

Geocronologia com ^{210}Pb na avaliação das taxas de sedimentação e da dinâmica deposicional na Lagoa Itapeva, sul do Brasil

Michel Doeppre IVANOFF¹, Elírio Ernestino TOLDO Jr.¹, Rubens Cesar Lopes FIGUEIRA² & Paulo Alves de Lima FERREIRA²

- 1 Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9.500, CEP 91509-900, Porto Alegre, RS, Brasil (mdi.ivanoff@gmail.com, toldo@ufrgs.br). Departamento de Oceanografia Física, Química e Geológica, Universidade de São Paulo. Praça do Oceanográfico, 191, CEP 05508-120, Cidade Universitária, São Paulo, SP, Brasil (rfigueira@usp.br, paulo.alves.ferreira@hotmail.com).
- 2

Recebido em 07/2016. Aceito para publicação em 11/2017.

Versão online publicada em 16/3/2018 (www.pesquisasemgeociencias.ufrgs.br)

Resumo - Lagoas costeiras são ambientes potencialmente ameaçados pelo aumento recente das taxas de sedimentação e elevação relativa do nível do mar. Neste trabalho foram analisadas as condições de preenchimento sedimentar da Lagoa Itapeva utilizando o método geocronológico ^{210}Pb , a partir dos valores da atividade do ^{210}Pb e ^{226}Ra obtidos de três testemunhos geológicos. As taxas de sedimentação medidas no testemunho C3 indicam forte influência da drenagem do Rio Três Forquilhas, com valores na ordem de 3,2 mm.a⁻¹. Os pontos de coleta no centro C2 e norte C1 apresentaram valores sensivelmente menores, 2,4 e 2,9 mm.a⁻¹, respectivamente. Tais valores mostram-se inferiores as taxas de elevação relativa do nível do mar, indicando um cenário transicional entre a estabilização e o déficit sedimentar no processo de preenchimento lacustre. A análise granulométrica nos testemunhos indica a presença de significativa energia hidrodinâmica no processo de sedimentação. A fração silte é a classe dominante, com variação entre o tamanho médio a grosso em todas as amostras, seguida pela ocorrência da fração areia em relação à argila que apresentou baixa concentração, não ultrapassando 9%. Entretanto, foi verificado no testemunho C3 um aumento do teor de lamas nas últimas décadas, o que sugere modificações na bacia de drenagem do Rio Três Forquilhas pelo aumento na produção de sedimentos. A urbanização e a introdução da agricultura no último século são as principais variáveis que explicam este comportamento.

Palavras-chave: taxa de sedimentação, geocronologia, sedimentação lacustre, elevação do nível relativo do mar.

Abstract - GEOCHRONOLOGY WITH ^{210}Pb IN THE EVALUATION OF SEDIMENTATION RATE AND THE DEPOSITIONAL DYNAMICS IN ITAPEVA LAKE, SOUTH OF BRASIL. As a result of anthropogenic activities, coastal lakes are potentially threatened by increased sedimentation rates and relative sea-level increases. The present study analyzed the sedimentary-filling conditions of Itapeva Lake by using the ^{210}Pb geochronology method, which is based on ^{210}Pb and ^{226}Ra activity values obtained from three sediment cores. Measurements of sedimentation rates in the core C3 indicate a strong influence of the drainage of the Três Forquilhas River with values of approximately 3.2 mm.a⁻¹. The sampling points in the center (C2) and north (C1) exhibited significantly lower values of 2.4 and 2.9 mm.a⁻¹, respectively. These values are lower than the rates of relative sea-level increase, which indicate a transitional scenario between the stabilization and sedimentary deficit in the lacustrine burial process. The particle size analysis in the core samples indicates the presence of significant hydrodynamic energy in the sedimentation. The silt fraction is the dominant class, with variations in size ranging from medium to coarse in all samples, followed by the occurrence of fraction sand in relation to clay which presented low concentration, not over 9%. However, an increase in mud content has been observed in the core C3 over the last several decades, which suggests changes in the drainage basin of the Três Forquilhas River due to an increase in sediment production. Urbanization and the introduction of agriculture within the last century are the main reasons for this behavior.

Keywords: sedimentation rate, geochronology, lacustrine sedimentation, rise of relative sea level.

1 Introdução

Lagoas costeiras são corpos aquosos geralmente orientados paralelamente à linha costa, separados do oceano por uma barreira ou ligados a ele por um ou mais canais restritos; apresentam profundidades reduzidas e são efêmeras em uma escala de tempo geológico (Nichols, 1989).

A gênese destas lagoas, em grande parte, se deve às oscilações eustáticas do nível do mar ocorridas durante o Quaternário, que associados a eventos transgressivo-regressivos resultaram na construção de barreiras arenosas por processos marinhos, as quais isolam parcial ou totalmente estes corpos lagunares (Kjerfve *et al.*, 1997).

Devido a pouca profundidade estes corpos lacustres são frequentemente sujeitos a rápida sedimentação e, eventualmente, evoluem para outros tipos de ambientes através do preenchimento por sedimentos, atividade tectônica ou mudanças eustáticas no nível do mar. A escala de tempo desta transição ambiental é geologicamente rápida e pode-se esperar que ocorra dentro de décadas ou séculos. Portanto, a compreensão da dinâmica sedimentar em ambientes costeiros torna-se importante no monitoramento de modificações naturais ou introduzidas pelas atividades humanas.

Tanto o desmatamento como o desenvolvimento agrícola são fatores que têm contribuído para o aumento da produção de sedimentos terrígenos, sendo que em muitos lugares o período de maior impacto e mais dramática transformação ocorreu nos últimos 150 anos ou menos (Oldfield & Appleby, 1984).

O estabelecimento de cronologias detalhadas e precisas dos processos sedimentares se torna ferramenta essencial para desenvolver uma contínua percepção ambiental da evolução destes corpos d'água. Estudos sobre taxas de sedimentação são importantes para a compreensão da dinâmica que envolve a entrada de elementos fornecida principalmente por fontes fluviais aos ambientes costeiros, bem como o entendimento da interação entre as atividades humanas em regiões litorâneas, fornecendo assim subsídios para o gerenciamento destes sistemas lacustres.

Assim sendo, este trabalho propõe compreender a dinâmica deposicional da Lagoa Itapeva através da avaliação das taxas de sedimentação recente utilizando o radionuclídeo ^{210}Pb e correlacionar a deposição sedimentar do último século com a taxa de elevação do nível do mar no mesmo período. Desta forma pretende-se verificar se em termos futuros o progressivo aumento do nível do mar será suficiente para prover um aumento do

espaço no qual o sedimento possa ser depositado, ou se a taxa de deposição atual tenderá a reduzir a profundidade do ambiente mais rapidamente acelerando sua colmatção.

2 Área, materiais e métodos

2.1 Localização da área

A Lagoa Itapeva é um corpo d'água costeiro relativamente raso, com profundidade máxima de 2,50 m. É a primeira de uma série de lagoas costeiras, no sentido norte-sul, paralelas à linha de costa no litoral norte do Rio Grande do Sul, as quais estão interligadas por canais meandantes até a Laguna de Tramandaí que os conecta ao Oceano Atlântico (Fig. 1).

A Planície costeira que engloba a área estudada foi formada durante eventos transgressivo-regressivos provocados pelas oscilações eustáticas do nível do mar durante o Quaternário (Tomazelli *et al.*, 2000; Rosa *et al.*, 2017). Como consequência dessas variações foram formados quatro sistemas deposicionais Laguna-Barreira, designados do mais antigo para o mais recente como sistemas Laguna-Barreira I, II, III de idades pleistocênicas e o sistema Laguna-Barreira IV com idade holocênica. A Lagoa Itapeva está inserida no espaço de retro-barreira do sistema deposicional Laguna-Barreira IV, a qual tem sua gênese vinculada ao final da Última Grande Transgressão, sendo a área pertencente ao corpo lacustre inundado há aproximadamente 6,5 ka (Dillenburg *et al.*, 2004).

O setor norte da Planície Costeira do Rio Grande do Sul, relativa à área da Lagoa Itapeva, é delimitada ao oeste pelas escarpas do Planalto da Serra Geral com altitudes de até 1000 m e ao leste pelo Oceano Atlântico (Fig. 1). A lagoa tem formato alongado apresentando orientação NE-SW com 32 km de comprimento e largura média que varia de 2,5 km na porção NE a 5,5 km na porção SW e uma área de aproximadamente 125 km².

A principal contribuição de material sedimentar para a lagoa provém da descarga dos Rios Três Forquilhas e Cardoso (Fig. 2), os quais têm suas nascentes nas terras altas do Planalto Serra Geral, apresentando vazões médias de 7,49 e 0,39 m³.s⁻¹, com estimativa do aporte de sedimentos suspensos à lagoa na ordem de 47.380 e 5.740 Ton.ano⁻¹ respectivamente (ECOPLAN, 1997).

Segundo Ivanoff *et al.* (2014), o fundo lacustre apresenta uma sedimentação de origem siliciclástica, com predomínio da fração arenosa associado a cascalho biodetrítico nas margens submersas, e granodecrescência para tamanhos silte grosso a

fino em direção ao centro da lagoa. A concentração de grãos tamanhos argila mostra-se pouco significativa, sempre menor que 18%, uma vez que a agitação por ondas que se desenvolve no corpo lacustre dificulta a deposição desta classe granulométrica. O processo deposicional é controlado principalmente pela dinâmica de ondas geradas pelo vento local, de forma que as áreas que apre-

sentam as menores profundidades desenvolvem fundos turbulentos que dificultam a deposição dos sedimentos lamosos. O teor de matéria orgânica também apresenta este padrão, com aumento gradativo na área central do corpo lacustre, e nas proximidades das desembocaduras dos Rios Três Forquilhas e Cardoso.

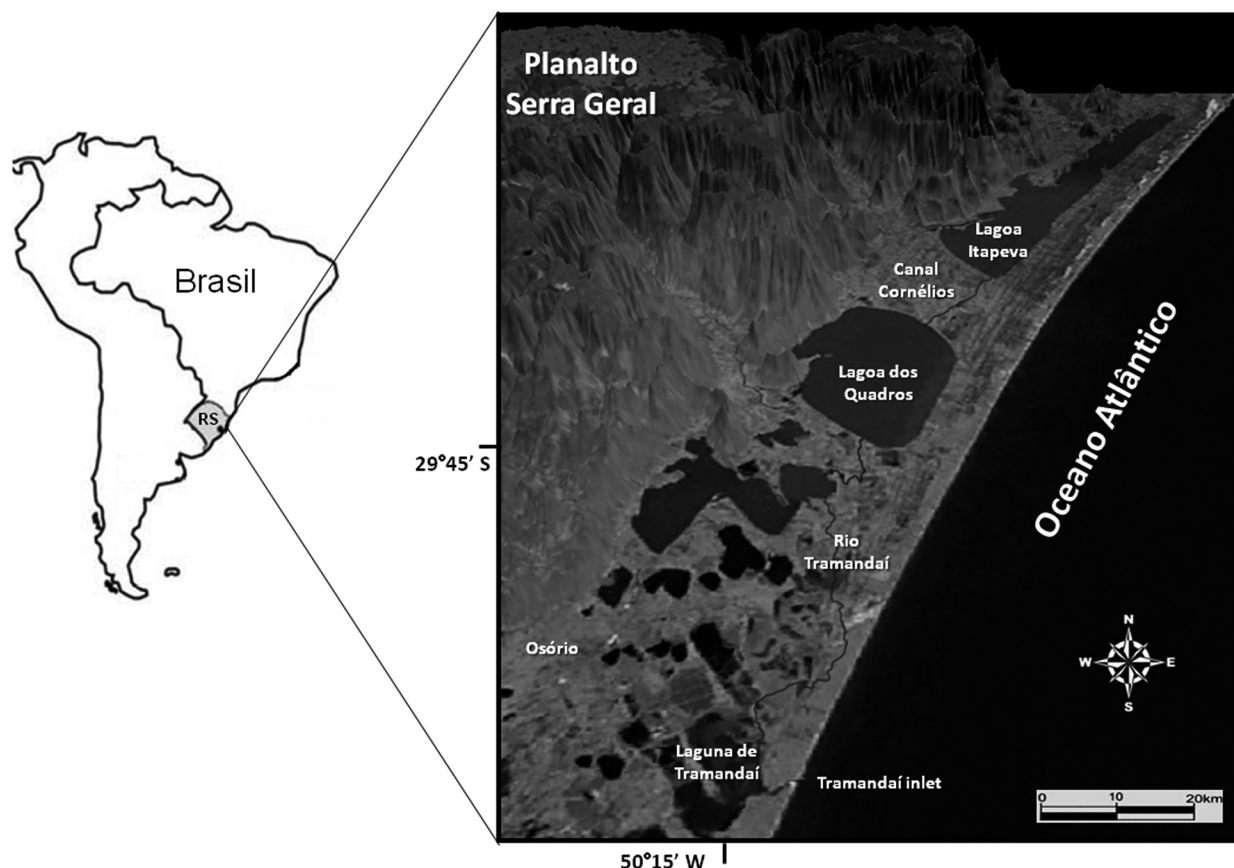


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo. Fusão de imagem Landsat Thematic Mapper (TM) com MDT das lagoas interligadas pelo canal Cornélio e o Rio Tramandaí, com destaque para a Lagoa Itapeva, a Lagoa dos Quadros e a Laguna de Tramandaí.

Figure 1. Location map of the study area. Image fusion Landsat Thematic Mapper (TM) with MDT of the lakes connected by Cornélio channel and Tramandaí River, highlighting Lake Itapeva, Lake dos Quadros and the Lagoon of Tramandaí.

O clima da área de estudo, segundo a classificação de Koppen-Geiger, apresentada por Strahler & Strahler (1987), é do tipo *Cfa*, o qual caracteriza um clima temperado chuvoso, com chuvas distribuídas regularmente ao longo do ano e temperatura média do mês mais quente superior a 22°C e a do mês mais frio superior a -3°C. Segundo Hasenack & Ferraro (1989), o clima do litoral norte é definido por uma temperatura média anual de 20°C, taxa de precipitação e evaporação anual de 1322,9 e 1134,5 mm respectivamente e umidade média de 83%.

A costa do Rio Grande do Sul está submetida a regime de micro marés com amplitude média de 0,25 m. Durante o inverno, no entanto, há significativa ocorrência de marés meteorológicas, associadas a tempestades, resultando em sobre-elevações

do nível do mar de até 1,23 m (Toldo Jr. *et al.*, 2000).

2.2 Materiais

Três testemunhos rasos de sondagem foram coletados na Lagoa de Itapeva no mês de janeiro de 2011, em locais representativos da dinâmica sedimentar, de modo que o C1, ao Norte, está em uma área sem contribuição fluvial direta; o C2 está em uma porção intermediária, e o C3, ao Sul, na proximidade do Rio Três Forquilhas, o principal tributário para a Lagoa (Fig. 2).

2.3 Métodos

Os testemunhos foram amostrados a cada

2 cm, sendo as amostras de sedimentos, pesadas ainda úmidas. Posteriormente foi iniciado o processo de secagem das amostras em estufa por 48 horas à temperatura de 55°C, e após esse processo, foram pesadas novamente para determinação do teor de água. Após desagregação e quarteamento, cada amostra foi separada em dois lotes, onde as

frações destinadas à análise por espectrometria gama foram acondicionadas em recipientes plásticos de 6 cm de diâmetro por 1,5 cm de altura, sendo hermeticamente fechadas e cobertas com duplo filme plástico. O restante da amostra foi analisado quanto à densidade, porosidade e granulometria.

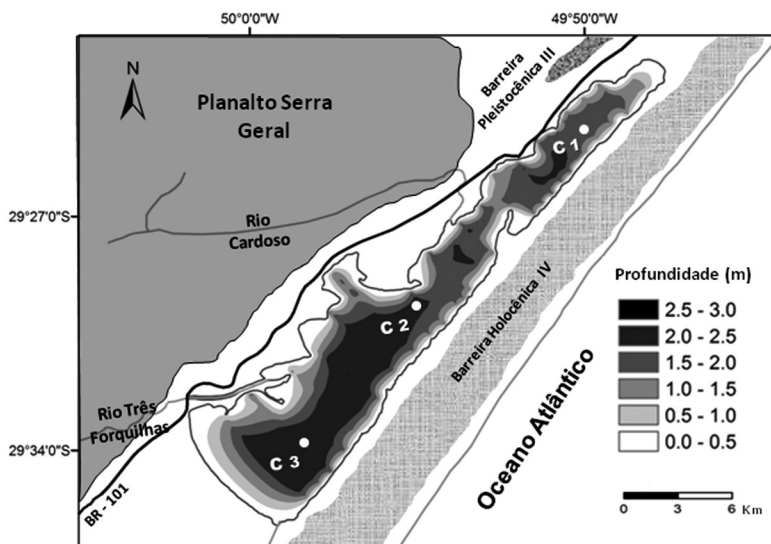


Figura 2. Mapa da amostragem dos testemunhos C1, C2 e C3 na Lagoa Itapeva, Sul do Brasil.
Figure 2. Sampling map of cores C1, C2, C3 in Itapeva Lake, South of Brazil.

A granulometria foi realizada em um analisador de partículas (granulômetro) da série Cilas, modelo 1180, e interpretadas segundo os procedimentos estatísticos de Folk & Ward (1957), Shepard (1954) e Pejrup (1988).

A obtenção das taxas de sedimentação foi realizada no Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, por espectrometria gama, através de um detector da série GEM de germânio hiperpuro, co-axial, modelo EG&G ORTEC (25190P), com resolução de 1,9 keV para o pico de 1332,5 keV do ^{60}Co .

A taxa de sedimentação foi determinada a atividade do elemento ^{210}Pb ($T_{1/2} = 22,26$ anos), um radionuclídeo natural pertencente à série de decaimento radioativo do ^{238}U , sendo a utilização deste elemento um dos métodos mais promissores para a estimativa de taxa de sedimentação numa escala de tempo entre 100 a 150 anos.

O ^{210}Pb formado no sedimento pelo decaimento natural do ^{226}Ra permanece em equilíbrio com o mesmo, e é denominado ^{210}Pb suportado (em equilíbrio). Porém a contagem do ^{226}Ra torna-se uma análise complexa devido à baixa intensidade de emissão dos raios gamas (186 KeV), que é de cerca de 4%, e também a interferência do pico do ^{235}U (185,7 KeV). Sendo assim, para analisar o ^{226}Ra por espectrometria gama optou-se pela utilização do elemento ^{214}Bi , com pico de 609 keV.

Em muitos ambientes, o elemento ^{210}Pb está

presente em excesso em relação ao seu precursor o ^{226}Ra . Tal fato deve-se ao ciclo natural de emissão do ^{222}Rn pelo solo e pelas rochas e ao posterior decaimento para ^{210}Pb , que, quando absorvido pelos aerossóis, retorna ao ambiente terrestre e aquático por deposição atmosférica (*fallout*).

Esta fonte de entrada de ^{210}Pb no sedimento está em excesso com relação ao ^{226}Ra , sendo denominado ^{210}Pb não-suportado, e sua concentração diminui com a profundidade nos depósitos sedimentares. A relação entre estes elementos fornece a base para a determinação da taxa de sedimentação. A atividade de $^{210}\text{Pb}_{\text{(não-suportado)}}$, por espectrometria gama, é determinada diretamente através da contagem do seu fotopico de 46,5 keV.

Desta forma, analisadas as atividades do ^{210}Pb e ^{226}Ra , os métodos desenvolvidos na análise deste radionuclídeo foram aplicadas as amostras de referência certificadas IAEA-300, IAEA-315 e IAEA-326 da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) no estabelecimento da eficiência de contagem do espectrômetro para as contagens de ^{210}Pb e ^{226}Ra . Após certificação, foi então calculada a taxa de sedimentação segundo a equação 1.

$$S = (-\lambda \cdot D) / (\ln C/C_0) \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que S é a taxa de sedimentação em cm.ano^{-1} , $C_{210-\text{Pb}}$ é a contagem do ^{210}Pb não suportado na base do testemunho, $C_{0\text{Pb}-210}$ é a contagem do ^{210}Pb

não suportado no topo do testemunho, λ é a constante de decaimento radioativo do ^{210}Pb igual a $0,31076 \text{ ano}^{-1}$ e D é a distância entre o topo e o estrato, medido em centímetros.

A determinação dos valores da taxa de sedimentação foi calculada a partir do modelo CIC (Concentração Inicial Constante), estabelecido por Appleby & Oldfield (1978) e Joshi & Shukla (1991). Este método leva em consideração a concentração de $^{210}\text{Pb}_{(\text{não-suportado})}$ em cada fatia da coluna sedimentar por unidade de massa seca, cujo modelo considera que a taxa de deposição anual de ^{210}Pb atmosférico em um determinado local é razoavelmente constante (Turekhian *et al.*, 1977; Rangarajan *et al.*, 1986).

A avaliação do espaço físico disponível para acomodação de sedimentos no interior lacustre também foi avaliado a partir da obtenção de cotas batimétricas em quatorze perfis transversais à lagoa, contendo de cinco a sete pontos cada, totalizando oitenta e duas cotas batimétricas com es-

paçamento médio de 600 m. A partir dos dados de coordenadas obtidas com GPS, mais a área da Lagoa de Itapeva medida em 125 km^2 , procedeu-se a inserção destes valores ao programa ArcMap™ 10 e com a interpolação dos dados no modo *natural neighbor* e seleção do *Grid Volume* foi determinado o volume do corpo lacustre.

3 Resultados

A partir dos dados da concentração de $^{210}\text{Pb}_{(\text{não-suportado})}$ foram obtidos os gráficos da relação de $\text{Ln } ^{210}\text{Pb} - ^{226}\text{Ra}$ versus a profundidade das amostras. Como esperado, os níveis de $^{210}\text{Pb}_{(\text{não-suportado})}$ nos testemunhos C1, C2 e C3 sofreram queda ao longo da profundidade, e o coeficiente angular da reta de regressão linear apresentou valor satisfatório. O valor p da análise de regressão (valor de probabilidade associado ao R^2) apresentou valores abaixo de 0,05 (5%), o que indica que a regressão é estatisticamente significativa (Fig. 3).

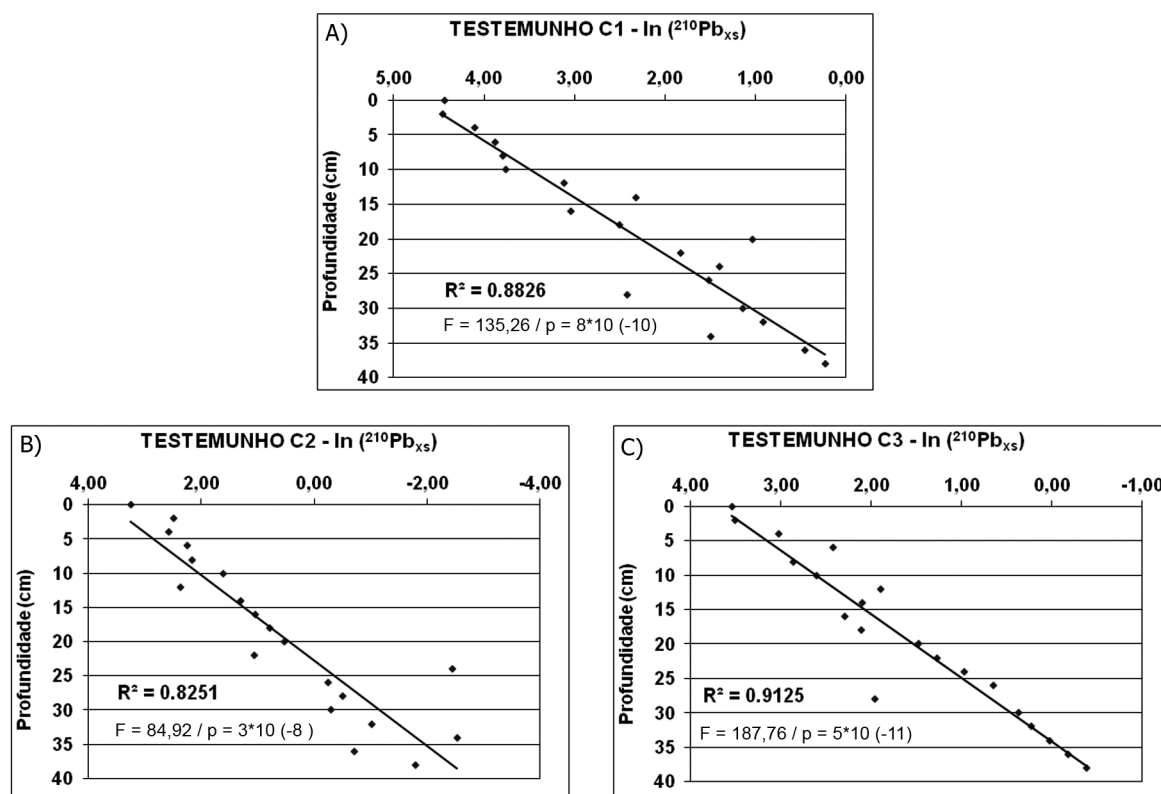


Figura 3. Perfil vertical da atividade de ^{210}Pb não suportado $\text{ln}(\text{Pb-}^{210}\text{xs})$ e reta de regressão linear na coluna sedimentar dos testemunhos. A) testemunho C1; B) testemunho C2; C) testemunho C3.

Figure 3. Vertical profile of the activity of ^{210}Pb not supported $\text{ln}(\text{Pb-}^{210}\text{xs})$, and linear regression line in the sedimentary column of the cores. A) core C1; B) core C2; C) core C3.

Os níveis de ^{210}Pb total e ^{226}Ra obtidos na Lagoa Itapeva foram utilizados para a determinação das taxas de sedimentação em cada ponto estudado, sendo os resultados ilustrados na tabela 1.

A densidade das amostras nos testemunhos variou de 0,9 a $1,12 \text{ g.cm}^{-3}$, e média de $1,08 \pm 0,5 \text{ g.cm}^{-3}$. Os valores de porosidade calculados a par-

tir da densidade e do teor de água variaram de 0,58 e 0,74, com média de $0,66 \pm 0,13 \text{ g.cm}^{-3}$, e uma tendência de redução com o aumento da profundidade (Tab. 1).

Os resultados obtidos com a geocronologia do ^{210}Pb mostraram variações nas taxas de sedimentação dentro Lagoa Itapeva resultante da dinâmica

de circulação interna, bem como da contribuição das principais fontes de sedimentos ao sistema lacustre. Os dados do testemunho C3 (sul) mostraram que o setor sul é a área de maior deposição de sedimentos com uma taxa de $3,2 \pm 0,4 \text{ mm.a}^{-1}$. O

ponto C2 (centro) apresentou taxa sensivelmente menor em relação ao ponto sul, com valor de $2,4 \pm 0,3 \text{ mm.a}^{-1}$. No testemunho C1 (norte) obteve-se taxa de sedimentação na ordem de $2,9 \pm 0,2 \text{ mm.a}^{-1}$ (Tab. 1).

Tabela 1. Propriedades físicas dos testemunhos quanto à taxa de sedimentação (T.S.), densidade, umidade e porosidade.
Table 1. Physical properties of the cores regarding the sedimentation rate (T.S.), density, humidity and porosity.

Testemunho	Comprimento (cm)	T. S. (mm.ano^{-1})	Densidade (gr.cm^{-3})	Umidade (%)	Porosidade
C1	38	$2,9 \pm 0,2$	$1,08 \pm 0,03$	$44,1 \pm 2,08$	$0,66 \pm 0,02$
C2	60	$2,4 \pm 0,3$	$1,04 \pm 0,05$	$41,7 \pm 3,14$	$0,64 \pm 0,03$
C3	56	$3,2 \pm 0,4$	$1,13 \pm 0,07$	$47,8 \pm 5,23$	$0,69 \pm 0,05$

A distribuição granulométrica nos três testemunhos indica a existência de significativa energia hidrodinâmica no processo de sedimentação na área central do corpo lacustre. A fração silte é a classe dominante, com variação de diâmetro entre médio a grosso em todas as amostras, sendo mais

comum a ocorrência da fração areia em relação à argila, que apresentou baixa concentração, não ultrapassando 9% (Fig. 4). Deste modo, é possível classificar texturalmente os sedimentos de acordo com Folk (1957), como silte médio a grosso.

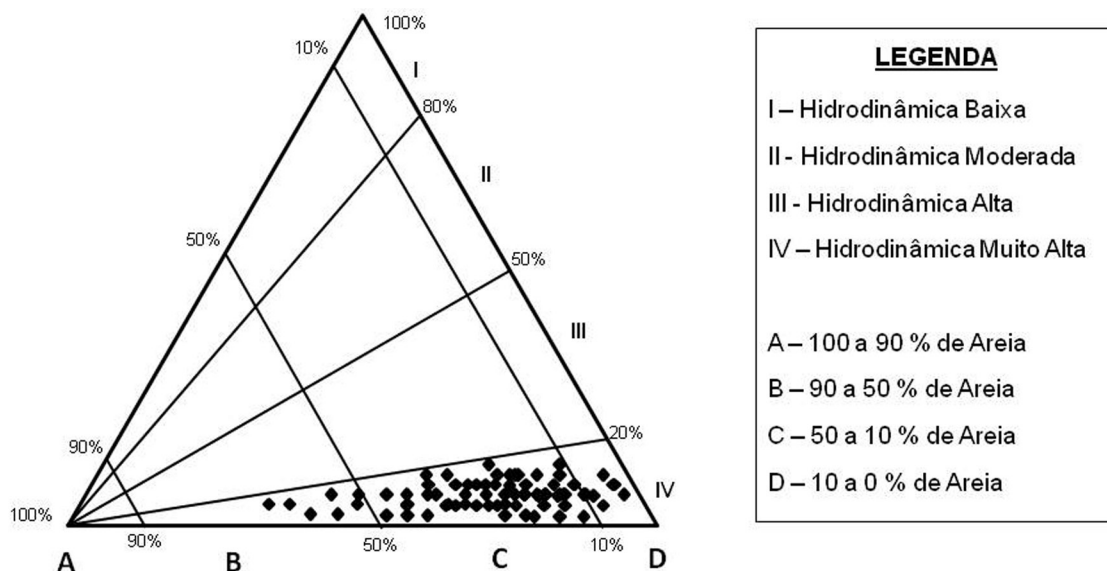


Figura 4. Diagrama triangular de Pejrup com a representação das amostras dos testemunhos C1, C2 e C3.
Figure 4. Pejrup triangular diagram with the sampling representation of cores C1, C2 and C3.

4 Discussão dos resultados

4.1 Taxa de sedimentação

A avaliação das taxas de sedimentação na Lagoa Itapeva demonstra que o setor sul apresenta maior deposição de sedimentos em relação aos demais pontos avaliados, sendo que o testemunho C3 apresentou valor na ordem de $3,2 \pm 0,4 \text{ mm.a}^{-1}$. Este valor pode ser creditado à maior profundidade da lagoa neste ponto reduzindo a agitação no fundo provocada por ondas e, assim, facilitando a deposição neste local (Fig. 2). Além disso, esta área é influenciada diretamente pela drenagem do Rio Três Forquilhas, o principal supridor de sedimentos terrígenos para o interior da lagoa, o que somado a influência batimétrica proporciona maior sedimentação.

O Testemunho C2 (centro) apresentou a menor taxa de sedimentação com valor de $2,4 \pm 0,3 \text{ mm.a}^{-1}$, podendo ser creditado este comportamento principalmente a menor efetividade do Rio Cardoso em transportar sedimentos para o setor central da lagoa.

O resultado do testemunho C1 (norte) apresentou taxa de sedimentação de $2,9 \pm 0,2 \text{ mm.a}^{-1}$, valor este menor em relação ao sul da lagoa, porém um maior em relação à área central. Este comportamento é esperado devido a sua posição geográfica mais abrigada do vento, sugerindo que neste ambiente existe menor agitação na superfície d'água e, portanto, mais facilidades para a deposição sedimentar em relação ao centro da lagoa. Tal processo de sedimentação está em acordo com os resultados granulométricos obtidos por Ivanoff *et al.* (2014), que identificaram maior concentração

de sedimentos lamosos e de matéria orgânica nesta porção do piso lacustre.

Resultados referentes à taxa de sedimentação em trabalhos realizados em outras lagoas da planície costeira do Estado são similares aos valores encontrados na Lagoa Itapeva, sendo que, de um modo geral, demonstram que a natureza da sedimentação apresenta ordem de grandeza de poucos milímetros por ano.

Medeanic *et al.* (2010) obtiveram o valor de 4,2 mm.a⁻¹ para a Laguna de Tramandaí, um corpo lagunar que está inserido na mesma Bacia Hidrográfica da Lagoa de Itapeva. A maior taxa de sedimentação neste local da bacia hidrográfica foi creditada à maior proximidade do oceano que, devido à intrusão salina, ocasiona a floculação dos depósitos deltaicos.

As taxas de sedimentação de curto período, calculadas pelo método ²¹⁰Pb, em sedimentos presentes no topo de dois testemunhos da Lagoa dos Patos RS, indicam valores entre 3,5 a 8,3 mm.ano⁻¹ (Martins *et al.*, 1989), e, em estudo mais recente realizado no estuário da mesma lagoa por Niencheski *et al.* (2014), foi estimado também por ²¹⁰Pb uma taxa de sedimentação local na ordem de 3 mm.ano⁻¹.

Nichols (1989) apresentou resultados referentes à taxa de sedimentação de curto prazo em 22 lagoas costeiras na costa leste dos EUA e Golfo do México, onde os padrões batimétricos com profundidades menores que 3 m se assemelham à Lagoa Itapeva, bem como o tipo de clima associado às zonas de baixas a médias latitudes. Os resultados mostram valores entre os extremos de 0,3 mm.a⁻¹ em Chincoteague, no estado norte-americano de Virginia, para 110 mm.a⁻¹ em depósitos deltaicos de Atchafalaya localizada no estado de Louisiana, Estados Unidos.

Taxas de sedimentação relativamente altas (> 5,6 mm.a⁻¹) são típicas de lagoas com setores de ativa sedimentação deltaica, por exemplo, Apalachicola localizada no Estado da Flórida (EUA) e Leste Matagorda no Estado norte-americano do Texas (Nichols, 1989). Segundo este trabalho os valores encontrados para a maioria das lagoas (70%) variam dentro de limites de 0,7 a 5,0 mm.a⁻¹ e taxa média de 3,4 mm.a⁻¹, sendo esta média semelhante à taxa média de sedimentação encontrada na Lagoa Itapeva. Mais resultados referentes à taxa de sedimentação de lagoas costeiras onde o mesmo método geocronológico foi aplicado podem ser verificados na tabela 2.

Tabela 2. Exemplos de taxas de sedimentação obtidas pelo método ²¹⁰Pb em ambiente lagunar (*média).

Table 2. Examples of sedimentation rates obtained through the ²¹⁰Pb method in a lagoon environment (*average).

Localização	Taxa de sedimentação (mm.a ⁻¹)	Zona Climática	Referência
Laguna Berre, França	5,5 - 7,5	Temperada	Robert <i>et al.</i> (2006)
Laguna de Venezia, Itália	1,4 - 1,8	Temperada	Cochran <i>et al.</i> (1998)
Laguna Thau Basin, França	1,6 - 2,1	Temperada	Monna <i>et al.</i> (1996)
Laguna Great Sound, EUA	1,8 - 5,4	Temperada	Carson <i>et al.</i> (1988)
Laguna Rhode Island, EUA	0,06 - 2,1	Temperada	Boothroyd <i>et al.</i> (1985)
Laguna Rehoboth, EUA	2,6 - 3,0	Temperada	Beasley (1987)
Laguna Apalachicola, EUA	6,0*	Temperada	Donoghue (1987)
Laguna Mobile, EUA	5,6*	Temperada	Ryan & Goodell (1972)
Laguna Point Judit, EUA	3,7 - 5,0	Temperada	Boothroyd <i>et al.</i> (1985)
Laguna Wachapreague, EUA	3,1*	Temperada	Oertel <i>et al.</i> (1989)
Laguna Las Matas, México	3,0 - 3,4	Tropical	Ruiz <i>et al.</i> (2012)
Laguna Oualidia, Marrocos	6,0 - 10,0	Temperada	Zourarah <i>et al.</i> (2007)

A avaliação do espaço interno da lagoa através da interpolação das cotas batimétricas resultou em um volume de aproximadamente 194,27 x 10⁶ m³. Com o volume conhecido, pode-se estimar o tempo necessário para o soterramento da Lagoa Itapeva, tendo como referência o valor médio das taxas de sedimentação nos três testemunhos segundo a equação 2:

$$Tp = V / (S \cdot A) \quad (\text{Eq. 2})$$

onde *Tp* é a taxa de preenchimento em anos, *V* é o volume do piso lacustre em m³, *S* é a taxa de sedimentação em m.ano⁻¹ e *A* é a área em m².

Considerando as condições atuais relativas às taxas de sedimentação e o volume interno disponível para acomodação de sedimentos, a Lagoa Itapeva poderá estar totalmente soterrada em aproximadamente 500 anos. No entanto, este tempo de preenchimento, dependerá de condições deposicionais estáveis ao longo do tempo, como taxa de deposição constante, efeitos de compactação do sedimento, inexistência de subsidência da bacia ou oscilação eustática do nível do mar.

4.2 Análise granulométrica

A classificação das amostras de sedimentos

dos testemunhos no diagrama de Pejrup (1988) indica a existência de elevada energia hidrodinâmica durante o processo de sedimentação uma vez que todas as amostras encontram-se classificadas no campo IV do diagrama (Fig. 4), distribuição esta controlada pela presença de tamanhos de grão areia e silte nestas amostras.

A análise granulométrica também demons-

trou oscilações da energia hidrodinâmica na deposição ao longo do tempo, sendo que o testemunho C1 apresentou *granocrescência* entre os 10 e 15 cm (Fig. 5A), assim como o testemunho C2 (Fig. 5B) que também apresentou redução de lammas *na profundidade de 15 cm, mas com granodecrescência* aos 5 cm.

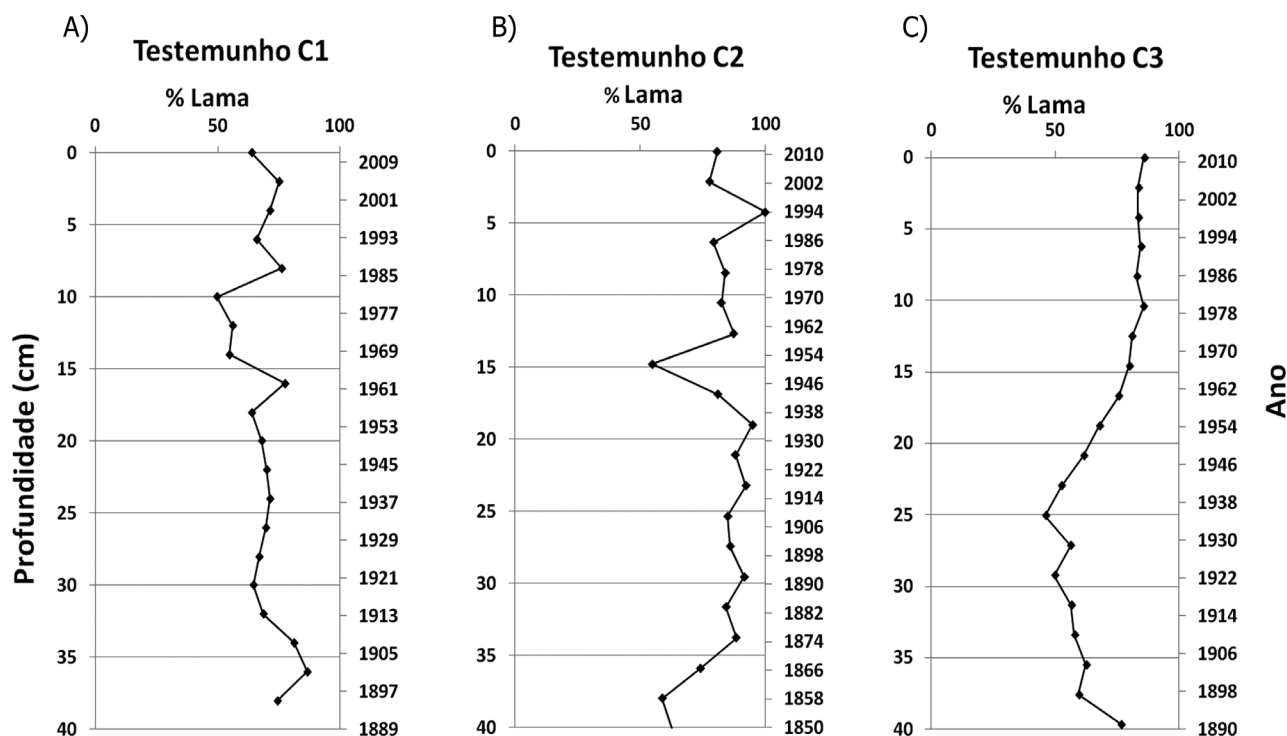


Figura 5. Percentual de lama, comprimento e idade estimada para os testemunhos. A) Testemunho C1; B) Testemunho C2; C) Testemunho C3.

Figure 5. Mud percentage, length and estimated age for the cores. A) Core C1; B) Core C2; C) Core C3.

Oscilações de classes granulométricas ao longo dos testemunhos são inerentes às variações do nível d'água, que, em períodos de menor profundidade, promovem maior agitação hidrodinâmica no fundo dificultando a deposição de lammas. Entretanto, a análise do testemunho C3 (Fig. 5C), a partir dos últimos 25 cm, mostra um significativo aumento de deposição de sedimentos lammosos a partir de 1935.

Os resultados obtidos na análise granulométrica demonstram que a Lagoa Itapeva recebeu nos últimos anos maior carga de sedimentos finos no setor sul provenientes do Rio Três Forquilhas (Fig. 5C). Este padrão anômalo na sedimentação pode ser atribuído às modificações antropogênicas, tais como; acelerado processo de remoção do solo através da urbanização, construção de estradas, desmatamento e agricultura no sopé da encosta da Serra Geral, e em áreas adjacentes influenciadas pela bacia de drenagem que deságua na lagoa. Esses processos aumentam a produção de sedimentos e consequentemente as taxas de sedimentação

nas bacias de drenagem.

Tais modificações, observadas nas zonas ciliares da bacia hidrográfica, representam processos de degradação do solo principalmente em áreas com maior aptidão agrícola. A agricultura local, normalmente desenvolvida em pequenas propriedades junto à escarpa do Planalto Meridional, é praticada em terrenos com declividades acentuadas e, aliada à ausência de técnicas adequadas, promove o desmatamento de importantes resquícios da Mata Atlântica, contribuindo assim para o surgimento de processos erosivos (Fujimoto *et al.*, 2006).

As grandes oscilações ocorridas nos teores de lama para os últimos anos também estão associadas ao aumento da urbanização na região, ocorrido desde o final do século XIX, com a chegada de imigrantes alemães que se fixaram no vale do Rio Três Forquilhas e mais tarde a partir de 1940, através do surgimento do núcleo urbano onde hoje é o Município de Terra de Areia (Fujimoto *et al.*, 2006). A construção da rodovia BR-101, concluí-

da em 1968, deu ainda mais projeção ao pequeno povoado, à época ainda Distrito de Osório, ocasionando grande impulso na ocupação do município.

Este processo de alteração no regime de deposição de sedimentos também foi identificado na Lagoa dos Patos por Toldo Jr. *et al.* (2000), onde idades determinadas através de medidas por ^{14}C , em coletas de lamas holocênicas, apresentam uma taxa média, não compactada, de $0,52 \text{ mm.ano}^{-1}$, valor comparável aos $0,75 \text{ mm.ano}^{-1}$ obtido por informação estratigráfica. Porém as medidas de curto período, apresentadas por Martins *et al.* (1989) através de ^{210}Pb no topo dos mesmos testemunhos, mostram-se completamente diferentes daquelas de longo período, sendo quase 10 vezes maiores ($3,5$ a $8,3 \text{ mm.ano}^{-1}$). Estas alterações foram atribuídas ao desmatamento na bacia de drenagem, processo que se iniciou com a colonização europeia, há aproximadamente 150 anos.

4.3 Evolução lacustre

Ao correlacionar a elevação do nível relativo do mar (NRM) com as taxas de sedimentação em sistemas lacustres, observa-se que, um estado de equilíbrio entre estas duas variáveis determinaria um ambiente de preenchimento estacionário, ou seja, dominado pela deposição agradacional (Nichols, 1989). Neste caso, o balanço de massa de entrada e saída será equivalente, acrescido do valor depositado no fundo. Esta condição foi observada, por exemplo, na Baía de San Antonio (USA) onde os depósitos lagunares atingem 24 m de espessura e sugerem que a laguna persistiu no mesmo local nos últimos 9.500 anos (Shepard & Moore, 1960).

Por outro lado, se o aporte de sedimentos for superior ao aumento do nível relativo do mar haverá uma tendência de redução do espaço de acomodação induzido pela acumulação de sedimentos acelerando o processo de colmatção (Fig. 6).

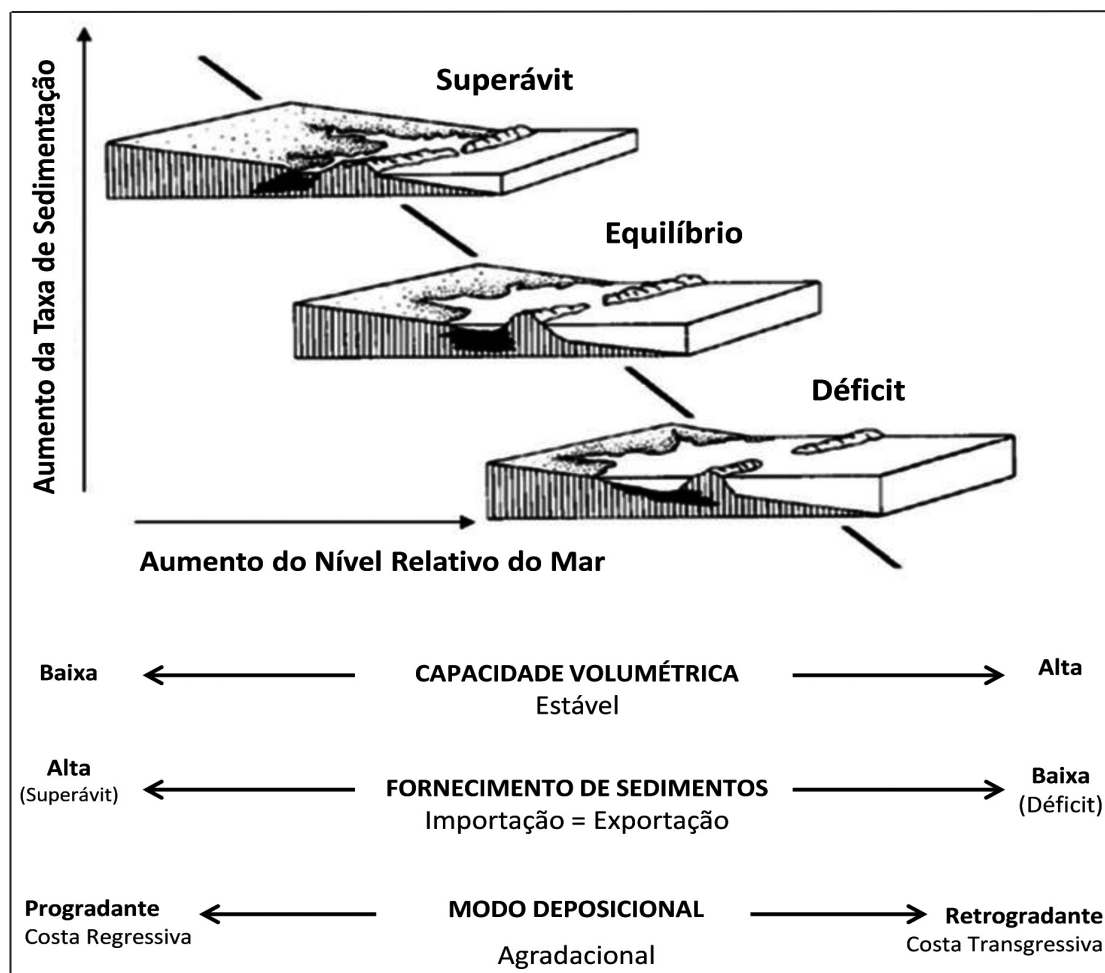


Figura 6. Modelo ilustrativo do estado de acreção contínua em uma lagoa, de um superávit para um déficit, em função do aumento da taxa de sedimentação e aumento do nível relativo do mar (Modificado de Nichols, 1989).

Figure 6. Illustrative model of continuous accretion state in a lake, from a surplus to a deficit, due to an increase of the sedimentation rate and increase in the relative sea level (Modified from Nichols, 1989).

Entretanto, os dados globais de elevação do NRM contidos no relatório AR4 do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima, IPCC (2007)

apontam que entre 1961 e 2003 o nível médio do mar subiu a uma taxa média de $1,8 [1,3-2,3] \text{ mm}$ por ano a nível global, e posteriormente apresen-

tou uma elevação de 3,1 [2,4-3,8] mm por ano para o período de 1993 a 2003.

Desta forma, a atual tendência de elevação do NRM nas últimas décadas ocasionaria uma alteração no tempo de preenchimento da lagoa. Considerando o suprimento de sedimentos depositados na Lagoa Itapeva, no período de 1961 a 1993, tais valores teriam capacidade de preencher a lagoa, devido ao saldo positivo entre a taxa de sedimentação (valor médio de 2,8 mm.ano⁻¹) e o aumento relativo do mar (1,8 mm.ano⁻¹). O cenário da evolução neste período levaria à colmatação lacustre mesmo com o nível do mar em ascensão, devido ao superávit de 1,0 mm/ano quando relacionado à taxa média de sedimentação. Desta forma, elevaria o tempo necessário de colmatação para 1.554 anos, diferentemente dos valores iniciais que não levam em consideração a mudança do nível do mar.

Porém, os valores de elevação do nível do mar entre 1993 a 2003, na ordem de 3,1 mm.ano⁻¹, apontam para um cenário de diminuição no processo de soterramento lacustre. Tal situação pode inclusive levar a um déficit acrescionário, uma vez que a sedimentação média é de 2,8 mm.ano⁻¹, como ocorrido na Laguna de Matagorda, onde a ascensão do nível do mar é relativamente rápida (5 mm.a⁻¹) e a taxa de sedimentação é de apenas 0,7 mm.a⁻¹ criando um déficit de 4,3 mm.a⁻¹ (Wright, 1980).

A avaliação da elevação do NRM em caráter regional demonstra que a variação do nível do mar no litoral brasileiro, segundo Moita & Wainer (2005), foi da ordem de 2,48 mm.ano⁻¹ para o período entre 1993 e 2005; os dados da reconstrução histórica mostram uma taxa de 2,27 mm.ano⁻¹ para o período de 1950 a 2001 e os modelos climáticos apontam para uma taxa de aumento do nível do mar para o período de 2001 a 2100 de 5,15 mm.ano⁻¹. Assim, em se confirmando estas estimativas, o volume da bacia onde os sedimentos podem ser armazenados aumentaria ainda mais, gerando um déficit na taxa de sedimentação em relação à taxa de criação de espaço.

Portanto, ao verificar os valores de elevação do NRM, tanto em nível regional quanto nível global, percebe-se uma clara tendência de aumento de espaço de acomodação interna de sedimentos na lagoa em se considerando os dados já mensurados bem como as projeções para as próximas décadas.

5 Conclusões

As taxas de sedimentação da Lagoa Itapeva apresentam valores na ordem de poucos milímetros ao ano, sendo influenciadas, principalmente,

pela presença da drenagem do Rio Três Forquilhas, onde a proximidade da desembocadura fluvial aumenta sensivelmente as taxas de sedimentação.

O padrão batimétrico influencia na sedimentação de forma que nas partes rasas a fricção no fundo, induzida pelas ondas, dificulta a deposição de sedimentos lamosos. Tal processo é inferido a partir das propriedades texturais dos sedimentos indicando aumento de energia hidrodinâmica de forma que a concentração do tamanho argila não ultrapassa 9% nos testemunhos.

O aumento do teor de lamelas para os últimos anos na coluna sedimentar representativa da porção sul da lagoa sugere que as modificações na bacia de drenagem do Rio Três Forquilhas têm aumentado a produção de sedimentos que depositam no fundo lacustre. A urbanização e a introdução da agricultura no último século são as possíveis variáveis que explicam este comportamento.

A análise da taxa de sedimentação revelou que os valores encontrados nesta lagoa se assemelham aos valores encontrados em outros corpos costeiros do Estado, bem como em outras lagoas de condições climáticas similares. Além disso, as taxas médias de sedimentação mostram-se inferiores aos valores de elevação recente do nível do mar e das projeções para as próximas décadas, sugerindo um cenário de estabilização e, futuramente, de déficit na taxa de sedimentação, com consequente redução do tempo de preenchimento do corpo lacustre.

Referências

- Appleby, P.G. & Oldfield, F. 1978. The calculation of lead-210 dates assuming constant rate of supply ²¹⁰Pb to sediment. *Catena*, 5: 1-8.
- Beasley, E.L. 1987. *Change in diatom assemblage of Rehoboth Bay, Delaware and the environmental implications*. Wilmington, 209p. PhD. Thesis, College of Earth, Ocean, and Environment University of Delaware, Newark, USA.
- Boothroyd, J.C., Friedrich, N.E. & McGinn, S.R. 1985. Geology of Microtidal Coastal Lagoons: Rhode Island. *Marine Geology*, 63: 35-76.
- Carson, B., Ashley, G.M., Lennon, G.P., Weisman R.N., Nadeau, J.E., Jo Hall, M., Faas, R.W., Zeff, M.L., Grizzle, R.E., Schuepfer, F.E., Young, C.L., Meglis, A.J., Carney, K.F. & Ralph G. 1988. Hydrodynamics and Sedimentation in a Back-Barrier Lagoon-Salt Marsh System, Great Sound, New Jersey a Summary. *Marine Geology*, 82: 123-132.
- Cochran, J.K., Frignani, M., Salamanca, M., Bellucci, L.G. & Guerzoni, S. 1998. Lead-210 as a tracer of atmospheric input of heavy metals in the northern Venice Lagoon. *Marine Chemistry*, 62: 15-29.
- Dillenburg, S.R., Tomazelli, L.J. & Barboza, E.G. 2004.

- Barrier evolution and placer formation at Bujuru Southern Brazil. *Marine Geology*, 203: 43-56.
- Donoghue, J.E. 1987. Rapid sediment infilling of a delta-estuary complex, Apalachicola Bay, Florida. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 68: 17-74.
- ECOPLAN. Engenharia, Consultoria e Planejamento Ltda. 1997. *Avaliação da disponibilidade hídrica superficial e subterrânea do litoral norte do Rio Grande do Sul, englobando todos os corpos hídricos que drenam para o Rio Tramandaí*. Relatório Técnico Final. São Paulo. ECOPLAN, 432p.
- Folk, R.L. & Ward, W.C. 1957. Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27: 3-27.
- Fujimoto, N.S.V.M., Strohaecker, T.M., Gruber, N.L.S., Kunst, A.V. & Ferreira, A.H. 2006. Litoral norte do estado do Rio Grande do Sul: indicadores socioeconômicos e principais problemas ambientais. *Desenvolvimento e Meio ambiente*, 13: 99-124.
- Hasenack, H. & Ferraro, L.W. 1989. Considerações sobre o clima da região de Tramandaí, RS. *Pesquisas em Geociências*, 22: 53-70.
- IPCC. Intergovernmental Panel of Climate Change. 2007. *Climate Change 2007 Synthesis Report*. Cambridge University Press. Geneva, Switzerland, p 104.
- Ivanoff, M.D., Toldo Jr., E.E. & Figueira, R.C.L. 2014. Sedi- mentação da Lagoa Itapeva, RS, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 41: 03-13.
- Joshi, S.R. & Shukla, B.S. 1991. Derivation of formulations for ^{210}Pb dating of sediments. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 148(1): 73-79.
- Kjerfve, B., Ribeiro, C.H.A., Dias, G.T.M., Filippio, A. M. & Quaresma, V.S. 1997. Oceanographic characteristics of an impacted coastal bay: baía de Guanabara, Rio de Janeiro, Brazil. *Continental Shelf Research*, 17(13): 1609-1643.
- Martins, I.R., Villwock, J.A., Martins, L.R. & Benvenuti, C.E., 1989. The Lagoa dos Patos Estuarine Ecosystem. *Pesquisas em Geociências*, 22: 5-44.
- Medeanic, S., Hirata, F. & Dillenburg, S.R. 2010. Algal Pal- ynomorphs Response to Environmental Changes in the Tramandaí Lagoon, Southern Brazil, and Climatic Oscillations in the 20th Century. *Journal of Coastal Research*, 26(4): 726-735.
- Moita, D. & Wainer, I. 2005. Estudo da Variação do Nível do Mar na Região do Atlântico Sudoeste. In: Congresso Brasileiro de Oceanografia, 2., 2005, Vitória. *Anais...* Vitória, CBO, v. 2, p. 1-10.
- Monna, F., Mathieu, D., Marques Jr., A.N., Lancelot, J. & Bernat, M. 1996. A comparison of PERALS to alpha spectrometry and beta counting: a measure of the sedimentation rate in a coastal basin. *Analytica Chimica Acta*, 330: 107-115.
- Nichols, M. 1989. Sediment Accumulation Rates and Relative Sea-Level Rise in Lagoons. *Marine Geology*, 88: 201-219.
- Niencheski, L.F., Moore, W.S. & Windom, H.L. 2014. History of human activity in coastal southern Brazil from sediment. *Marine Pollution Bulletin*, 78: 209-212.
- Oertel, G.F., Kearney, M.S., Leatherman, S.P. & Woo, H.J. 1989. Anatomy of a barrier platform: outer barrier lagoon, southern Delmarva Peninsula, Virginia. Physical Processes and Sedimentology of Siliciclastic-Dominated Lagoonal Systems. *Marine Geology*, 88: 303-318.
- Oldfield, F. & Appleby, P.G. 1984. Empirical testing of ^{210}Pb -dating models for lake sediments. In: Hayworth, E.Y. & Lund, J.W.G. (Eds.). *Lake Sediments and Environmental History*. Leicester University Press, Leicester, p. 93-124.
- Pejrurp, M. 1988. The triangular diagram used for classification of estuarine sediments a new approach. In: Boer, P.L., Van Gelder, A. & Nio, S.D. (Eds.). *Tide-Influenced Sedimentary Environments and facies*. Dordrecht, Reidel Publishing, p. 289-300.
- Rangarajan, C., Madhavan, R. & Gopalakrishnan, S.S. 1986. Spatial and temporal distribution of lead-210 in the surface layers of the atmosphere. *Journal of Environmental Radioactivity*, 3: 23-33.
- Robert, C., Degiovanni, C., Jaubert, R., Leroy, V., Reyss, J.L., Saliège, J.F., Thouveny, N. & Vernal, A. 2006. Variability of sedimentation and environment in the Berre coastal lagoon (SE France) since the first millennium: Natural and anthropogenic forcings. *Journal of Geochemical Exploration*, 88: 440-444.
- 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.
- Ruiz, F.A.C., Sprovieri, M., Piazza, R., Frignani, M., Sanchez-Cabeza, J.A., Feo, M.L., Bellucci, L.G., Vecchiato, M., Pérez-Bernal, L. H. & Páez-Osuna, F. 2012. ^{210}Pb -derived history of PAH and PCB accumulation in sediments of a tropical inner lagoon (Las Matas, Gulf of Mexico) near a major oil refinery. *Geochemical et Cosmochimica Acta*, 82: 136-153.
- Ryan, J.J. & Goodell, H.G. 1972. Marine geology and estuarine history of Mobile Bay, Alabama. *Geological Society of America Memoirs*, 133: 517-554.
- Shepard, F.P. 1954. Nomenclature Based on Sand-Silt-Clay Ratios. *Journal of Sedimentary Petrology*, 24: 151-158.
- Shepard, F.P. & Moore, D.G. 1960. Bays of central Texas coast. In: Shepard, F.P., Phleger, F.B. & Van Andel, T.H. (Ed.). *Recent Sediments of Northwest Gulf of Mexico*. Oklahoma, Tulsa, p. 117-152.
- Strahler, A.N. & Strahler, A.H. 1987. *Modern Physical Geography*. John Willey and Sons, New York. 488 p.
- Toldo Jr., E.E., 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., Dillenburg, S.R. & Villwock, J.A. 2000. Late Quaternary geological history of Rio Grande do Sul coastal plain, southern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(3): 470-472.
- Turekhian, K.K., Nozaki, Y. & Benninger, L.K. 1977. Geochemistry of atmospheric radon and radon products. *Earth and Planetary Science Letters*, 5: 227-255.

- Zourarah, B., Maanan, M., Carruesco, C., Aajjane, A., Mehdi, K. & Conceição Freitas, M. 2007. Fifty-year sedimentary record of heavy metal pollution in the lagoon of Oualidia (Moroccan Atlantic coast). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 72: 359-369.
- Wright, S.S. 1980. *Seismic stratigraphy and depositional history of Holocene sediments on the Texas Gulf Coast*. Texas, 123p. PhD. Thesis, Marine Science Institute, University of Texas, USA.

Manuscrito 623

Editores: Editores: Eduardo G. Barboza & Paulo A. Souza