

Idades de deposição dos sedimentos da falésia de Itaguapé (Bertioga-SP) determinadas por luminescência opticamente estimulada

Depositional ages from Itaguapé outcrop (Bertioga-SP) sediments by optically stimulated luminescence

Carlos Conforti Ferreira Guedes^{ad}, Vinícius Ribau Mendes^{be}, Paulo César Fonseca Giannini^{bf},
André Oliveira Sawakuchi^{bg}, Luciana Nogueira^{bh}, Francisco S Buchmann^{ci}

^aUniversidade Federal do Paraná – UFPR, Departamento de Geologia, ^bLaboratório de Espectrometria Gama e Luminescência (Legal) - Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo, ^cLaboratório de Estratigrafia e Paleontologia (Lep) - Instituto de Biociências – Universidade Estadual Paulista,

^dccfguedes@gmail.com, ^erebigeo@gmail.com, ^fpcgianni@usp.br, ^gandreas@usp.br, ^hluciana.mailme@gmail.com,
ⁱpaleonchico@yahoo.com.br

Resumo

A região da foz do rio Itaguapé, localizada no Parque Estadual da Restinga de Bertioga-SP, apresenta uma miscelânea de processos sedimentares e formas de leito atuais gerados pela ação de marés, ondas e do próprio rio. Ocorrem também depósitos sedimentares quaternários expostos ao longo de falésia de dezenas de metros de extensão por até 4m de altura, formados por processos de ondas análogos aos observados na praia adjacente. Seus depósitos sedimentares são compostos por areias finas, moderadamente a bem selecionadas, com estratificação plano-paralela, tendo em sua porção inferior (~0,5m) icnofósseis de *Ophiomorfa nodosa* (galerias de *Callichirus* sp.). Esta sucessão sedimentar é indicativa de deposição sob o espraiamento de ondas, em condições regressivas, e com nível relativo do mar cerca de 1,4±1,0m acima do atual, estimado pela comparação da cota máxima de ocorrência da *O. nodosa* com o topo da biozona de *Callichirus* vivente. Duas amostras de sedimentos (Ber-01, basal, e Ber-02, topo) foram datadas por luminescência opticamente estimulada (LOE), com o uso do protocolo *Single Aliquot Regeneration-dose* (LOE-SAR). O método geocronológico por LOE-SAR indica, por premissa, a idade de última exposição à luz solar que, nesse caso, é a idade de deposição do sedimento. As medidas de dose equivalente ou paleodose obtidas em 18 (Ber-01) e 20 (Ber-02) alíquotas apresentaram baixos valores de dispersão (7,8% e 7,5%, respectivamente), calculados pelo parâmetro *overdispersion* de distribuição de dados. Esta baixa dispersão é o melhor indicador de que as amostras foram fotoesvaziadas previamente à deposição e soterradas com sinal LOE residual próximo de zero, e que, portanto, os processos de mistura pós-deposicionais são negligenciáveis para a interpretação dos resultados. As idades (Ber-01: 4,4±0,3 ka e Ber-02: 3,6±0,2 ka) são estratigraficamente coerentes e, além disso, compatíveis com as curvas do nível relativo do mar mais aceitas para a região, o que eleva a confiabilidade dos resultados.

Palavras-chave: Holoceno; datação; nível relativo do mar.

Abstract

The Itaguapé River mouth region, located in “Parque Estadual da Restinga de Bertioga-SP”, is frequently used for didactic classes in sedimentary geology and related areas. It presents a miscellany of sedimentary processes and bed forms generated by the action of tides, waves and the river. Quaternary sedimentary deposits outcropping along a cliff with tens of meters of extension and up to 4m in height formed by beach processes, similar to those observed at the beach nearby. The deposits are composed of fine, moderately to well-selected sands with plane-parallel stratification, presenting in their lower portion (~ 0.5m) *Ophiomorfa nodosa* (*Callichirus* sp. galleries) ichnofossils. This sedimentary succession is indicative of deposition in the swash zone, in a regressive condition, and with a relative sea level around 1.4±1.0 m above the present, estimated by comparing the maximum level of *O. nodosa* occurrence with the top of the living *Callichirus* biozone. Two sediment samples (Ber-01, basal, and Ber-02, top) were dated by optically stimulated luminescence (OSL) using the *Single Aliquot Regeneration-dose* (OSL-SAR) protocol. Luminescence geochronological methods indicates, on the premise, the age of last exposure to sunlight, which, in this case, is the age of sediment deposition. Equivalent dose measurements obtained at 18 (Ber-01) and 20 (Ber-02) aliquots presented low values of dispersion (7.8% and 7.5%, respectively), calculated by the overdispersion parameter of data distribution. This low dispersion values is the best indicator that samples were bleached prior to deposition and buried with near zero residual OSL signal, and, also, the post-depositional mixing processes are negligible for the interpretation of the results. The ages (Ber-01: 4,4±0,3 ky and Ber-02:

3,6±0,2 ky) are stratigraphically coherent and, in addition, compatible with the most accepted regional relative sea-level curves, which increases the reliability of the results.

Keywords: Holocene; dating; relative sea level.

1. Introdução

A foz do rio Itaguapé, localizada no Parque Estadual da Restinga de Bertioga-SP (figura 1), é uma região de grande relevância para ensino e pesquisa em geologia sedimentar, já que apresenta processos sedimentares costeiros (ondas, correntes e marés) e fluviais atuantes, lado a lado com depósitos sedimentares quaternários formados por processos análogos, expostos em uma falésia (figura 1). A determinação da idade de deposição dos sedimentos da falésia, formada pela ação erosiva do rio e das ondas do mar, é primordial para a correta caracterização geológico-geomorfológica deste local que, por sua vez, é fundamental para entender o desenvolvimento da planície costeira paulista e para as aulas de campo, voltadas ao Quaternário costeiro, ali realizadas. Dada à ausência de material orgânico sindeposicional, o método mais apropriado para a obtenção da idade do depósito é a Luminescência Opticamente Estimulada (LOE). O método de datação por LOE vem sendo amplamente utilizado, com sucesso, na última década em sedimentos continentais e costeiros no Brasil (Giannini *et al.* 2007, Araujo *et al.* 2008, Sawakuchi *et al.* 2008, Tatumi *et al.* 2008, Tsoar *et al.* 2009, Feathers *et al.* 2010, Sallun & Suguio 2010, Soares *et al.* 2010, Guedes *et al.* 2011, Bueno *et al.* 2012). Nos últimos anos, com a aplicação do protocolo *Single Aliquot Regeneration-dose* (SAR), os resultados passaram a apresentar alta confiabilidade, com validação por diversos testes intrínsecos ao protocolo bem como por outros métodos geocronológicos (Banerjee *et al.* 1999, Murray & Wintle 2000, Wintle & Murray 2006). Este trabalho propõe-se a datar os depósitos sedimentares da falésia da foz do rio Itaguapé por LOE-SAR, cujo significado é, por premissa do método, a idade da última exposição à luz solar, nesse caso, a idade de deposição do sedimento. Os resultados são discutidos com relação a sua confiabilidade, processos deposicionais e curvas de nível relativo do mar (NRM).

2. Área de Estudo

Os eventos que formaram a planície costeira de Bertioga são, de forma geral, os mesmos que atuaram na construção das planícies de cordões litorâneos de maior parte do Sul e Sudeste brasileiro (Suguio & Martin 1978a, 1978b, Lessa *et al.* 2010, Guedes *et al.* 2011, Souza 2016). Na planície de Bertioga, são reconhecidas ao menos duas gerações de planícies costeiras relacionadas aos dois últimos períodos de NRM acima e/ou próximos ao atual, com máximos em cerca de 120 ka e 6 ka (Suguio & Martin 1978a, 1978b, Souza 2007, 2015, figura 1). Embora se trate a rigor antes de unidades cronoestratigráficas do que litoestratigráficas (Giannini *et al.* 2009), essas gerações

foram inicialmente definidas como formações, a pleistocênica denominada Formação Cananeia (Suguio & Martin 1978a) e a holocênica, Formação Ilha Comprida (Suguio & Martin 1994), em substituição ao termo Formação Santos, que vinha sendo empregado informalmente (Suguio & Tessler 1992). O mapeamento dessas duas gerações de depósitos apresentou, historicamente, divergências (Suguio & Martin 1978a, Souza 2007, 2016), em vista dos diferentes critérios utilizados e evidências disponíveis para sua diferenciação. No clássico trabalho de Suguio & Martin (1978a), e seus mapas (Suguio & Martin 1978b), a distinção entre sedimentos holocênicos e pleistocênicos baseia-se em critérios como altitude, nitidez dos alinhamentos superficiais de “cristas praias” e grau de impregnação epigenética dos grãos (presença de “piçarras”, areias pardas escuras, subconsolidadas pela presença de cimento filossilicático-orgânico-ferruginoso, então admitida como evidência de idade mais antiga que o Holoceno). Na região de Bertioga, predominam, de acordo com os autores, depósitos holocênicos (figura 1), inclusive nas proximidades da foz do rio Itaguapé. Em mapeamento específico para a região de Bertioga, Souza (2007) mapeou ao todo 13 Unidades Geológico-Geomorfológicas Quaternárias (UQ) baseada em critérios geológicos, geomorfológicos e de cobertura vegetal original, incluindo quatro unidades de depósitos marinhos costeiros. Os depósitos marinhos são subdivididos pela autora com base em sua cota, posicionamento em relação à linha de costa e idade; este último critério, porém, sem que se apresentem dados geocronológicos. Desse modo, foram mapeadas duas unidades holocênicas e duas pleistocênicas. Uma unidade pleistocênica seria correlata à Formação Cananeia e outra, mais antiga, relacionada à Barreira II de Villwock *et al.* (1986). No mapa de Souza (2007), os depósitos próximos à foz do rio Itaguapé são mapeados como pleistocênicos (Formação Cananeia). As duas unidades holocênicas (cordões e terraços) são separadas por critérios como altitude e posicionamento com relação à linha de costa.

Idades absolutas dos depósitos da falésia foram obtidas por Martins (2009) e Souza (2015). Martins (2009) apresentou idades por termoluminescência (TL) e LOE holocênicas (7 ka). Entretanto, a autora cita incoerências do resultado de datação, sem especificar quais, como argumento para preteri-lo, em prol de evidências topográficas, pedológicas e biológicas que indicariam deposição durante o Pleistoceno. Souza (2016) datou, por ¹⁴C, a matéria orgânica presente no espodossolo da falésia. O resultado de 2.740–2.580 cal anos AP é interpretado como a idade do último processo pedogenético.

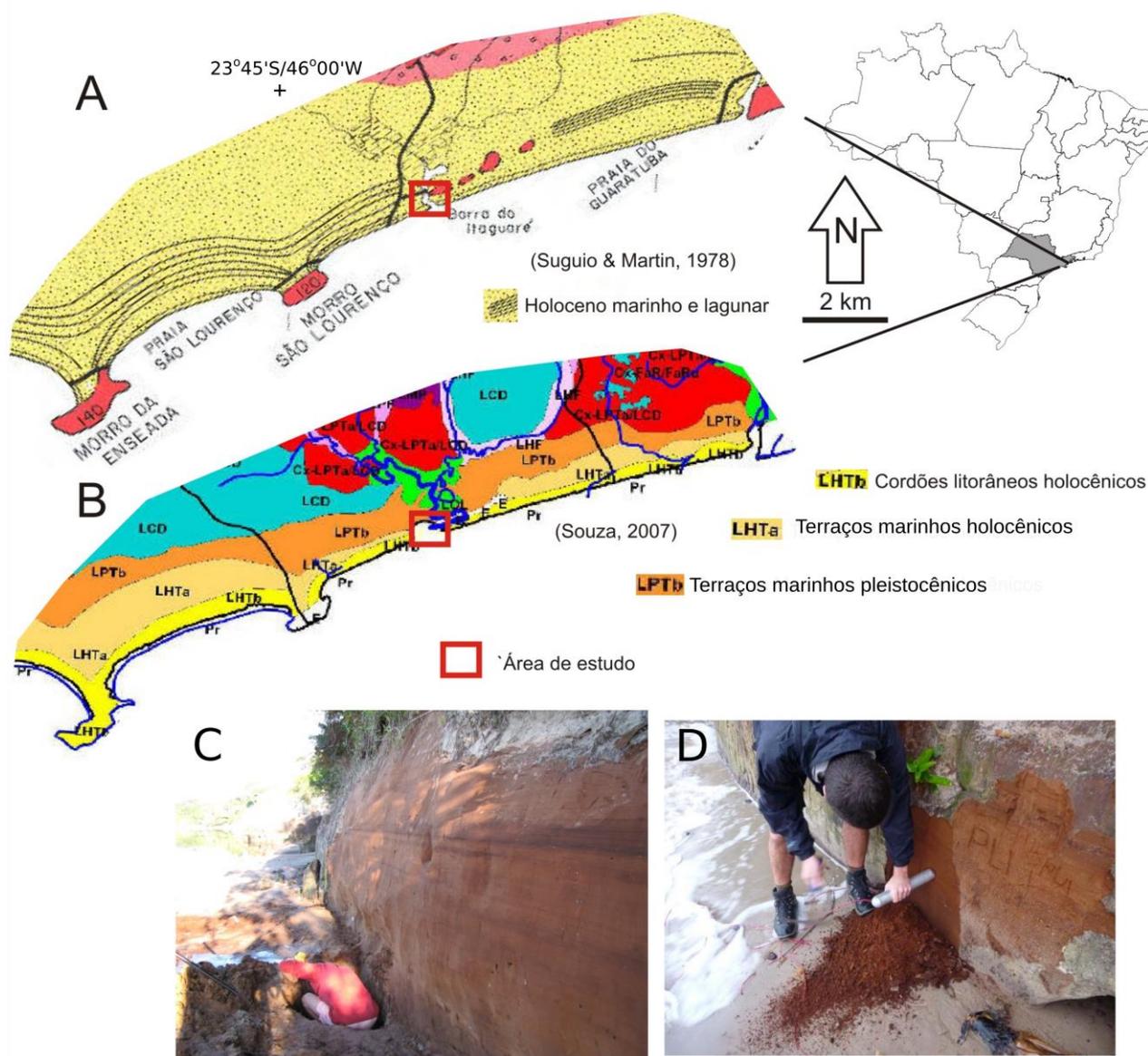


Figura 1: Localização e aspecto de campo da falésia próxima à foz do rio Itaguare (Bertioga-SP). A, B - Mapas geológicos com a interpretação da posição cronoestratigráfica dos sedimentos da falésia, segundo Suguio & Martin (1978b), em A (“Holoceno marinho e lagunar”), e Souza (2007), em B (“Terraços marinhos baixos pleistocênicos”). C - Vista geral da falésia. D - Amostragem para datação por LOE-SAR.

As divergências encontradas na literatura bem como a importância da correta interpretação desses depósitos reforçam a proposta deste trabalho: obtenção de idades confiáveis para a deposição dos sedimentos expostos na falésia de Itaguare.

3. Material e Métodos

Para datação por LOE-SAR, coletaram-se duas amostras em um mesmo ponto, com diferença na posição vertical (figura 2a). A amostra basal (Ber-01) foi coletada a 2,0 m de profundidade, em horizonte de solo B espódico (iluvial); a amostra Ber-02 foi extraída a 0,4 m de profundidade, em horizonte E alvíco (eluvial). Para estimativa do paleonível marinho, utilizaram-se tubos de *Ophiomorfa nodosa*, que ocorrem em meio a areias finas com estratificações plano-paralelas da base do afloramento. Estes icnofósseis são atribuídas ao decápodo talassinídeo *Callichirus* sp., crustáceo que vive em galerias

construídas na região entremarés de praias arenosas. Os icnofósseis foram nivelados com teodolito em relação ao seu nível homólogo atual, de acordo com método proposto por Angulo & Souza (2014). A incerteza associada ao posicionamento do indicador de NRM foi de $\pm 1,0$ m conforme sugerido por Angulo & Souza (2014).

O processamento analítico das amostras foi realizado no Laboratório de Espectrometria Gama e Luminescência (Legal) do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. A separação e a preparação dos grãos de quartzo para datações LOE foram realizadas sob luz vermelha, segundo os seguintes procedimentos: 1- peneiramento para separação de grãos entre 120 e 150 μ m; 2- tratamento com H₂O₂ 27%, para eliminação de matéria orgânica; 3- tratamento com HCl 3,75%, para eliminação de carbonatos; 4- ataque com HF 48-51% por 40 minutos, para eliminação do feldspato e da porção externa dos

grãos de quartzo atingidas pela radiação alfa; 5- tratamento com HCl, para eliminação de compostos residuais relacionados ao ataque de HF; 6- separação dos minerais leves dos pesados por flutuação em

solução de metatungstado de lítio (LMT- $(Li_6(H_2W_{12}O_{40}))$) à densidade de $2,75 \text{ g/cm}^3$; 7- separação entre quartzo e feldspato remanescente com solução de LMT à densidade de $2,62 \text{ g/cm}^3$.



Figura 2: Falésia amostrada. A- Posição das amostragens para datação LOE-SAR. B- Detalhe da porção inferior do afloramento, formado por areias finas com estratificações plano-paralelas, com horizonte basal rico em icnofósseis de *Ophiomorfa nodosa*.

O procedimento utilizado nesse trabalho, o *Single-Aliquot Regenerative-Dose* (SAR), proposto por Murray & Wintle (2000) e revisto por Wintle & Murray (2006) (quadro 1), é o mais aceito para a determinação da dose de radiação acumulada em grãos de quartzo. Consiste em comparar o sinal LOE natural com uma curva de dose-resposta obtida com o sinal de doses conhecidas (D1 a D4). Doses-teste (TDI) são aplicadas após cada medida LOE, como forma de corrigir a mudança na sensibilidade da amostra. O teste de variação de sensibilidade (*recycling ratio test*) é realizado na dose D5, com intensidade igual a D2, e tem o objetivo de verificar a efetividade da correção da variação de sensibilidade da amostra. A diferença entre os sinais de LOE corrigidos tem que ser inferior a 10%. O teste de recuperação (*recuperation test*) determina se a transferência de cargas de armadilhas profundas para as cargas sensíveis a LOE durante o pré-aquecimento, foi efetiva. Esse teste é realizado com a comparação entre o sinal da amostra zerada (D6=0) e da LOE natural, exigindo-se que o sinal da amostra zerada seja menor que 5% do sinal natural. Um teste de presença de feldspato é realizado comparando os sinais LOE corrigidos resultantes de mesma dose em ciclos diferentes, sem (D5) e com (D7) a estimulação infravermelha inicial. A razão entre os sinais precisa ser maior que 0,9.

A medida da taxa de dose anual de radiação foi realizada por espectrometria gama, em um detector de germânio de alta pureza (HPGe), com os seguintes procedimentos: 1- pesagem e secagem, para medir o teor de umidade; 2- embalagem e armazenamento em

recipientes plásticos por pelo menos duas semanas, com a finalidade de eliminar o desequilíbrio causado pelo escape de radônio; 3- medição da radiação de cada amostra por 12 horas no detector. A contribuição da radiação cósmica na taxa anual foi calculada de acordo com Barbouti & Rastin (1983) e Prescott & Stephan (1982), usando-se informações sobre latitude, longitude, altitude e profundidade de coleta, bem como sobre a densidade de cada amostra.

Quadro 1: Principais etapas do procedimento SAR usado na determinação de dose equivalente. O tempo de irradiação para cada dose foi variável para cada amostra sendo $D1 < D2 < D3 < D4$, $D5 = D1$, $D6 = 0$, $D7 = D4$ e dose-teste $TDi = D5/5$. Utilizou-se fonte de raios beta $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, com taxa de dose de $88 \pm 4,1 \text{ mGy/s}$

1. Dose (Di)
2. Pré-aquecimento a 200°C por 10 s
3. Medida da LOE a 125°C por 100 s (Ri)
4. Dose-teste (TDi)
5. Pré-aquecimento a 200°C por 10 s
6. Medida da LOE a 125°C por 100 s (Ti)
7. Determinação da sensibilidade de correção LOE $Li = Ri/Ti$

4. Resultados

4.1. Análise de fácies

A sucessão de depósitos sedimentares (figura 2b) é composta por duas fácies de areias finas, moderadamente a bem selecionadas (Cruz & Buchmann 2011), com séries decimétricas cuneiformes de estratificação plano-paralela. A fácies inferior, com cerca de $\sim 0,5\text{m}$ de espessura exposta, distingue-se da superior pela concentração de icnofósseis de *Ophiomorfa nodosa* (galerias de *Callichirus* sp.). As

duas fácies são lateralmente contínuas por toda a extensão da falésia, de aproximadamente 200 m.

4.2. Datação por luminescência opticamente estimulada

As idades obtidas (Tabela 1; Ber-01: $4,4 \pm 0,3$ ka e Ber-02: $3,6 \pm 0,2$ ka) para os depósitos estudados são estratigraficamente coerentes. Todas as alíquotas analisadas, de ambas as amostras, mostraram alta razão sinal/ruído e predomínio da componente rápida do sinal (figura 3). Essas características são também encontradas em outros sedimentos da costa Sul e Sudeste brasileira (Guedes *et al.* 2013). Tanto a alta razão sinal/ruído quanto o predomínio da componente rápida do sinal são desejáveis para datação por LOE-SAR, uma vez que aumentam a confiabilidade dos resultados. Outro importante fator no que diz respeito à confiabilidade das idades calculadas é a variação de dose entre as alíquotas de cada amostra, representada pelos valores de dispersão, calculados pelo parâmetro *overdispersion* de distribuição de dados. São consideradas confiáveis datações em que os valores de dispersão são inferiores a 30%. Sendo assim, os valores encontrados para as amostras datadas (Ber-01: 7,8% e Ber-02: 7,5%) podem ser considerados baixos e, portanto, indicam resultados confiáveis (figura 4a e 4b). Os testes sugeridos por Murray & Wintle (2000) para o protocolo LOE-SAR, como o teste de variação de sensibilidade (*recycling ratio test*) e o teste de recuperação (*recovery test*), foram plenamente satisfeitos por todas as alíquotas. A média do *recycling ratio* foi de 0,98, com variação de 0,87 a 1,05 (figura 4c) e ampla maioria das alíquotas (98%) dentro do intervalo limite (0,90 a 1,10). O mesmo ocorreu com o teste de recuperação, com média de 2,1 % (figura 4d). Não foi observado sinal luminescente durante a estimulação por infravermelho, o que demonstra a efetividade da preparação laboratorial na eliminação de feldspatos.

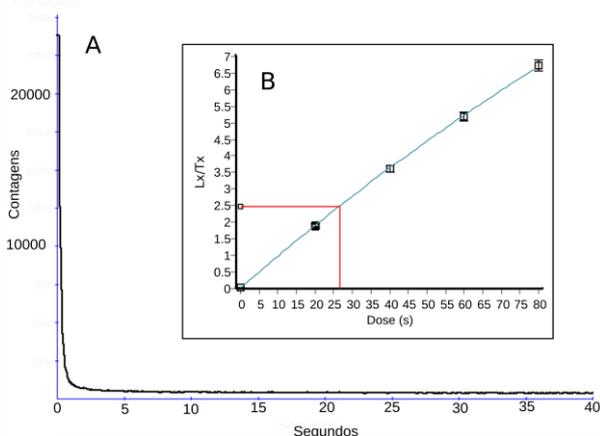


Figura 3. Características do sinal de luminescência opticamente estimulada. O gráfico A corresponde à contagem de fótons obtidas ao longo da estimulação por 40 s para o sinal natural de uma alíquota da amostra Ber-01. Notar a alta razão/ruído quando se comparam os segundos iniciais de estimulação, que correspondem ao sinal da componente LOE rápida, a mais adequada à datação por LOE-SAR, com os valores de fundo, últimos 10 s de exposição. Esse sinal natural obtido é padronizado por uma dose-padrão (dose-teste, ver

quadro 1) e comparado com a curva de dose-resposta obtida para essa mesma alíquota (gráfico B), obtendo-se assim a dose estimada de radiação acumulada.

5. Discussão

5.1. Confiabilidade e significado das idades obtidas

São duas as premissas principais na datação por luminescência. A primeira é que o sedimento deve sofrer fotoesvaziamento (liberação de cargas acumuladas no retículo cristalino por excitação causada pela luz), com boa exposição à luz solar (alguns minutos) e diminuição do sinal luminescente a valores residuais (muito próximos de zero). Atendidas estas condições, o resultado de datação obtido representa o tempo que o grão passou a acumular radiação ambiental, protegido da luz solar, e, pode, portanto, ser considerado representativo da idade de deposição do sedimento. A segunda premissa é que o mineral analisado, neste caso o quartzo, deva comportar-se como um dosímetro natural, isso é, o sinal luminescente do quartzo deve ser proporcional à radiação absorvida e, assim, à idade de deposição (Preusser *et al.* 2009).

Problemas com a premissa do fotoesvaziamento podem ocorrer em depósitos sedimentares formados por processos que atuaram por pouco tempo e/ou distância ou com baixa exposição à luz solar, como em águas profundas e/ou turvas (Preusser *et al.* 2009). Os processos sedimentares atuantes na deposição dos sedimentos analisados, espraiamento de ondas em intermarés, são tipicamente de mar raso, zona de antepraia, onde os sedimentos são constantemente expostos à luz solar. Uma forma de analisar se os depósitos sofreram fotoesvaziamento completo é pela curva de distribuição de dose equivalente medida em cada alíquota (figuras 4a e 4b). Caso o fotoesvaziamento tenha sido incompleto, o sinal residual de cada grão seria alto e com valores heterogêneos, o que resultaria em grande dispersão nos valores de dose equivalente entre as alíquotas. Para ambas as amostras (figuras 4a e 4b), a dispersão dos valores de dose equivalente em torno da média foi baixa, com baixos valores de desvio padrão e *overdispersion* (tabela 1). Assim, é possível considerar que os sedimentos sofreram fotoesvaziamento completo.

Para validar a segunda premissa, do quartzo como dosímetro natural, realizam-se testes de recuperação de dose equivalente, onde alíquotas do sedimento a ser datado são separadas e fotoesvaziadas completamente, à luz solar ou lâmpada ultravioleta (UV). Em seguida, são administradas doses de radiação conhecidas e as alíquotas são submetidas ao protocolo de datação (quadro 1). São aceitos como dosímetros naturais grãos em que a variação entre a dose administrada e a recuperada é inferior a 10%.

Os valores de concentração de radionuclídeos nos sedimentos (tabela 1) são bastante semelhantes aos de outros estudos na região (Martins 2009) e na costa paulista (Sawakuchi *et al.* 2008, Guedes *et al.* 2011).

Dessa forma, é pouco provável que modificações pós-deposicionais tenham alterado significativamente essas

concentrações e, assim, a taxa de dose anual de radiação ambiental.

Tabela 1: Resultado das datações por luminescência opticamente estimulada. O.D: *Overdispersion*.

Amostra	Prof. (m)	Dose (Gy)	O.D. (%)	K (%)	Th (ppm)	U (ppm)	Gamma (Gy/ka)	Beta (Gy/ka)	Taxa de dose cósmica (Gy/ka)	Taxa de dose total (Gy/ka)	Idade (ka)
Ber-01	2	2,38 ± 0,05	8	0,326 ± 0,017	0,525 ± 0,052	0,207 ± 0,022	0,116 ± 0,013	0,260 ± 0,031	0,1616 ± 0,0117	0,538 ± 0,036	4,4 ± 0,3
Ber-02	0,4	1,47 ± 0,03	7	0,134 ± 0,009	0,696 ± 0,055	0,179 ± 0,018	0,079 ± 0,009	0,129 ± 0,016	0,1965 ± 0,0143	0,404 ± 0,023	3,6 ± 0,2

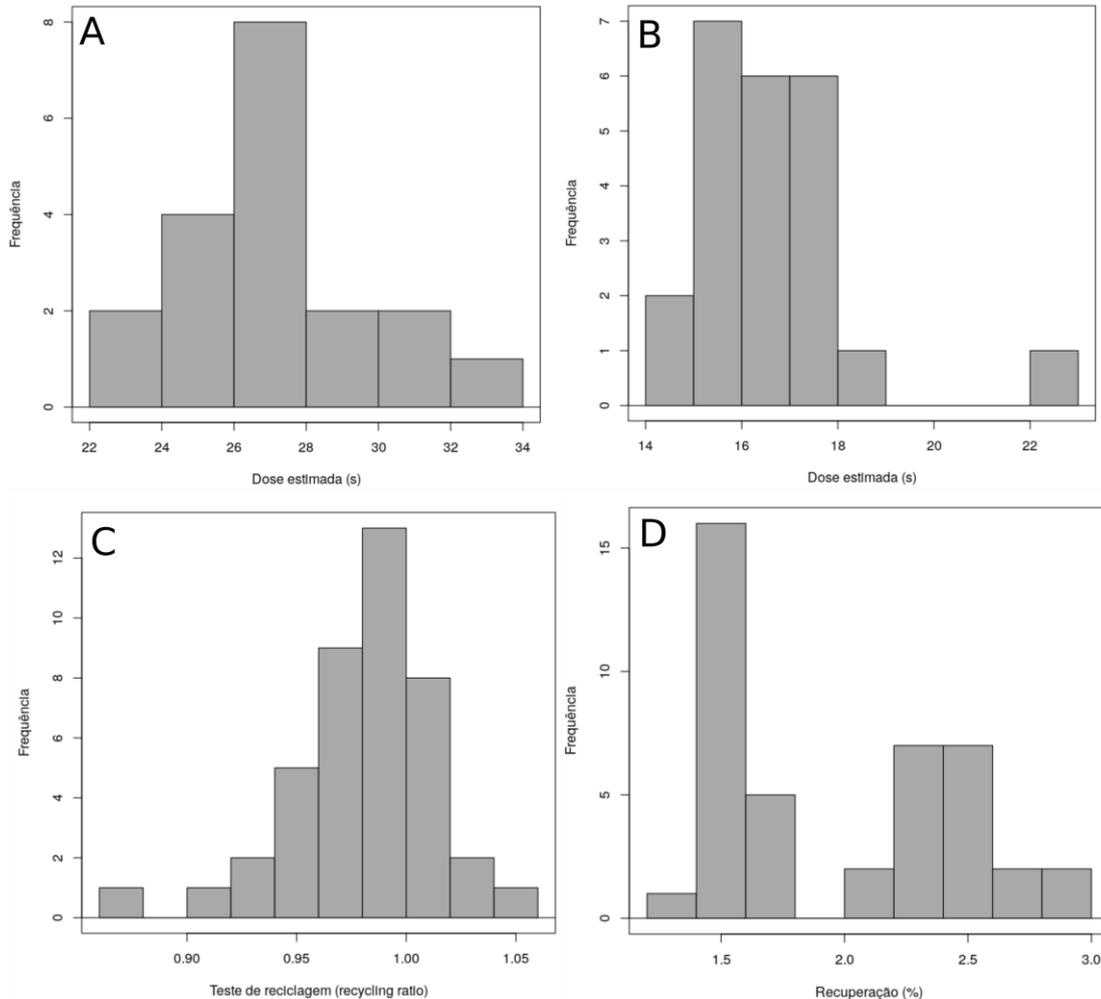


Figura 4: Histogramas de distribuição de resultados de medida de dose e de valores de testes. A e B: Dose (em segundos de irradiação no laboratório) das alíquotas das amostras Ber-01 e Ber-02, respectivamente. C: Teste de reciclagem para ambas amostras; notar que somente uma alíquota excedeu o intervalo limite (0,9 a 1,1) e, assim, não foi considerada para o cálculo da idade. D: Teste de recuperação para ambas as amostras; notar que o ganho de sinal pelo tratamento térmico é sempre inferior à 3% do sinal natural.

5.2. Idades LOE, NRM e processos pedogenéticos

Tanto as séries de estratificações plano-paralelas quanto a presença de icnofósseis interpretados como tubos de morada de *Callichirus sp.* (vulgarmente conhecido como corrupto) sugerem fortemente que os sedimentos encontrados na falésia foram depositados em zona de espraiamento. *Callichirus sp.* vive preferencialmente na zona de espraiamento de baixa mar, adjacente, rumo continente, à zona de arrebenção. Assim, a sucessão de fácies encontrada representa provavelmente a sobreposição de areias da

zona de espraiamento de baixa mar por areias de espraiamento de preamar, em um empilhamento regressivo. O nível relativo do mar pode ser estimado em cerca de $1,4 \pm 1,0$ m acima do atual, pela comparação da cota máxima de ocorrência do *O. nodosa* com o topo da biozona de *Callichirus* vivente. Mesmo com evidências de deslocamento vertical de parte do depósito na falésia em estudo da ordem de 0,2 m (Cruz & Buchmann 2011), interpretados como resultado de acomodação por sobrecarga (Cruz & Buchmann 2011) ou neotectônica (Cruz & Buchmann 2011, Souza 2015), esse deslocamento é menor que a margem de

erro do indicador de paleonível. A idade considerada para esse paleonível é a da amostra Ber-01, de $4,4 \pm 0,3$ ka (figura 5), e está compatível com a curva de nível relativo do mar de [Angulo et al. \(2006\)](#). Como não foram observadas superfícies de descontinuidade

deposicional, hiato ou erosão, é possível calcular a taxa de deposição entre as duas amostras. Entretanto, considerando a margem de erro das datações, os valores de taxa de deposição estimados (0,12 a 0,53 cm/a) possuem grande variação.

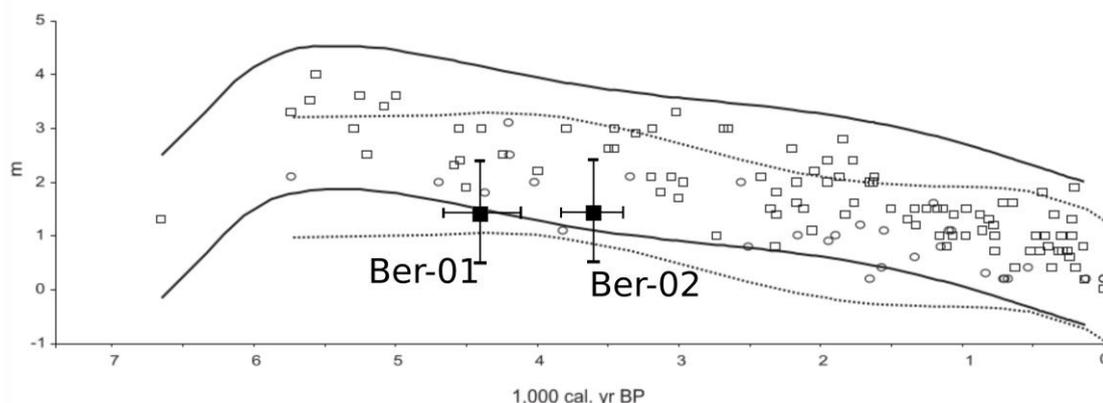


Figura 5: Envelope da curva do NRM para o setor da costa brasileira entre as latitudes 28°S e 3°N (linha sólida), de acordo com [Angulo et al. \(2006\)](#), e posição das amostras analisadas. O envelope tracejado refere-se à região costeira a sul da latitude 28°S. Considerando os erros associados de idade e elevação vertical, as amostras (23°45'S) são compatíveis com ambos os envelopes.

O desenvolvimento de espodosolos sobre estes depósitos, com formação de horizonte E álbico de até 2m de espessura, torna a exposição didática também sob o ponto de vista da pedologia. As idades de formação do espodosolo na área de estudo, de 2.740–2.580 anos cal AP ([Souza 2016](#)), são posteriores às idades de deposição dos sedimentos aqui obtidas por LOE. Este resultado é coerente, uma vez que a formação do espodosolo no local de amostragem só pode ter ocorrido depois da estabilização do cordão litorâneo pela mata atlântica. O intervalo de tempo entre a deposição da amostra Ber-02 e a formação do espodosolo é de 0,7 a 1,3 ka, considerando os erros associados às duas datações. Nesse intervalo, ocorreu a deposição dos sedimentos praias sobrepostos a Ber-02, substituição da água salgada pela água doce e estabilização do substrato pela vegetação. Dessa forma, o desenvolvimento do espodosolo ocorreu relativamente pouco tempo após a deposição da barreira, provavelmente menos de mil anos, ordem de grandeza semelhante à encontrada no Paraná por [Boski et al. \(2015\)](#).

6. Conclusões

Os depósitos sedimentares da falésia localizada na foz do rio Itaguapé (Bertioga) foram depositados sob ação de espraiamento de ondas, em condições regressivas, e com nível relativo do mar cerca de $1,4 \pm 1,0$ m acima do atual. Esses depósitos encontram-se íntegros, sem modificações pós-deposicionais que acarretassem mistura de grãos de diferentes níveis estratigráficos ou perda significativa de elementos radioativos por lixiviação intensa. As idades de deposição dos sedimentos, obtidas pelo método LOE, protocolo SAR, foram de $4,4 \pm 0,3$ ka (Ber-01) e $3,6 \pm 0,2$ ka (Ber-02). Estas idades são estratigraficamente coerentes e de elevada confiabilidade do ponto de vista metodológico. Dessa forma, os depósitos estudados podem ser correlacionados com a geração holocênica

de cordões litorâneos, também conhecida na literatura como “Formação Ilha Comprida”.

Agradecimentos

Agradecemos à FAPESP (processo 2009/53988-8), pela instalação do Laboratório de Espectrometria Gama e Luminescência - Legal, ao CNPq (processo 307055/2013-2), pela bolsa de produtividade de P.C.F. Giannini, e aos dois revisores pelos comentários construtivos ao manuscrito.

Referências

- Angulo R.J., Lessa G.C., Souza M.C. 2006. A critical review of mid-to late-Holocene sea-level fluctuations on the eastern Brazilian coastline. *Quaternary Science Reviews*, 25: 486-506.
- Angulo R.J., Souza M.C. 2014. Revisão conceitual de indicadores costeiros de paleoníveis marinhos quaternários no Brasil. *Quaternary and Environmental Geosciences*, 05(2): 01-32.
- Araujo A.G.M., Feathers J.K., Arroyo-Kalin M., Tizuka M.M. 2008. Lapa das boleiras rockshelter: stratigraphy and formation processes at a paleoamerican site in Central Brazil. *Journal Archaeological Science*, 25: 3186-3202.
- Banerjee D., Bötter-Jensen L., Murray A.S. 1999. Retrospective Dosimetry: preliminary use of the single aliquot regeneration (SAR) protocol for the measurement of quartz dose in young house bricks. *Radiation Protection Dosimetry*, 84:421-426.
- Barbouti A.; Rastin B. 1983. A Study of the absolute intensity of muons at sea level and under various thicknesses of absorber. *Journal of Physics G: Nuclear Physics*, 9:1577-1595.
- Boski T., Angulo R.J., Souza M.C., Barboza E.G., Knicker H., González-Pérez J.A., González-Vila F.J. 2015. Progradation rates of coastal barriers estimated from the 14 C age of soil organic matter. *Journal of Quaternary Science (Print)*, 30: 9-18.
- Bueno L., Feathers J., De Blasis P. 2012. The formation process of a paleoindian open-air site in Central Brazil: integration lithic analysis, radiocarbon and luminescence dating. *Journal Archaeological Science*. 40(1): 190-203.
- Cruz E.A., Buchmann F.S.C. 2011. Descrição da paleopraia de Itaguapé e suas implicações paleoambientais (Bertioga - SP). Anais do XIV Congresso Latino-americano de Ciências do Mar - XIV COLACMAR
- Feathers J., Kupnis R., Piló L., Arroyo-Kalin M., Coblenz D. 2010. How old is Luzia? Luminescence dating and stratigraphic integrity at Lapa Vermelha, Lagoa Santa, Brazil. *Geoarchaeology: An International Journal*, 1: 395-436.

- Giannini P.C.F., Sawakuchi A.O., Martinho C.T., Tatum S.H. 2007. Eolian depositional episodes controlled by Late Quaternary relative sea level changes on the Imbituba-Laguna coast (southern Brazil). *Marine Geology*, 237: 143-168.
- Giannini P.C.F., Guedes C.C.F., Nascimento Jr D.R., Tanaka A.P.B., Angulo R.J., Assine M.L., Souza M.C. 2009. Morphology and sedimentology of Ilha Comprida, southern São Paulo coast. In: Dillenburg S.R., Hesp P.A. (eds). *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*. Berlin – Heidelberg, Springer, 177-224p.
- Guedes C.C.F., Giannini P.C.F., Sawakuchi A.O., Dewitt R., Nascimento D.R., Aguiar V.A.P., Rossi M.G. 2011. Determination of controls on Holocene barrier progradation through application of OSL dating: The Ilha Comprida Barrier example, Southeastern Brazil. *Marine Geology*, 285: 11-16.
- Guedes C.C.F., Sawakuchi A.O., Giannini P.C.F., Dewitt R., Aguiar V.A.P. 2013. Luminescence characteristics of quartz from Brazilian sediments and constraints for OSL dating. *Anais da Academia Brasileira de Ciências (Impresso)*, 85: 1303-1316.
- Lessa G.C., Angulo R.J., Giannini P.C.F., Araújo A.D. 2000. Stratigraphy and Holocene evolution of a regressive barrier in south Brazil. *Marine Geology*, 165: 87-108.
- Martins V.M. 2009. *Relação Solo-relevo-substrato geológico na planície costeira de Bertioga (SP)*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 273p.
- Murray A., Wintle A.G., 2000. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements*, 32: 57-73.
- Prescott J.R., Stephan L.G. 1982. The contribution of cosmic radiation to the environmental dose for thermoluminescence dating. In: *Proceedings of the Second Specialist Seminar on Thermoluminescence Dating 6*, Council of Europe, Strasbourg, pp. 17–25.
- Preusser F., Chithambo M.L., Götte T., Martini M., Ramseyer K., Sendezera E.J., Susino G.J., Wintle A.G. 2009. Quartz as a natural luminescence dosimeter. *Earth Science Reviews*, 97: 184-214.
- Sallun A.E.M., Suguio K. 2010. Quaternary colluvial episodes (Upper Paraná River Hydrographic Basin, Brazil). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 82: 701-715.
- 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., Kalchgruber R., Giannini P.C.F., Nascimento Jr D.R., Guedes C.C.F., Umisedo N. 2008. The development of blowouts and foredunes in the Ilha Comprida barrier (Southeastern Brazil): the influence of Late Holocene climate changes on coastal sedimentation. *Quaternary Science Review*, 27: 2076-2090.
- Sawakuchi A.O., Mendes V.R., Pupim F.N., Mineli T.D., Ribeiro L.M.A.L., Zular A., Guedes C.C.F., Giannini P.C.F., Nogueira L., Sallun Filho 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.
- Soares E.A.A., Tatum S.H., Riccomini C. 2010. OSL age determination of Pleistocene fluvial deposits in Central Amazonia. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 82(3): 691-699.
- Souza C.R.G. 2007. *Ambientes Sedimentares de Planície Costeira e Baixa-Média Encosta em Bertioga (SP)*. In: XI Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário - ABEQUA, 2007, Belém (PA).
- Souza C.R.G. 2015. The Bertioga Coastal Plain: An Example of Morphotectonic Evolution. In: Vieira B.C., Salgado A.A.R., Santos L.J.C. (Org.). *World Geomorphological Landscapes*. 1ªed.: Springer Netherlands, 115-134p.
- Suguio K., Martin L. 1978a. Formações quaternárias marinhas do litoral paulista e sul fluminense. In: *international symposium on coastal evolution in the Quaternary*, São Paulo. Special Publication (1)... São Paulo, IGCB/IGUSP/ SBG, 55p.
- Suguio K., Martin L. 1978b. *Mapas Geológicos da Planície Costeira do Estado de São Paulo e Sul do Rio de Janeiro (1:100.000)*. São Paulo, DAEE / Secr. de Obras e Meio Ambiente. Governo do Estado de São Paulo.
- Suguio K., Martin L. 1994. *Geologia do Quaternário*. In: Falconi F.F., Nigro Jr. A. (eds.) *Solos do litoral de São Paulo*. Mesa Redonda ABMS/ASSECOB:69-97.
- Suguio K., Tessler M.G. 1992. Depósitos quaternários da planície costeira de Cananéia-Iguape (SP). *Publicação Especial do Instituto Oceanográfico, USP*, 9:1-33.
- Tatum S.H., Silva L.P., Pires E.L., Rossetti D.F., Góes A.M., Munita C. 2008. Datação de sedimentos Pós-Barreiras no norte do Brasil: implicações paleogeográficas. *Revista Brasileira de Geociências*, 38: 514-524.
- Tsoar H., Levin N., Porat N., Maia L.P., Herrmann H.J., Tatum S.H., Claudino-Sales V. 2009. The effect of climate change on the mobility and stability of coastal sand dunes in Ceará State (NE Brazil). *Quaternary Research*, 71: 217-226.
- Villwock J.A., Tomazelli J.L., Loss E.L., Dehnhard E.A., Horn Filho N.O., Bachi F.A., Dehnhard B.A. 1986. *Geology of the Rio Grande do Sul coastal province*. In: Rabassa J. (ed) *Quaternary of South America and Antarctic peninsula*. Balkema, Rotterdam, 79–97p.
- 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: 369–391. .

Recebido 18 de maio de 2017
Aceito 18 de setembro de 2017