

AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE À EROÇÃO COSTEIRA DE PRAIAS DA ILHA DE SANTA CATARINA

RUDORFF, F. M. ^{1*} & BONETTI, J. ²

¹ Diretoria de Recursos Hídricos - Secretaria do Desenvolvimento Econômico Sustentável; Rua Frei Caneca, 400, Florianópolis - SC; CEP 88025-060.

² Laboratório de Oceanografia Costeira - Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Catarina; bonetti@cfh.ufsc.br

* Corresponding author: fmr@sds.sc.gov.br

ABSTRACT

Rudorff, F. M. & Bonetti, J. 2010. Evaluation of coastal erosion susceptibility in Santa Catarina island's beaches. *Braz. J. Aquat. Sci. Technol.* 14(1): 9-20. ISSN 1808-7035. Coastal erosion susceptibility was assessed at four different beaches at Santa Catarina Island, Brazil, using geoindicators and spatial analysis techniques as a methodological . The assessment was based on geoindicators evaluated in situ, Digital Elevation Models, and surface maps of distances from the coastline were used as geoindicators of susceptibility. Interpolation techniques, fuzzy logic functions, and map algebra were applied. The highest susceptibility was observed on the southern sector of the Ingleses Beach, which presented severe coastal erosion, with absence of dry beach, foredunes and interior dunes, and presence of many seawalls. The lowest susceptibility occurred on the west sector of Pântano do Sul Beach, where the dry beach was wide, fore dunes were above 2 m, well vegetated and established. The Armação and Pântano do Sul Beaches also had sectors with very high susceptibility, while Morro das Pedras Beach varied from medium to high susceptibility. It was evident that the most susceptible areas were related to inadequate occupation, with houses and buildings over or immediately behind the foredunes, with minimum setback. The use of geoindicadores and spatial analysis techniques yielded a rapid and efficient assessment of the beaches and can be used as management tools for assessments of other areas and for coastal monitoring.

Keywords: coastal hazards; GIS, fuzzy logic; multicriteria evaluation.

INTRODUÇÃO

A erosão costeira é um processo que afeta uma parcela expressiva das praias arenosas de todo o mundo, sendo que alguns autores estimam que cerca de setenta por cento das mesmas encontram-se em retração (Bird, 1985). De forma geral ela é resultante do aumento do nível do mar e/ou do balanço negativo do estoque de sedimentos. As mudanças da linha de costa refletem padrões de acreção e de erosão causados pela complexa interação entre processos naturais que atuam em uma variedade de escalas temporais e espaciais. As praias arenosas estão sujeitas à ação erosiva durante eventos de alta energia e acreção durante períodos de menor energia (Komar, 1983). Desta forma, durante eventos como tempestades tropicais e extratropicais, praticamente todas as praias apresentam alguma suscetibilidade à erosão.

Complementarmente, os processos erosivos também podem ser fruto da interferência antrópica (Charlier & Meyer, 1998). A ocupação em áreas inadequadas, estimulada pelo desenvolvimento de atividades como turismo, transporte, pesca e indústria, tem desencadeado e/ou acelerado processos erosivos ao longo da costa (Wisner *et al.*, 2004). Além disso, as mudanças glo-

bais aparentemente têm repercutido no aumento da frequência e intensidade de tempestades e do nível do mar, o que agrava ainda mais este cenário (McGuire *et al.*, 2002).

No Brasil, a maior parte do litoral encontra-se em erosão, tendo um panorama geral da distribuição de áreas de erosão/acresção na costa brasileira sido apresentado por (Muehe, 2006). Particularmente no Estado de Santa Catarina, onde cerca de sessenta e oito por cento da população encontra-se na zona costeira, a erosão vem causando sérios danos materiais. Estudos apontam que ela é, em grande parte, consequência da ocupação indevida da orla, sendo que a maior parte dos danos ocorre durante eventos de tempestades extratropicais, especialmente quando associadas a marés de sizígia (Komar, 1976, Komar *et al.* 1999; Simó & Horn Filho; Rudorff *et al.*, 2005). O mapeamento da erosão costeira requer o entendimento adequado dos processos atuantes na costa, mas a falta de dados históricos, de programas de monitoramento e de informação a respeito dos processos costeiros impõem sérias barreiras para a elaboração destes mapas. O uso de geoindicadores foi apontado por Bush *et al.* (1999) como sendo uma alternativa viável para o mapeamento de suscetibilidade.

Segundo Fabbri & Patrono (1995), um indicador geoambiental, ou geoindicador, é um componente geologicamente quantificável, sensível a mudanças no ambiente que são significativas ao homem para serem identificadas. Semelhantemente, a COGEOENVIRONMENT, uma comissão da União Internacional de Ciências Geológicas (IUGS) define os geoindicadores como “[...] medidas (magnitudes, frequências, taxas e tendências) de processos geológicos e fenômenos ocorrendo na superfície ou próximo dela e sujeitas a alterações que são significativas no entendimento das mudanças ambientais ao longo de períodos de 100 anos ou menos” (Berger e Iams, 1996).

Os geoindicadores indicam tendências que podem ser úteis no entendimento dos processos atuantes na costa e, conseqüentemente, dos riscos aos quais a mesma está sujeita. A facilidade de levantamento de dados faz dos geoindicadores uma ferramenta de gestão importante para avaliações rápidas de suscetibilidade a ameaças, ou no monitoramento ambiental de longo prazo (Bush *et al.*, 1999).

Outra abordagem analítica é o emprego de técnicas de análise espacial em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG). A análise espacial fornece um conjunto de alternativas para mensurar relacionamentos, levando em conta a localização espacial do fenômeno em estudo (Fucks *et al.*, 2004).

O presente trabalho teve por objetivo avaliar a suscetibilidade à erosão de quatro praias da Ilha de Santa Catarina utilizando geoindicadores, dados morfológicos e técnicas de análise espacial.

ÁREA DE ESTUDO

A Ilha de Santa Catarina está localizada no Litoral Central do Estado de Santa Catarina, entre as latitudes 27°22' e 27°50' sul e as longitudes 48°20' e 48°35' oeste (Figura 1). Possui um clima mesotérmico superúmido do tipo temperado e encontra-se sob regime de micromarés, estando sujeita a tempestades causadas por sistemas frontais, ciclones extratropicais e complexos convectivos de mesoescala (Nimer, 1979).

Araujo *et al.* (2003), analisando dados obtidos por um ondógrafo, caracterizaram cinco sistemas de ondas distintos na plataforma continental adjacente à Ilha de Santa Catarina. Dois deles estão associados à passagem de sistemas frontais, que formam vagas (*seas*) com período de 4-5 s de nordeste na fase pré-frontal, evoluindo para vagas bem desenvolvidas de sul com períodos de 5-7.5 s na fase pós-frontal. Outro sistema é caracterizado por vagas bem desenvolvidas de leste (8 s) que são formadas pelo anticiclone semi-permanente do Atlântico Sul. Os marulhos (*swells*) geralmente provêm de sudeste e também são formados pela

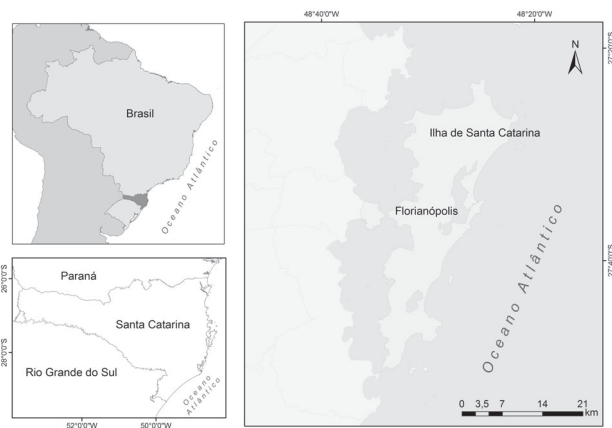


Figura 1. Localização da Ilha de Santa Catarina (à direita).

passagem de sistemas frontais, mas são gerados a grandes distâncias da costa, com períodos de 11 a 14 s (Araujo *et al.*, 2003). As maiores ondulações ocorrem no outono e no inverno; entretanto, ondas grandes, com altura significativa (H_s) e" 4,0 m estão presentes em todas as estações do ano. No outono o valor modal de H_s é de 1,5 m e no inverno o H_s varia de 1,25 a 2,5 m.

Diferentes pesquisas indicam que processos erosivos de longo termo vêm ocorrendo em diversas praias da Ilha de Santa Catarina (Abreu de Castilhos *et al.*, 1995; Almeida *et al.*, 1991; Diehl *et al.*, 1998; Faraco *et al.*, 2006; Horn Filho, 2006; Torronteguy & Horn Filho, 2001). Todavia, processos erosivos intensos que podem ser observados em escalas temporais menores, como aqueles que ocorrem durante tempestades extratropicais, ainda foram pouco estudados. Durante tais eventos, a ação conjunta de ondas de tempestade, correntes longitudinais e de retorno e marés de sizígia podem erodir grandes volumes de areia das praias e dunas contíguas.

A costa da Ilha de Santa Catarina pode ser subdividida em 6 compartimentos geológico-geomorfológicos costas norte; noroeste; nordeste; sudeste; sul e sudoeste (Horn Filho, 2004). O presente trabalho foi desenvolvido em quatro praias com histórico de erosão: a Praia dos Ingleses, situada na costa nordeste; a Praia Morro das Pedras e a Praia da Armação, na costa sudeste; e a Praia Pântano do Sul, na costa sul. Estas praias apresentam características geológicas e geomorfológicas distintas e estão sujeitas a diferentes graus de exposição às ondulações predominantes. Baseados no levantamento de registros de "ressacas", associados à interpretação de fotos aéreas, (Simó & Horn Filho, 2004) classificaram as praias de Ingleses, Armação e Pântano do Sul como de "Alto Risco" e a do Morro das Pedras como de "Baixo Risco". Suas principais características estão descritas a seguir.

Praia dos Ingleses

A Praia dos Ingleses apresenta forma parabólica com cerca de 5 km de extensão orientada no sentido noroeste-sudeste, sendo delimitada por dois promontórios rochosos (Klein, 2004; Faraco *et al.*, 2006) (Figura 2). A praia em planta apresenta equilíbrio quase estático (Klein, 2004) e é composta por sedimentos finos quartzosos originados da plataforma continental e do complexo de dunas situados à sudeste da praia (Faraco *et al.*, 2006). O promontório rochoso sudeste protege a praia das ondulações de sul, mas é exposta às ondulações de leste, sendo que as de sudeste afetam somente o setor noroeste da praia.

Estudos morfodinâmicos na Praia dos Ingleses foram realizados por (Faraco *et al.*, 2006) com base em perfis de praia monitorados entre 1996 e 1997. Os principais parâmetros morfodinâmicos calculados, tais como, altura significativa de onda (Hb), declividade média da face praial (Decliv.), largura média da praia (Yb), desvio padrão de Yb (sYb), coeficiente de variação da linha de costa (CV%), variação do volume médio da porção subaérea da praia (Vv) e parâmetro adimensional ômega estão espacializados na Figura 2. A praia apresenta: energia de onda moderada no setor norte, e baixa, nos setores central e sul; e largura de praia estreita no setor sudeste, larga em torno da desembocadura do rio que ali deságua e média nos demais setores. De acordo com a classificação proposta por Wright & Short (1984), Faraco *et al.* (2006) classificaram a praia como sendo predominantemente intermediária. Entretanto, a autora considerou que a classificação mais apropriada a partir de uma avaliação indireta com base na declividade praial que a praia apresentou estágios dissipativos e intermediário.

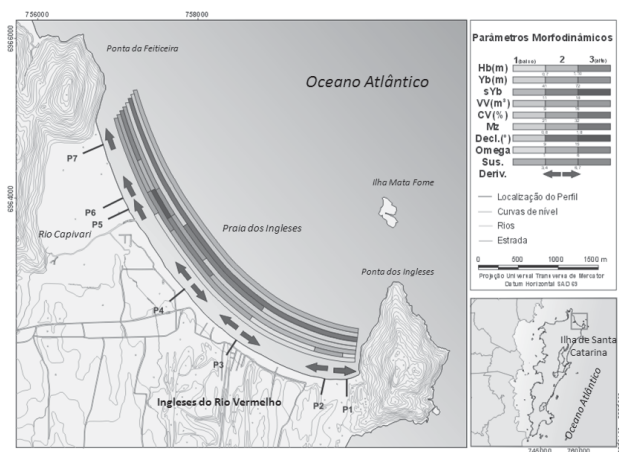


Figura 2. Localização da Praia dos Ingleses. P1, P2, P3, P4, P5, P6 e P7, localização dos perfis monitorados por Faraco *et al.* (2004). Hb – altura significativa de onda em metros; Decliv. – declividade média da face praial em graus; Yb – largura média da praia em metros; σYb – desvio padrão de Yb; CV% – coeficiente de variação da linha de costa; Vv – variação do volume médio da porção subaérea da praia; Ω – parâmetro adimensional ômega; e Deriv – sentido dominante da deriva litorânea.

Praia Morro das Pedras

A Praia Morro das Pedras, delimitada por um costão rochoso ao sul e um pontal arenoso ao norte, tem cerca de 3.400 m de extensão. Este pontal se formou devido à zona de sombra gerada por uma ilha próxima (Figura 3).

Entre março de 2000 e abril de 2001, Torronteguy & Horn Filho (2001) monitoraram cinco perfis ao longo do sistema praial Joaquina - Morro das Pedras. Os principais parâmetros morfodinâmicos dos 3 perfis mais ao sul estão espacializados na Figura 3. O presente estudo foi realizado apenas no setor sul da praia, que apresenta alta energia de onda, largura de praia e variação do volume médio intermediárias e características reflectivas. O setor sul também é caracterizado pela presença de ocupação residencial próxima à linha de costa, estando exposto, sobretudo, às ondulações de leste e sudeste.

Praia da Armação

A Praia da Armação é uma praia de enseada em equilíbrio quase estático cujo arco praial forma uma espiral com 3,2 km de extensão, sendo limitada ao norte e ao sul por costões rochosos (Abreu de Castilhos *et al.*, 1995; Klein, 2004) (Figura 4).

Abreu de Castilhos *et al.* (1995) monitoraram cinco perfis na Praia da Armação e os principais parâmetros morfodinâmicos obtidos neste monitoramento estão espacializados na Figura 4. No setor sul a praia é de baixa energia de onda, de granulometria fina, apresenta um alto coeficiente de variação de linha de costa (CV), mas uma baixa variação do volume médio (Vv), com predomínio do estágio morfodinâmico intermediário. Nos demais setores, de

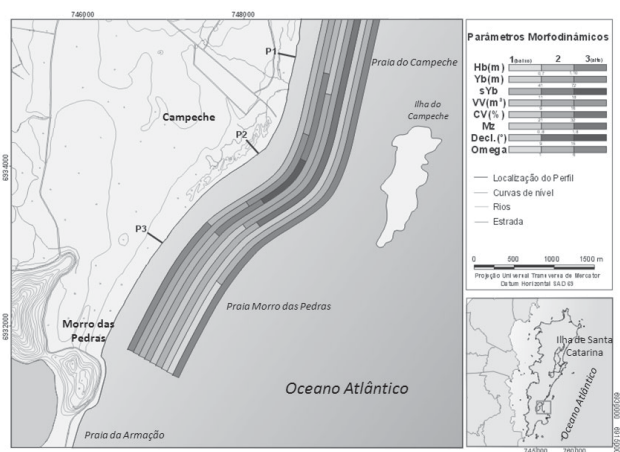


Figura 3. Localização da Praia Morro das Pedras. P1, P2 e P3, localização dos perfis monitorados por Torronteguy & Horn Filho (2001). Hb – altura significativa de onda em metros; Decliv. – declividade média da face praial em graus; Yb – largura média da praia em metros; σYb – desvio padrão de Yb; CV% – coeficiente de variação da linha de costa; Vv – variação do volume médio da porção subaérea da praia; Ω – parâmetro adimensional ômega.

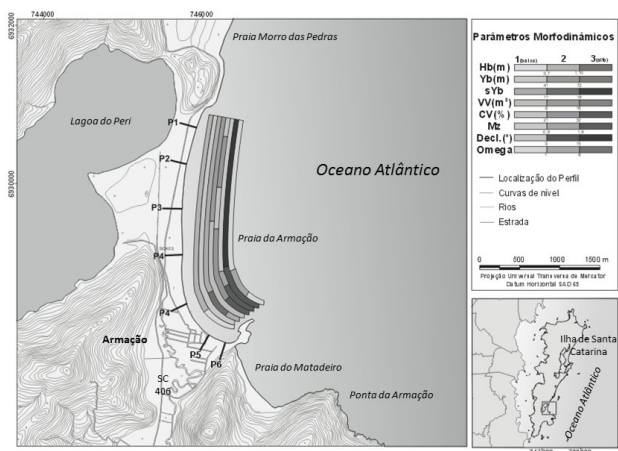


Figura 4. Localização da Praia da Armação. P1, P2, P3, P4, P5 e P6, localização dos perfis monitorados por Abreu de Castilhos *et al.* (1995). Hb – altura significativa de onda em metros; Decliv. – declividade média da face praial em graus; Yb – largura média da praia em metros; σYb – desvio padrão de Yb; CV% - coeficiente de variação da linha de costa; Vv – variação do volume médio da porção subaérea da praia; Ω - parâmetro adimensional ômega.

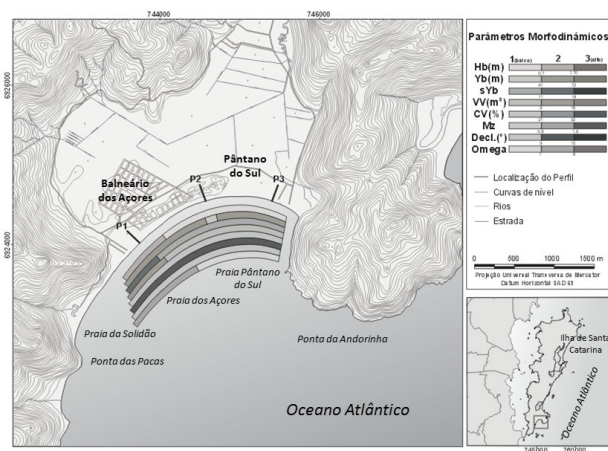


Figura 5. Localização da Praia Pântano do Sul. P1, P2 e P3, localização dos perfis monitorados por Oliveira *et al.* (2006). Hb – altura significativa de onda em metros; Decliv. – declividade média da face praial em graus; Yb – largura média da praia em metros; σYb – desvio padrão de Yb; CV% - coeficiente de variação da linha de costa; Vv – variação do volume médio da porção subaérea da praia; Ω - parâmetro adimensional ômega.

forma geral a praia é de energia de onda média, a granulometria aumenta em direção ao norte e apresenta características predominantemente reflectivas.

Segundo Abreu de Castilhos *et al.* (1995) a praia está em processo erosivo ao longo de todo arco, sendo que no setor sul a taxa de erosão é mais acentuada, tendo sido verificada taxa de erosão de 0,5 m/ano.

Praia Pântano do Sul

As Praias Pântano do Sul e dos Açores formam um arco praial único voltado para o sul, de onde provém ondulações de sul e sudeste que ocorrem principalmente durante o outono e o inverno (Araujo *et al.*, 2003) (Figura 5). Entretanto, um conjunto de ilhas frontais e o costão leste proporcionam uma proteção às grandes ondulações.

Segundo Oliveira *et al.* (2006), o arco Praial Pântano Sul Açores pode ser classificado como semi-protegido, sendo que as menores alturas significativas de onda ocorrem no setor leste ($H_b = 0,16$), o que o configura como sendo de baixa energia de onda. Segundo os mesmos autores a praia é predominantemente intermediária ($\bar{U} = 1,37$) (Figura 5). Klein (2004) classificou sendo uma praia de enseada com estabilidade estática.

Apesar de ser relativamente protegida no setor leste, a ocupação urbana está muito próxima da orla marítima, tendo sido suprimidas as dunas frontais que poderiam proteger as edificações durante tempestades severas. Assim, durante frentes frias intensas ou ciclones extratropicais, freqüentemente ocorrem prejuízos causados pela erosão e pelo avanço do mar.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a determinação da suscetibilidade das praias estudadas à erosão costeira foi elaborado um índice, através de Avaliação Multicritério, baseado em três tipos de indicadores: geoindicadores obtidos em campo, topografia da área emersa adjacente e a superfície contínua de distâncias em relação à linha de costa.

Os geoindicadores foram levantados em campo, a topografia foi obtida de cartas planialtimétricas em escala 1:2.000 e a linha de costa foi digitalizada a partir de fotografias aéreas também em escala 1:2.000, restituídas seguindo-se a base da duna frontal. As cartas e as fotografias aéreas foram disponibilizadas pelo Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis (IPUF). Todos os dados foram integrados e processados utilizando o software ArcGIS (ESRI).

Geoindicadores de campo

Seleção e caracterização dos geoindicadores

Os geoindicadores foram previamente selecionados a partir da lista proposta apresentada por Bush *et al.* (1999). Eles sugerem um conjunto de geoindicadores para a avaliação do risco a eventos erosivos associados às passagens de ciclones tropicais e extratropicais na costa leste dos Estados Unidos.

Os geoindicadores adotados no presente trabalho foram selecionados com base nesta lista e adaptados para a realidade das praias da Ilha de Santa Catarina, visando a avaliação da suscetibilidade à erosão durante tempestades extratropicais. A matriz adaptada dos geoindicadores está representada na Tabela 1 e contém: as categorias de geoindicadores; os pesos atribu-

Tabela 1. Geoindicadores de suscetibilidade.

Categoria	Peso	Indicador Geoambiental	Peso	Pontuação norm.	Atributo do indicador	Peso	Pontuação
Linha de Costa	0,9	Taxa de erosão (QUADRO 2)	0,3	0,27	Erosão severa	10	2,70
					Erosão	5	1,35
					Acresção	1	0,27
		Altura da duna frontal	0,2	0,18	< 2	10	1,80
					= 2	5	0,90
					> 2	1	0,18
		Estado da Duna Frontal	0,1	0,09	Escarpada	10	0,90
					Sem escarpas	5	0,45
		Tipo de duna frontal	0,1	0,09	Alterada	10	0,90
					Natural	5	0,45
		Vegetação da duna frontal	0,1	0,09	Ausente	10	0,90
					Presente	5	0,45
					Estabelecida	1	0,09
		Energia de onda	0,05	0,045	Alta	10	0,45
Média	5				0,23		
Baixa	1				0,05		
< 11 m	10				0,90		
Largura média de praia seca	0,1	0,09	> 11 m e < 18 m	5	0,45		
			> 18	1	0,09		
			Diversas	10	0,45		
Estruturas de engenharia	0,05	0,045	Poucas	5	0,23		
			Ausentes	1	0,05		
			Duna removida ou ausente	10	1,00		
Interior	0,1	Estado da duna interior	1	0,1	Descontinua c/ vegetação	5	0,50
					Alta, bem desenvolvida	1	0,05
Pontuação Total							10,00

idos a cada categoria; os geoindicadores; os pesos de cada geoindicador; a pontuação normalizada; os atributos de cada geoindicador; os pesos de cada atributo; e finalmente a pontuação.

A lista de geoindicadores inclui diversos parâmetros que formam agrupados em duas categorias, de linha de costa e de interior (Tabela 1). Os de linha de costa contemplam o estado erosivo/acrescivo e largura média da praia, energia de ondas, características da duna frontal, presença de estruturas de engenharia para conter erosão, entre outros. Já os parâmetros de interior incluem o estado da duna interior, como altura, estado de preservação e cobertura vegetal. Estes indicadores foram selecionados, pois suas características refletem o grau de suscetibilidade da costa à erosão durante eventos de alta energia.

Os pesos das categorias e dos geoindicadores foram definidos tendo como referência o trabalho de Coburn (2001) que utilizou os mesmos geoindicadores de Bush *et al.* (1999) e atribuiu pesos aos mesmos. A pontuação normalizada foi obtida pela multiplicação do peso do geoindicador pelo peso de sua categoria. Já a pontuação foi obtida pelo produto da pontuação normalizada e do peso do atributo. Finalmente, a pontuação total foi obtida pela soma das pontuações dos geoindicadores. A soma das pontuações máximas de cada geoindicador (índices de suscetibilidade) resulta numa pontuação máxima de 10,0. Os atributos dos indicadores associados à taxa de erosão foram definidos com base na Tabela 2.

Os indicadores largura média de praia seca (Yb) e energia de onda (Hb), presentes na Tabela 1, são os únicos que não foram medidos durante a checagem de campo. Os valores médios e os intervalos das classes destes parâmetros morfodinâmicos foram calculados a partir dos perfis monitorados disponíveis em trabalhos anteriores. Apesar dos perfis praias terem sido monitorados em anos diferentes, estes tiveram duração de 9 a 14 meses, sendo, portanto, considerados representativos para a avaliação de suscetibilidade.

Identificação dos geoindicadores em campo

Para a identificação dos geoindicadores foram realizadas missões de campo nas praias de Morro das Pedras (9 de maio de 2004), Pântano do Sul (26 de janeiro de 2005), Ingleses (2 de fevereiro de 2005) e Armação (7 de fevereiro de 2005).

Os geoindicadores observados foram posicionados com um GPS de navegação com precisão nominal em torno de 7 a 11 m. As amostragens eram realizadas ao longo da praia em espaços irregulares, tomando o cuidado de se coletar uma maior quantidade de pontos sempre que se notavam mudanças significativas nas características dos geoindicadores.

Interpolação dos Geoindicadores de Campo

Os índices de suscetibilidade dos pontos avaliados em campo foram calculados e organizados em um banco de dados em ambiente SIG. Os pontos foram então interpolados com o intuito de gerar uma grade

Tabela 2. Detalhamento dos geoindicadores suplementares usados na avaliação da taxa de erosão.

Geoindicador	Atributos utilizados
Erosão severa	Dunas ausentes com leques de sobrelavagem freqüentes Escarpamento ativo de falésias ou remanescentes de dunas por ondas Canais de marés expostos na zona de surf Vegetação ausente Estruturas construídas pelo homem na orla e que agora estão no pós-praia, na face praial, praia média ou antepraia Escarpamento da praia evidente
Erosão	Dunas escarpadas ou fragmentadas Turfa, lama ou pedaços de árvore expostos na praia. Praia estreita ou ausência de praia seca Vegetação efêmera ou derrubada ao longo da linha da escarpa
Acresção ou estabilidade de longo termo	Dunas e cristas praias robustas, sem rupturas, vegetadas. Praia larga com berma bem desenvolvida Leques de sobrelavagem ausentes Vegetação bem desenvolvida de restinga no interior, arbustos de duna e gramínea pioneira.

regular contínua dos geoindicadores com resolução espacial de 1 metro. Para a interpolação foi utilizado o método Inverso do Quadrado da Distância (MIQD).

Segundo, Longley *et al.* (2005) o MIQD é o método de interpolação mais freqüentemente utilizado em SIG. O MIQD é um método interpolação local, determinístico, pois parte do pressuposto que objetos que estão mais próximos uns dos outros tendem a serem mais parecidos do que aqueles que estão mais separados (Burrough & McDonnell, 1998). Assim, o valor de um atributo z em um ponto não visitado é uma média dos pontos que ocorrem em uma vizinhança, ou em uma janela, ao redor do ponto não visitado e ponderada com base nas distâncias (Burrough & McDonnell, 1998).

Modelo Digital de Elevação (MDE)

A topografia é um indicador importante de suscetibilidade costeira uma vez que as áreas mais baixas do terreno têm uma maior propensão a sofrer efeitos adversos por erosão durante tempestades severas (Robin, 2002). O MDE foi gerado com resolução de 1 m a partir da interpolação das cotas altimétricas das cartas planialtimétricas através do método de krigagem.

Lógica Difusa

Para integrar o MDE na avaliação da suscetibilidade optou-se por utilizar a teoria dos conjuntos difusos (Bone *et al.*, 2005; Dragicevic & Marceau, 2000; Robin, 2002). Na lógica difusa (*Fuzzy Logic*), a incerteza na definição de limites ou limiares é de certa forma contornada através da utilização de uma função de pertencimento difuso, onde fronteiras e limiares entre classes são indefinidos (Burrough & McDonnell, 1998).

A lógica difusa é baseada na teoria dos conjuntos difusos. Ela utiliza o conceito da possibilidade admitida em que um determinado elemento é permitido pertencer parcialmente a um conjunto. Em conjuntos booleanos convencionais são permitidas apenas funções de pertencimento binárias (i.e. Verdadeiro ou Falso). Conjuntos difusos, entretanto, admitem a possibi-

lidade de pertencimento parcial, de modo que eles são generalizações de conjuntos booleanos para situações onde os limites das classes não são, ou não podem ser bem definidos (Burrough & McDonnell, 1998).

Segundo (Burrough & McDonnell, 1998), as funções de associação difusa mais utilizadas são as funções linear e senoidal. Ao aplicar a lógica difusa ao MDE, os valores altimétricos são padronizados em uma escala que varia entre 0 e 10. No presente trabalho foi utilizada a seguinte equação senoidal de pertencimento difuso $f(z)$:

$$\alpha = \frac{1}{(z_{0,5} - \beta)^2} \quad (2)$$

$$f(z) = \frac{1}{1 + (\alpha(z - \beta))^2} \quad (1)$$

onde, $z_{0,5}$ representa a altitude com potencial de suscetibilidade 5 (metade do potencial máximo 10); e β representa a altitude com potencial de suscetibilidade máxima (10). A altitude de 4 m foi estabelecida para $z_{0,5}$. Já o valor máximo de potencial de suscetibilidade β foi definido como sendo a altitude de 0 m.

Através da lógica difusa, os valores do MDE foram todos transformados em uma escala que varia entre 0 e 10. Assim sendo, as altitudes em torno de 0 m têm suscetibilidade máxima, próxima de 10, as altitudes em torno de 4 m tem suscetibilidades em torno de 5, e com forme as altitudes aumentam os valores de suscetibilidade tendem a 0.

Distância em relação à linha de costa

A suscetibilidade à erosão também diminui com o aumento da distância em relação à linha de costa. Visando representar este processo, primeiramente foi gerada uma superfície contínua de distâncias em relação à linha de costa com resolução de 1 m. Foi então aplicada a lógica difusa utilizando as mesmas funções aplicadas ao MDE (Equações 1 e 2), apenas alterando os valores de $z_{0,5}$ e β .

As máximas distâncias em que ocorrem respostas morfodinâmicas durante tempestades dependem da interação de diversos fatores (Morton & Sallenger, 2002). Para fins de modelagem, no presente trabalho os valores de $z_{0,5}$ e b foram definidos de forma arbitrária, não pretendendo representar a real distância desta influência, mas sim uma aproximação razoável para a área.

Neste caso foram utilizados os valores de 33 m para $z_{0,5}$ (limite dos terrenos pertencentes à União) e de 0 m para b . Desta forma, as suscetibilidades são máximas nas áreas próximas à linha de costa (em tor-

no de 10) e diminuem rapidamente com o aumento progressivo das distâncias.

Álgebra de mapas

A superfície contínua de suscetibilidade foi modelada com base nos três planos de informações raster: os geoindicadores de campo interpolados, o MDE difuso e a superfície contínua difusa de distâncias da linha de costa. Foi atribuído um peso de 0,8 para os geoindicadores de campo e para a distância em relação à linha de costa e de 0,2 para o MDE, seguindo a relação funcional descrita abaixo:

$$\text{Suscetibilidade} = ((\text{geoindicadores} \times \text{distância_difusa}) \times 0,8) + (\text{MDE_difuso} \times 0,2) \quad (3)$$

O peso de 0,2 para o MDE foi escolhido com base no trabalho de Robin (2002). O autor, após consulta a diversos especialistas, concluiu que a topografia tem uma contribuição de cerca de 20 por cento na suscetibilidade à erosão costeira.

Apesar das suscetibilidades terem sido representadas na forma de superfícies contínuas, com o intuito de facilitar a interpretação dos resultados, elas foram classificadas em cinco classes distintas: Suscetibilidade Muito Baixa (0-2); Suscetibilidade Baixa (2-4); Suscetibilidade Média (4-6); Suscetibilidade Alta (6-8); e Suscetibilidade Muito Alta (8-10). Uma vez que as superfícies contínuas obtidas são matrizes numéricas, a álgebra de mapas apresentada na Equação 3 foi diretamente aplicada sobre elas, tendo-se assim obtido as superfícies contínuas de suscetibilidade à erosão das praias estudadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Praia dos Ingleses

O mapa de suscetibilidade da Praia dos Ingleses resultante da integração das superfícies contínuas dos geoindicadores de campo, do MDE e da distância à linha de costa está representado na Figura 6.

A rápida diminuição da suscetibilidade em direção ao interior se deve aos efeitos do aumento da distância da linha de costa, bem como da topografia. A área com altitudes mais baixas no setor noroeste, em torno dos perfis A e B, mantiveram suscetibilidades em torno de 2, mesmo a uma distância relativamente grande da linha de costa, evidenciando o efeito da topografia na suscetibilidade.

Este efeito da topografia é importante próximo à linha de costa, mas nas áreas mais distantes, mesmo em áreas baixas as suscetibilidades à erosão deveriam tender a 0, mostrando certa imprecisão no modelo. Isto poderia ser facilmente corrigido em avaliações fu-

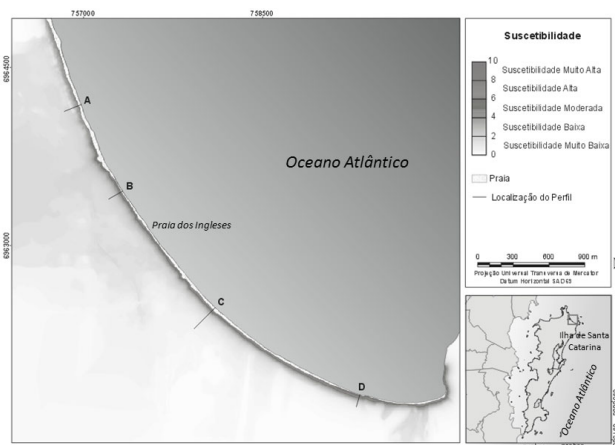


Figura 6. Superfície contínua de suscetibilidade - Praia dos Ingleses.

turas aumentando o peso do mapa de distância à linha de costa de 0,8 para 1.

Não obstante, o modelo conseguiu representar de forma bastante satisfatória os gradientes de suscetibilidade ao longo da praia, com as suscetibilidades aumentando progressivamente do ponto A em direção ao ponto D (Figura 6).

O setor noroeste é o mais exposto da praia, estando sujeito principalmente às ondulações de sudeste e leste e também apresenta maior largura de praia e estoque sedimentar na porção subaérea. Por estes motivos, apresenta as maiores variações no volume de areia Faraco (2003). Ao norte do rio que desemboca na altura do ponto D (Figura 7), onde a praia é mais larga, as suscetibilidades são moderadas, com dunas frontais e interiores vegetadas, porém descontínuas. Nas imediações deste rio as suscetibilidades aumentam. Se por um lado o rio pode atuar como fonte de sedimento para a praia, as oscilações na desembocadura, principalmente durante eventos de tempestade, não permitem a estabilização do sistema de dunas (Calliari & Pereira da Silva, 1998; Faraco, 2003). Outro fator que contribuiu no aumento da suscetibilidade local foi a presença de edificações muito próxima às dunas frontais.

A lista dos geoindicadores proposta por (Bush *et al.*, 1999) incluía a proximidade de desembocaduras na avaliação de perigos costeiros. Na atual avaliação este indicador não foi considerado, todavia, o efeito desestabilizador causado pela presença destas feições pôde ser observado.

No setor central (Figura 8), a praia mostrou características intermediárias entre os setores noroeste e sudeste, concordantes com o observado por (Faraco, 2003). As suscetibilidades estiveram altas, variando entre 6 e 8. Em torno dos pontos A, B, C e D da Figura 8 as suscetibilidades foram mais altas. Nestas áreas as edificações e muros estão mais próximos da praia,

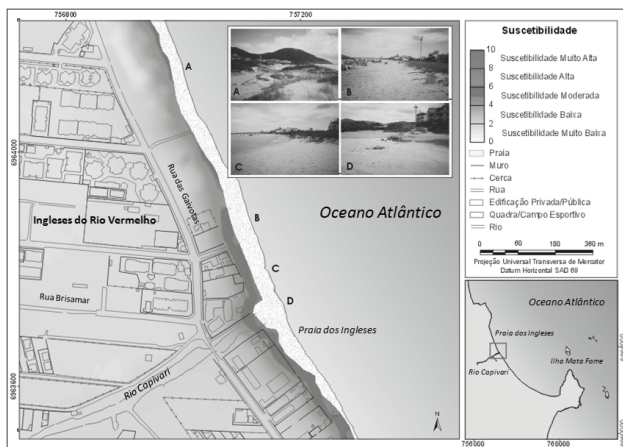


Figura 7. Superfície contínua de suscetibilidade - Praia dos Ingleses. Localização das fotos no mapa (A, B, C e D, respectivamente).

as dunas frontais foram praticamente removidas ou estão muito mal preservadas e as dunas interiores não existem mais. As fotografias representadas nas Figuras 8 A, B, C e D mostram a praia seca bastante estreita e o mar atingindo as cadeiras e bares à beira mar. As escarpas na praia indicam que a praia vinha sofrendo um processo de erosão recente quando foi realizado o levantamento.

Um pouco mais ao sul, nas proximidades do centro da Praia dos Ingleses, a suscetibilidade oscilou entre 6 e 8,2 ao longo da linha de costa, chegando a atingir a classe de suscetibilidade muito alta (Figura 9). Ao contrário da área mostrada anteriormente, onde as suscetibilidades mais altas estavam em torno de alguns pontos ao longo da praia, neste setor a presença de muros, prédios e casas sobre a praia ocorre de forma mais contínua. Nas Figuras 9 A, B, C e D nota-se as edificações e muros na beira da praia, as dunas frontais e interiores ausentes e a largura da praia seca bastante estreita.

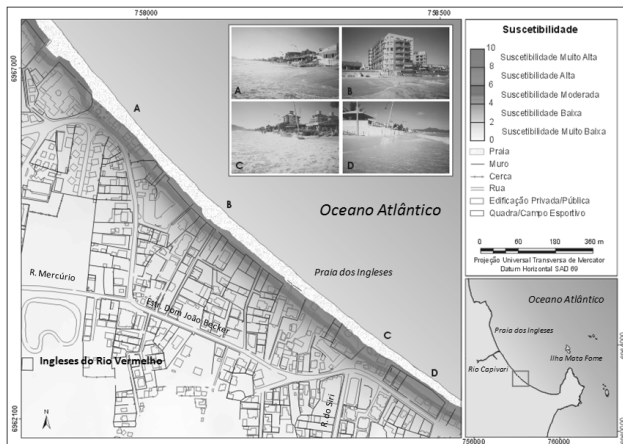


Figura 9. Superfície contínua de suscetibilidade - Praia dos Ingleses. Localização das fotos no mapa (A, B, C e D, respectivamente).

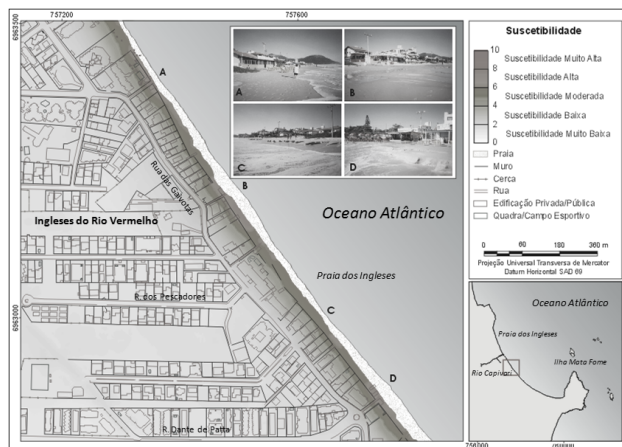


Figura 8. Superfície contínua de suscetibilidade - Praia dos Ingleses. Localização das fotos no mapa (A, B, C e D, respectivamente).

O setor sudeste representado na Figura 10 apresentou os maiores valores de suscetibilidade na Praia dos Ingleses. A praia seca praticamente não existe e foram construídos diversos muros e enrocamentos para impedir o avanço do mar (Figura 10 A, B, C e D). O valor médio de suscetibilidade neste setor foi de 8,8, sendo que as áreas mais críticas atingiram suscetibilidades em torno de 9,6.

Nos perfis monitorados por Faraco (2003) localizados a noroeste e sudeste deste setor foram encontradas as menores variações de volume e as menores larguras de praia. Em contrapartida, é justamente no setor sudeste que a antepraia é mais extensa (Faraco, 2003). Logo ao sul deste setor, um campo de dunas expressivo avança sobre o pós-praia e os ventos do quadrante sul podem transportar grande quantidades de sedimento em direção à praia. Segundo Abreu de Castilhos *et al.*, (1995), parte deste sedimento é depositada no pós-praia e outra parte é remobilizada pelas correntes de deriva litorânea e transportada para noro-

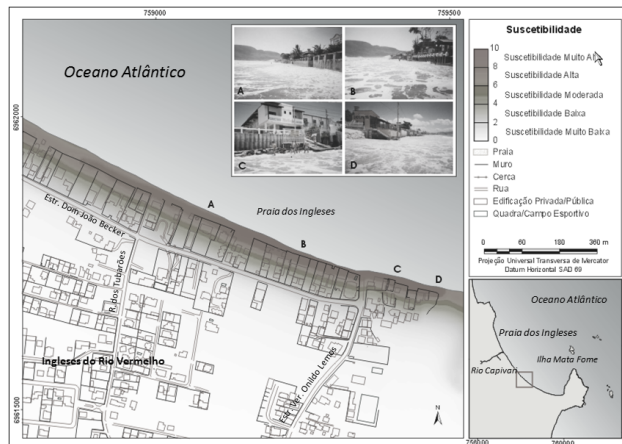


Figura 10. Superfície contínua de suscetibilidade - Praia dos Ingleses. Localização das fotos no mapa (A, B, C e D, respectivamente).

este. Segundo Faraco (2003), este processo explicaria o baixo estoque de sedimento na praia emersa neste setor, apesar da proximidade da fonte de sedimento.

Praia Morro das Pedras

Na Praia Morro das Pedras a suscetibilidade variou entre moderada (5) e alta (7,5) (Figura 11). O gradiente de suscetibilidade ao longo da linha de costa refletiu a variação dos geoindicadores. Contudo, no sul da praia, onde as altitudes eram mais baixas, a topografia contribuiu para o aumento da suscetibilidade e ao norte, onde as altitudes eram mais elevadas, contribuiu para a diminuição.

As áreas de suscetibilidade moderada estão mais ao norte (Figura 11 A), onde as dunas são relativamente bem preservadas e com a vegetação estabelecida. Durante o trabalho de campo, a presença de escarpas indicou que a praia vinha sofrendo processos erosivos. Nesta faixa, apenas um ponto teve suscetibilidade alta devido à presença uma trilha que chega até a praia, onde a duna frontal esta praticamente destruída.

No setor sul, a praia foi classificada como sendo de suscetibilidade alta. As dunas frontais são baixas, bastante vegetadas, porém fragmentadas pela grande quantidade de acessos de casas para a praia. As dunas interiores são ausentes devido à presença de diversas casas imediatamente atrás das dunas frontais. Fica evidente também ali que a ocupação humana é um fator determinante na suscetibilidade, pois as áreas mais suscetíveis ocorrem nas áreas onde muros e edificações (Figura 11 C) estão mais próximos da praia.

De forma geral o resultado do mapeamento da suscetibilidade na Praia Morro das Pedras foi satisfatório, pois conseguiu integrar na avaliação fatores como os geoindicadores, a topografia e a distância da linha de costa. Todavia, apesar da geologia local

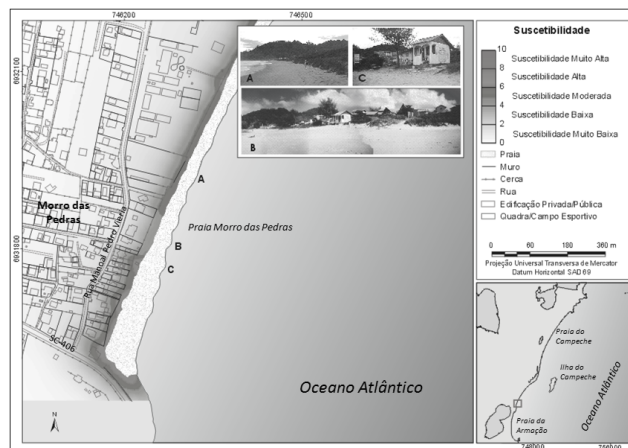


Figura 11. Superfície contínua de suscetibilidade - Praia Morro das Pedras. Localização das fotos no mapa (A, B e C, respectivamente).

não ter sido considerada na lista de geoindicadores de Bush *et al.* (1999) e tão pouco no presente trabalho, ela pode vir a ser um fator importante na avaliação da suscetibilidade. Ao sul da praia encontra-se o embasamento cristalino que tem uma suscetibilidade de sofrer os efeitos erosivos de uma maré de tempestade muito inferior do que os depósitos arenosos. Esta área acabou obtendo valores maiores do que os desejáveis e, portanto, a variação litológica deve ser considerada em futuros trabalhos.

Praia da Armação

A Praia da Armação teve uma grande variação no perfil de suscetibilidade ao longo da praia (Figura 12). Em torno do ponto A as suscetibilidades foram altas, em torno dos pontos C e D moderadas, e em torno dos pontos B, E e F, muito altas (Figura 12). Os setores mais urbanizados da praia são os setores central e sul.

A Figura 13 mostra em maior detalhe o setor central. No ponto A a suscetibilidade esteve muito alta. Nota-se uma praia seca muito estreita, a duna frontal com indícios de escarpamento ativo e a presença de uma casa praticamente sobre a duna frontal, cujo morador construiu um muro de madeira para conter o avanço do mar (ver foto). Já no entorno do ponto a ausência de casas sobre as dunas proporcionou a diminuição da suscetibilidade para alta. Entretanto, mais ao sul a suscetibilidade aumenta novamente para muito alta. Nas Figuras 13 B, C e D, observa-se indícios de erosão severa, a duna frontal foi totalmente removida e a os muros das casas estão praticamente na praia. Ao sul do ponto D a suscetibilidade diminui rapidamente para moderada. As dunas frontais, apesar de baixas e escarpadas, estão preservadas e com vegetação bem estabelecida.

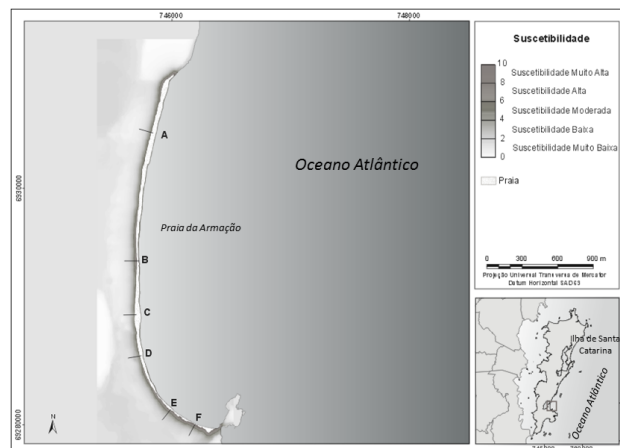


Figura 12. Superfície contínua de suscetibilidade - Praia da Armação.

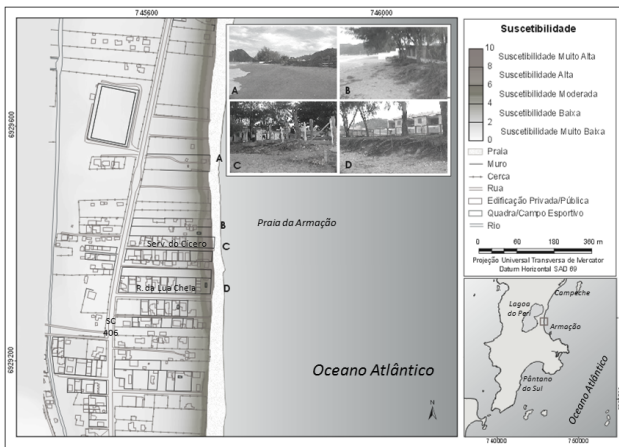


Figura 13. Superfície contínua de suscetibilidade - Praia da Armação. Localização das fotos no mapa (A, B, C e D, respectivamente).

O setor sul da Praia da Armação foi onde se registraram os valores mais altos de suscetibilidade. Além de apresentar indícios de erosão intensa, com diversas estruturas de contenção e dunas frontais e interiores ausentes (Figuras 14 A, B, C e D), este setor é o mais baixo e plano.

Praia Pântano do Sul

A Praia Pântano do Sul, apesar de estar submetida à menor energia de onda entre praias avaliadas, também apresentou áreas com alta suscetibilidade. Ao longo da praia foram observados gradientes intensos de suscetibilidade, variando desde baixas no setor oeste até altas no setor leste (Figura 15). Estes gradientes refletem, em grande parte, a influência negativa da ocupação local.

No setor oeste foram obtidos os valores mais baixos de suscetibilidade entre as quatro praias analisadas (em torno de 3,7). As dunas frontais e interiores estão bem desenvolvidas e vegetadas, a praia é larga e a energia de onda baixa. No setor leste, diversas edificações localizam-se sobre a praia e a única proteção contra as marés de tempestades são muros de contenção, quando existem (Figuras 15 B, C e D), pois as dunas frontais e interiores foram praticamente removidas. Quando presentes, são muito baixas (menores que 0,5m) e pouco vegetadas. A praia é extensa, porém bastante plana e o interior também apresenta baixa declividade. Nas áreas mais planas, a influência do relevo na suscetibilidade pode ser observada pela diminuição mais gradual da suscetibilidade em direção ao interior. Nestas áreas, existem terrenos quase totalmente situados em áreas de suscetibilidade muito alta.

Oliveira *et al.* (2004) observaram períodos de erosão e de acreção na Praia Pântano do Sul. Os maiores eventos erosivos ocorreram no outono e inverno com ondulações de sul e sudeste associados a marés

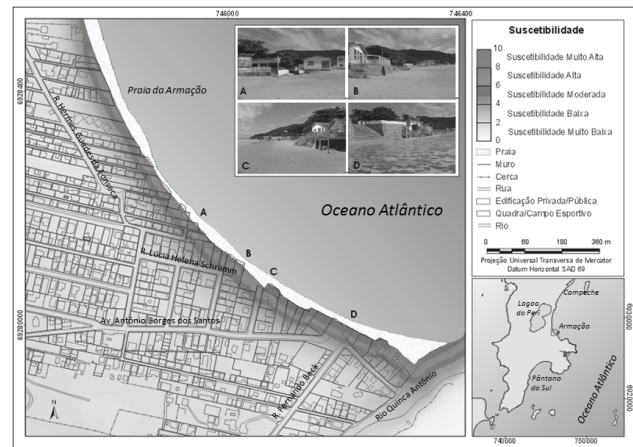


Figura 14. Superfície contínua de suscetibilidade - Praia da Armação. Localização das fotos no mapa (A, B, C e D, respectivamente).

meteorológicas. Entretanto, a praia apresentou poder de recuperação no estoque de sedimentos após os eventos de alta energia (Oliveira *et al.*, 2004).

CONCLUSÕES

Mesmo tendo empregado abordagens metodológicas distintas, houve uma boa concordância entre os resultados obtidos e o mapeamento de áreas de risco à ação de “ressacas” proposto por Simó e Horn Filho (2004). Os setores classificados como “Área com Alto Risco” por aqueles autores se correlacionaram com os trechos de “Suscetibilidade Alta e Muito Alta” identificados no presente trabalho. A exceção ficou por conta da Praia do Morro das Pedras, que se mostrou com maior risco quando analisada com base nos geoindicadores. Também foi possível obter um melhor

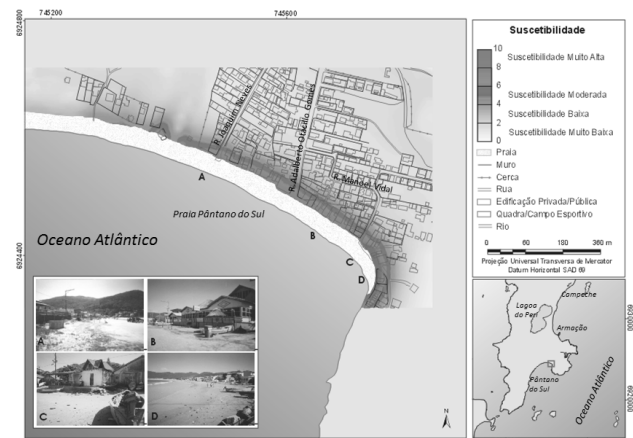


Figura 15. Superfície contínua de suscetibilidade - Praia Pântano do Sul. Localização das fotos no mapa (A, B, C e D, respectivamente).

detalhamento geométrico da distribuição dos trechos susceptíveis à erosão, graças à representação dos dados na forma de superfícies contínuas.

Entre as áreas estudadas, o setor mais suscetível à erosão foi o sudeste da Praia dos Ingleses, onde ocorrem diversos enrocamentos e muros de contenção para impedir o avanço do mar. As Praias da Armação e Pântano do Sul também apresentaram setores com suscetibilidade muito alta. Já na Praia Morro das Pedras as suscetibilidades variaram de alta a moderada. O maior gradiente de suscetibilidade foi encontrado na Praia Pântano do Sul, onde a mesma aumentou de baixa no setor oeste para muito alta no setor leste.

A metodologia adotada não identifica as causas de erosão, mas evidenciou que a ocupação inadequada influencia de forma bastante efetiva a suscetibilidade. A presença de estruturas sobre as dunas frontais rompe o estoque natural de sedimentos que protege a praia durante as tempestades mais intensas e a supressão deste estoque pode alterar o equilíbrio dinâmico da praia, desencadeando e/ou intensificando os processos erosivos e aumentando, portanto a suscetibilidade.

Apesar de não diagnosticar as taxas ou a probabilidade de erosão, os geoindicadores permitiram avaliar eficientemente as variações da suscetibilidade das praias estudadas. Uma vez que tais indicadores refletem processos que vêm atuando em escalas temporais distintas (de dias a décadas), seu emprego associado à metodologia de análise espacial proposta é promissora no estudo de perigos costeiros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu de Castilhos, J.; Klingebiel, A.; & Gré, J.C.R. 1995. Les plages de l'île de Santa Catarina (Brésil): un système sédimentaire évolutif et précaire. In: Conference on Coastal Change – Bordomer, Bordeaux, 1995. IOC/UNESCO, p.3.
- Almeida, E.S.; Castilhos, J.A.D.; Simon, A.F.; Ávila, E.L.; Aumond, J.J.; Pinto, N.C.L.; Santo, N.A.D.; & Infante, N. 1991. Observações geomorfológicas na praia do Forte – Ilha de Santa Catarina. Geosul. 11: 38-54.
- Araujo, C.E.S.; D., Franco.; E., M. F.; & Pimenta, F. 2003. Wave Regime Characteristics of the Southern Brazilian Coast. In: Sixth International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, Colombo, 2003. COPEDEC, p.15.
- Berger, A.R. & Iams, W.J. 1996. Geoindicators: Assessing Rapid Environmental changes in Earth Systems. Rotterdam: A. A. Balkema, 466p.
- Bird, E.C.F. 1985. Coastal changes: A global overview. John Wiley and Sons, New York, 219pp.
- Bone, C.; Dragicevic, S.; & Roberts, A. 2005. Integrating high resolution remote sensing, GIS and fuzzy set theory for identifying susceptibility areas of forest insect infestations. Int. J. Remote Sens. 26(21): 4809-4828.
- Burrough, P.A.; & McDonnell, R.A. 1998. Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press, New York, 346p.
- Bush, D.M.; Neal, W.J.; Young, R.S.; & Pilkey, O.H. 1999. Utilization of geoindicators for rapid assessment of coastal-hazard risk and mitigation. Ocean Coast. Manage. 42(8): 647-670.
- Calliari, L.J.; & Pereira da Silva, R. 1998. Erosion processes associated to storm surge and washout along the south Brazilian coastline. In: International Coastal Symposium. Palm Beach, 1998. J. Coastal Res., p.7.
- Charlier, R.H.; & Meyer, C.P.d. 1998. Coastal erosion: response and management. Springer Verlag, Heidelberg & New York, 343p.
- Coburn, R.H., 2001, Reducing the Vulnerability of North Carolina's Coastal Communities: A Model Approach for Identifying, Mapping and Mitigating Coastal Hazards. Duke University, Durham, p.10.
- Diehl, F.L.; Klein, A.H.F.; Calliari, L.J.; & Horn Filho, N.O. 1998. Coastal Evolution of the Daniela Spit, Santa Catarina Island, Southern Brazil. J. Coastal Res. 26(1): 3-8.
- Dragicevic, S.; & Marceau, D.J. 2000. A fuzzy set approach for modeling time in GIS. Int. J. Geogr. Inf. Sci. 14(3): 225-245.
- Fabri, A.G. & Patrono, A. The use of environmental indicators in the geosciences. ITC Journal. 4: 358-366, 1995.
- Faraco, K.R. 2003. Comportamento Morfodinâmico e Sedimentológico da Praia dos Ingleses - Ilha de Santa Catarina - SC, Durante o Período de 1996 - 2001. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. 132p.
- Faraco, K.R.; Castilhos, J.A.D.; & Horn Filho, N.O. 2006. Morphodynamic aspects and El Niño oscillations in Ingleses Beach, Santa Catarina Island, Southern Brazil. J. Coastal Res. SI(39): 656-659.
- Fucks, S.; Carvalho, M.S.; Câmara, G.; & Miguel, M.A. 2004. Análise Espacial de Dados Geográficos. EMBRAPA, Brasília, 209p.
- Horn Filho, N.O. 2004. Estudos morfossedimentares (1970-2004) nas praias da ilha de Santa Catarina, SC, Brasil, uma síntese Gravel. 2: 57-70.
- Horn Filho, N.O., 2006. Ilha de Santa Catarina. In: Muehe, D. (ed.), Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro: Ministério do Meio Ambiente, Brasília, p.413-436.

- Klein, A.H.d.F. 2004. Morphodynamics of Headland-Bay Beaches: Examples from the Coast of Santa Catarina State, Brazil. Tese de Doutorado. Universidade do Algarve. Portugal. 257p.
- Komar, P.D. Beach processes and sedimentation. Prentice-Hall, 1976. 429p.
- Komar, P.D. 1983. CRC handbook of coastal processes and erosion. CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, 320p.
- Komar, P.D.; McDougal, W.G.; Marra, J.J.; & Ruggiero, P. 1999. The rational analysis of setback distances: Applications to the Oregon coast, Shore and Beach. 67(1): 41-49.
- Longley, P.A.; Goodchild, M.F.; David, J.M. & Rhind, D.W. Geographic Information Systems and Science. John Wiley and Sons, 2005. 512 p.
- McGuire, B.; Mason, I.; & Kilburn, C. 2002. Natural Hazards and Environmental Change. Arnold Publishers, 187 p.
- Morton, R.A.; & Sallenger, A.H. 2002. Morphological Impacts of Extreme Storms on Sandy Beaches and Barriers. J. Coastal Res. 13(3): 560-573.
- Muehe, D., (ed.), 2006. Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro Ambiente. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 145p.
- Nimer, E. 1979. Climatologia do Brasil. IBGE, Rio de Janeiro, 422p.
- Oliveira, U.R.; Horn Filho, N.O.; & Oliveira, J.S. 2006. Morphosedimentary aspects of the Pântano do Sul - Açores arc beach, Santa Catarina Island, Brazil. J. Coastal Res. SI(39): 626-628.
- Robin, M. 2002. Étude des risques côtiers sous l'angle de la géomatique. Annales de Géographie (627-628): 471-502.
- Rudorff, F.d.M.; Bonetti, J.; & Moreno, D.A. 2005. Maré de Tempestade. In: Herrmann, M. L. P. (ed.), Atlas de Desastres Naturais do Estado de Santa Catarina. Estado de Santa Catarina, Florianópolis, p. 5.
- Silveira, L.d.; Klein, A.H.d.F.; Tessler, M.G. Análise da Morfodinâmica de Praias de Enseada a Partir de Imagens Aéreas Verticais. Caso de Estudo: Praias do Estado de Santa Catarina e do Litoral Norte do Estado de São Paulo. Rev. Bras. Geomorf. (Em revisão)
- Simó, D.H.; & Horn Filho, N.O. 2004. Caracterização e distribuição espacial das "ressacas" e áreas de risco na Ilha de Santa Catarina. Gravel. 2: 93-103.
- Torrenteguy, M.C.; & Horn Filho, N.O. 2001. Variações morfológicas ao longo do arco praiial Joaquina - Morro das Pedras, ilha de Santa Catarina, SC, Brasil. In: I Congresso do Quartenário de Países de Línguas Ibéricas, Lisboa, 2001. p.241-244.
- Wisner, B.; Blaikie, P.; Cannon, T.; & Davis, I. 2004. At Risk: Natural Hazards, Peoples's Vulnerability and Disasters. Routledge, 451p.
- Wright, L.D.; & Short, A.D. 1984. Morphodynamics variability of surf zones and beaches: a synthesis. Marine Geol. 56: 93-118.

Submetido: Junho/2008
Revisado: Abril/2009
Aceito: Agosto/2009