

---

---

# LAGOAS COSTEIRAS INTERDUNARES E BRANQUEAMENTO DE DUNAS NO NORDESTE BRASILEIRO

Prof. Ph. D. Noam Levin  
Senior Lecturer - Department of Geography, Hebrew University of Jerusalem, Israel  
Mount Scopus, Jerusalem 91905 - Israel  
Tel.: 972-2-5881078 - noamlevin@mscc.huji.ac.il

Haim Tsoar  
Ben-Gurion Universidade do Negev  
tsoar@bgu.ac.il

Luis Parente Maia  
Universidade Federal do Ceará  
parente@ufc.br

Vanda Claudino-Sales  
Universidade Federal do Ceará  
vcs@ufc.br

Hans Herrmann  
Instituto Federal Suíço de Tecnologia  
hans@ifb.baug.ethz.ch

## RESUMO

As mudanças na cor das areias de dunas, de branca para amarela ou vermelha, é frequentemente interpretada como significando uma maior idade dos materiais de origem. Neste estudo, demonstramos o efeito sazonal que as lagoas interdunares de água doce têm no branqueamento da cor da areia das dunas através da redução de ferro nas condições anaeróbicas que elas criam. Combinando medidas espectrais de amostras de campo da areia dunar simultaneamente com a análise de imagens de satélite que cobrem três campos de dunas no Nordeste do Brasil (Lençóis Maranhenses, Jericoacoara e Canoa Quebrada), demonstramos tal situação no campo. Como este processo pode ter ocorrido em outros campos de dunas durante condições climáticas passadas que podem ter sido diferentes das atuais, as interpretações da idade das dunas baseadas na sua cor devem ser tratadas com cuidado.

**Palavra-Chaves:** dunas litorâneas; lagoas interdunares; óxidos de ferro; avermelhamento; redução; sensoriamento remoto

## ABSTRACT

The changes in color of sand dunes from white to yellow or red is often interpreted to signify their age or their source materials. In this study we demonstrate the effect seasonal inter-dune freshwater ponds have on the bleaching of the color of sand dunes by iron reduction in the anaerobic conditions they create. By combining spectral measurements of field samples of dune sand together with the analysis of satellite images covering three dune fields in NE Brazil (Lençóis Maranhenses, Jericoacoara and Canoa Quebrada) we demonstrate its existence in the field. As this process may have occurred in other dune fields during past climate conditions that may have been different from current ones, interpretations of dunes age based on their color should be handled with care.

**Words-Key:** coastal dunes; Ponds; Iron oxides; Rubification; Reduction; Remote sensing

---

---

## Introdução

### *Avermelhamento de dunas*

Há evidência abundante de que muitas areias de dunas se tornam avermelhadas com o tempo. Este processo é promovido através de temperaturas elevadas, condições de oxidação e presença periódica de umidade (NORRIS, 1969). Deste modo, a porcentagem de óxidos de ferro nas areias de dunas pode indicar a sua idade, materiais de origem e caminhos de transporte, como demonstrado tanto para dunas

de deserto (WHITE et al., 1997, 2001) quanto para dunas litorâneas (LEVIN et al., 2005; BEN-DOR et al., 2006), nas quais a areia se torna mais amarela ou vermelha com a distância do litoral. Este processo é conhecido como avermelhamento, que é um estágio de pedogênese no qual o ferro é liberado de minerais primários para formar óxidos livres de ferro que revestem partículas de quartzo nos solos com um filme fino avermelhado (BUOL et al., 1973). Durante a intemperização de uma rocha primária para gerar um solo, o ferro, predominantemente unido em silicatos no estado reduzido, será liberado através de uma reação hidrolítica e oxidativa combinada na qual o oxigênio atmosférico remove elétron (SCHWERTMANN e TAYLOR, 1977). Devido à solubilidade extremamente baixa dos óxidos de  $Fe^{3+}$  nos vários solos de pH normal, o ferro liberado será precipitado como óxido ou hidróxido. Williams e Yaalon (1977) demonstraram o avermelhamento em areias de dunas em laboratório. A pesquisa deles mostrou que a matéria orgânica não é necessária para iniciar o processo. Em solos de Terra Rosa e Chernossolo (Rhodoxeralfs e Xerochrepts, respectivamente, de acordo com a Taxonomia do Solo dos EUA), diferenças na mineralogia do óxido de ferro (hematita vermelha vs. goethita amarela) foram interpretadas por Singer et al. (1998) como sendo devido à diferenças no pedoclima.

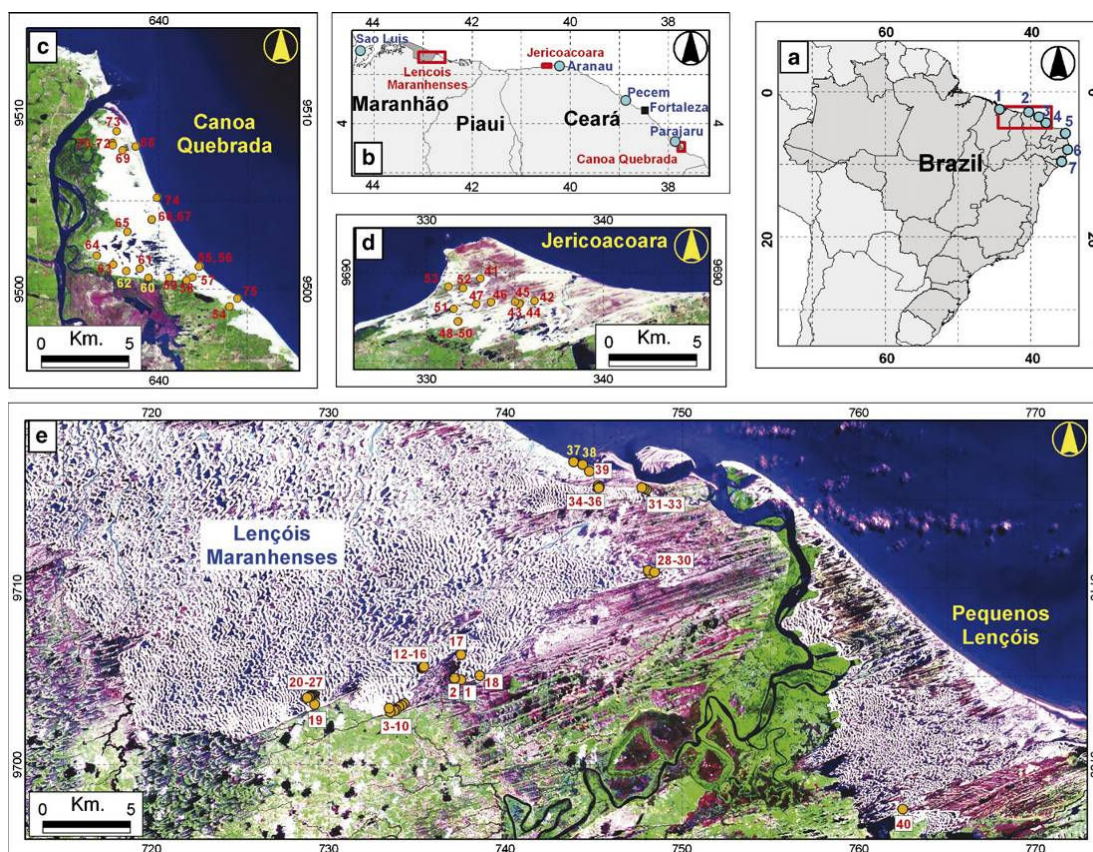
### ***Branqueamento de dunas***

Se por um lado o avermelhamento de dunas é bem estudado, por outro, o processo oposto, no qual o ferro é reduzido e a cor da areia torna-se mais branca, tem recebido muito menos atenção. Experimentalmente, a abrasão da areia foi demonstrada como apta a remover apenas uma pequena porcentagem de ferro das camadas de grãos de superfície (BULLARD et al., 2004; BULLARD e WHITE, 2005). Roden et al. (2000) demonstrou dissolução redutiva de causa microbiana de 95% do  $Fe^{3+}$  cristalino sintético (goethita) de areia revestida de óxido em reatores de colunas de fluxos contínuos no período de 6 meses. Isto foi visivelmente comprovado através do extenso branqueamento da cor da areia nas colunas. A reversibilidade para redução da oxidação do ferro portanto desempenha um papel importante no comportamento dos solos. Em solo saturado, o oxigênio torna-se deficiente e microorganismos podem utilizar  $Fe^{3+}$  como receptores finais de elétron para realizar a sua decomposição oxidante de matéria orgânica. O  $Fe^{3+}$  é reduzido deste modo a  $Fe^{2+}$ , que, sendo geralmente mais solúvel, acelera a dissolução do óxido (SCHWERTMANN e TAYLOR, 1977). Em solos de ambientes pantanosos, foi demonstrado que depleções de redox ocupam mais de 60% do horizonte, em profundidades 15–30 cm, em solos que foram saturados 21 dias ou mais em pelo menos 9 de 10 anos (VEPRASKAS et al., 2004).

O branqueamento de areia quando esta é transportada através de correntes litorâneas é bem conhecido (Emery e Neev, 1960), e evidência de estudos de campo relativo à redução de ferro férrico em água doce geralmente indica apenas redução parcial (por exemplo LOVLEY e PHILLIPS, 1986; PIPUJOL e BUURMAN, 1997).

### ***Sensoriamento remoto de óxidos de ferro***

Baseado nos óxidos livres de ferro que avermelham partículas de solo, e usando índices espectrais de cor ou modelos lineares mesclados, Madeira et al. (1997) e White et al. (1997, 2001) demonstraram que é possível considerar o status do óxido de ferro usando os dados de Landsat sobre solos lateríticos no Brasil, e areias de dunas na Namíbia e nos Emirados árabes Unidos, respectivamente. A espectroscopia de campo era utilizada por Bullard e White (2002) para quantificar as camadas de óxido de ferro em areia de dunas no Deserto de Simpson-Strzelecki, Austrália. Embora em dunas litorâneas o conteúdo de ferro seja relativamente baixo, tal conteúdo pode ser quantificado usando índices espectrais (por exemplo o índice de avermelhamento) ou um sensor hiperespectral aéreo (BEN-DOR et al., 2006), ou até mesmo através de uma simples câmera fotográfica digital (LEVIN et al., 2005).



**Figura 1** - Mapa de localização dos campos de dunas estudados (a) Localização da área de estudo no Nordeste do Brasil com respeito à América do Sul; (b) a localização dos três locais dos campos nos estados do Ceará e Maranhão; (c) local do campo de dunas de Canoa Quebrada. Ao fundo: uma imagem de satélite Landsat de 9/8/1989. Os locais das amostras coletadas estão marcados pela numeração (d) local do campo de dunas de Jericoacoara. Ao fundo: uma imagem de satélite Landsat de 23/8/1992. Os locais das amostras da areia estão marcados pela numeração; (e) local do campo de dunas dos Lençóis Maranhenses. Ao fundo: uma imagem de satélite Landsat de 23/5/2000. Os locais das amostras da areia estão marcados pela numeração.

### Objetivo de estudo

Nenhum estudo relatou ainda o branqueamento de areias de dunas ativas devido à redução de ferro. Nosso objetivo no presente estudo foi portanto apresentar a existência de tal mecanismo nas dunas litorâneas e sistema de lagoas de água doce localizados na área interdunares no Nordeste do Brasil. Combinando a espectropia das amostras de areia e o sensoriamento remoto via satélite, visamos demonstrar que a presença de lagoas temporárias de água doce é responsável por este processo. Nossas hipóteses foram a seguinte:

- (1) Em áreas sem lagoas o processo de avermelhamento será evidente quanto maior a distância do litoral.
- (2) Em áreas com lagoas não existirá este processo de avermelhamento porque os óxidos de ferro serão reduzidos, de forma que a cor da areia se tornará mais branca quanto maior a distância do litoral.
- (3) estes padrões podem ser impedidos por exposições de areia vermelha de gerações de dunas mais antigas.

### Área de estudo

A área de estudo está situada na costa tropical nordeste do Brasil, nos estados do Maranhão e do Ceará (Fig. 1). As duas principais províncias geomorfológicas incluídas na área de dunas litorâneas são e



vermelho é comum (Formação Barreiras, de idade Terciária), e acima deste a planície quaternária, com depósitos de várias origens (planícies de cristas de praia, solos hidromórficos e campos de dunas litorâneas). A costa do Ceará quase toda (como também as do Piauí e a parte leste do Maranhão) é caracterizada por campos de dunas extensos. Três a quatro gerações foram identificadas (MAIA, 1998; JIMENEZ et al., 1999):

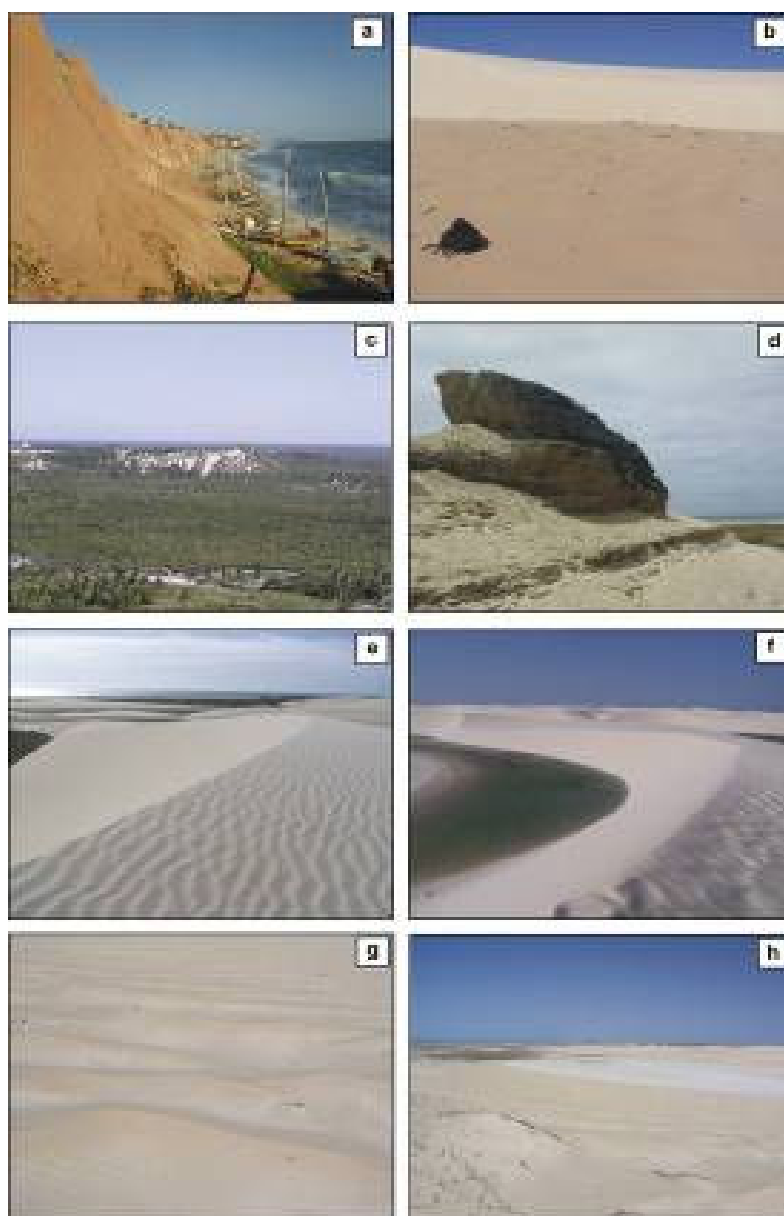
- (1) Palaeodunas sem formas definidas situadas no topo da formação de Barreiras (Fig. 2a). Estas consistem de areia de quartzo não consolidada, variando de grãos moderadamente a uniformemente finos a grãos médios de uma cor vermelha escura (Fig. 2b, g, h).
- (2) Dunas parabólicas estabilizadas formadas de areia média a fina de quartzo não consolidado, de grãos moderados a uniformes e cores que variam de laranja a cinza (Fig. 2c).
- (3) Eolianitos que estão situados acima do terraço holoceno marinho mas abaixo do sistema de duna móvel atual (Fig. 2d).
- (4) As dunas ativas atuais (Fig. 2e, f) que são o objeto do presente trabalho. Estas dunas penetram entre 5–10 km no interior da zona costeira (no Maranhão até mesmo mais de 20 km) e inclui barcanas, barcanoides e lençóis de areia, com o tipo de duna dominante dependendo do estoque de areia disponível. No momento, as dunas ativas estão separadas da faixa litorânea por uma planície de deflação de 600 m a 2000 m de largura, e estão migrando sobre o topo de gerações de dunas mais antigas. A taxa de migração das barcanas de Jericoacoara é calculada como em média 17.5 m / ano (Jimenez et al., 1999). Maia (1998) calculou que as condições originais para formação de dunas ocorreram durante um período de baixo nível do mar durante os últimos 2000 anos.

Três locais de campo foram estudados:

- (1) A reserva natural dos Lençóis Maranhenses no Estado do Maranhão (Figs. 1e, 2f), onde as dunas se estendem ao longo de aproximadamente 75 km e penetram no interior por distâncias maiores que 20 km. A área dos Lençóis Maranhenses é principalmente caracterizada pela presença de barcanoides e dunas transversais. Durante a estação chuvosa as áreas interdunares são inundadas pela ascensão do lençol freático, formando assim lagoas interdunares temporárias (Fig. 2f).
- (2) A reserva natural de Jericoacoara no Estado do Ceará, oeste da cidade de Fortaleza (Figs. 1d, 2b, e). Este campo de dunas é caracterizado por grandes barcanas (alturas de até 50 m). Nas áreas interdunares destas barcanas são formadas lagoas temporárias (entretanto menos extensas que nos Lençóis Maranhenses), principalmente entre marcas de vegetação em cúspide (como descrito em JIMENEZ et al., 1999; CLAUDINO-SALES e PEULVAST, 2002). As taxas de migração de dunas nesta área estão entre 14 e 22 m/ano, dependendo da altura das dunas (JIMENEZ et al., 1999; SAUERMAN et al., 2003).
- (3) O campo de dunas de Canoa Quebrada no Estado de Ceará, a leste da cidade de Fortaleza (Fig. 1c). Este campo de dunas é caracterizado por dunas transversais, com poucas áreas com lagoas interdunares. A Formação Barreiras propicia a existência de falésias de arenito vermelho ao longo das suas partes sudeste (Fig. 2a).

O regime eólico no Nordeste do Brasil é regido pelos fortes ventos alísios oriundos do leste. O posicionamento latitudinal sazonal da ZCIT determina tanto a presença de ventos dominantes quanto os regimes de chuva (WANG et al., 2004). A média anual de chuva em Fortaleza é de 1663 mm (para os anos de 1974–1995) e é altamente sazonal, com um período chuvoso de janeiro a julho, quando ocorrem quase 93% das chuvas (JIMENEZ et al., 1999). A chuva aumenta na direção oeste, ocorrendo nos Lençóis Maranhenses mais de 2000 mm anuais. Durante o período seco, de agosto a dezembro, quase não há nenhuma chuva, e a velocidade do vento é muito maior que na estação chuvosa. Geralmente ao longo da costa do Nordeste do Brasil, a velocidade do vento aumenta na direção noroeste e, ao mesmo tempo, uma mudança na direção da qual o vento está se deslocando também é detectada do SE a NE (JIMENEZ et al., 1999). A força do vento e o potencial de deriva resultante (DRP; FRYBERGER, 1979)

de areia aumenta de Maceió (no estado do Alagoas) para Aranaú (no estado do Ceará) e provavelmente para os Lençóis Maranhenses, diminuindo dramaticamente em São Luis e na direção oeste (veja os locais na Fig. 1, e valores de Potencial de Deriva - DP na Tabela 1). Os valores de DP e DRP/DP de Aranaú, Pecém e Parajuru correspondem a valores encontrados em áreas com sistemas de dunas altamente ativos (TSOAR, 2005).



**Figura 2** - Fotografias das diferentes gerações de dunas encontradas na área de estudo: (a) Falésias vermelhas da Formação Barreiras, Canoa Quebrada, Ceará, Brasil (foto de N.L.); (b) Superfície de areia vermelha de palaeoduna coberta por uma duna de areia branca ativa, Jericoacoara, Ceará, Brasil (foto de N.L.); (c) Dunas parabólicas estabilizadas, leste de Fortaleza, Ceará, Brasil (foto de H.T.); (d) Eolianito, oeste de Fortaleza, Ceará, Brasil (foto de N.L.); (e) dunas Barcanas, Jericoacoara, Ceará, Brasil (foto N.L.); (f) Dunas e lagoas, Lençóis Maranhenses, Maranhão, Brasil (foto de Reginaldo Lima Verde); (g, h) Mega-ondulações (mega-ripples) no campo de dunas de Canoa Quebrada (foto de H.T.).

**Tabela 1:** Parâmetros da força do vento do potencial de deriva (DP), potencial de deriva resultante (RDP), e direcionalidade do vento (RDP/DP)

ID no mapa	local/período de medida	DP	RDP	RDP/DP	RDD (deg)	limiar de tempo acima p/o movimento da areia (%)
1	São Luís <sup>a</sup> 1972-90	138.4	406	0.77	67.3	16.2
2	Aranauí <sup>b</sup> 2003	2173	2110	0.97	96	76
3	Pecém <sup>b</sup> 1995-99	692.2	659.5	0.95	99.2	59
4	Parajuru <sup>b</sup> 2003	282.3	257.6	0.91	89.8	49.8
5	Natal <sup>a</sup> 1973-90	97.7	81.5	0.83	113.8	15.1
6	Recife <sup>a</sup> 1973-93	81.9	45.7	0.56	108	7.2
7	Maceió <sup>a</sup> 1972-90	34.4	23.1	0.67	84.1	5.5

Os locais estão ordenados ao longo da costa de norte a oeste (São Luís) para o sul ao leste (Maceió), e são mostrados na Fig. 1a.

**a** retirado da Estação Meteorológica Internacional do Clima. Complexo federal do Clima, Ashville, Dept. da Marinha/ Dept. do Comércio/Dept. da Força Aérea

**b** Dados fornecidos por L.P.M.

## Métodos

### Amostras de campo

Ao todo, 75 amostras de areia de dunas foram coletadas dos três locais de campo: 22 de Canoa Quebrada, 13 de Jericoacoara e 40 dos Lençóis Maranhenses. As amostras de areia coletadas incluem a praia, falésias vermelhas da Formação Barreiras (amostra 75 em Canoa Quebrada), dunas de areias ativas (retiradas de uma profundidade aproximada de 2 cm para evitar influências das ondulações de superfície; Tsoar, 1990), e exposições de grãos de areia vermelha de paleodunas ou nas áreas interdunares (amostra 49 e 50 em Jericoacoara; veja Fig.2b) ou em mega-ondulações (“mega-ripples”: em Canoa Quebrada; Fig.2g, h). Em cada área a maior parte das amostras foi coletadas no topo das dunas e ao longo de um transecto que varia do litoral rumo ao interior, o qual permite examinar as mudanças de cor como uma função da distância do litoral. O transecto das dunas de Canoa Quebrada foi escolhido em uma área onde há algumas lagoas entre as dunas, e que é situado ao norte com respeito à falésia vermelha da Formação Barreiras (assim as dunas não foram afetadas por ela). Além disso, amostras foram retiradas em transectos através de duas lagoas nos Lençóis Maranhenses: começando na duna, a barlavento, depois no leito da lagoa (alguns centímetros abaixo de sua superfície) e terminando o transecto da lagoa na duna, a sotavento. Isto foi feito para estudar as mudanças na cor da areia entre a duna e o leito da lagoa. A primeira lagoa (amostras 12–16) tem 100 m de extensão (na direção do movimento das dunas) enquanto que a segunda lagoa (Lagoa Bonita, amostras 20–27) tem 350 m de extensão.

### Imagens de satélite

Um extenso conjunto ordenado de imagens de satélite foi examinado para obtenção de padrões espaciais de cor das dunas nas áreas de estudo. Apenas imagens que não estão obscuras e estão sem efeitos de saturação (causada pela cor luminosa da areia e a calibração imprópria do sensor; veja Karnieli

et al., 2004) foram examinadas. Imagens de diferentes estações demonstram a mudança na área das lagoas. Uma lista completa destas imagens e os seus problemas de saturação são dados na Tabela 2. Todas as imagens de satélite foram radiometricamente e atmosféricamente corrigidos seguindo Chavez (1988). As imagens do Aster foram obtidas da Internet do site da USGS em valores de refletância seguindo a correção automática descrita em Thome et al. (1999). Como a maioria das imagens utilizadas era alguns anos mais antiga do que nossas amostras de campo, e devido à alta mobilidade das dunas nestas áreas, nós ajustamos o local das amostras com respeito ao movimento das dunas. A área das lagoas foi determinada por imagens próximas do final da estação chuvosa e aplicando um classificador supervisionado (ou Probabilidade Máxima ou Distância Mahalanobis, como implementado em Envi 4.2, Research Systems, 2005).

### **Medidas ASD**

Medidas espectrais das amostras de areia seca foram executadas no laboratório com um ASD espectrômetro de campo (ASD, 2001) que cobre a região espectral (0.4–2.5 $\mu$ m), usando uma sonda de contato com iluminação constante e própria de Tungstênio. Vinte medidas espectrais foram feitas para cada amostra e calculada a média para apresentar as características espectrais de cada uma. Isto foi repetido para cada amostra de quatro direções, e dos espectros resultantes foram então calculados a média, para evitar distorções relacionadas com a Função Bidirecional de Distribuição de Refletância (FBDR; KING, 1995). Para otimizar as características de absorção em cada espectro mineral, nós aplicamos uma remoção do continuum espectral algoritmo (CLARK et al., 1987), no qual os sinais de espectros monótonos são caracterizados por um valor de unidade de refletância, e características de absorção são apresentadas relativo a um continuum de valores interpolados de refletância que conectam duas extremidades de absorção.

### **Índices espectrais**

O conteúdo de óxido de ferro livre nas areias foi calculado seguindo índices de cor (MATHIEU et al., 1998). Estes índices e especialmente o Índice de Avermelhamento (IA) são altamente correlatos com o conteúdo de óxido de ferro livre em dunas de areia (LEVIN et al., 2005; WENKART et al., 2005; BEN-DOR et al., 2006):

$$\text{Índice de Brilho, IB} = (B^2 + G^2 + R^2) / 3 \quad (1)$$

$$\text{Índice de Coloração, IC} = (R-G) / (R+G) \quad (2)$$

$$\text{Índice de Matiz, IM} = (2 * R - G - B) / (G - B) \quad (3)$$

$$\text{Índice de Avermelhamento, IA} = R^2 / (B * G^3) \quad (4)$$

$$\text{Índice de Saturação, IS} = (R - B) / (R + B) \quad (5)$$

onde R, G, e B representam a refletância para os comprimentos de ondas das faixas vermelha, verde e azul (Faixas 3, 2 e 1, respectivamente no Landsat). Como estes índices são principalmente índices de proporção, nós esperamos que eles reduzam a matização e os efeitos da FBDR que podem estar presente nas imagens, devido ao ângulo de observação com respeito à direção da qual a luz está vindo (LILLESAND e KIEFER, 1994; KING, 1995). Isto é porque uma imagem de uma cena compensa efetivamente pela variação de brilho causada pelas diferenças na topografia, e enfatiza o conteúdo da cor dos dados. Estes índices foram calculados das medidas do ASD depois de envolver os espectros de refletância para emparelhar aqueles das faixas do Landsat. Como o sensor de Aster não inclui uma faixa azul, os únicos índices que poderíamos calcular para essas imagens foram o índice de coloração (IC), e também versões modificadas do índice de brilho (IB) e do índice de avermelhamento (IA) sem a faixa azul (assim o IA modificado é designado como “IA w/o B”). Como entre o ASD derivaram valores de IA e IA w/o B havia uma correlação de  $R^2 = 99\%$ , os dois são quase idênticos.

Tabela 2 - Imagens de Satélite usadas no estudo

No.	Área de estudo	Sensor	ID da imagem	Data	Saturação em	Uso de imagem
1		Landsat MSS	Path 220 row 62	13/8/1986	Faixas 2, 3	Nenhuma
2		Landsat TM	Path 220 row 62	21/8/1992	Faixas 1, 5	Índices de cor
3	Lençóis	Landsat ETM+	Path 220 row 62	23/5/2000	Faixas 1, 2, 3, 5, 7	áreas das lagoas
4	Maranhenses	Aster	AST_09_0030814200113300000000000000.hdf0	14/8/2001	Faixas 1, 2	Nenhuma
5		Aster	AST_09_0030908200113224300000000000.hdf0	8/9/2001	Faixas 1, 2	Nenhuma
6		Aster	AST_07_0030706200113241200100000000.hdf0	6/7/2001	Faixas 1, 2	Nenhuma
7		Landsat TM	Path 218 row 62	23/8/1992	Band 1 (marginal), Band 5	Índices de cor
8		Landsat ETM+	Path 218 row 62	30/9/2000	Faixas 2, 3, 5, 7	Nenhuma
9	Jericoacoara	Landsat ETM+	Path 218 row 62	16/8/2001	Faixas 3, 5, 7	Nenhuma
10		Landsat ETM+	Path 218 row 62	18/11/2003	Band 1 (some), Band 5, cloudy	Nenhuma
11		QuickBird pan sharpened	04SEP14130853-S2AS_000000178619_01_P002.TIF	14/9/2004	Nenhuma	Índices de cor
12		Landsat TM	Path 216 row 63	9/8/1989	Band 5	Índices de cor
13		Landsat ETM+	Path 216 row 63	13/8/1999	Faixas 3, 5, 7	Nenhuma
14		Landsat ETM+	Path 216 row 63	2/8/2001	Faixas 3, 5, 7	Nenhuma
15	Canoa	Landsat ETM+	Path 216 row 63	20/7/2002	Faixas 3, 5, 7	Nenhuma
16	Quebrada	Aster	AST_07_0030628200013132000000000000.hdf0	28/6/2000	Nenhuma	Índices de cor, áreas das lagoas
17		Aster	AST_07_0030831200013130500000000000.hdf1	27/9/2002	Band 1	Nenhuma
18		QuickBird pan sharpened	Várias imagens	19/2/2004	Faixas 1, 2, 3	Nenhuma



As hipóteses de trabalho foram testadas através do cálculo das correlações entre a distância do litoral e os vários índices de cor. Isto foi feito através do uso das amostras de campo e das imagens de satélite. Das imagens de satélite nós obtivemos gradientes que demonstram as mudanças nos índices de cor como uma função da distância do litoral. Para as imagens de mais alta resolução do Aster (para Canoa Quebrada) e QuickBird (para Jericoacoara), nós fizemos isto após definir o percurso de migração das dunas de acordo com a direção de vento e a existência de lagoas ou de exposições de areia vermelha.

### ***Distribuição do tamanho de grãos***

Algumas das amostras de areia foram submetidas a análise do tamanho de partícula para determinar as diferenças entre a areia do fundo das lagoas e a areia das próprias dunas. Todas as amostras de areia foram peneiradas em um conjunto de peneiras em  $0.25\phi$  ( $\phi = -\log_2 d$ , onde  $d$  é o diâmetro do grão em milímetros) com intervalos para 15 min. Os quatro momentos principais (média, desvio-padrão, assimetria e curtose) foram calculados de acordo com o método de Folk e Ward usando o programa GRADISTAT (BLOTT e PYE, 2001).

## **RESULTADOS**

### ***Espectros, índices de cor e distribuição do tamanho de grãos das amostras de areia***

Os espectros de seis amostras de areia selecionadas cobrindo a gama de cores de branca a vermelha presente na área de estudo é demonstrado na Fig.3. A partir dos valores de refletância do albedo da areia, todas as mudanças são aparentes, tendo sido a areia mais branca encontrada na praia e a mais vermelha, na falésia da Formação Barreiras (Fig.3a). Características de absorção em geral, e aquelas dos óxidos de ferro especialmente, são mais visíveis após uma transformação da remoção do continuum (Fig.3b). A principal característica de absorção do óxido de ferro é centrada em 487 nm (o mediano para todas as 75 amostras). Isto pode indicar que o óxido de ferro presente nestas dunas é goethita cuja característica de absorção diminui a 485 nm (baseado na biblioteca espectral de GROVE et al., 1993). Os cálculos de índice de cor foram baseados nas três faixas específicas seguintes (além de calculá-las das faixas simuladas do TM): 450 nm, 487 nm e 610 nm. Analisando a correlação entre os índices de cor baseado nas faixas específicas e aqueles das faixas simuladas do TM, pode ser visto que é alto para todos os índices com exceção do HI (Tabela 3). Portanto, o HI não foi levado em consideração nas análises seguintes.

Examinando a correlação entre os vários índices e a distância da costa para subconjuntos regionais das amostras de campo (incluindo apenas dunas ativas ao longo dos transectos e desconsiderando as exposições de areia vermelha), os seguintes padrões emergem (Tabela 3, Fig.4):

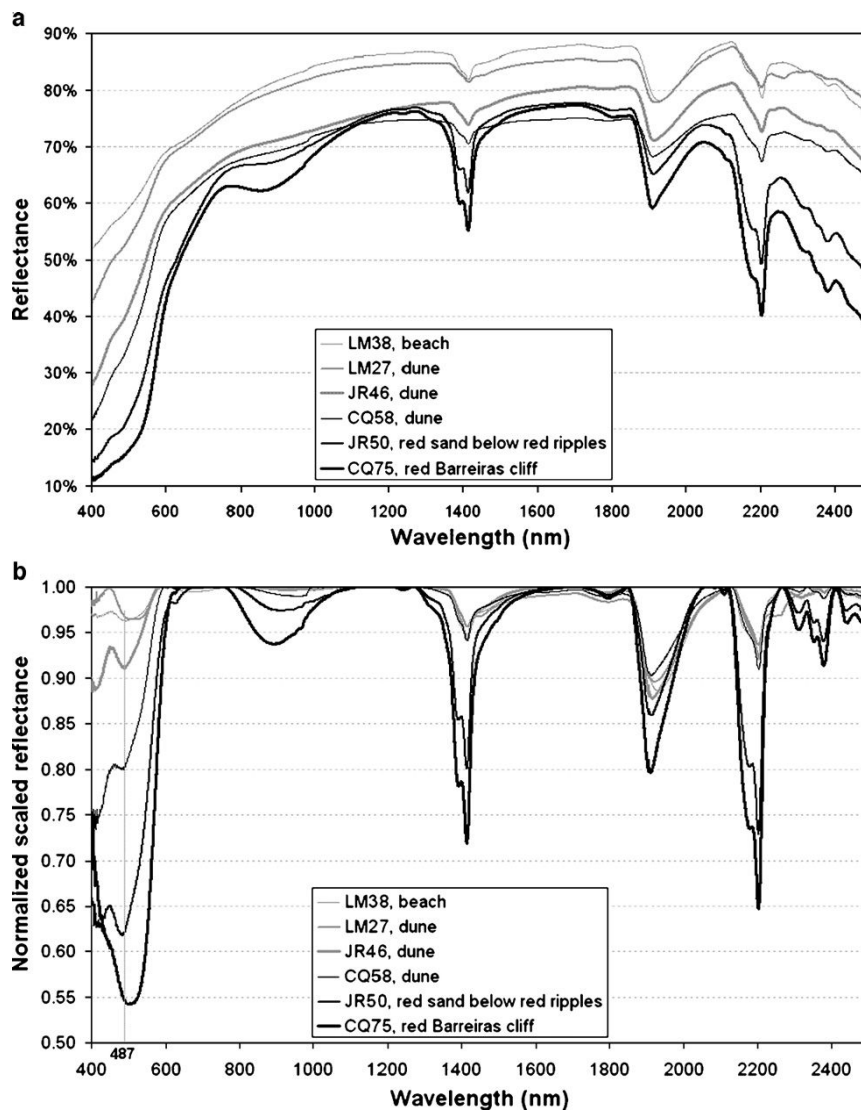
(1) Diante da área das lagoas, o processo de avermelhamento realmente ocorre, como demonstrado para a área próxima do litoral dos Lençóis Maranhenses (LM).

(2) Em áreas onde as dunas estão separadas por lagoas, o branqueamento das dunas ocorre. Isto foi verificado para todas as três áreas de estudo, e será explorado mais adiante na análise das imagens de satélite.

(3) Dentro da Lagoa Bonita, que é uma lagoa relativamente funda com cerca de 350 m de extensão, um branqueamento da areia ocorre, como encontrado nas amostras de areia retiradas do leito da lagoa (Fig.4b; este padrão não apareceu porém em uma lagoa menor de apenas 100 m de extensão; amostras 12–16).

(4) O índice de avermelhamento é na maioria dos casos o melhor índice em termos de valores de coeficiente de correlação. Focalizamos portanto as análises seguintes neste índice espectral. Baseado na distribuição de tamanho dos grãos, todas as amostras de areia das dunas e lagoas são característica de areia eólica (Tabela 4), com um tamanho de areia médio a fino, uniforme, principalmente simétrico e na média mesocúrtica. Para as amostras que representam a areia dos topos das dunas (e da praia), com uma distância a favor do vento, diminui a média do tamanho dos grãos ( $R=0.85$ ,  $p=0.01$ ), a classificação

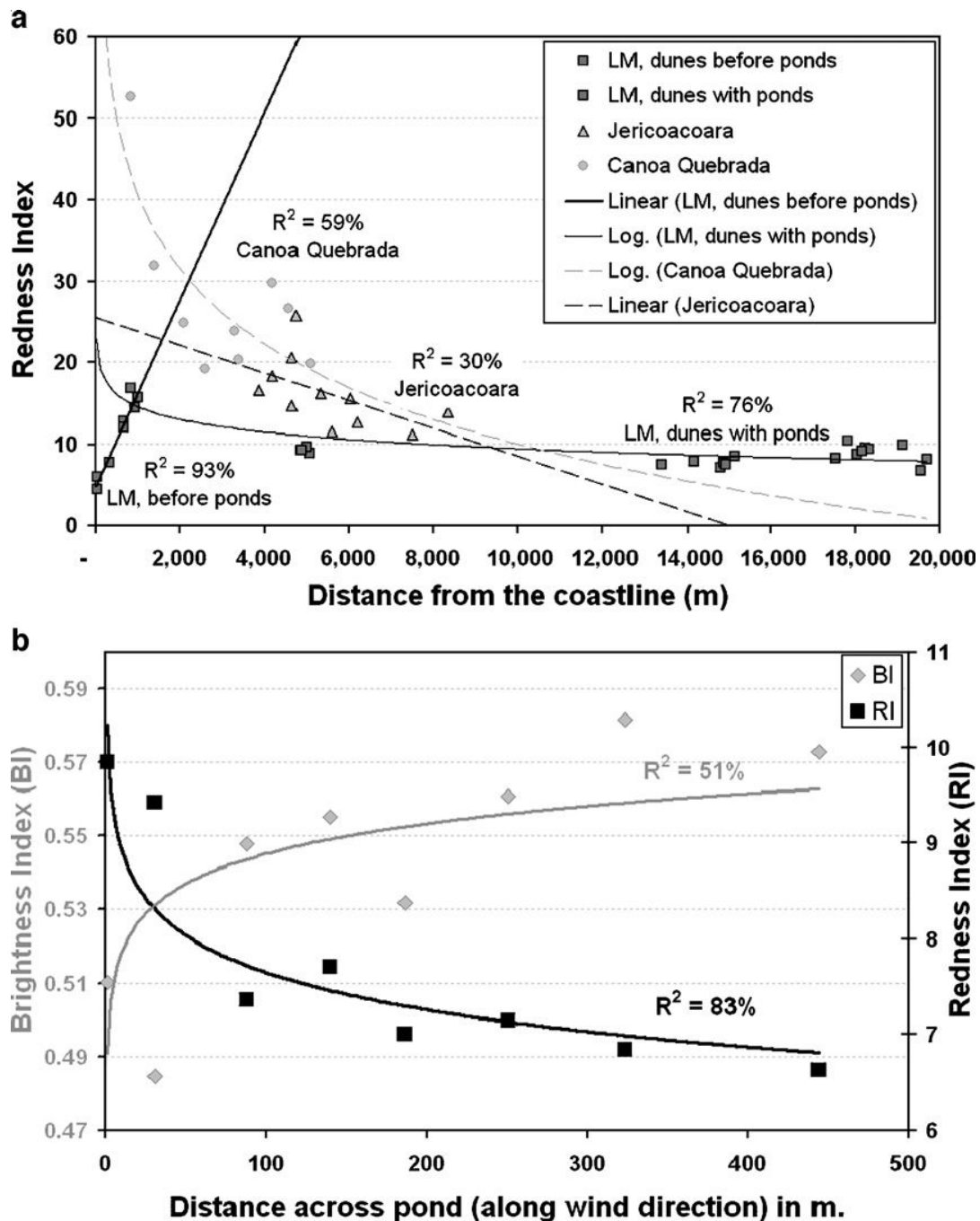
melhora, e a sua distribuição fica mais simétrica e mesocúrtica (Tabela 4 e Fig.5). Devido a estas mudanças na distribuição da areia, quando comparamos o tamanho médio dos grãos das amostras das dunas ( $\bar{i}=2.20\bar{O}$ ) com o das amostras retiradas do fundo da Lagoa Bonita, que fica situada a aproximadamente 20 km ao interior do litoral ( $\bar{i}=2.04\bar{O}$ ), a diferença entre os dois grupos não foi estatisticamente significativa ( $p=0.13$ ). Na realidade, as amostras de areia das dunas e das lagoas foram apenas diferentes na curtose ( $\hat{i}=1.10$  e  $0.90$ , respectivamente;  $p=0.00$ ), onde algumas das amostras das dunas são leptocúrticas e algumas das amostras da lagoa são platicúrticas (de acordo com a classificação em BLOTT e PYE, 2001). A distribuição platicúrtica e até mesmo a bimodal encontradas em algumas das amostras das lagoas indica uma classificação pobre, e pode ser o resultado da mistura da areia muito fina que foi levada pela turbulência na vertente a barlavento da duna e depositados na lagoa, com depósitos tardios no leito da lagoa. Também está claro que a distribuição do tamanho dos grãos dos fundos das lagoas (amostras 21–26) apresenta material mais grosseiro do que aquele dos topos das dunas imediatamente circunvizinhas (amostras 19 e 20).



**Fig.ura 3:** Os espectros de refletância de seis amostras de areia representativas da área de estudo como obtido no laboratório antes (a) e depois de aplicar a remoção do continuum algoritmo (b). LM representa Lençóis Maranhenses, JR representa Jericoacoara, e CQ representa Canoa Quebrada.

Correlação com	Amostras incluídas	BI	CI	HI	RI	SI	RI (w/o B)
Os mesmos índices calculados das faixas simuladas	Todas (n = 75)	0.99	0.88	0.52	<b>0.96</b>	0.98	0.90
Distância do litoral,							
Lençóis Maranhenses,	31-39 (n = 9)	-0.95	0.93	0.25	<b>0.97</b>	0.94	0.97
dunas ativas antes das lagoas							
Logaritmo da distância do litoral,	1-3, 5-6, 9-14,						
Lençóis Maranhenses,	16-36	0.81	-0.63	0.60	<b>-0.84</b>	-0.69	-0.83
dunas ativas separadas por lagoas	(n = 32)						
Distância do litoral,							
Lençóis Maranhenses,	20-27 (n = 8)	0.82	-0.34	0.29	<b>-0.82</b>	-0.37	-0.79
Lagoa Bonita							
(antes, depois e dentro da lagoa)							
Distância do litoral,							
Jericoacoara,	41-48, 51-53	0.70	-0.51	-0.50	<b>-0.55</b>	-0.50	-0.55
dunas ativas separadas por lagoas	(n = 11)						
Distância do litoral,							
Canoa Quebrada,	57-65 (n = 9)	0.69	-0.74	-0.88	<b>-0.77</b>	-0.72	-0.77
dunas ativas separadas por lagoas							

**Tabela 3:** Valores de coeficiente de Correlação encontrados entre os índices de cores espectrais (calculado de três faixas específicas do ASD) e os mesmos índices calculados das faixas simuladas TM, bem como a distância do litoral para vários subconjuntos regionais das amostras de campo.

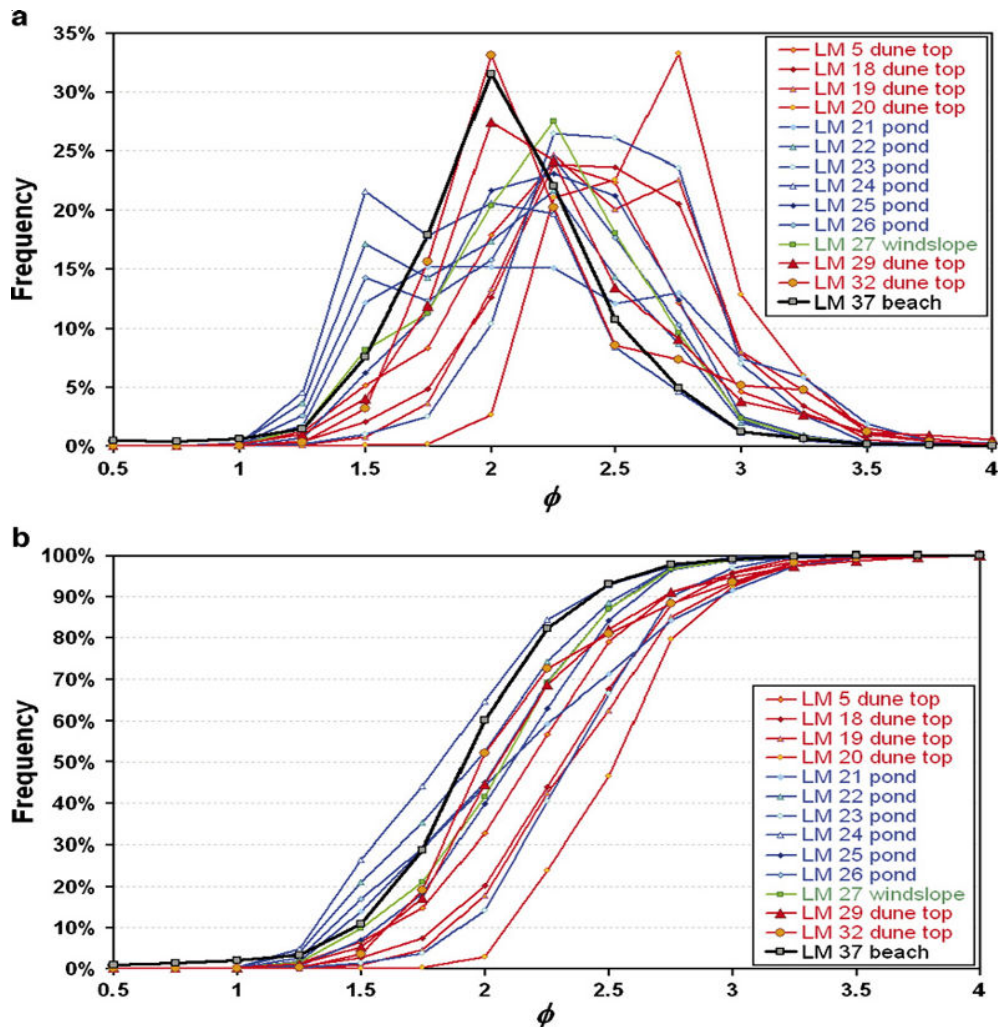


**Fig.ura 4:** (a) Uma matriz de correlação que apresenta a correlação entre o índice de avermelhamento como calculado nas três faixas específicas do ASD e a distância do litoral na direção do movimento de duna, para três áreas de estudo; (b) como em (a), mas apenas para as amostras retiradas do leito da Lagoa Bonita. A primeira amostra, à esquerda, foi retirada do topo da duna a sotavento, e a última amostra, à direita, foi retirada da vertente a barlavento da duna. Em ‘a’, na vertical, índice de avermelhamento, na horizontal, distância da praia; em ‘b’, na vertical, índice de brilho, na horizontal, distância através da lagoa, de acordo com a direção do vento, em metros.

**Tabela 4:** Momentos de distribuição do tamanho de grão de 14 amostras do campo de dunas dos Lençóis Maranhenses (valores em  $\ddot{O}$ ). Filas 1–7 representam o ambiente de dunas, enquanto filas 8–14 representam ambientes interdunas. Filas 7–14 cobrem transecto Lagoa da Bonita. Nas filas mais abaixo algumas estatísticas com respeito a esses momentos são dados (veja texto para detalhes). LM quer dizer Lençóis Maranhenses.

Fila	Nome da amostra de areia	Distância do litoral	Distância ao longo do transecto da Lagoa Bonita	Média	Uniformidade	Dissimetria	Curiose
1	LM 37 praia	40		1.918	0.373	0.025	1.116
2	LM 32 topo da dune	679		2.086	0.461	0.375	1.216
3	LM 29 topo da dune	4,998		2.104	0.442	0.220	1.181
4	LM 18 topo da dune	14,169		2.300	0.397	-0.003	1.067
5	LM 5 topo da dune	17,837		2.170	0.440	0.008	1.159
6	LM 19 topo da dune	19,719		2.339	0.395	0.094	1.008
7	LM 20 topo da dune	19,121	0	2.492	0.332	0.034	0.980
8	LM 21 lagoa	19,151	30	2.118	0.580	0.102	0.857
9	LM 22 lagoa	19,208	87	1.926	0.460	-0.053	0.846
10	LM 23 lagoa	19,260	139	2.337	0.337	0.048	1.004
11	LM 24 lagoa	19,307	185	1.805	0.422	0.066	0.864
12	LM 25 lagoa	19,371	250	2.089	0.391	-0.064	0.957
13	LM 26 lagoa	19,444	323	1.986	0.452	-0.149	0.870
14	LM 27 declive face ao vento	19,565	443	2.045	0.406	-0.095	1.046
	Correlação com a distância para as amostras das dunas (filas 1–7)			0.85	-0.38	-0.58	-0.71
	Correlação com a distância para as amostras das dunas sem a praia (filas 2–7)			0.78	-0.70	-0.89	-0.81
	Média para as amostras das dunas (filas 1–7)			2.20	0.41	0.11	1.10
	Média para as amostras das dunas sem a praia (filas 2–7)			2.25	0.41	0.12	1.10
	Média para as amostras das lagoas (filas 8–13)			2.04	0.44	-0.01	0.90
	Média para as amostras das lagoas com o declive face ao vento exatamente após a lagoa (filas 8–14)			2.04	0.44	-0.02	0.92
	Teste- T entre as amostras das dunas (filas 1–7) e as amostras interdunas (filas 8–14)			0.13	0.39	0.07	0.00
	Teste- T entre as amostras dos topos das dunas (filas 2–7) e as amostras das lagoas (filas 8–13)			0.07	0.47	0.11	0.00





**Figura 5:** Distribuição do tamanho dos grãos das amostras de areia do campo de dunas litorâneas dos Lençóis Maranhenses. Em azul: amostras de areia do fundo da lagoa, em verde: amostras de areia da mais baixa vertente a barlavento das dunas, e em vermelho: amostras de areia dos topos das dunas. Ambas a % de frequência (a) e a % de frequência cumulativa (b) são dados.

### *Índices de cor de imagem-derivada de Satélite*

Baseado na boa correlação entre os índices de cor, como calculado das amostras de campo, e os seus valores correspondentes, como calculado das imagens de satélite (especialmente quando usados sensores de resolução mais alta como Aster ou QuickBird; Tabela 5), continuamos a examinar o gradiente completo das mudanças no índice de avermelhamento (IA) da areia como uma função da distância do litoral.

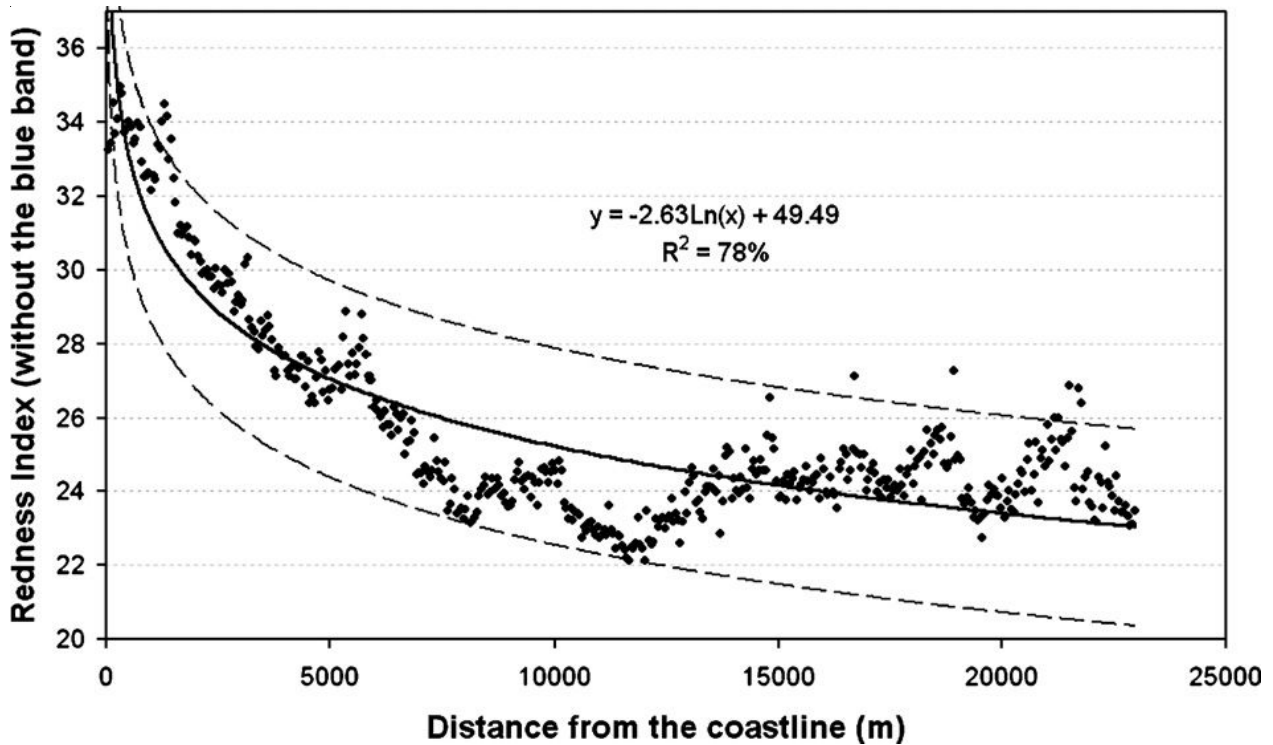
### *Lençóis Maranhenses*

O índice de avermelhamento comum para intervalos de 50 m de distância do litoral foi calculado da imagem do Landsat de agosto de 1992 cobrindo as dunas litorâneas dos Lençóis Maranhenses (esta imagem foi saturada na faixa azul). As lagoas interdunares cobrem aproximadamente 41% deste campo de dunas. A área média das lagoas interdunares é de 7 ha e a sua média de circularidade (como em ROBINSON e FRIEDMAN, 2002, onde a circularidade de uma esfera é 1) é de 0.47. Deste modo, a maioria das lagoas é mais extensa na direção dos ventos de direções diferentes e não na direção longitudinal ao vento (como na Lagoa Bonita). Na análise seguinte do índice de avermelhamento foram incluídas

apenas dunas ativas. Estas foram definidas como aqueles pixels que foram fixados pelo classificador de probabilidade máxima nesta categoria em um limiar de probabilidade de 90%. Depois de uma distância de cerca de 1 km na qual não havia quase nenhuma mudança na cor da areia, há um branqueamento evidente na cor da areia até uma distância de cerca de 7.5 km (Fig. 6). De lá em diante a cor da areia fica mais ou menos a mesma com flutuações secundárias, que estão principalmente dentro dos 95% intervalos de segurança da curva de saturação. De modo geral a distância do litoral explica aproximadamente 78% da variação no índice de avermelhamento.

**Tabela 5:** Valores do coeficiente de correlação encontrados entre os índices espectrais de cores (calculado das faixas simuladas TM do ASD) e os mesmos índices calculados das imagens de satélite para vários subconjuntos regionais das amostras de campo

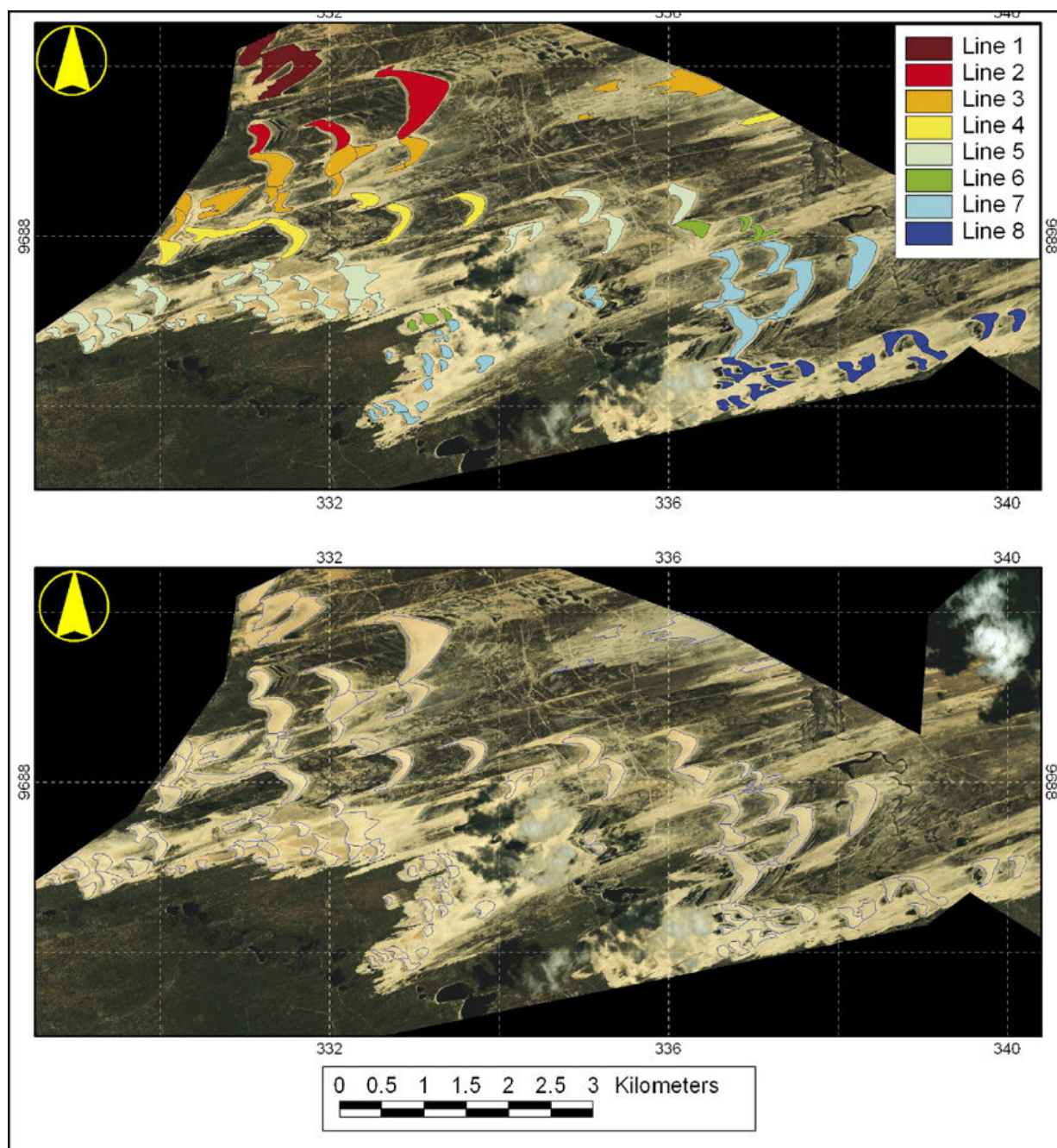
Correlação com	Amostras incluídas	BI	CI	HI	RI	SI	RI (w/o B)
	n = 44						
Os mesmos índices calculados das imagens do satélite Landsat, amostras de superfície	(como detalh.abixo)	0.49	0.89	0.18	0.69	0.85	0.43
Os mesmos índices calculados das imagens do satélite Landsat, Lençóis Maranhenses, amostras de superfície	1-3, 5-6, 9-12, 16-20, 27-36 (n = 24)	0.86	0.76	0.18	0.87	0.14	0.82
Os mesmos índices calculados das imagens do satélite Landsat, Jericoacoara, todas amostras de superfície	41-49, 51-53 (n = 12)	0.86	0.35	0.54	0.94	0.23	0.93
Os mesmos índices calculados das imagens do satélite QuickBird, Jericoacoara, todas amostras de superfície	41-49, 51-53 (n = 12)	0.73	0.95	0.93	0.97	0.95	0.97
Os mesmos índices calculados das imagens do satélite Landsat, Canoa Quebrada	58-65 (n = 8)	0.54	0.77	0.79	0.91	0.69	0.93
Os mesmos índices calculados das imagens do satélite Aster, Canoa Quebrada	58-65 (n = 8)	0.65	0.47				0.93



**Fig.ura 6:** Uma matriz de correlação que apresenta a correlação entre o índice de avermelhamento como calculado da imagem do satélite Landsat de agosto 1989 do campo de dunas dos Lençóis Maranhenses e a distância do litoral na direção do movimento das dunas. A linha tracejada representa 95% de intervalo de segurança.

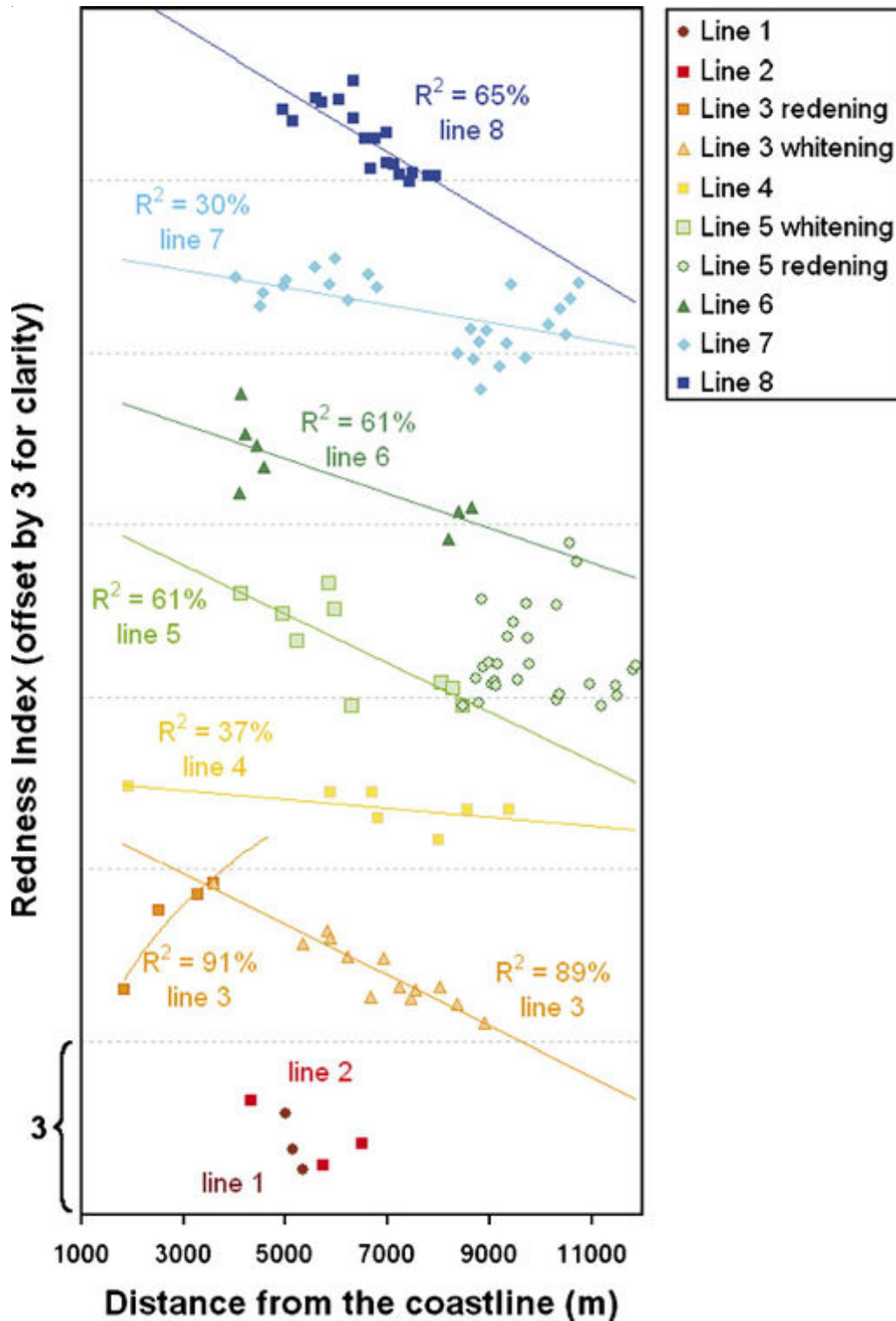
### *Jericoacoara*

Oito linhas de penetração de dunas foram definidas na imagem do QuickBird de Jericoacoara (Fig.7), assumindo que o movimento de areia em cada linha é independente dos outros. Para cada uma das 116 dunas que foram digitalizadas nesta imagem (excluindo as áreas de face de deslizamento, ou áreas sombreadas por nuvens), foram calculadas a média do Índice de avermelhamento e a média de distância do litoral. Como linha 1 e linha 2 compreendem apenas três dunas, os seus dados não foram analisados estatisticamente. Os resultados são apresentados na Fig.8. Pode ser visto claramente que na maioria das linhas não há nenhum processo de avermelhamento, mas sim, ao contrário, ocorre branqueamento das dunas. Contudo algumas exceções interessantes deveriam ser notadas. Nos lençóis de areia no começo da linha 3 há um avermelhamento que é invertido uma vez que as lagoas começam a se formar, mais para oeste. Nas linhas 5 e 7 o processo de branqueamento das dunas para a uma distância de cerca de 9 km do litoral é devido a uma falta combinada de lagoas e existência de exposições de areia vermelha entre as lagoas.



**Figura 7:** Uma imagem do satélite QuickBird de Jericoacoara de setembro de 2004 e oito linhas digitalizadas de dunas utilizadas na Fig. 8. A imagem mais abaixo (b) demonstra as áreas de dunas.



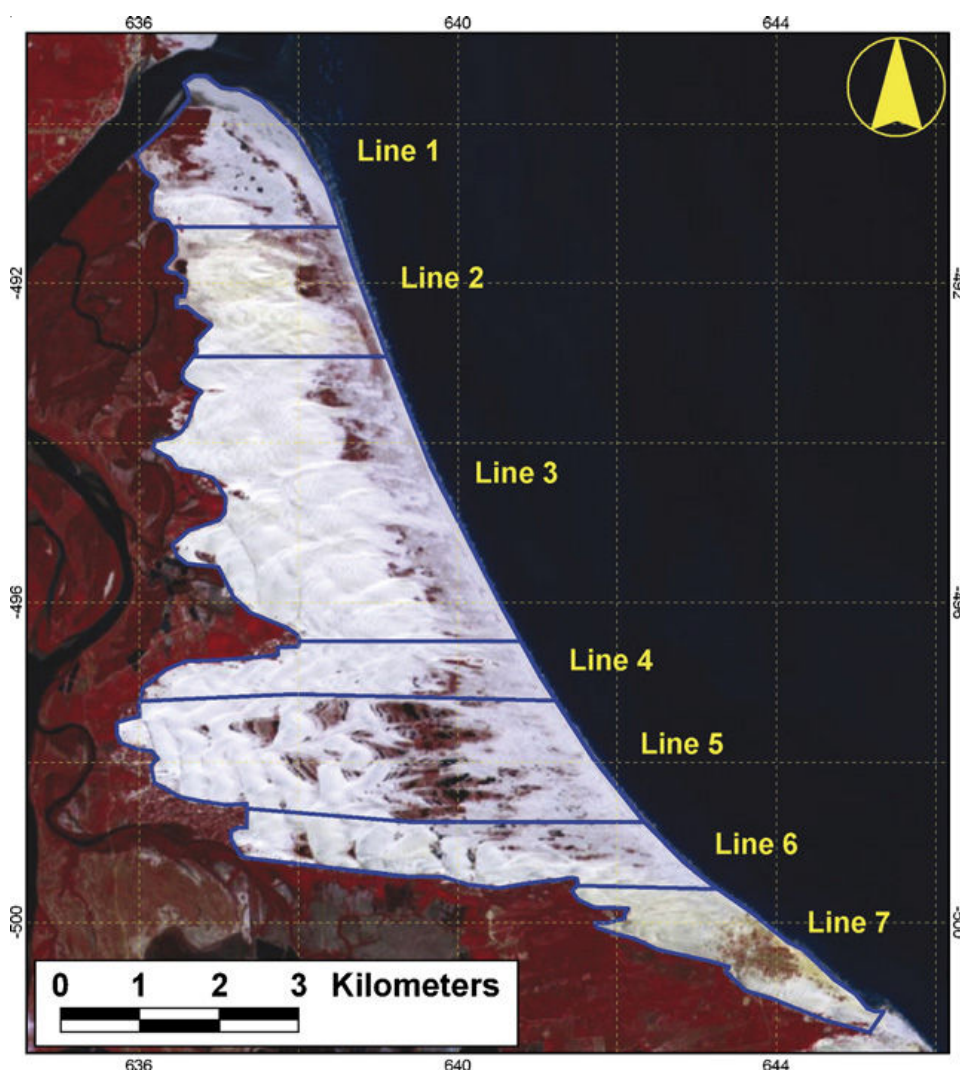


**Figura 8 :** Uma matriz de correlação que apresenta a correlação entre o índice de avermelhamento como calculado da imagem do satélite QuickBird de setembro 2004 do campo de dunas de Jericoacoara e a distância do litoral na direção do movimento das dunas, para cada uma das linhas designadas na Fig.7. Tradução: na vertical: Índice de Avermelhamento. Na horizontal: linha1; linha 2; linha 3, avermelhamento; linha 3, branqueamento; linha 4; linha 5, branqueamento; linha 5, avermelhamento; linha 6; linha 7; linha 8.

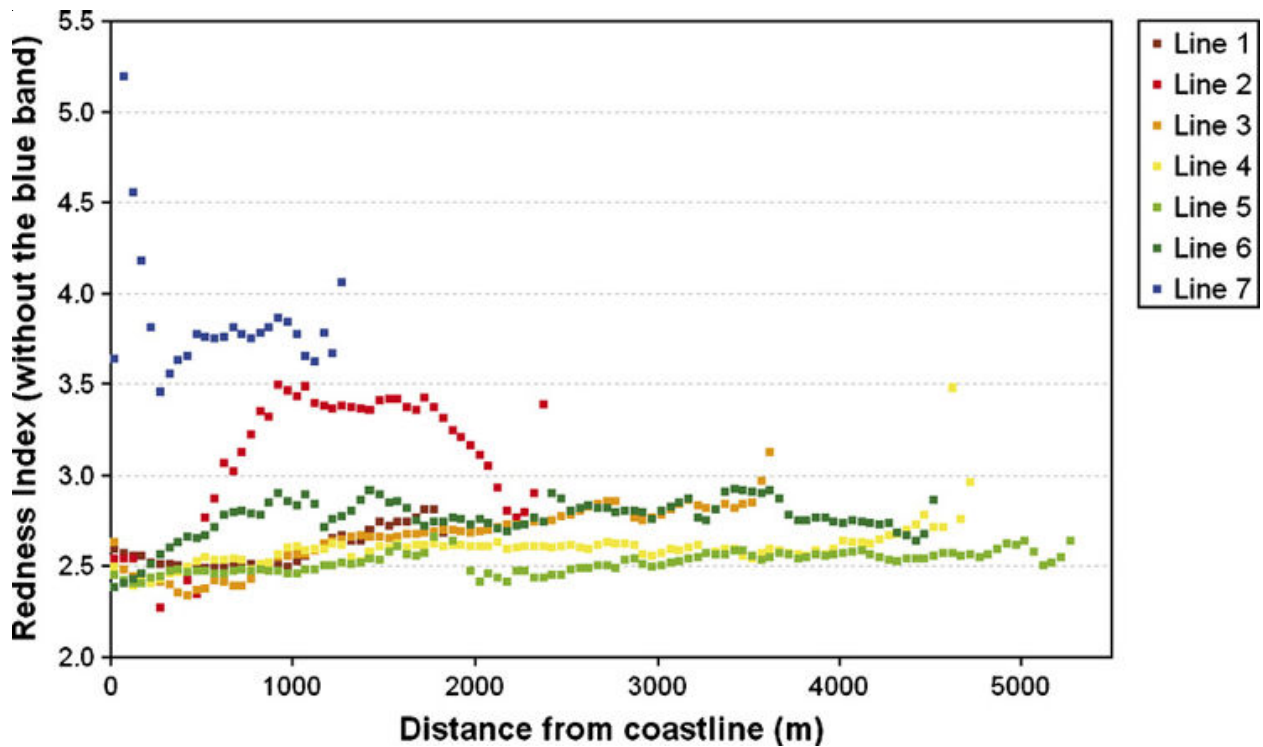


### Canoa Quebrada

Tais processos combinados também são evidentes na área de Canoa Quebrada. Aqui nós definimos sete áreas de penetração de dunas de norte para sul, baseados na presença ou ausência de lagoas, na penetração das dunas para o interior, e também nas mudanças latitudinais na sua cor (estas estão relacionadas a exposições de areia vermelha; Fig. 2g, h e fig. 9). Aqui também nós calculamos a média do índice de avermelhamento para intervalos de 50 m de distância do litoral. Nesta análise foram incluídas apenas dunas ativas. Estas foram definidas como aqueles pixels que foram fixados pelo classificador de probabilidade máxima nesta categoria em um limiar de probabilidade de 90%. Neste campo de dunas onde as lagoas são menos abundantes, o processo de branqueamento de dunas não é aparente, porém o avermelhamento de dunas, claramente evidente na linha 3, não existe na maioria das áreas (Fig. 10). A elevação rápida no índice de avermelhamento na linha 2 pode estar relacionada à exposição dos grãos de areia vermelha das paleodunas que participam na formação de mega-ondulações naquela área (Fig. 2g, h). Gostaríamos de registrar que nas áreas de penetração de dunas mais longas (linhas 4, 5 e 6) onde há algumas lagoas, quase não há nenhuma mudança na cor da areia.



**Figura 9:** A imagem do satélite Aster de junho de 2000 do campo de dunas de Canoa Quebrada e as sete áreas de penetração de dunas que nós definimos.



**Figura 10:** Uma matriz de correlação que apresenta a correlação entre o índice de avermelhamento como calculado de junho de 2000. Imagem do satélite Aster do campo de dunas de Canoa Quebrada e a distância do litoral na direção do movimento das dunas, para cada uma das sete áreas designadas na figura 9.

## Considerações Finais

### Índices espectrais da cor da areia

O avermelhamento das dunas é geralmente identificado na faixa visível do espectro eletromagnético. Dos vários índices espectrais que nós examinamos, o índice de avermelhamento (IA) desempenhou-se melhor, como também verificado em estudos anteriores (LEVIN et al., 2005; BENDOR et al., 2006; LEVIN et al., 2007). Isto foi constatado pelas altas correlações entre os valores de IA derivados do ASD e aqueles derivados da imagem de satélite, e também das altas correlações entre os valores de IA e distância da costa (Tabelas 2 e 3). O índice de brilho que idealmente também deveria desempenhar-se bem não é um índice de proporção e é mais afetado pelos efeitos do sombreamento.

Trabalhando em alvo de elevado albedo, em muitas das imagens disponíveis, uma ou mais das faixas visíveis estavam saturadas, especialmente no Landsat 7 ETM+ (Tabela 2). A existência de características luminosas em uma área de clima tropical provavelmente é a razão pela qual não foram efetuados ajustes de ganho e de equivalência adequados. Alguns erros nos valores dos índices espectrais podem surgir das diferenças de umidade entre e dentro das dunas. Nós consideramos que trabalhando com imagens de satélite da estação seca, tais problemas foram minimizados. Como estas dunas são altamente ativas e destituídas de vegetação, a presença de matéria orgânica não impôs obstáculos na obtenção dos resultados.

### Braqueamento das dunas

O processo de branqueamento das dunas que emerge deste estudo parece confirmar os resultados experimentais de Roden et al. (2000). Em áreas onde há uma elevada presença de lagoas de água doce (como nos Lençóis Maranhenses: 41% da área), áreas arenosas interdunares estão sendo cobertas por água durante a estação chuvosa, e as próprias dunas estão/ficam saturadas a uma altura de até 2–3 m.

Nas condições anaeróbicas que se desenvolvem dentro da areia saturada, o  $Fe^{3+}$  é reduzido a  $Fe^{2+}$ , e microorganismos consomem oxigênio para realizar a decomposição oxidante da matéria orgânica. Este processo continua enquanto a areia está saturada de água durante a estação seca conforme as lagoas vão gradualmente secando. Parece que se as lagoas não fossem temporárias mas sim estáveis, a redução de ferro seria muito menos intensa como é muito intensa no topo (1 cm: LOVLEY e PHILLIPS, 1986). O ferro reduzido se acumula portanto na camada impermeável abaixo da duna (ou abaixo da lagoa) ou no fundo da lagoa, e pode ser levado mais adiante para baixo pela chuva depois que as lagoas estão secas. Uma vez que as lagoas estejam secas a areia branqueada está novamente disponível para participar dos processos eólicos. É claro pela distribuição do tamanho dos grãos que a areia do fundo das lagoas participa dos processos eólicos (PYE e TSOAR, 1990). A distribuição de tamanho de grão um pouco mais grosseiro (entretanto não estatisticamente significativa em nosso tamanho de amostra) no fundo das lagoas com respeito aquele encontrado nos topos das dunas se adapta a outros estudos nos quais foi demonstrado que há uma diminuição gradual no tamanho dos grãos e maior uniformidade para o topo das dunas (LANCASTER, 1981; WHITE e TSOAR, 1998). Além disso, deveria ser observado que areia em processo de transporte quase sempre é mais fina e com melhor uniformidade que a areia presente na superfície da vertente a barlavento (LANCASTER et al., 2002).

Nos Lençóis Maranhenses um branqueamento quase completo é realizado a uma distância de 7.5 km do litoral, e de lá em direção ao interior quase não há mais mudanças na cor da areia. Deveria ser notado que por abrasão o óxido de ferro que reveste os grãos de areia é apenas levemente removido (BULLARD et al., 2004; BULLARD e WHITE, 2005), e certamente não na mesma medida que realizado através da redução por bactérias (Roden et al., 2000). Em outras áreas onde a cobertura da lagoa é mais baixa, o branqueamento é menos intenso ou não existe. Onde as lagoas estão presentes por períodos mais curtos de tempo, é provável que condições saturadas não existam para períodos de tempo longos o suficiente para permitir a completa absorção microbiana do oxigênio dissolvido na água, e condições de redução de ferro raramente, ou nunca, são criadas. As condições para o avermelhamento de dunas do Nordeste do Brasil é determinado por sua ocorrência nos lençóis de areia em Jericoacoara, ou até mesmo nos Lençóis Maranhenses na área próxima ao litoral antes do início da área de lagoas de maior porte (Figs. 4a e 8— linha 3), como também pela existência de areia vermelha de fases anteriores de migração de dunas (admitindo condições semelhantes do clima no passado como influenciado pela ZCIT; WANG et al., 2004).

A cor das dunas é tradicionalmente interpretada como um indicador da idade das dunas (em um campo de dunas; NORRIS, 1969). Os resultados deste estudo indicam que o processo de avermelhamento das dunas é reversível, e com as condições apropriadas o branqueamento das dunas pode ocorrer. A implicação desse fato é de que a cor das dunas deveria ser interpretada com cuidado, e com relação a condições climáticas passadas, especialmente no tocante à possível existência pretérita de lagoas temporárias. Tais lagoas podem existir ou cobrindo amplas áreas devido a padrões de chuva sazonais (como atualmente no Nordeste do Brasil), ou podem se formar devido ao bloqueio de rios pela migração de dunas em períodos áridos (como no deserto do Negev em Israel: MAGARITZ e ENZEL, 1990). Portanto, em áreas onde as há mudanças da cor das dunas, uma explicação adicional para aquelas de minerais de origem diferentes ou de idades diferentes pode ser a existência passada (ou presente) de lagoas temporárias de água doce. Em conclusão, este estudo demonstra que processos pedogênicos prematuros não são irreversíveis, mas ao contrário, o sistema no qual atuam é dinâmico.

### **Agradecimentos**

Agradecemos a Dan G. Blumberg do Departamento de Geografia e Desenvolvimento Ambiental da Ben-Gurion Universidade do Negev, Israel, pelo uso do ASD para as medidas espectrais. Agradecemos também a Juliana Cristina Fukuda e Erika Fernandes Pinto, do IBAMA do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses pela ajuda no trabalho de campo durante o verão de 2005. Este estudo foi financiado pela Fundação Volkswagen (Volkswagen-Stiftung) (<http://www.volkswagen-stiftung.de/>), como parte da seguinte

pesquisa: “O paleoclima e as implicações ambientais das incursões de dunas eólicas na costa do Estado do Ceará, NE do Brasil.” A Kreitman Fellowship Foundation apoiou Noam Levin na sua pesquisa do pós-doutorado.

### **Bibliografia**

- ASD. **Analytical Spectral Devices** website: <http://www.asdi.com/>. Accessed on November 13, 2003.
- BEN-DOR, E., Levin, N., Singer, A., Karnieli, A., Braun, O., Kidron, G.J. Quantitative mapping of the soil rubification process on sand dunes using an airborne CASI hyperspectral sensor. **Geoderma** 131, 2006, p.1–21.
- BLOTT, S.J., Pye, K. GRADISTAT: a grains size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. **Earth Surface Processes and Landforms** 26, 2001, p. 1237–1248.
- BULLARD, J.E., WHITE, K. Quantifying iron oxide coatings on dune sands using spectrometric measurements: an example from the Simpson- Strzelecki Desert, Australia. **Journal of Geophysical Research** 107 (B6), 2002, p.2125–2138.
- BULLARD, J.E., WHITE, K. Dust production and the release of iron oxides resulting from the Aeolian abrasion of natural dune sands. **Earth Surface Processes and Landforms** 30 (1), 2005, p.95–106.
- BULLARD, J.E., McTAINSH, G.H., Pudmenzky, C.A. Aeolian abrasion and modes of fine particle production from natural red dune sands: an experimental study. **Sedimentology** 51, 2004, p.1103–1125.
- BUOL, S.W., HOLE, F.D., McCracken, R.J. **Soil Genesis and Classification**. The Iowa State University Press, Ames, 1973, p. 360.
- CHAVEZ, P.S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment** 24, 1988, p.459–479.
- CLARK, R.N., KING, T.V.V., GORELICK, N.S. Automatic continuum analysis of reflectance spectra. Proceedings of the Third AIS Workshop, 2–4 June 1987. **JPL Publication**, vol. 87-30. JPL, Pasadena C, 1987, p.138–142.
- CLAUDINO-SALES, V., PEULVAST, J.P. Dune generation and ponds on the coast of Ceará state (northeast Brazil). In: Allison, R.J. (Ed.), **Applied Geomorphology: Theory and Practice**. John Wiley and Sons, 2002, p.443–459.
- EMERY, K.O., NEEV, D. Mediterranean beaches of Israel. **Geological Survey of Israel Bulletin** 26, 1960, p.1–24.
- FRYBERGER, S.G. Dune forms and wind regime. In: McKee, E.D. (Ed.), **A Study of Global Sand Seas. Geological Survey Professional Paper**, vol.1052. Geological Survey, Washington, D.C., United States, 1979, p.137–169.
- GROVE, C.I., HOOK, S.J., PAYLOR, E.D. Laboratory Reflectance Spectra of 160 Minerals, 0.4 to 2.5 Micrometers. **JPL Publication**, vol. 92-2. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, 1993.
- JIMENEZ, J.A., MAIA, L.P., SERRA, J., MORAIS, J. Aeolian dune migration along the Ceará coast, north-eastern Brazil. **Sedimentology** 46, 1999, p.689–701.
- KARNIELI, A., BEN-DOR, E., BAYARJARGAL, Y., LUGASSI, R. Radiometric saturation of Landsat-7 ETM+ data over the Negev Desert (Israel): problems and solutions. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation** 5, 2004, p.219–237.
- KING, D.J., Airborne multispectral digital camera and video sensors: a critical review of system designs and applications. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 21: 245–273, 1995. Available online at: <http://www.carleton.ca/~dking/paper1.html> (accessed 10 November 2003).
- LANCASTER, N. Grain size characteristics of linear dunes in the southwestern Kalahari. **Journal of Sedimentary Petrology** 56, 1981, p.395–400.
- LANCASTER, N., NICKLING, W.G., McKENNA NEUMAN, C. Particle size and sorting characteristics of sand in transport on the stoss slope of a small reversing dune. **Geomorphology** 43, 2002, p.233–242.
- LEÃO, Z.M.A.N., DOMINGUEZ, J.M.L. Tropical coast of Brazil. **Marine Pollution Bulletin** 41, 2000,



p.112–122.

LEVIN, N., KIDRON, G.J.; BEN-DOR, E. Surface proprieties of stabilizing coastal dunes – combining spectral and field analyses. **Sedimentology**, 54, 771-788: doi 10.1111/j.1365-3091.2007.00859.x, 2007.

LEVIN, N., BEN-DOR, E., SINGER, A. A digital camera as a tool to measure color indices and related properties of sandy soils in semi-arid environments. **International Journal of Remote Sensing** 26 (24), 2005, p.5475–5492.

LILLESAND, T.M., KIEFER, R.W. **Remote Sensing and Image Interpretation**, 3rd edition. John Wiley and Sons, New York, 1994.

LOVLEY, D.R., PHILLIPS, E.J.P. Availability of ferric iron for microbial reduction in bottom sediments of the freshwater tidal Potomac River. **Applied and Environmental Microbiology** 52 (4), 1986, p.751–757.

MADEIRA, J., BEDIDI, A., CERVELLE, B., POUGET, M., FLAY, N. Visible spectrometric indices of hematite (Hm) and goethite (Gt) content in lateritic soils: the application of a thematic mapper (TM) image for soil- mapping in Brasilia, Brazil. **International Journal of Remote Sensing** 18 (13), 1997, p.2835–2852.

MAGARITZ, M., ENZEL, Y. Standing-water deposits as indicators of Late Quaternary dune migration in the northwestern Negev, Israel. **Climatic Change** 16 (3), 1990, p.307–318.

MAIA, L.P. **Procesos Costeros y Balance Sedimentario a lo Largo de Fortaleza (NE Brasil): Implicaciones para una Gestión Adecuada de la Zona Litoral**. Unpublished Ph.D. Thesis, Faculty of Geology, University of Barcelona, Spain, 1998.

MATHIEU, R., POUGET, M., CERVELLE, B., ESCADAFAL, R. Relationships between satellite-based radiometric indices simulated using laboratory reflectance data and typic soil color of an arid environment. **Remote Sensing of Environment** 66, 1998, p.17–28.

NORRIS, R.M. Dune reddening and time. **Journal of Sedimentary Petrology** 39 (1), 1969, p.7–11.

PIPUJOL, M.D., BUURMAN, P. Dynamics of iron and calcium carbonate redistribution and palaeohydrology in middle Eocene alluvial paleosols of the southeast Ebro Basin margin (Catalonia, northeast Spain). **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology** 134, 1997, p.87–107.

PYE, K., TSOAR, H. **Aeolian Sand and Sand Dunes**. Unwin Hyman, London, 1990.

ROBINSON, D.A., FRIEDMAN, S.P. Observations of the effects of particle shape and particle size distribution on avalanching of granular media. **Physica A** 311, 2002, p.97–110.

RODEN, E.E., URRUTIA, M.M., MANN, C.J. Bacterial reductive dissolution of crystalline Fe(III) oxide in continuous-flow column reactors. **Applied and Environmental Microbiology** 66 (3), 2000, p.1062–1065.

SAUERMAN, G., ANDRADE Jr., J.S., MAIA, L.P., COSTA, U.M.S., ARAUJO, A.D., HERRMANN, H.J. Wind velocity and sand transport on a barchan dune. **Geomorphology** 54 (3), 2003, p.245–255.

SCHWERTMANN, U., TAYLOR, R.M. Iron oxides. In: Dinauer, R.C., Nagler, J., Nauseef, J.H. (Eds.), **Minerals in Soil Environments**. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin USA, 1977, p.145–180.

SINGER, A., SCHWERTMANN, U., FRIEDL, J. Iron oxide mineralogy of Terre Rosse and Rendzinas in relation to their moisture and temperature regimes. **European Journal of Soil Science** 49, 1998, p.385–395.

THOME, K., Biggar, S., TAKASHIMA, T. Algorithm Theoretical Basis Document for ASTER Level 2B1—Surface Radiance and ASTER Level 2B5—Surface Reflectance. Remote Sensing Group of the Optical Sciences Center University of Arizona, Tucson, Arizona 85721, available online at (accessed December 12, 2005): [http://eospsso.gsfc.nasa.gov/eos\\_homepage/for\\_scientists/atbd/docs/ASTER/atbd-ast-07-09.pdf](http://eospsso.gsfc.nasa.gov/eos_homepage/for_scientists/atbd/docs/ASTER/atbd-ast-07-09.pdf), 1999.

TSOAR, H. Grain-size characteristics of wind ripples on a desert seif dune. **Geography Research Forum** 10, 1990, p.37–50.

TSOAR, H. Sand dunes mobility and stability in relation to climate. **Physica A** 357, 2005, p.50–56.



- VEPRASKAS, M.J., He, X., LINDBO, D.L., SKAGGS, R.W. Calibrating hydric soil field indicators to long-term wetland hydrology. **Soil Science Society of America Journal** 68, 2004, p.1461–1469.
- WANG, X., AULER, A.S., EDWARDS, R.L., CHENG, H., CRISTALL, P.S., SMART, P.L., RICHARDS, D.A., SHEN, C.C. Wet periods in northeastern Brazil over the past 210 kyr linked to distant climate anomalies. **Nature** 432, 2004, p.740–743.
- WENKART, R., Tsoar, H., BLUMBERG, D. Aeolian sand incursion into the north western Negev during the Upper Quaternary, **Geophysical Research Abstracts**, vol. 7, 2005. 00775, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU05-A-00775, European Geosciences Union 2005, Vienna, Austria, available online at (accessed December 5, 2005): <http://www.cosis.net/abstracts/EGU05/00775/EGU05-J-00775.pdf>.
- WHITE, B.R., TSOAR, H. Slope effect on saltation over a climbing sand dune. **Geomorphology** 22, 1998, p.159–180.
- WHITE, K., WALDEN, J., DRAKE, N., ECKARDT, F., SETTLE, J. Mapping the iron oxide content of dune sands, Namib Sand Sea, Namibia, using Landsat Thematic Mapper data. **Remote Sensing of Environment** 62, 1997, p.30–39.
- WHITE, K., GOUDIE, A., PARKER, A., AL-FARRAJ, A. Mapping the geochemistry of the Northern Rub' Al Khali using multispectral remote sensing techniques. **Earth Surface Processes and Landforms** 26, 2001, p.735–748.
- WILLIAMS, C., YAALON, D.H. An experimental investigation of reddening in dune sand. **Geoderma** 17, 1977, p.181–191.
- ZUQUETTE, L.V., COLARES, J.Q.S., PEJON, O.J. Environmental degradation related to human activities, Fortaleza Metropolitan region, state of Ceará, Brazil. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment** 61(3), 2002, p. 241–251.

Trabalho enviado em outubro de 2008  
Trabalho aceito em janeiro de 2009