

## MODELO EVOLUTIVO DO CAMPO DE DUNAS DO PERÓ (MUNICÍPIO DE CABO FRIO/RJ) E CÁLCULO DE TRANSPORTE EÓLICO

Ramos, Renato Rodriguez Cabral<sup>1</sup>; Cassar, João Cláudio Martins<sup>2</sup>; Gusmão, Luiz Abílio de Barros<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> D.Sc. em Geologia, Setor de Estratigrafia e Paleontologia do Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade do Federal do Rio de Janeiro, CCMN, Phone: +55 021 9681-2723. e-mail: rramos@geologia.ufrj.br

<sup>2,3</sup> M.Sc. em Engenharia Oceânica/Costeira (COPPE/UFRJ), Aquamodelo Consultoria e Engenharia Ltda., Av. Presidente Vargas, 542, grupo 1901, Phone: +55 21 2516-4545. e-mail: aquamodelo@aquamodelo.com.br

### RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a evolução morfológica e sedimentar do Campo de Dunas do Peró, situado no município de Cabo Frio/RJ. Através da análise de imagens de satélite, fotos aéreas convencionais e de observações de campo, foram definidos, tendo como base teórica os estudos de Castro (2001), 4 sub-sistemas eólicos (zonas de alimentação, de entrada, de retenção e de saída) resultantes de processos morfológicos e sedimentares específicos. Foram também calculadas as taxas de transporte eólico do arco de praia para o campo de dunas, para cada direção e mês do ano, concluindo-se que a maior taxa de transporte de areia provem da direção NE, com média anual em torno de 612 m<sup>3</sup>/mês/km. O balanço sedimentológico concluiu que o volume anual transportado pelos ventos de NE para o interior do campo de dunas é de aproximadamente 29.000 m<sup>3</sup>.

### ABSTRACT

This work presents a study on the morphological and sedimentary evolution of Peró Dunes Field, located at Cabo Frio, state of Rio de Janeiro. Through local surveying, and the analysis of satellite images and aerial photographs, it was defined, based on Castro (2001) studies, 4 eolic sub-systems (Source, Entrance, Retention and Exit zones) resulting from specific sedimentary and morphological processes. It has been also calculated the eolic transport rate from the beach arc to the dune field, for each wind direction and month. It is concluded that the higher sand transport rate comes from NE, with an annual average around 612 m<sup>3</sup>/month/km. The sedimentological balance resulted in an annual volume of sand being transported from NE toward the dune field of approximately 29.000 m<sup>3</sup>.

Palavras-Chave: peró, dunas eólicas, transporte eólico

### INTRODUÇÃO

O Campo de Dunas do Peró constitui um conjunto de formas eólicas de grande beleza cênica, com extensão em torno de 3 km no sentido N-S, e largura em torno de 1 km no sentido E-W, possuindo área de cerca de 2,3 km<sup>2</sup>. É limitado a leste pela Praia do Peró; a oeste por uma extensa área brejosa e pela estrada do Guriri; e ao sul pelo Morro da Piaçava e o Brejo do Matadouro.

Este sistema sedimentar estendia-se para a região ao sul do Morro da Piaçava (Dunas da Ogiva) até a Praia das Conchas, sendo que a maior parte desse campo de dunas foi ocupada por loteamentos, que constituem os bairros do Peró, Conchas, Ogiva e Cajueiro.

O vento predominante na região ao longo de todo o ano é o de NE, com velocidade média de 5 m/s, que incidindo obliquamente sobre a Praia do Peró forma um ângulo de cerca de 20°, resultando no desenvolvimento de um cordão de dunas ao longo do pós-praia.

Segundo Castro (2001), a evolução geomórfica do sistema de dunas eólicas está essencialmente relacionada com as variações do clima, principalmente o regime de ventos e a pluviometria, e com a quantidade de sedimento disponível na faixa de praia. Trata-se de um sistema dinâmico, onde existe uma inter-relação de diferentes condicionantes ambientais, dos quais os mais importantes são os processos sedimentares, climáticos e litorâneos.

Através da análise das imagens de satélite Ikonos, de fotos aéreas convencionais e de observações de campo, foi elaborado um modelo de evolução para o Campo de Dunas do Peró, tendo como base teórica os estudos desenvolvidos por Castro (2001) em um sistema eólico similar no Nordeste do Brasil. Foram, assim, definidos quatro sub-sistemas com características diferenciadas, resultantes de processos morfológicos e sedimentares específicos (vide Figura 1): Zona de alimentação (praia e cordões externo e interno); Zona de entrada (planície de deflação com dunas longitudinais e parabólicas); Zona de retenção (campo de dunas barcanóides) e Zona de saída (área de deposição atual e futura).

### ZONA DE ALIMENTAÇÃO

Este sub-sistema é representado pelo arco praiado do Peró e pelo cordão de dunas formado ao longo de todo o pós-praia (aqui denominado cordão litorâneo ou externo). Na praia, corresponde a uma faixa com cerca de 30 m de largura com superfície de baixa declividade e constituída por areia fina (diâmetro médio 0,16 mm). O cordão externo de dunas possui largura entre 20 e 40 m, e é constituído por duas linhas de dunas, uma mais baixa junta à faixa de praia (2-3 m de altura), e outra com dunas mais altas, situada em contato com a planície de deflação, com alturas de até 10 m, notadamente ao norte do campo de dunas.



Foto 1: Zona de alimentação do campo de dunas, observando-se a direita o cordão litorâneo.

Este cordão litorâneo, na verdade, constitui uma primeira área de acumulação da areia que é removida permanentemente da praia pelos ventos de NE. Ao longo da faixa de praia, durante os períodos de exposição sub-aérea, o vento constante e o calor do sol provocam a formação de manchas de areia seca, que é transportada até ser retida no cordão externo.

O cordão litorâneo, portanto, atua como uma estreita zona de retenção temporária do sedimento oriundo da praia. A partir do momento que haja em algum segmento do cordão externo um acúmulo excessivo de areia, gerando um desequilíbrio entre esta feição morfológica e o regime de ventos, desenvolvem-se a partir dessa zona de retenção pequenas dunas longitudinais (“línguas de areia”) orientadas do sentido SW e que penetram na planície de deflação. As dunas longitudinais são formadas quando ventos mais fortes, unidirecionais, movem a areia paralelamente ao curso do vento, gerando formas lineares retas, com vegetação esparsa, principalmente ao redor das cristas (Castro, 2001). Esse “arrombamento” do cordão externo também pode ocorrer a partir da retirada da escassa vegetação ao longo de uma trilha ou, mesmo, devido a uma queimada (Foto 2).



Foto 2: Dunas longitudinais penetrando na planície de deflação a partir do cordão de dunas litorâneas

O cordão interno, também incluído nesta zona, é formado por dunas que foram fixadas pela vegetação de restinga, mais desenvolvida nessa área, provavelmente por

causa da maior umidade nesse setor junto à extensa área brejosa.. Este cordão de dunas fixas e semi-fixas possui altura entre 5 e 12 m, alcançando cotas em torno de 15 m no seu setor norte. Ao longo de seus 3 km de extensão, apresenta diversos trechos onde há fornecimento de sedimentos para o desenvolvimento de dunas e de lençóis de areia que penetram na zona de entrada constituindo, portanto, uma zona de alimentação.

### ZONA DE ENTRADA

Este sub-sistema constitui o de maior extensão do sistema eólico do Perú, representado pela sua planície de deflação, localizada entre o cordão externo de dunas; o cordão interno adjacente a planície inundável, e o campo de dunas móveis (zona de retenção).

As pequenas dunas longitudinais formadas a partir do cordão externo penetram episodicamente na planície de deflação e, com o aumento da velocidade dos ventos nessa área de relevo predominantemente plano, são transportadas para o interior da zona de entrada. O acúmulo permanente de sedimentos arenosos provenientes dessas dunas longitudinais e dos lençóis de areia gera, gradativamente, condições para a formação de feições maiores, que podem ser fixadas pela vegetação. Essas acumulações maiores, a partir do momento em que atingissem um determinado tamanho a partir do avanço de outras dunas sobre estas, passam a se mover pela zona de entrada no sentido SW, na forma de dunas parabólicas (Foto 3). As dunas parabólicas, segundo Tomazelli (1990), são produzidas em locais onde há uma relativa deficiência de sedimento, e onde a vegetação atua no sentido de ancorar os braços, retardando-os em relação à migração do corpo central da duna.



Foto 3: Zona de entrada, observando-se duna parabólica

Algumas dessas formas são observadas avançando sobre a zona de entrada do Campo de Dunas do Perú, deixando atrás de si trilhas que são facilmente visualizadas em fotos aéreas convencionais ou imagens de satélite. A presença das trilhas de dunas, muitas delas guardando marcas na superfície de planície de deflação a curvatura de dunas que outrora transitaram pela zona de entrada, indicam que grande parte do volume de areia hoje acumulado nas zonas de retenção e de saída do sistema eólico, foi transportada na forma de dunas parabólicas. A largura das dunas parabólicas que atualmente transitam pela planície varia entre 30 e 50 m, sendo que algumas das trilhas possuem

larguras superiores a 100 m, sugerindo que no passado algumas dessas dunas foram maiores.

A feição eólica que ocupa a maior superfície na planície de deflação é representada pelos lençóis de areia, que correspondem às formas mantiformes que se movimentam na direção preferencial dos ventos (Foto 4).



Foto 4: Vista para norte da planície de deflação, observando-se o cordão de dunas litorâneo.

Foi calculado através da comparação entre uma foto aérea convencional obtida em maio de 1989, e a imagem Ikonos de setembro de 2002, que o avanço médio anual nesse período de 12,3 anos, da face frontal de algumas dunas parabólicas isoladas na planície de deflação, variou entre 0,5 e 1,5 m.

### ZONA DE RETENÇÃO

Esta zona constitui o setor mais elevado do sistema eólico do Perú, cuja cota máxima alcança pouco mais de 25 m, apresentando larguras máximas de 880 m na direção NE-SW; de 1.200 m na direção N-S; e de 720 m na direção NW-SE. A área da zona de retenção é de cerca de 585.000 m<sup>2</sup>, o que corresponde a 25% do total do Campo de Dunas do Perú (Foto 5).

É limitada ao sul pelo maciço rochoso do Morro da Piaçava, que constitui um obstáculo intransponível ao movimento das areias. A leste e ao norte o sub-sistema é limitado pela planície de deflação e, a oeste, por um brejo e pela planície costeira com vegetação de restinga arbórea, que constituem a zona de saída e de futuro espraçamento do campo de dunas móveis.



Foto 5: Vista da zona de entrada do campo de Dunas do Perú e, ao fundo, a zona de retenção.

A zona de retenção foi originada pelo acúmulo gradual da areia transportada na forma de dunas parabólicas, que transitaram ao longo da zona de entrada (planície de deflação) desde quando o nível do mar alcançou um nível próximo ao nível atual. Também contribuiu para a formação deste sub-sistema o material arenoso transportado na forma de lençóis e a areia livre carregada pelos fortes ventos de NE.

Provavelmente, a zona de retenção começou a ser formada pelo seu setor sul, quando algumas das primeiras dunas tiveram o seu trajeto impedido pelo Morro da Piaçava e, as que vieram posteriormente, foram acumulando mais e mais areia, proporcionando a expansão da zona de retenção para norte.

Conforme observado por Castro (2001) no campo de dunas de Paracuru/CE, que apresenta diversas características comuns ao campo do Perú, o aumento da quantidade de areia disponível é inversamente proporcional à distância da fonte, ou seja, quanto mais distante da praia, maior é a altura das dunas. Esse aspecto também é observado no campo de dunas de Cabo Frio e no antigo campo de dunas da Ogiva, hoje inteiramente ocupado pela mancha urbana.

Na zona de retenção do Perú, no seu setor norte, próximo à planície de deflação, ocorrem dunas parabólicas superpostas (extremidade norte da zona), predominando formas do tipo barcanóide alinhadas na direção geral NW-SE.

### ZONA DE SAÍDA

Esse termo, “zona de saída”, foi utilizado por Castro (2001) para se referir “a unidade ambiental que se localiza na direção preferencial de migração de dunas”. Sendo assim, consideramos este sub-sistema no campo de dunas do Perú como as áreas de deposição recente e atual de areia, além da área de futuro espraçamento do campo de dunas no sentido SW.

A frente de dunas avança sobre a área a NW do Morro da Piaçava, sobre a lagoa do Brejo do Matadouro e uma área plana com uma pequena colina, onde está implantado empreendimento conhecido como Aquadunas. Através da análise das fotos convencionais e da imagem Ikonos, foi calculado o avanço de uma das frentes de duna sobre a lagoa da ordem de 5,3 m/ano nos últimos 12 anos e, um avanço ainda maior sobre a área onde estão a Pousada e o Clube Aquadunas, da ordem de 9 m/ano nesse mesmo período. A estrada que passava ao longo do muro desta propriedade já foi interrompida e, atualmente, a base da frente de uma das dunas já encobre o muro da propriedade.

Considerando-se um avanço médio anual da ordem de 5 m, estima-se que a lagoa e, conseqüentemente, grande parte da área onde está implantado o loteamento, estejam soterrados pela areia em cerca de 1 século. A situação mais dramática, no entanto, é a das edificações construídas inadvertidamente no setor mais ao norte da zona de saída, que já nos próximos anos deverão estar sendo soterradas pela areia.

### CÁLCULO DO TRANSPORTE EÓLICO

Estimativas de taxas de transporte eólico têm sido embasadas na concepção inicialmente apresentada por Bag-nold (1941), na qual as partículas sólidas são transporta-

das na direção do vento com um movimento de flutuação junto à superfície de areia. O movimento se manifesta quando o escoamento exerce sobre o grão uma tensão capaz de arrancá-lo do repouso e mantê-lo em movimento. Nessa concepção, os grãos desempenham movimentos de arrasto, saltação ou suspensão, semelhante ao transporte hídrico. A diferença mais notável entre os dois tipos de transporte é devida à maior densidade relativa do grão no ar em relação ao mesmo na água, o que praticamente torna o movimento em suspensão desprezível.

Dessa forma, todas as fórmulas empíricas traduzem, de alguma maneira, a capacidade de transporte do escoamento em função da tensão exercida pelo vento, tensão essa expressa em termos da velocidade de atrito  $\mu_*$ , em  $u = \rho_a \mu_*^2$ . A componente horizontal da velocidade do escoamento  $\mu$ , a uma elevação  $z$  acima da superfície, está relacionada com a velocidade de atrito em  $\mu = 5,75 \mu_* \log \frac{z}{z_0} + u'$ , onde todas as componentes podem ser expressadas empiricamente através do diâmetro ( $z_0 = 0,081 \log(D/0,18)$ , em mm;  $\mu' = 8,94D$ , em m/s; e  $z' = 10D$ , em mm). O movimento se inicia na tensão crítica, relacionada a uma velocidade de atrito crítica expressa como  $\mu_{c*} = A \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} g D}$ .

A Tabela 1 apresenta uma lista com as quatro formulações para estimativas de taxas de transporte eólico baseadas na teoria de Bagnold. Todas as fórmulas apresentadas foram utilizadas em Valentini (1994) na estimativa do transporte eólico em dunas da região metropolitana de Fortaleza.

Utilizou-se para uma média da taxa das formulações apresentadas para o cálculo do transporte eólico. Para cada direção de vento, obteve-se uma taxa de transporte, ressaltando-se que a taxa positiva se dá da praia para o interior, enquanto o transporte do interior para a praia tem sinal negativo.

Tabela 1: Fórmulas para estimativa das taxas de transporte eólico baseadas na teoria de Bagnold

Autor	Fórmula ( $m^3/m.s$ )	Observações
Bagnold (1941)	$q = B \frac{\rho_a}{\rho_s g} \sqrt{\frac{D_{50}}{D_p}} \mu_*^3$	$1,5 < B < 2,8$ $0,2 < D < 0,4 mm$ $0,14 < \mu_* < 2,85$ m/s
O'Brien-Rindlaud (1936)	$q = 5,473 \times 10^{-5} \mu_*^3$	$D > 0,2 mm$ $0,2 < \mu_* < 0,6 m/s$
Chepil (1945)	$q = C \frac{\rho_a}{\rho_s g} \mu_*^3$	$2 < C < 4$
Horikawa (1981)	$q = 5,473 \times 10^{-5} (\mu_* + 0,108)^3$	$D > 0,2 mm$ $0,2 < \mu_* < 0,6 m/s$

Fonte: Valentini (1994)

A zona de alimentação para o cordão de dunas litorâneo da praia do Peró possui uma extensão de aproximadamente 4 km, e um alinhamento médio de  $18^\circ$  com o Norte verdadeiro. A taxa de transporte de sedimento e o volume carregado ao longo destes 4 km de praia foi calculada para todas as direções de vento e cada um dos meses do ano.

Os resultados permitem concluir que as maiores taxas de transporte provém das direções NE e N. A taxa média anual de transporte devido aos ventos de NE é de cerca de  $612 m^3/mês/km$ , enquanto para os ventos de N a taxa é de  $-106,6 m^3/mês/km$ . Cabe ressaltar que valores positivos representam o transporte de areia no sentido do campo de dunas e valores negativos representam o transporte no sentido da praia. Em relação às outras direções de vento, a taxa devida ao vento de SW chega a um valor próximo a  $-100 m^3/mês/km$ , enquanto as demais geram taxas bem inferiores a este valor. A taxa média anual considerando o somatório de todas as direções é de  $494 m^3/mês/km$ . Ressalta-se que, em média, as maiores taxas de transporte, para todas as direções, foi observada nos meses de setembro, outubro e novembro, devido às maiores velocidades de vento nesta época do ano.

Através de um balanço sedimentológico feito para todas as direções, onde se subtrai as contribuições de ventos com sentidos contrários e tem-se o volume resultante total carregado para um dos sentidos, concluiu-se que grande parte do sedimento transportado provém de NE, conforme mostra a Figura 2, com volume anual transportado de aproximadamente  $29.000 m^3$  para o interior da praia. Esse volume, descontado da contribuição contrária de cerca de  $5.000 m^3$  gerada pelo vento de SW, constitui quase 80% do volume total do balanço. O vento de N também tem uma participação considerável, transportando anualmente cerca de  $5.000 m^3$  do interior para a linha de praia, assim como o vento de SW. As outras direções de vento transportam um volume resultante praticamente insignificante no balanço. Cabe salientar que apenas a resultante dos sentidos N-S consegue transportar areia em direção ao mar, conforme mostra a Tabela 2, sendo as demais resultantes positivas, ou seja, transportam areia para o interior da praia.

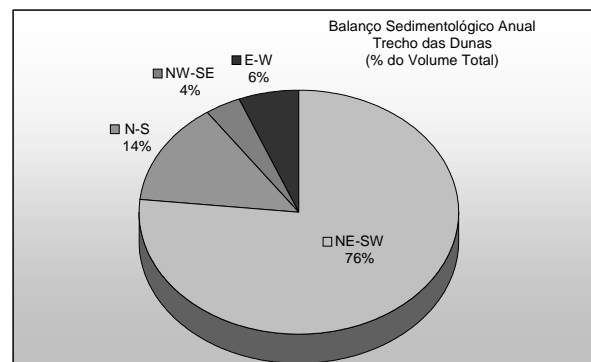


Figura 2: Balanço Sedimentológico Anual

Tabela 2: Balanço Sedimentológico Anual Volume Resultante (m<sup>3</sup>).

BALANÇO SEDIMENTOLÓGICO ANUAL POR DIREÇÕES	NE-SW	24.942,35
	N-S	-4.423,53
	NW-SE	1.210,65
	E-W	1.991,04

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAGNOLD, R.A. 1941. A physics of blown sand and desert dunes. London: Methuen.
- CASTRO, J.W.A. 2001. *Geomorfologia do Sistema Sedimentar Eólico de Paracuru – Ceará*. Rio de Janeiro, 200p. (Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geografia, UFRJ).
- CHEPIL, W.S. 1945. Dynamics of wind erosion. *Soil Science*, **60**(5):397-411.
- HORIKAWA, K. 1981. Coastal Sediment Processes. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **13**:9-32.
- TOMAZELLI, L.J. 1990. *Contribuição ao Estudo dos Sistemas Depositionais Holocênicos do Nordeste da Província Costeira do Rio Grande do Sul – Ênfase no Sentido Eólico*. Porto Alegre, 270 p. (Tese de Doutorado, Departamento de Geologia, UFRGS)
- VALENTINI, E.M.S. 1994. *Avaliação de Processos Litorâneos e Conseqüências para o Gerenciamento Costeiro no Ceará*. Rio de Janeiro (Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, UFRJ).

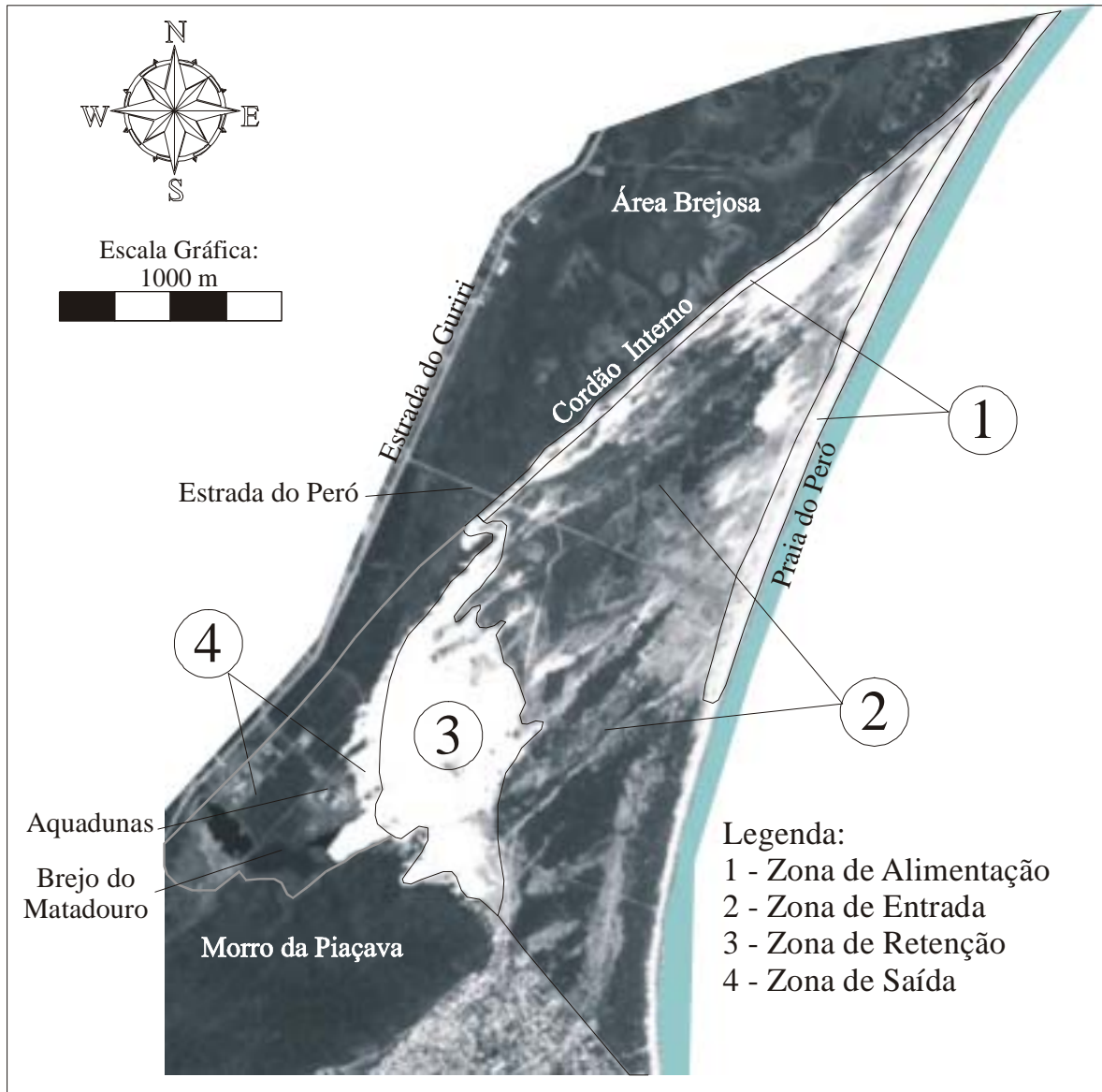


Figura 1: Compartimentação do Campo de Dunas do Peró.