

Artigo

A Utilização do Método de Luminescência Opticamente Estimulada para a Datação de Sedimentos de Dunas Costeiras do Nordeste Setentrional do Brasil

Maia, L. P.;* Gastão, F. G. C.; Tatumi, S. H.; Lacerda, L. D.

Rev. Virtual Quim., 2011, 3 (2), 103-115. Data de publicação na Web: 2 de junho de 2011

<http://www.uff.br/rvq>

Stimulated Optical Luminescence Applied to Dating Coastal Sediments in Northeastern Brazil

Abstract: Stimulated optical luminescence (SOL) was applied in dating coastal sediments in northeastern Brazil and revealed that the evolution of aeolic deposits in the region can be divided in 4 stages related to climate changes occurred during the quaternary leading to sea level changes, which modeled the coastline since the end of the Higher Pleistocene to present. The first stage dated back from $108,000 \pm 11,000$ years to $103,000 \pm 9,000$ anos B.P. (Before Present), but related mas que está relacionado ao máximo da Penúltima Transgressão, que aconteceu no Pleistoceno Médio, por volta de 123.000 anos, evento marcado por erosão dos depósitos mais antigos. O segundo estágio revelado pelas idades de 25.000 a 18.100 anos A.P, está relacionado à formação do vasto campo de dunas, que alcançaram cerca de 160 km da linha de costa e que fixaram no terceiro estágio (14.000 a 12.000 anos A.P). O quarto estágio é representado pelas dunas móveis dos Lençóis Maranhenses, que podem ter se formado há pelo menos 3.000 anos A.P.

Keywords: dating; sand dunes; luminescence ; Lençóis Maranhenses.

Resumo

Neste trabalho foi utilizado o método de Luminescência Opticamente Estimulada (LOE) para a datação de sedimentos costeiros situados na região do litoral setentrional do nordeste do Brasil. As idades obtidas revelaram que a evolução dos depósitos eólicos daquela região pode ser dividida em quatro estágios, e que estes estão relacionados às mudanças no clima ocorridas durante o período Quaternário, impulsoras de eventos de subida e decida do nível do mar, moldando a linha de costa desde o fim do Pleistoceno Superior até os dias atuais. O primeiro estágio foi datado de 108.000 ± 11.000 anos e 103.000 ± 9.000 anos A.P (Antes do Presente), e está relacionado ao máximo da Penúltima Transgressão, no Pleistoceno Médio, por volta de 123.000 anos, evento marcado por erosão dos depósitos mais antigos. O segundo estágio revelado pelas idades de 25.000 a 18.100 anos A.P, está relacionado à formação do vasto campo de dunas, que alcançaram cerca de 160 km da linha de costa e que foi imobilizado no terceiro estágio (14.000 a 12.000 anos A.P). O quarto estágio é representado pelas dunas móveis dos Lençóis Maranhenses, que podem ter se formado há pelo menos 3.000 anos A.P.

Palavras-chave: datação; luminescência; dunas arenosas; Lençóis Maranhenses.

* Laboratório de Dinâmica Costeira (LABDIC), Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR), Universidade Federal do Ceará (UFC), Av. da Abolição, 3207, Meireles, 60165-081, Fortaleza-CE, Brasil.

✉ parente@ufc.br

DOI: [10.5935/1984-6835.20110015](https://doi.org/10.5935/1984-6835.20110015)

A utilização do método de Luminescência Opticamente Estimulada para a datação de sedimentos de dunas costeiras do nordeste setentrional do Brasil

Luis P. Maia,^{a*} Francisco Gleidson da C. Gastão,^a Sônia H. Tatumi,^b Luiz D. Lacerda^c

^aLaboratório de Dinâmica Costeira (LABDIC), Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR), Universidade Federal do Ceará (UFC), Av. da Abolição, 3207, Meireles, 60165-081, Fortaleza-CE, Brasil.

^bCentro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, Faculdade de Tecnologia de São Paulo, Praça Cel. Fernando Prestes, 30, Laboratório de Datação e Luminescência de Cristais, Bom Retiro, 01124-060, São Paulo, SP, Brasil.

^cInstituto de Ciências do Mar (LABOMAR), Universidade Federal do Ceará (UFC), Av. da Abolição, 3207, Meireles, 60165-081, Fortaleza-CE, Brasil.

*parente@ufc.br

Recebido em 3 de maio de 2011. Aceito para publicação em 13 de maio de 2011

1. Introdução

2. Materiais e Métodos

2.1. Amostragem de campo

2.2. O método de LOE

2.3. Teores de CaCO₃

3. Resultados e Discussão

3.1. Primeiro estágio da evolução (123.000 anos A.P)

3.2. Segundo estágio da evolução (50.000 a 18.100 anos A.P)

3.3. Terceiro estágio da evolução (14.000 a 12.000 anos A.P)

3.4. Quarto estágio da evolução (3.000 anos A.P)

4. Considerações Finais



1. Introdução

A região costeira do nordeste setentrional do Brasil possui entre suas paisagens campos de dunas que são produtos de intensa atividade eólica acontecida no passado. As dunas eólicas são definidas como sendo “uma crista ou morro de areia empilhada pelo vento”.¹ As dunas, individualmente, variam em comprimento de menos de um metro a até dezenas de quilômetros e alturas oscilando de dezenas de centímetros até mais de 150 metros.¹ Quando estes

depósitos estão recobertos por vegetação podem ser chamados de dunas fixas ou dunas fixadas por vegetação. Há ainda outra classificação para dunas fixas,² na qual alguns autores chamam de dunas fósseis os depósitos eólicos já estabilizados, como por exemplo no médio rio São Francisco no estado da Bahia, que representam um dos mais importantes registros de mudanças paleoambientais, principalmente paleoclimáticas, ocorridas durante o período Quaternário no nordeste do Brasil.

São vários os tipos de dunas costeiras distribuídas pelo nordeste setentrional brasileiro. A diferença

entre estas está baseada em características como cor, forma, composição, fração granulométrica das dunas, que podem nos dar alguma noção a respeito da origem e evolução destes depósitos eólicos. De acordo com os eventos de mudanças climáticas ocorridos durante o Quaternário e usando estas características, ainda é possível montar uma sequência histórica da origem e evolução destes depósitos geológicos mais recentes.

Descrever a história da Terra de forma cronológica, baseando-se nos eventos geológicos ou climáticos, seja datando as rochas do Pré-Cambriano ou os depósitos sedimentares mais recentes do Cenozóico, não é uma tarefa fácil. Para isso, é preciso saber qual método de datação é mais pertinente para determinado material.

As rochas mais antigas conhecidas atualmente, por exemplo, pertencem ao complexo gnáissico de Acasta, que fica no noroeste do Canadá, datadas de 3,96 Ga (3.960 milhões de anos).³ O método utilizado para a datação e determinação da idade destas rochas foi a análise de decaimento de elementos radioativos U e Pb encontrados no mineral zircão ($ZrSiO_4$). Este método é o mais utilizado e uma excelente ferramenta geocronológica para termos acesso à remota história da crosta terrestre. Além do U/Pb, constituem outros métodos para a datação de rochas mais antigas, as análises de outros isótopos como Sm e Nd, com valores para meia-vida de 106 bilhões de anos; Rb e Sr (48.8 bilhões de anos); Th e Pb (14 bilhões de anos) e K e Ar (1.25 bilhões de anos).⁴

Outro método de datação, mas que engloba matéria orgânica ao invés de rochas como fonte de isótopos radioativos é a determinação da idade a partir do ^{14}C (Carbono-14). Demonstrado inicialmente por Libby em 1947, o método é eficaz para datar com precisão os últimos 50.000 anos da Terra. Se baseia nas pequenas quantidades de ^{14}C radioativo que fazem parte da estrutura dos animais e plantas, e após a morte destes organismos não é mais adquirido, sendo progressivamente desintegrado para ^{14}N .⁵

A análise em ^{14}C também se torna uma ferramenta ideal para datação em alguns minerais. Alguns autores analisando fragmentos de carvão enterrado,⁶ usando ^{14}C , indicaram que na região de Barreirinhas no estado do Maranhão, entre 14 e 9 mil anos A.P., a vegetação arbórea era predominante, provavelmente devido à presença regional de um clima úmido.

No caso de dunas costeiras, como são depósitos eólicos mais recentes e a diferença cronoestratigráfica se situa em curto intervalo no tempo geológico, além de serem desprovidos na maioria das vezes de

matéria orgânica, nem todos os métodos de datação são eficazes para realizar uma geocronologia consistente dos diferentes tipos de dunas e relacioná-la com os eventos de mudanças no clima ocorridos no período Quaternário.

Um dos primeiros estudos com o objetivo de distinguir entre os diferentes tipos de dunas foi feito utilizando relações estratigráficas, diferenciando quatro gerações de dunas no litoral do estado do Ceará.⁷ A primeira geração, marcada pelas paleodunas que são depósitos eólicos mais antigos e sem forma definida, são de cor avermelhada em função do grau de oxidação do ferro nos grãos de areia e que são formadas, na sua maioria, pelo transporte eólico de sedimentos arenosos com granulometria entre 2 e 0,2 mm, podendo ocorrer nos mais variados tipos de litoral.⁸

A segunda geração descrita está relacionada às dunas estabilizadas por estarem vegetadas.⁷ O autor descreve estas dunas como inativas, fixadas por vegetação do tipo arbórea, bastante intensa, compostas de areias quartzosas inconsolidadas de granulometria média a fina, com grau de seleção entre bem a moderadamente selecionado. As dunas parabólicas constituem um tipo destas dunas fixadas. Morfologicamente vistas em planta as dunas parabólicas exibem uma forma de U ou V, com alturas entre 20 e 40 metros, comprimento entre 1.200 e 2.000 metros e uma largura variável, normalmente em torno de 320 a 460 metros. Para que seja formada, é necessário a estabilização parcial de seus braços pela vegetação ou umidade, fazendo com que sua parte central migre mais rápido que os extremos.

As dunas da terceira geração descritas pelo autor⁷ consistem em um tipo distinto de dunas inativas que apresentam características bastante peculiares, como a preservação de estruturas sedimentares, algumas sem vegetação, são compostas por um cimento de carbonato de cálcio conhecidas também como *eolianitos*. Este termo foi originalmente proposto por Sayles (1931)⁹ para descrever todas as rochas sedimentares consolidadas que foram depositadas pela atividade eólica. Os *eolianitos* ocorrem nas zonas áridas e semiáridas de muitas regiões do mundo, particularmente em áreas costeiras com grandes acumulações de areias biogênicas.¹⁰

As dunas da última e quarta geração em geral distribuem-se paralelo à linha de costa, e migram (dunas móveis) atualmente em direção ao continente até aproximadamente 6 km no litoral do estado do Ceará, por exemplo.⁷ São formadas a partir da acumulação de sedimentos removidos da praia pela deflação eólica e distribuem-se como um cordão

contínuo, dispostos paralelamente a linha de costa, o qual começa a ser esboçado a partir da linha de praia alta (*backshore*) possuindo uma largura média de 2 – 3 km e espessura que atingem até 30 m. São constituídas por areias esbranquiçadas, bem selecionadas, de granulação fina a média, quartzosas, com grãos de quartzo foscos e arredondados. Muitas vezes encerram níveis de minerais pesados, principalmente ilmenita (FeTiO_3). Estratificações cruzadas de médio a grande porte e marcas ondulares eólicas podem ser registradas em algumas exposições. As dunas móveis apresentam formas distintas que variam entre os tipos barcanas, cadeias barcanoides, transversas e lençóis de areia (*sand sheets*). Os Lençóis Maranhenses, o maior campo de dunas ativas do litoral brasileiro, são considerados o maior registro de sedimentação eólica do Quaternário encontrado na América do Sul.¹¹

O método de LOE (Luminescência Opticamente Estimulada) é o mais indicado pelos pesquisadores para determinar a idade de vários materiais que se formaram ou se modificaram no período Quaternário,

como artigos arqueológicos, por exemplo. É altamente recomendado para a datação de sedimentos depositados recentemente. Alguns trabalhos utilizaram este método para datar sedimentos de origens costeira e fluvial.^{2,12,13}

O método tem como vantagem trabalhar com uma das propriedades físicas dos minerais, a luminescência dos sólidos cristalinos, principalmente quartzo e feldspato, e tem ótima abrangência temporal que vai de 100 anos A.P. até 1 Ma (1 milhão de anos).¹⁴

O objetivo deste trabalho consiste em realizar um estudo da origem e evolução dos corpos de dunas existente na zona costeira do nordeste setentrional do Brasil (Figura 1), através da datação do sedimento que as compõe, utilizando o método de luminescência opticamente estimulada. Objetiva ainda fazer uma relação geocronológica dos diferentes tipos de dunas a fim de moldar as condições climáticas e ambientais que condicionaram a origem e evolução destes depósitos eólicos.

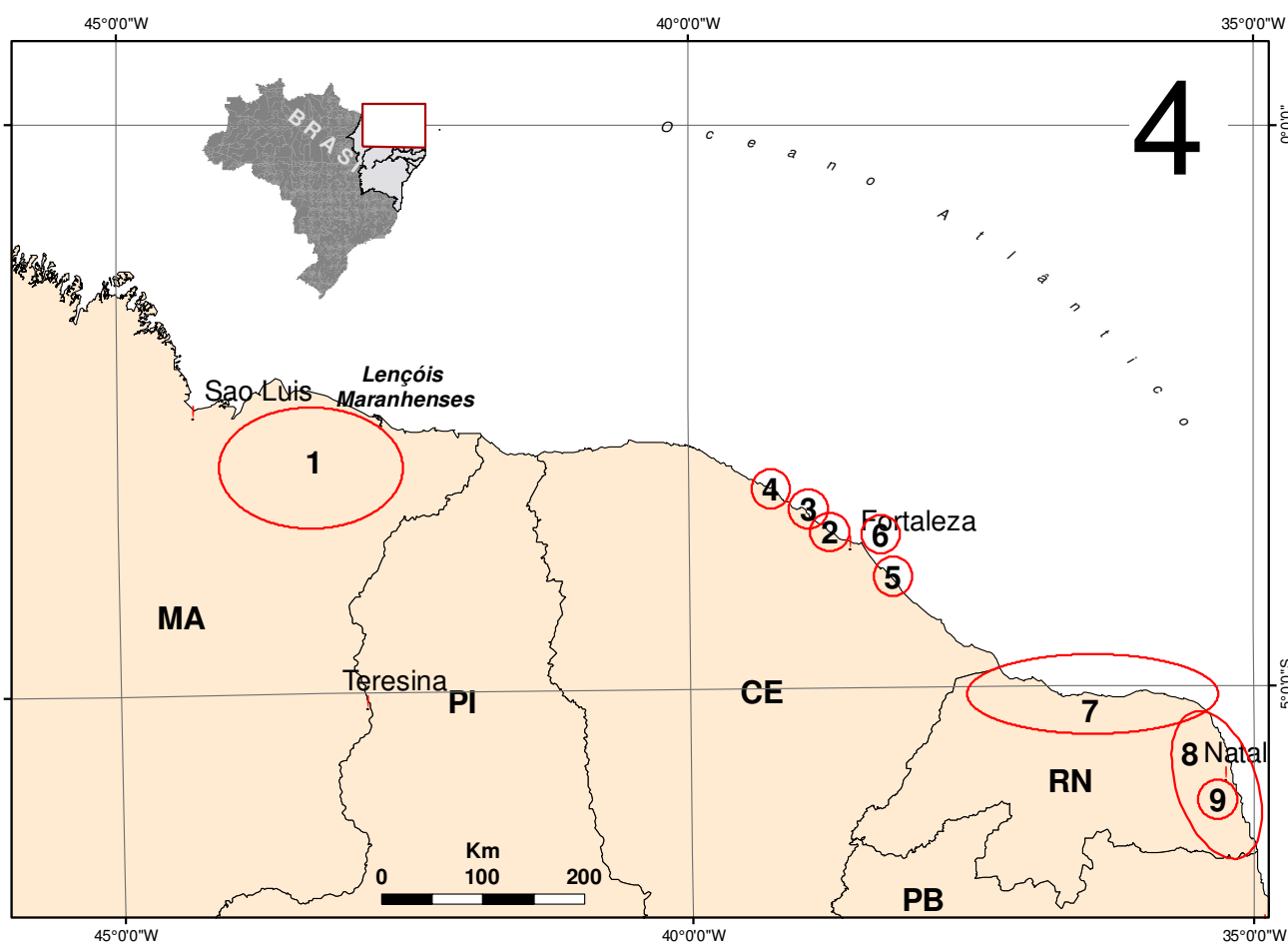


Figura 1. Localização das áreas com datações de dunas realizadas no litoral setentrional do nordeste do Brasil. Áreas 1-2 (este trabalho). Áreas 3-4-5.¹² Área 6.^{15,16} Áreas 7-8.^{17,18} Área 9¹⁹

2. Materiais e Métodos

2.1. Amostragem de campo

Foram coletadas 49 amostras distribuídas entre os tipos de dunas na área 1 (estado do Maranhão) e 2 (município de Caucaia no estado do Ceará) (Figura 1). Do total de amostras coletadas 12 foram datadas e nas demais foram calculados os teores de carbonato de cálcio (CaCO_3), bastante indicado para identificação da origem do material, se marinho ou terrestre. A coleta (Figura 2) foi feita utilizando trado manual e canos de PVC de cor preta e lona de plástico preta para a proteção do local amostrado contra a radiação solar nos pontos datados. Foram realizados furos com profundidades entre 1 e 2 metros. Os pontos de coleta foram escolhidos estrategicamente após a observação dos campos de dunas em imagem de satélite Landsat 5 TM²⁰ (Figura 3). Os pontos de coleta foram georreferenciados com *GPSmap 76 Garmin* com precisões variando de 8 a 11 metros, e em seguida foram plotados em mapa, o que facilitou a identificação da distribuição da idade dos campos de dunas na área estudada.

2.2. O método de LOE

Os minerais que se encontram na natureza, estão em constante exposição às radiações ionizantes, que se originam dos raios cósmicos e de radioisótopos que estão no solo. O cristal sofre uma série de defeitos, provocados por essas radiações, que podem armazenar cargas (elétrons) e lacunas. O cristal ao aquecer, pode emitir luz, que é denominada de TL, devido à recombinação de cargas. A intensidade da TL é proporcional à concentração de cargas aprisionadas e este por sua vez é proporcional à dose da radiação depositada e também pelo tempo em que o cristal ficou exposto à radiação ionizante.²¹

A Luminescência Opticamente Estimulada (LOE) é a luz emitida quando o cristal sofre uma excitação óptica, não térmica como na TL. A LOE pode ser utilizada para estipular o tempo decorrido desde que os grãos que compõem uma massa sedimentar foram expostos pela última vez à luz solar, logo o método fornece a idade do sedimento, a partir da sua última estabilização. A incerteza no valor das idades depende da reprodutibilidade dos cristais contidos na amostra, em geral é de aproximadamente 10%. Quando a amostra contém uma concentração de água (>15%)

esta incerteza pode aumentar para 20%.



Figura 2. Aspectos da coleta de sedimento em dunas fixadas por vegetação

A LOE também é definida como a luz emitida por alguns cristais quando o mesmo é exposto a algum tipo de radiação na região do visível ou infravermelho. No caso da emissão de LOE do quartzo é sabido que ocorre quando este é estimulado com luz azul e a LOE encontra-se na região do UV.

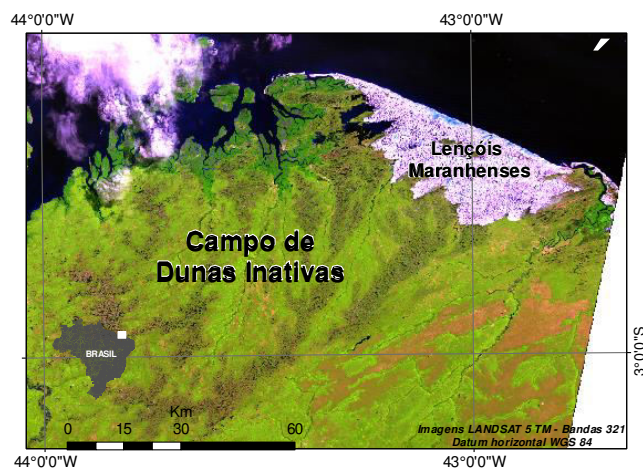


Figura 3. Aspectos dos campos de dunas do estado do Maranhão em imagem de satélite Landsat 5 TM

A intensidade da emissão LOE é proporcional à dose de radiação ionizante que o cristal recebeu previamente (Equação 1). A idade I é calculada dividindo a dose acumulada ou paleodose D_e por T , este é encontrado através dos valores de concentração dos isótopos radioativos do ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th e ^{40}K , além da contribuição da radiação cósmica. Esses valores podem ser determinados através de espectroscopia gama ou pela dosimetria Termoluminescente (TL) com a colocação de dosímetros TL nos sítios estudados.

$$I = D_e / T \quad (\text{Equação 1})$$

Alguns grãos podem ter seu sinal de LOE zerado no momento do soterramento, devido à exposição à luz do sol, mas pode ocorrer de termos grãos não zerados misturados em uma mesma alíquota, principalmente em sedimentos fluviais e colúvios, onde os sedimentos deslizam através da lama ou em camadas abaixo da superfície sem se expor ao sol. Quando a incerteza do valor da idade é muito grande, pode ser uma indicação que na amostra temos grãos que não tiveram seu sinal de LOE zerado direito misturado com grãos zerados. Assim os resultados de datação por LOE podem indicar, além da idade, os possíveis processos de deposição dos grãos.

2.2.1. Material Utilizado

Os sedimentos foram coletados em diversos sítios e tratados quimicamente no laboratório com peróxido, HF, HCl e SPT (politungstato de sódio). As medidas de LOE foram feitas com uma Leitora TL/OSL da Daybreak Nuclear System Inc, modelo 1100. Todas as irradiações foram feitas com uma fonte de raios- γ de ^{60}Co . A concentração de isótopos naturais ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th e ^{40}K , foram determinados por espectroscopia gama, com um detetor de NaI(Tl), da Canberra.

2.3. Teores de CaCO_3

A análise dos teores de CaCO_3 foi feita a partir do método do *Calcímetro de Bernard* modificado, em que as amostras são atacadas com ácido clorídrico (HCl) diluído à 10% em um sistema de vasos comunicantes. O sedimento é inicialmente seco à 60°C em estufa, fracionado 0,5 g e acondicionado num *erlenmeyer* adaptado a um tudo de ensaio, ligado a um tubo de provetas preenchidas por água. O gás CO_2 desprendido pela reação $\text{HCl} + (\text{amostra} + \text{CaCO}_3)$ faz com que a coluna d'água se desloque ($d\Delta$) dentro da proveta (Figura 4). É admitido um valor máximo de deslocamento para uma amostra com 99% de CaCO_3 .

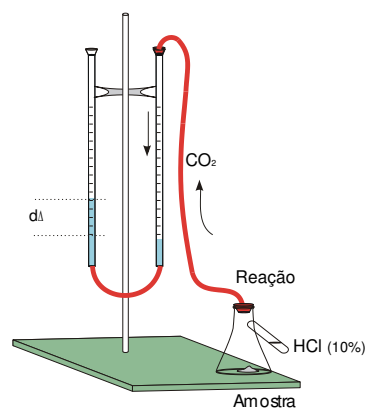


Figura 4. Esquema do ensaio para a obtenção dos teores de CaCO_3 . *Calcímetro de Bernard* (modificado)

3. Resultados e Discussão

Os sedimentos datados compõem pelo menos duas gerações de dunas mais antigas, as dunas fixas ou fixadas por vegetação e as paleodunas sem forma definida. As dunas móveis dos Lençóis Maranhenses são consideradas de geração mais recente, e a idade das mesmas foi estipulada a partir da sua velocidade de migração e da distância que elas se encontram da linha de costa.

A evolução destes depósitos eólicos durante o período Quaternário envolve pelo menos quatro estágios. Estes estão separados por alterações climáticas que resultaram em períodos de glaciação e degelo, transgressão e regressão marinha (Figura 5) e mudanças nos regime dos ventos, umidade e na pluviosidade, alterando a morfologia costeira ao longo da história geológica. Mas, apesar desta divisão em quatro estágios de evolução de forma regular, ou seja, exatamente de acordo com as mudanças climáticas, algumas idades revelam que houve retrabalhamento eólico de material, mesmo que não tenha acontecido algum evento de mudança no clima em escala regional.

3.1. Primeiro estágio da evolução (123.000 anos A.P.)

As dunas mais antigas encontradas na zona costeira do estado do Maranhão, mais precisamente nas proximidades da BR-402 entre os municípios de Tutóia e Paulino Neves, são de cor avermelhada e sem forma de cômoro ou colina (Figura 6). São depositadas sobre os tabuleiros pré-litorâneos da

Formação Barreiras e compostas de areia fina, moderadamente selecionada e com grãos de quartzo sub-angulosos a sub-arredondados.²² O mesmo material foi encontrado no estado do Ceará no município de Caucaia.

As idades encontradas para estas dunas (amostras AMT 10 e AMT 01 – Ceará) obtidas por LOE (Tabela 1) de 108.000 ± 11.000 anos e 103.000 ± 9.000 anos A.P., revelam que a evolução destes depósitos sedimentares está relacionada ao máximo da Penúltima Transgressão, que aconteceu no Pleistoceno Médio, por volta de 123.000 anos (ver figura 5), quando o mar erodiu total ou parcialmente os depósitos continentais de estágios anteriores.²³

Apesar destes depósitos não apresentarem forma de duna, como cômoro ou colina, o material que as compõem preservam as características de sedimentos moldados por atividade eólica. Outra característica importante a ser ressaltada, é o teor de CaCO_3 dos sedimentos, foram encontrados teores de 1,90% e 2,53% para as dunas dos estados do Maranhão e Ceará, respectivamente. Estes valores sugerem a contribuição de material marinho para a formação destas dunas.

Outro estudo feito em dunas do estado do Ceará revelou idade de 132.000 ± 11.000 anos, correspondente ao fim do período glacial.¹²

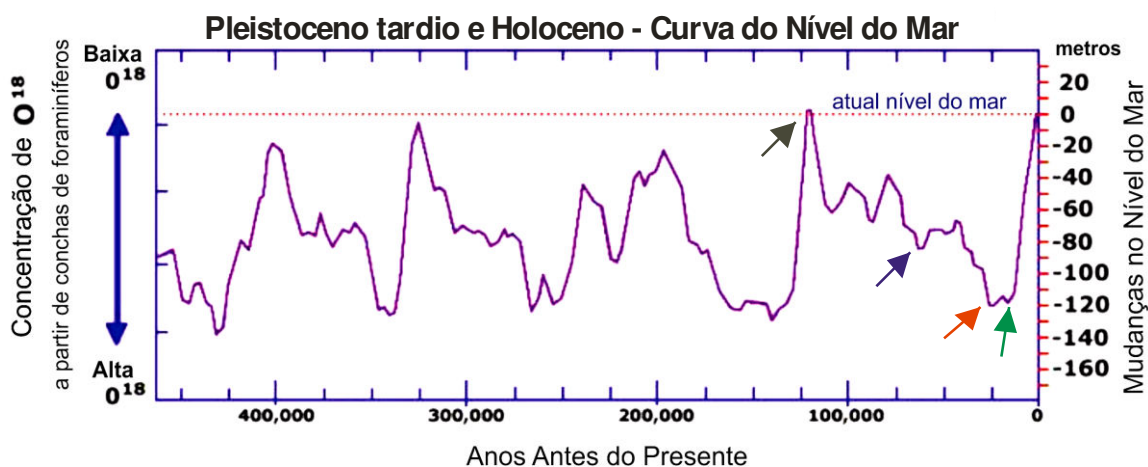


Figura 5. Transgressões e regressões marinhas durante o período Quaternário Superior. Seta preta, por volta dos 123 mil anos A.P. Setas azul e vermelha, entre 70 e 60 a 25 mil anos A.P. Seta verde, entre 14 e 12 mil anos A.P.²⁴

3.2. Segundo estágio da evolução (50.000 a 18.100 anos A.P.)

O segundo estágio, ainda no Pleistoceno, se encaixa nas evidências da glaciação ocorrida entre 70.000 e 60.000 anos A.P., como a famosa “ponte de terra” que ligou a Ásia e a América do Norte secando o estreito de Bering. O mar neste período estava em níveis muito mais baixos do que o atual, aproximadamente -80m (ver figura 5). Mesmo sem dados de datação para este período, pode ser considerado que uma área muito grande, antes submersa pelo mar, existiu disponibilizando material (areia) suficiente para a formação de um vasto campo de dunas. E, considerando a figura 5, o nível do mar baixou mais ainda para -120m de 50.000 a 25.000 anos, o que teria favorecido a disposição de mais material. Um grande deserto de areia se formou na época, pois estas dunas do segundo estágio migraram até distâncias consideráveis da linha de costa, cerca

de 160 km (Figura 7). Condições mais áridas e com ventos favoráveis predominaram neste período. Idades de 25.000 ± 2.100 , 18.700 ± 3.000 e 18.100 ± 2.500 anos A.P, amostras AMT 09, AMT 08 e AMT 08 B, respectivamente (Tabela 1), foram encontradas para estas dunas móveis do Pleistoceno, assim chamadas neste trabalho, que sofreram processos de estabilização posteriormente no terceiro estágio. Os teores de CaCO_3 para estes depósitos variaram de 3,79 a 6,96%.

Este campo de dunas pode ter sido muito maior do que o atual, já fixado. Se o nível do mar se encontrava pelo menos de 80 a 120 metros abaixo do atual, e se as dunas se formaram e migraram desde a antiga linha de costa, a área ocupada pelas dunas era bem maior do que a de hoje.

Dunas deste estágio foram encontradas a oeste do rio Munim (Figura 7A), indicando que são mais antigas que o rio, este ainda não tinha se formado, há pelo menos 18.700 anos A.P., uma vez que dunas com

idades de 25.000 e 18.100 anos A.P. foram encontradas a leste do rio (Figuras 7B e 7C).

3.3. Terceiro estágio da evolução (14.000 a 12.000 anos A.P.)

O terceiro estágio, acontecido no fim do Pleistoceno Superior e que possivelmente se estendeu até o Holoceno, pode ser relatado pela fixação das dunas móveis do segundo estágio.

Análises de pólen, realizadas na lagoa do Caço²⁵ (região central da área estudada), revelaram que o fim do período glacial, ocorrido no Pleistoceno superior (14 - 12 mil anos A.P.), foi acompanhado de condições climáticas mais úmidas e frias, favorecendo o crescimento de vegetação, e conseqüentemente a fixação das dunas móveis do Pleistoceno (Figuras 8A, 8B e 8C). Idade de 23.800 anos A.P. foi encontrada para depósitos eólicos situados próximos à lagoa do Caço²⁶, distante cerca de 70 km da linha de costa, no sentido de migração preferencial NE/SW.

Pesquisas realizadas em quatro tipos de vegetação (restinga costeira, savana lenhosa, cerrado lenhoso denso e floresta)⁶ na região de Barreirinhas, através de perfis de solo e análise $\Delta^{13}\text{C}$ (desvio da concentração isotópica de ^{13}C); e análise de fragmentos de carvão enterrado, usando ^{14}C ; indicaram que na região, entre 14 e 9 mil anos A.P., a vegetação arbórea predominou, provavelmente devido à presença de um clima úmido. O mesmo estudo indica ainda que, entre 9 e 4-3 mil anos A.P., houve expansão do cerrado, provavelmente relacionado à presença de clima mais seco, e que a partir de 4-3 mil anos para o presente há um aumento na densidade arbórea, devido ao retorno de um clima mais úmido, provavelmente semelhante ao presente.

A datação por LOE revelou idades de 16.000 ± 1.500 , 13.000 ± 1.100 e 11.000 ± 1.500 anos A.P., amostras AMT 01, AMT 07 e AMT 04, respectivamente para as dunas que foram depositadas neste período e sofreram processo de fixação por vegetação.

Algumas idades revelam reativação de atividade eólica, mesmo para dunas hoje fixadas por vegetação (Figura 8C). As amostras AMT 06, AMT 05, AMT 02 e AMT 03, foram datadas de 8.700 ± 600 , 6.000 ± 800 , 5.000 ± 1.200 e 1.400 ± 270 anos A.P., respectivamente. Teores de CaCO_3 de 4,43 a 5,22% foram encontrados para estas dunas.

3.4. Quarto estágio da evolução (3.000 anos A.P.)

O quarto estágio é marcado pelo aparecimento de dunas móveis que continuam a migrar e são conhecidas como Lençóis Maranhenses (Figura 9), representado por uma cadeia de dunas barcanas e barcanóides.

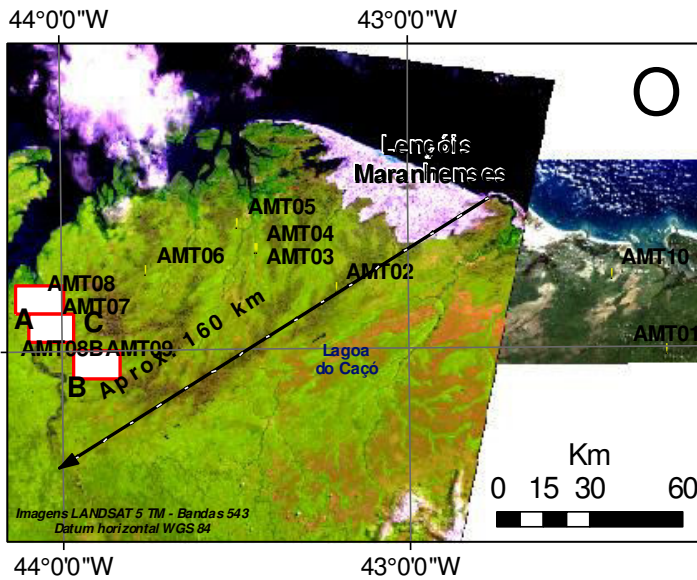
Na área estudada, estas dunas atingem pelo menos 34 km da linha de costa, migrando sobre as dunas inativas (fósseis) a 11 m/ano (calculado a partir das imagens de satélite). A relação entre a distância e a velocidade de migração leva a crer que estas dunas apareceram há cerca de 3 mil anos. Considerando os levantamentos que revelaram que na área houve uma expansão do cerrado⁶, entre 9 e 4-3 mil anos, e possivelmente o nível do mar na época estava mais baixo do que o atual, estas dunas podem ter se formado em tempo ao observado. Isto pode ser inferido a partir da relação entre a velocidade de migração e a distância da linha de costa que elas alcançaram até hoje.



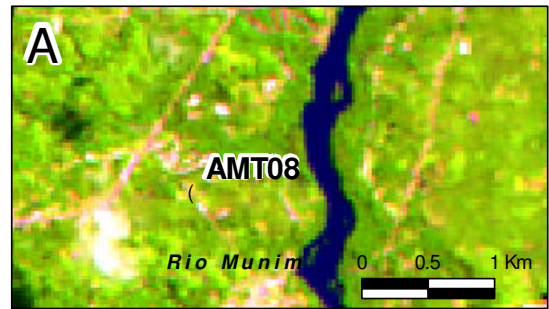
Figura 6. Paleoduna sem forma de câmorô ou colina

Tabela 1. Idades obtidas dos depósitos datados por LOE

Amostra	Dose Anual ($\mu\text{Gy}/\text{ano}$)	Dose Acumulada (Gy)	Idade (Anos A.P.)
AMT 01	550 ± 25	8,97	16.000 ± 1.500
AMT 02	720 ± 130	3,63	5.000 ± 1.200
AMT 03	965 ± 150	1,31	1.400 ± 270
AMT 04	433 ± 30	4,93	11.000 ± 1500
AMT 05	360 ± 30	2,14	6.000 ± 800
AMT 06	450 ± 40	3,91	8.700 ± 600
AMT 07	480 ± 17	6,27	13.000 ± 1.100
AMT 08	570 ± 60	10,65	18.700 ± 3.000
AMT 08 B	485 ± 40	8,78	18.100 ± 2.500
AMT 09	520 ± 20	13,37	25.000 ± 2.100
AMT 10	1.100 ± 61	121,14	108.000 ± 11.000
AMT 01 - Ceará	1.000 ± 40	106,81	103.000 ± 9.000



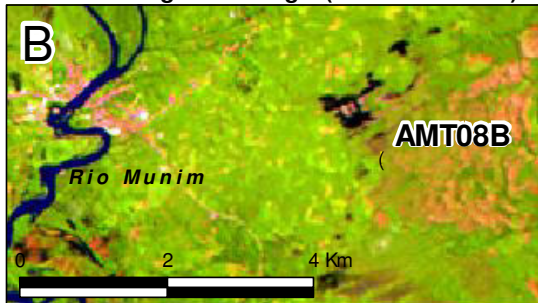
Duna do Segundo Estágio (18.700 anos A.P)



3°0'0\"/>



Duna do Segundo Estágio (18.100 anos A.P)



Dunas do Segundo Estágio (25.000 anos A.P)

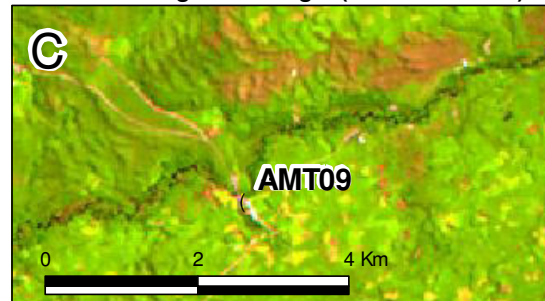




Figura 9. Aspectos do campo de dunas móveis dos Lençóis Maranhenses

4. Considerações Finais

Os registros com maior evidência para a evolução das dunas do litoral setentrional do nordeste do Brasil estão atrelados às mudanças climáticas ocorridas durante o período Quaternário, envolvendo transgressões e regressões marinhas.

A evolução dos depósitos eólicos de zona costeira relatada neste trabalho revelou que pelo menos quatro estágios de evolução foram identificados, os depósitos de paleodunas, mais antigos, com idades de 108.000 ± 11.000 anos A.P., encontrados atualmente sem forma de duna devido à erosão produto das evidências da penúltima transgressão, ocorrida por volta de 123.000 anos A.P.; as dunas móveis do pleistoceno que migraram a distâncias de aproximadamente 160 km da linha de costa com idades de 25.000 a 18.100 anos A.P.; as dunas fixas com idades em torno dos 14.000 anos A.P; registros de reativação eólica para as idades de 8.700 a 6.000 anos A.P; e as dunas móveis que podem ter surgido a pelo menos 3.000 anos A.P.

O método de datação por LOE é bastante eficaz para datar materiais desenvolvidos recentemente, comparando com o tempo geológico. Mas fica claro que quanto mais dados, melhor são as reconstruções paleoclimática e paleoambiental de uma região para

escrever a história das mudanças climáticas e ambientais ocorridas no período Quaternário.

Agradecimentos

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq pelo apoio financeiro com a bolsa de mestrado (Processo 136055/2008-7) concedida ao primeiro autor, ao INCT-TMCOcean (Proc. No. CNPq 573.601/2008-9). Agradecemos também ao Instituto de Ciências do Mar-LABOMAR (UFC) pela infra-estrutura fornecida para a realização desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

¹ Pye, K.; Tsoar, H.; *Aeolian Sand and Sand Dunes*, 1a. ed., Unwin Hyman: London, 1990.

² Barreto, A. M. F; Suguio, K; de Oliveira, P. E.; Tatum, S. H. *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil – SIGEP* **1999**, 1, 223. [Link]

³ Bowring, S. A.; Williams, I. S.; Compston, W. *Geology* **1989**, 17, 971. [CrossRef] [Link]

- ⁴ Sítio do DRMRJ – Departamento de Recursos Minerais do Rio de Janeiro, *página da internet sobre águas subterrâneas*. Disponível em: <<http://www.drm.rj.gov.br/>>. Acesso em: 04 setembro 2010.
- ⁵ Carneiro, C. D. R.; Almeida, F. F. M.; de. Mizusaki, A. M. P. *Terra e Didática* **2005**, 1, 6. [[Link](#)]
- ⁶ Pessenda, L. C. R.; Ribeiro, A. S.; Gouveia, S. E. M.; Aravena, R.; Boulet, R.; Bendassolli, J. A. *Quaternary Research* **2004**, 62, 183. [[CrossRef](#)]
- ⁷ Maia, L. P.; *Tese de Doutorado*, Universitat de Barcelona, Espanha, 1998.
- ⁸ Short, A. D; Hesp, P. A. *Marine Geology* **1982**, 48, 259. [[CrossRef](#)]
- ⁹ Goldsmith, V. Em *Coastal sedimentary environments*; Davis, R. A., ed.; Springer-Verlag: New York, 1990.
- ¹⁰ Pye, K. Em *Aeolian sand and sand dunes*; Blackwell Scientific Publications: Oxford, 1994.
- ¹¹ Gonçalves, R. A.; Lehugeur, L. G. O.; Castro, J. W. A.; Pedroto, A. E. S. *Mercator* **2003**, 2, 99. [[Link](#)]
- ¹² Tsoar, H.; Levin, N.; Maia, L. P.; Herrmann, H. J.; Sales, V. C. *Quaternary Research* **2009**, 71, 217. [[CrossRef](#)]
- ¹³ Carneiro-Filho, A., Tatumi, S. H.; Yee, M. *Ciência Hoje* **2003**, 32, 24. [[Link](#)]
- ¹⁴ Silva, D. G.; Corrêa, A. C. B. *Revista Brasileira de Geografia Física* **2009**, 2, 43. [[Link](#)]
- ¹⁵ Levin, N.; Tsoar, H.; Herrmann, H. H. J.; Maia, L. P.; Claudino-Sales, V. *Sedimentology* **2009**, 56, 1623. [[CrossRef](#)]
- ¹⁶ Carvalho, A. M.; Maia, L. P.; Dominguez, J. M. L. *Arquivos de Ciências do Mar* **2007**, 40, 43-51.
- ¹⁷ Barreto, A. M. F.; Bezerra, F. H. R.; Suguio, K.; Tatumi, S. H.; Yee, M.; Paiva, R. P.; Munita, C. S. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **2002**, 179, 57. [[CrossRef](#)]
- ¹⁸ Barreto, A. M. F.; Suguio, K.; Bezerra, F. H. R.; Tatumi, S. H.; Yee, M.; Guannini, P. C. F. *Geologia USP Série Científica* **2004**, 4, 1. [[Link](#)]
- ¹⁹ Duran, O.; Silva, M. V. N.; Bezerra, L. J. C.; Herrmann, H. J.; Maia, L. P. *Geomorphology* **2008**, 102, 460-471. [[CrossRef](#)]
- ²⁰ Sítio do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. Disponível em: <<http://www.inpe.br/>>. Acesso em: 31 agosto 2010.
- ²¹ Sítio da Universidade Estadual Paulista - UNESP. Disponível em: <<http://www.unesp.br/prope/projtecn/Outras/Outras07a.htm>>. Acesso em: 05 fevereiro 2011.
- ²² Gastão, F. G. C.; Maia, L. P. *Revista Brasileira de Cartografia* **2010**, 62, 155. [[Link](#)]
- ²³ Martin, L.; Suguio, K.; Flexor, J. M. *Boletim IG-USP* **1993**, 15, 1. [[Link](#)]
- ²⁴ Imbrie, J.; Imbrie, K. P.; *Ice ages: Solving the Mystery*, Cambridge, Harvard University Press: Massachusetts, 1979.
- ²⁵ Ledru, M. P.; Cordeiro, R. C.; Dominguez, J. M. L.; Martin, L.; Mourguiart, P.; Sifeddine, A.; Turcq, B. *Quaternary Research* **2001**, 55, 47. [[CrossRef](#)]
- ²⁶ Santos, J. H. S.; Silva, J. X.; *Trabalho Completo do XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada*, Viçosa, Brasil, 2009. [[Link](#)]