dois estágios. Cada um desses dois estágios engloba diferentes

intervalos/taxas de progradação. Serão utilizadas as taxas médias de progradação para as discussões a seguir.

O primeiro estágio, contendo os cordões de E a B, é marcado por uma progradação de aproximadamente 570 m a uma taxa média que variou entre $0,11$ e $0,31 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$. Ou seja, um crescimento significativo das taxas de progradação no período.

No segundo estágio, correspondente à porção mais externa (entre o cordão B e a linha de costa), a progradação ocorreu com menores taxas médias, situadas entre $0,08$ e $0,19 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, na qual, houve um deslocamento de 600 m nos últimos 4 ka.

As idades encontradas no presente trabalho evidenciam que a progradação dos cordões lagunares da Lagoa dos Quadros ocorreu de forma quase concomitante com a progradação da barreira de Curumim (porção da barreira holocênica que separa o sistema de lagoas Quadros-Itapeva do Oceano Atlântico).

Dentre os fatores que atuam diretamente nas taxas de progradação de cordões em ambientes lagunares, o suprimento de sedimento é, na maioria das vezes, o mais importante (Johnston *et al.* 2007). A planície de cordões evidencia, portanto, importantes variações na disponibilidade de sedimento. Além do mais, é possível afirmar que houve um rebaixamento do NRM da ordem

de 2 ± 1 m nos últimos 7 – 6 ka (Dillenburg *et al.* 2017); assumindo que os corpos lagunares seguiram a mesma tendência, a formação da planície de cordões pode, também, ter sido influenciada por um rebaixamento do nível de base (nível da lagoa).

No primeiro estágio de progradação da planície (marcado com maiores taxas médias), sedimentos transgredindo para dentro da lagoa, relacionados às fases

iniciais de formação dos depósitos eólicos transgressivos da barreira de Curumim entre 7,1 e 5,5 ka (Hesp *et al.* 2005, 2007, Martinho *et al.* 2008), podem ter sido uma importante fonte de areia para a formação da planície de cordões (Bitencourt *et al.* 2016). Na ocasião, os autores demonstraram, com base em fotografias, uma migração de sedimentos eólicos para o interior da lagoa e seu posterior retrabalhamento na margem NE da mesma.

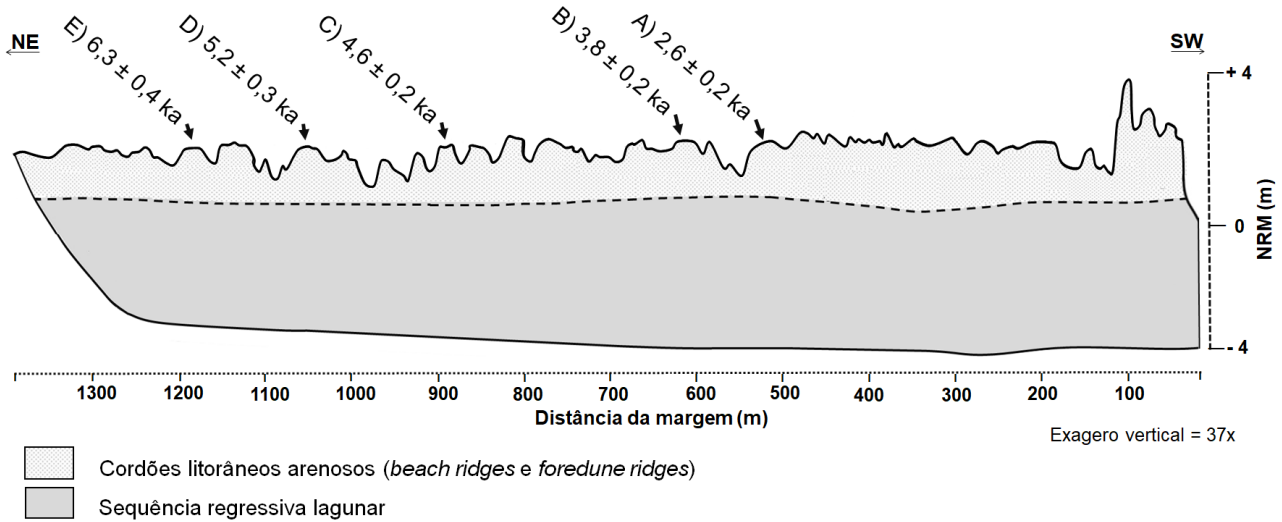


Figura 4: Perfil topográfico na trajetória das coletas das amostras para datação. A altimetria foi realizada com medidas do topo, base (pé) e cavas em relação ao NRM atual. Maiores detalhes são encontrados em Bitencourt *et al.* (2016). Sentido da margem da lagoa para SW.

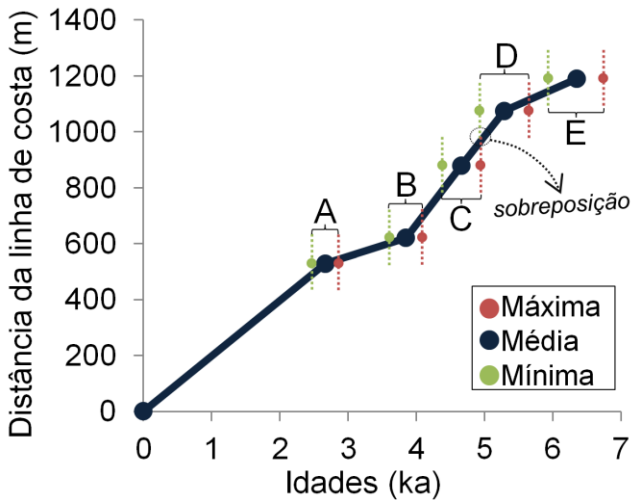


Figura 5: Variação das taxas máximas, médias e mínimas de progradação em relação à distância da linha de costa.

Em relação ao segundo estágio, variações climáticas podem ter sido responsáveis por mudanças no padrão pluviométrico e na vegetação, ocasionando períodos de reduzido transporte eólico para a lagoa e, conseqüentemente, diminuindo a disponibilidade de sedimento para a planície de cordões. Contudo, o tamanho cordão (comprimento) cresceu ao longo do tempo, indicando um maior espaço de acomodação. Com isso, uma menor taxa de progradação seria esperada naturalmente.

Salientamos que a variação do aporte sedimentar aqui discutida remete a aproximações médias, uma vez que análises volumétricas compreendendo o espaço de acomodação e o mapeamento detalhado dos cordões

(geometria e quantidade de sedimento) ainda não foram possíveis.

Na costa do RS, a correspondência entre variações climáticas, depósitos eólicos e feições geomorfológicas é uma característica bem conhecida (*e.g.* Martinho *et al.* 2008, Miot da Silva *et al.* 2013). Também, segundo Medeanic & Corrêa (2010), a PCRS foi marcada por mudanças climáticas ao longo de todo o Holoceno, sendo o Holoceno tardio assinalado como uma época de maior umidade. Tal aumento de umidade pode ter diminuído o potencial de transporte de areia para o interior da Lagoa dos Quadros. Este segundo estágio deve ter sido influenciado pelo avanço na progradação da barreira oceânica de Curumim, fato que resultou no deslocamento, para mais longe da Lagoa dos Quadros, os processos costeiros ativos, relacionados a ação das ondas e ventos. Além do mais, com a progradação da barreira de Curumim, as fases de campos de dunas transgressivas mais internas (mais próximo da lagoa) tornaram-se vegetadas, diminuindo o transporte de areias eólicas para o interior da lagoa.

Conforme Tomazelli & Dillenburg (2005), há três processos básicos de preenchimento sedimentar para os corpos lagunares do litoral norte do RS: preenchimento por depósitos clásticos fluviais (progradação de deltas e depósitos de rompimento de diques marginais); preenchimento pelo avanço gradativo da vegetação marginal; e preenchimento pelo avanço de dunas eólicas transgressivas da barreira holocênica adjacente. Este último modo de preenchimento constituiu-se na principal fonte de sedimentos que adentraram na lagoa e que serviram para a progradação da margem lagunar estudada. O bom selecionamento dos grãos sugere um agente com

alta competência para segregação granulométrica; portanto, ventos. Mais recentemente, Tomazelli *et al.* (2013) e Rosa *et al.* (2016) ressaltam a contribuição da formação de deltas intralagunares como um mecanismo de transferência de sedimento da barreira para a retrobarreira (*backbarrier*).

Ao compararmos uma imagem de satélite atual (figura 3) com uma fotografia aérea de 1948 (figura 6) da área de estudo (sem a devida ortorretificação), verifica-se a existência de uma diferença na posição da linha de costa entre o período das imagens; ou seja, nos últimos 70 anos a linha de costa se deslocou em aproximadamente 150 m para o interior da lagoa. Tal progradação corresponde a uma taxa de 2,14 m.a⁻¹. Essa taxa é muito superior às taxas dos períodos datados por LOE. Contudo, a margem NE da lagoa possui uma planície de inundação lagunar, representada por uma superfície que é parcialmente inundada por períodos de intensa pluviosidade. Essa superfície tem uma extensão de até 70 m. Portanto, é incerto afirmar que a grande diferença da posição da linha de costa entre as duas imagens (150 m) seja fruto somente de uma intensa progradação de cordões, uma vez que a fotografia história pode ter sido feita em uma época chuvosa.

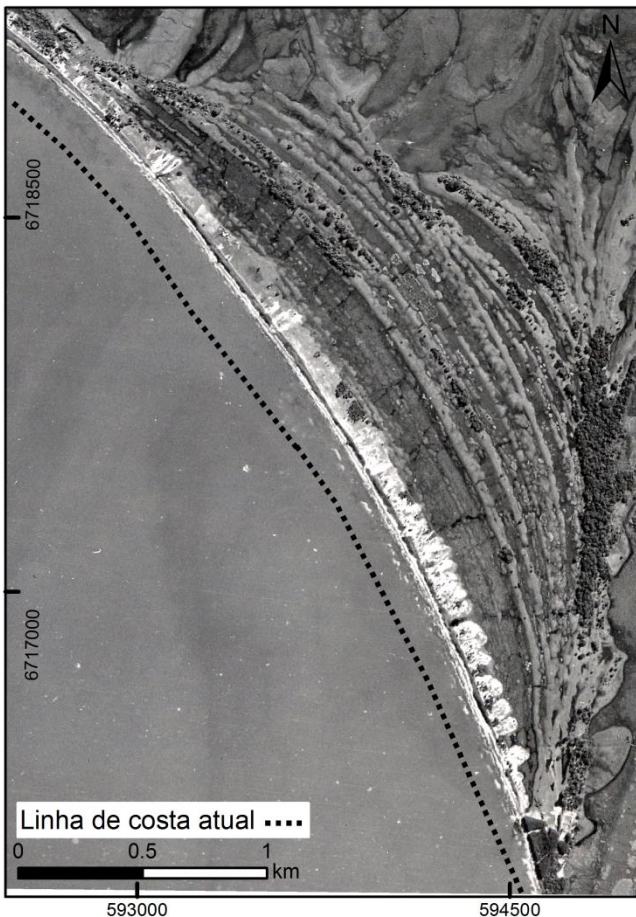


Figura 6: Fotografia aérea de 1948 (escala 1:25000). A linha pontilhada demarca a linha de costa atual, que pode ser conferida na figura 2. Cortesia de Patrick Hesp.

Além do mais, podemos considerar os processos de canibalização (erosão) de cordões litorâneos, como descrito por Isla & Bujalesky (2000). Por se situarem na

parte mais dinâmica da lagoa, os cordões mais recentes podem vir a serem erodidos (canibalizados) e, portanto, extintos do registro sedimentar. Este processo de canibalização deve ser considerado para toda a progradação da planície de cordões.

5. Conclusões

As idades LOE indicaram que a progradação da planície de cordões lagunares da Lagoa dos Quadros foi iniciada entre 1,1 a 0,3 ka após a formação inicial da barreira holocênica de Curumim (7 ka).

Durante o desenvolvimento da planície de cordões da Lagoa dos Quadros, as taxas de progradação variaram entre 0,08 e 0,31 m. a⁻¹. Estas variações podem ter sido decorrentes da variação no aporte de sedimentos eólicos da barreira oceânica (Curumim) para a Lagoa dos Quadros, possivelmente controladas por variações de umidade (pluviosidade).

O segundo estágio de desenvolvimento da planície de cordões foi também influenciado pela maior distância entre os processos costeiros ativos e a Lagoa dos Quadros.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao PRH-PB 215 (Programa de Formação de Recursos Humanos em Geociências, nº 215) e ao CNPq (Projeto Universal 484856/2011-1) pelo auxílio financeiro.

Referências

- Bitencourt V.J.B., Dillenburg S.R., Barboza E.G., Manzolli R.P., Caron F. 2016. Geomorfologia e arquitetura deposicional de uma planície de cordões litorâneos na margem NE da Lagoa dos Quadros, RS, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 43 (3): 249-269.
- Bristow C.S., Pucillo K. 2006. Quantifying rates of coastal progradation from sediment volume using GPR and OSL: the Holocene fill of Guichen Bay, south-east South Australia. *Sedimentology*, 53(4):769-788.
- Britto F.P., Barletta R.C., Mendonça M. 2008. Variabilidade espacial e temporal da precipitação pluvial no Rio Grande do Sul: influência do fenômeno El Niño Oscilação Sul. *Revista Brasileira de Climatologia*, 3:37-48.
- Costas S., Ferreira Ó., Plomaritis T.A., Leorri E. 2016. Coastal barrier stratigraphy for Holocene high-resolution sea-level reconstruction. *Scientific Reports* 6(38726):1-12.
- Dillenburg S.R., Roy P.S., Cowell P.J., Tomazelli L.J. 2000. Influence of antecedent topography on coastal evolution as tested by the Shoreface Translation-Barrier Model (STM). *Journal of Coastal Research*, 16:71-81.
- Dillenburg S.R., Barboza E.G., Rosa M.L.C.C., Caron F., Sawakuchi A.O. 2017. The complex prograded Cassino barrier in southern Brazil: Geological and morphological evolution and records of climatic, oceanographic and sea-level changes in the last 7–6 ka. *Marine Geology*, 390:106-119.
- Dillenburg S.R., Tomazelli L.J., Hesp P.A., Barboza E.G., Clerot C.C.P., Biancini Da Silva A. 2004. Stratigraphy and Evolution of a Prograded Transgressive Dunefield Barrier in Southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, 39(SI):132-135.
- 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: Dillenburg S.R., Hesp P.A. (eds) *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*. Berlin, Springer, 53-91p.
- Guedes C.C.F., Sawakuchi A.O., Giannini P.F.C., Dewitt R., Aguiar A.P. 2011. Datação por luminescência opticamente estimulada: princípios e aplicabilidade nos depósitos sedimentares brasileiros. XIII Congresso da ABEQUA, Armação dos Búzios/ RJ, 5p.
- Guedes C.C.F., Sawakuchi A.O., Giannini P.F.C., Dewitt R., Aguiar A.P. 2013. Luminescence characteristics of quartz from Brazilian

- sediments and constraints for OSL dating. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 85(4):1303-1316.
- Hart E.A., Stapor F.W., Jerez J.E.N., Sutherland C.J. 2016. Progradation of a Beach Ridge Plain between 5000 and 4000 Years BP Inferred from Luminescence Dating, Coquimbo Bay, Chile. *Journal of Coastal Research*: no prelo.
- Hasenack H., Ferrara L.W. 1989. Considerações sobre o clima da região de Tramandaí, RS. *Pesquisas em Geociências*, 22:53-70.
- Hesp P.A., Dillenburg S.R., Barboza E.G., Tomazelli L.J., Ayup-Zouain R.N., Esteves L.S., Gruber N.L.S., Toldo Jr. E.E., Tabajara L.L.C., Clerot L.C.P. 2005. Beach ridges, foredunes or transgressive dunefields? Definitions and an examination of the Torres to Tramandaí barrier system, Southern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 77(3):495-508.
- Hesp P.A., Dillenburg S.R., Barboza E.G., Clerot L.C.P., Tomazelli L.J., Ayup-Zouain R.N. 2007. Morphology of the Itapeva to Tromandaí transgressive dunefield barrier system and mid-to-late Holocene sea level change. *Earth Surfaces and Landforms*, 32:407-414.
- Isla F.I., Bujalesky G.G. 2000. Cannibalization of Holocene gravel beach plains, northern Tierra del Fuego, Argentina. *Marine Geology*, 170(1-2):105-122.
- Johnston J.W., Thompson T.A., Baedke, S.J. 2007. Systematic pattern of beach-ridge development and preservation: conceptual model and evidence from ground penetrating radar. *The Geological Society of America*, 432:47-58.
- Lopes R.P., Kinoshita A., Baffa O., Figueiredo A.M.G., Dillenburg S.R., Schultz C.L., Pereira, J.C. 2014. ESR dating of Pleistocene mammals and marine shell from coastal plain of Rio Grande do Sul state, Southern Brazil. *Quaternary International*, 352:124-134.
- Madsen A.T., Murray A.S., Andersen T.J. 2007. Optical Dating of Dune Ridges on Rømmø, a Barrier Island in the Wadden Sea, Denmark. *Journal of Coastal Research*, 23(5): 1259-1269.
- Manzollini R.P. 2016. Gênese e evolução do Sistema Laguna-Barreira da Feitoria. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 184p.
- Martinho C.T., Dillenburg S.R., Hesp P.A. 2008. Mid to late Holocene evolution of transgressive dunefields from Rio Grande do Sul Coast, Southern Brazil. *Marine Geology*, 256:49-64.
- Mauz B., Hijma M.P., Amorosi A., Porat N., Galili E., Bloemendal, J. 2013. Aeolian beach ridges and their Significance for climate and sea level: Concept and insight from the Levant coast (East Mediterranean). *Earth-Science Reviews*, 121:3-54.
- Medeiros P.R.P. 1992. Estudo do Sistema Lagunar-Estuarino de Tramandaí-Imbé: Física e Química da Água. Porto Alegre. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Ecologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 112p.
- Medeanic S., Corrêa I.C.S. 2010. Climatic changes in the coastal plain of the Rio Grande do Sul state in the Holocene: palynomorph evidences. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, 5(2):287-297.
- Milana J.P., Guedes C.C.F., Buso V.V. 2017. The coastal ridge sequence at Rio Grande do Sul: A new geoarchive for past climate events of the Atlantic coast of southern Brazil since the mid Holocene. *Quaternary International*, 438(A):187-199.
- Miot da Silva G., Martinho C.M., Hesp P., Keim B.D., Ferligoj Y. 2013. Changes in dunefield geomorphology and vegetation cover as a response to local and regional climate variations. *Journal of Coastal Research*, 165:1307-1312.
- Murray A.S., Wintle A.G. 2000. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurement* 32:57-73.
- Orford J.D., Murdy J.M., Wintle A.G. 2003. Prograded Holocene beach ridges with superimposed dunes in north-east Ireland: mechanisms and timescales of fine and coarse beach sediment decoupling and deposition. *Marine Geology*, 194(1-2): 47-64.
- Rémillard A.M., Buylaert J., Murray A.S., Héty B. 2015. Quartz OSL dating of late Holocene beach ridges from the Magdalen Islands (Quebec, Canada). *Quaternary Geochronology*, 30(B):264-269.
- Rosa M.L.C.C., Barboza E.G., Dillenburg S.R., Tomazelli, L.J., Ayup-Zouain R.N. 2011. The Rio Grande do Sul (southern Brazil) shoreline behavior during the Quaternary: a cyclostratigraphic analysis. *Journal of Coastal Research*, 64:686-690.
- Rosa M.L.C.C., Hoyal D., Barboza E.G., Fedele J., Abreu V.S. 2016. River-dominated deltas: upscaling autogenic and allogenic processes observed in laboratory experiments to field examples of small deltas in southern Brazil. *SEPM*, 106(13):1-22.
- Rosa M.L.C.C., Barboza E.G., Abreu V.S., Tomazelli L.J., Dillenburg S.R. 2017. High-Frequency Sequences in the Quaternary of Pelotas Basin (coastal plain): a record of degradational stacking as a function of longer-term base-level fall. *Brazilian Journal of Geology*, 47(2): 183-207.
- Roy P.S., Cowell M.A., 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, Cambridge University Press, 121-186p.
- Sallun A.E.M., Suguio K., Tatum S.H., Yee M., Santos J., Barreto A.M.F. 2007. Datação absoluta de depósitos quaternários brasileiros por luminescência. *Revista brasileira de Geociências*, 37(2):402-413.
- Sawakuchi A.O., Mendes V.R., Pupim F.N., Mineli T.H., Ribeiro L.M.A.L., Zular A., Guedes C.C.F., Giannini P.C.F., Nogueira L., Sallun W., Assine M.L. 2016. Optically stimulated luminescence and isothermal thermoluminescence dating of high sensitivity and well bleached quartz from Brazilian sediments: from Late Holocene to beyond the Quaternary?. *Brazilian Journal of Geology*, 46:209-226.
- Schwarzbold A., Schafer A. 1984. Gênese e morfologia das Lagoas Costeiras do Rio Grande do Sul. *Amazoniana*, IX(1):87-104.
- Strahler A.N., Strahler A.H. 1987. *Modern Physical Geography*. John Wiley and Sons, New York. 488p.
- Tamura T. 2012. Beach ridges and prograded beach deposits as palaeoenvironment records. *Earth-Science Reviews*, 114:279-297.
- Tomazelli L.J. 1993. O regime de ventos e a taxa de migração das dunas eólicas costeiras do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 20(1):18-26.
- 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*. Edição CIGO/UFRGS, Porto Alegre/RS, 375-406p.
- Tomazelli L.J., Dillenburg S.R. 2005. Fatores de controle na origem e evolução das lagoas costeiras holocênicas do Litoral Norte do Rio Grande do Sul. In: X Congresso da ABEQUA, Guarapari-ES, 6p.
- Tomazelli L.J., Dillenburg S.R., Barboza E.G., Rosa M.L.C.C. 2008. Geomorfologia e Potencial de Preservação dos Campos de Dunas Transgressivos de Cidreira e Itapeva, Litoral Norte do Rio Grande do Sul. *Pesquisas em Geociências*, 35:47-55.
- Tomazelli L.J., Dillenburg S.R., Barboza E.G., Rosa M.L.C.C., Manzollini R.P., Caron F. 2013. Processos de transferência de sedimentos durante a transgressão de barreiras arenosas costeiras: o exemplo da costa do Rio Grande do Sul. XIV Congresso da ABEQUA, Natal/RN, 1p.
- Wintle A.G., Murray A.S. 2006. A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols. *Radiation Measurements*, 41(4): 369-391.
- Villwock J.A. 1984. Geology of the Coastal Province of Rio Grande do Sul, Southern Brazil. A Synthesis. *Pesquisas*, 16:5-49
- Villwock J.A., Tomazelli L.J. 1995. Geologia Costeira do Rio Grande do Sul. Notas Técnicas, Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, UFRGS. Porto Alegre, 8:1-45.
- Villwock J.A., Tomazelli L.J., Loss E.L., Dehnhardt E.A., Horn N.O., Bachi F.A., Dehnhardt B.A. 1986. Geology of the Rio Grande do Sul Coastal Province. In: Rabassa J. (ed). *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*. A. A. Balkema, Rotterdam, 4:79-97p.

Recebido 02 de junho de 2017
Aceito 15 de setembro de 2017