

# GESTÃO COSTEIRA INTEGRADA

Revista de Gestão Costeira Integrada  
para Países de Língua Portuguesa

#08.FASCÍCULO 1: ANO 07. 2008

<http://www.gci.inf.br/nova/>  
<http://www.aprh.pt/rgci/>





# Revista de Gestão Costeira Integrada

Número 8, fascículo 1

2008

[www.aprh.pt/rgci](http://www.aprh.pt/rgci)  
[www.gci.inf.br](http://www.gci.inf.br)

## Editores

J. Alveirinho Dias (jdias@ualg.pt)  
Marcus Polette (mpolette@univali.br)  
J. Antunes do Carmo (jsacarmo@dec.uc.pt)

ISSN 1646-8872







[www.aprh.pt/rgi](http://www.aprh.pt/rgi)  
[www.gi.inf.br](http://www.gi.inf.br)

## Comissão Editorial

João Alveirinho Dias  
Marcus Polette  
José Antunes do Carmo

## Comissão Científica

Adriano A. Bordalo Instituto de Ciências Biomédicas de Abel Salazar, Universidade do Porto, Porto, Portugal  
Alexander Turra Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil  
Alexandre Schiavetti Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, Bahia, Brasil  
André Bustorff Fortunato Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal  
Antonio Klein Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, SC, Brasil  
Cassiano Monteiro-Neto Universidade Federal Fluminense, Niteroi, RJ, Brasil  
Dieter Muehe Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
Fernando Veloso Gomes Universidade do Porto, Porto Portugal  
Helena Granja Universidade do Minho, Braga, Portugal  
Ildeberto Mota-Oliveira Centro de Estudos de Hidrosistemas, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal  
João Alveirinho Dias Faculdade de Ciências do Mar e Ambiente, Universidade do Algarve, Faro, Portugal  
José Antunes do Carmo Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal  
Lauro J. Calliari Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Carreiros, RS, Brasil  
Luís Cancela da Fonseca Faculdade de Ciências do Mar e Ambiente, Universidade do Algarve, Faro, Portugal  
Manuel Afonso-Dias Faculdade de Ciências do Mar e Ambiente, Universidade do Algarve, Faro, Portugal  
Marcus Polette Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, SC, Brasil  
Mônica Costa Departamento de Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil  
Moyses G. Tessler Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil  
Óscar Ferreira Faculdade de Ciências do Mar e Ambiente, Universidade do Algarve, Faro,  
Paulo Freire Vieira Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil  
Rainer Wehrhahn Departamento de Geografia, Universidade de Kiel, Alemanha  
Sílvio Soares Macedo Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil  
Walter M. Widmer Universidade Federal do Paraná, Matinhos, PA, Brasil



## Índice

J. Alveirinho Dias Marcus Polette J. Antunes do Carmo	3	Editorial
<b>Prefácio</b> J. Alveirinho Dias Marcus Polette J. Antunes do Carmo	5	A Ocupação e Exploração do Litoral. Reflexões para um Desenvolvimento Sustentável.
<b>Artigos</b> Paulo Baptista Luísa Bastos Telmo Cunha Cristina Bernardes João Alveirinho Dias	9	Aplicação de Metodologias de Monitorização GPS em Litorais Arenosos: Geração de Modelos de Elevação do Terreno <i>Application of GPS Survey Methodologies in Sandy Shore Environments: Generation of Digital Elevation Models</i>
Catarina I. C. Vargas Filipa S. B. F. Oliveira Anabela Oliveira Nuno Charneca	25	Análise da Vulnerabilidade de uma praia Estuarina à Inundação: Aplicação à Restinga do Alfeite (Estuário do Tejo) <i>Vulnerability Analysis of an Estuarine Beach to Inundation: Application to Alfeite Spit (Tagus Estuary)</i>
A. B. Fortunato M. Clímaco F. Oliveira A. Oliveira F. Sancho P. Freire	45	Dinâmica Fisiográfica da Orla Costeira: Estudos de Reabilitação e Protecção <i>Coastal Dynamics: Rehabilitation and Protection Studies</i>
Mechteld Ten Voorde Maria da Graça Neves João Simão Antunes do Carmo	65	Estudo Preliminar da Geometria de um Recife Artificial para Protecção Costeira e para a prática de Surf na Costa Oeste Portuguesa <i>Preliminary Study on Geometry of an Artificial Reef for Coastal Protection and Surfing along the West Coast of Portugal</i>
Iracema Reimão Silva Abílio Carlos da Silva Pinto Bittencourt Sylvio Bandeira de Mello e Silva José Maria Landim Dominguez José Rodrigues de Souza Filho	81	Nível de Antropização X nível de uso das praias de Porto Seguro/BA: Subsídios para uma avaliação da capacidade de suporte
Andresa G. Wagner Valleria R. Bellotto	93	Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário: Análise Económica de Alternativas para Municípios Litorâneos - Estudo de Caso_- Balneário Camboriú e Itajaí (SC), Brasil <i>Sewage Treatment Stations: Economic Analysis of Alternatives for Coastal Cities - Case Study Balneário Camboriú e Itajaí (SC), Brazil</i>



## Editorial

A Revista de Gestão Costeira Integrada (RGCI), como revista electrónica (*e-journal*) que é, pretende ser uma revista virada para o futuro, explorando e beneficiando, tanto quanto possível, as novas tecnologias. A criação e reformulação dos portais português (<http://www.aprh.pt/rgci>) e brasileiro (<http://www.gci.inf.br>) da RGCI são disso exemplo.

Num mundo em mudança constante, em que as tecnologias digitais estão sujeitas a progressos substanciais e muito rápidos, há que desenvolver, de forma consistente e persistente, um esforço grande de adaptação e actualização. É o que tentamos fazer na Comissão Editorial da RGCI.

Por outro lado, as novas tecnologias, principalmente as tecnologias digitais, transformaram a nossa sociedade na “sociedade da informação”, em que esta é disponibilizada rapidamente e circula de forma extremamente ampla. As grandes revistas científicas internacionais, cujo potencial económico e organizativo lhes permitem respostas rápidas e consistentes, há já algum tempo que iniciaram o processo de contínua adaptação, do que tem resultado, em termos gerais, aumento de receitas e redução de custos. As tiragens em papel têm vindo sistematicamente a ser menores, ao mesmo tempo que o número de utilizadores / leitores tem vindo a crescer de forma impressionante, para o que muito têm contribuído, essencialmente, os contratos celebrados entre as editoras ou associações destas, as universidades e os governos. Ter acesso a determinado artigo, que há poucas décadas exigia saber o local onde existia a revista onde foi publicado e, por vezes até, percorrer longas distâncias, o que, não raro, se traduzia em investimentos significativos em tempo e dinheiro, está agora à distância de um simples clique no teclado de um computador (o que, actualmente, com o *wireless*, pode até ser feito no meio de uma reunião, em pleno campo ou praia no meio de trabalhos de aquisição de dados, no carro, nos transportes públicos, etc.). Da mesma forma, também a submissão de manuscritos pode, agora, ser efectuada com a mesma facilidade. É o futuro a acontecer!

Como se referiu, a RGCI quer estar nessa via do Futuro. Desde o ano passado que os artigos, assim que estão aceites para publicação e devidamente formatados, são de imediato disponibilizados no portal em versão *pre-print*. Reduzem-se, assim, de forma muito significativa, os tempos de divulgação da informação (o que nitidamente beneficia os autores) e de acesso à mesma (com vantagens óbvias para o leitor / utilizador).

Mas, perante as amplas possibilidades que vão sendo criadas pelas novas tecnologias, a Comissão Editorial da RGCI está, como é lógico, num estado de insatisfação permanente, tentando, de forma persistente, melhorar o aproveitamento e utilização dessas possibilidades. Assim, espera-se que ainda no decurso do corrente ano o processo de submissão de manuscritos, bem como o de avaliação, passe a ser inteiramente automático, num contexto integralmente *on-line*, através do portal existente. De igual forma, o esforço de adaptação e melhoramento do portal é permanente.

Na actualidade, a visibilidade de qualquer publicação na internet é absolutamente essencial. Pode já dizer-se que, em grande parte, o que não existe na internet não existe em termos práticos. Consequentemente, é importante que a RGCI esteja indexada nas principais bases de dados com cunho científico. Um passo importante nesse sentido foi dado recentemente, na sequência de contactos com a EBSCO Publishing, Inc. (via Fundação para a Ciência e Tecnologia, de Portugal), ao conseguir-se integrar a RGCI na base de dados internacional FONTE ACADEMICA.

Actualmente, os documentos publicados na internet (*e-books*, *e-papers*, *e-reports*) são identificados por um nome / número conhecido por DOI. A esmagadora maioria dos artigos publicados em revistas (nacionais ou internacionais) que têm versão digital disponível na internet, está identificada com um número DOI. O sistema DOI (<http://www.doi.org>) fornece, entre outras potencialidades, uma rede de identificação eficaz e persistente, um processo de gestão facilitada da propriedade intelectual, um método de administração de metadados, e uma forma de disponibilização e divulgação de publicações que é absolutamente notável. Todas as editoras científicas relevantes aderiram já ao sistema DOI. Actualmente, a RGCI está a analisar a questão, tentando, também ela, pesem embora as limitações financeiras, aderir a este sistema.

Todas as revistas de circulação internacional fazem um esforço grande para encurtar os tempos de publicação (ou de disponibilização *on-line* dos artigos), o que é fortemente constrangido pelos tempos de avaliação. Em todas as revistas, de forma geral, existem atrasos significativos imputáveis a respostas menos céleres de alguns avaliadores (*referees*). Estes, que desejavelmente têm elevado gabarito na comunidade científica internacional, e que, de forma abnegada e graciosa, prestam colaboração, normalmente entusiástica, a várias revistas, não podem, como é óbvio, ser submetidos a pressões excessivas. Por outro lado são, por via de regra, pessoas muito ocupadas, sendo normalmente essa intensa actividade que lhes granjeou o prestígio científico que têm. As comissões editoriais têm, conseqüentemente, que procurar um determinado equilíbrio entre avaliadores altamente categorizados e tempos de resposta adequados, o qual é difícil de obter. Na RGCI conseguimos que os 123 dias de duração média da avaliação registados em 2007, se reduzissem para 76 dias no 1º semestre deste ano. É uma redução extremamente significativa que é, sabemos, bastante circunstancial, mas que tentaremos consolidar nas próximas edições. No que se refere à publicação dos artigos, conseguimos também encurtar o período que medeia entre a submissão inicial e a disponibilização *on-line* de 112 dias para 93 dias, embora neste caso os períodos aludidos estejam também muito influenciados pelo tempo que os autores levam a reformular os manuscritos.

Com frequência, as actividades paralelas à publicação da revista em si podem revelar-se tão ou mais relevantes e úteis do que os artigos que aí são divulgados. Deste modo, paralelamente à edição da revista, iniciar-se-á, em breve, a elaboração de um Glossário / Dicionário científico sobre a Zona Costeira, o qual será desenvolvido de forma inter-activa utilizando os portais da RGCI, onde ficará disponível. Com esta acção pretende-se não só harmonizar terminologias (e significados), bem como explicitar divergências e convergências existentes nas linguagens científicas dos diferentes países onde se fala português. Solicita-se, desde já, que os investigadores (angolanos, brasileiros, cabo-verdianos, guineenses, moçambicanos, portugueses, são-tomenses, timorenses ...) interessados em colaborar neste ambicioso projecto contactem qualquer um dos editores da RGCI.

A Comissão Editorial da RGCI tenta prestar um serviço útil e relevante à comunidade técnico-científica de expressão portuguesa. Para tal, esforça-se para que a revista seja eficaz, dinâmica e virada para o futuro. Todavia, nunca esquecemos que a revista não é nossa; é dos autores / leitores / utilizadores. É “a” revista de gestão costeira dessa grande comunidade que é a dos países que adoptaram o português como língua sua.

A Comissão Editorial da RGCI  
J. Alveirinho Dias  
Marcus Polette  
J. Antunes do Carmo

## Prefácio

# A Ocupação e Exploração do Litoral. Reflexões para um Desenvolvimento Sustentável

Os litorais mundiais estão sujeitos a pressão de ocupação crescente que, em variadíssimos casos, excedeu já, em muito, a capacidade de carga dos sistemas naturais. Por outras palavras, o limite da resiliência desses sistemas foi ultrapassado, o que significa que a maior parte do potencial de exploração dos amplos recursos que originalmente aí existiam estão definitivamente perdidos. São, agora, sistemas artificiais, embora funcionando ainda, em maior ou menor grau, de acordo com os processos naturais, tal dependendo da capacidade interventiva do Homem. A regeneração natural de tais sistemas é, actualmente, impossível. Se, por qualquer milagre difícil de conceber, a pressão (e respectivos impactes) exercida pelas actividades antrópicas deixassem, de um momento para o outro, de se fazer sentir, esses sistemas por certo que iniciariam um processo de auto-renaturalização e, mais tarde ou mais cedo, estariam funcionando em equilíbrio (dinâmico e evolutivo) com os forçamentos ambientais actuais. Seriam, porém, sistemas naturais profundamente diferentes dos que existiam no século XIX. Provavelmente nem piores, nem melhores: apenas diferentes.

Porém, sabe-se que o “milagre” a que se aludiu não vai acontecer (pelo menos por vontade do Homem). A miragem do turismo, em particular do turismo de massas, é de tal modo forte e está, em geral, de tal forma arreigada nas mentalidades de gestores e de populações, que o que é lógico pressupor é que o nível de antropização dos sistemas costeiros continue a ampliar-se até níveis difíceis de imaginar. O Homem vai progressivamente alterando os sistemas por forma a adaptá-los cada vez mais às “necessidades” do momento, na tentativa de potenciar o mais possível os proventos económicos que deles extrai, mesmo quando há consciência clara de que tal carece de sustentabilidade.

São os grandes edifícios, por vezes com altura cuja razão de ser dificilmente se consegue perceber, que são edificadas nos corpos dunares costeiros, na ante-praia ou, mesmo, na alta praia, ou ainda no topo das arribas, e que, em breve, devido à erosão costeira ou à actuação de um temporal cuja ocorrência foi obliterada nos planos de urbanização, terão que ser “protegidos” por estruturas de defesa, por via de regra do tipo estático. São estas estruturas de defesa que, devido à elevação do nível médio do mar, à diminuição de abastecimentos sedimentares e/ou à actuação de temporais com maiores períodos de retorno, têm que ser periodicamente sujeitas a obras de manutenção, de reconstrução ou de substituição, convertendo o trecho costeiro intervencionado num sector completamente “amuralhado”, cuja amplitude irá crescer ao longo do tempo, e onde a areia irá faltar. São as realimentações artificiais a que é necessário proceder periodicamente para, não obstante o aspecto profundamente artificial do litoral, o turista persistente tenha algum espaço para estender a toalha, e que, por vezes, causam alterações profundas nos ecossistemas costeiros. São as estruturas transversais construídas para reter areia e formar praias artificiais, e que, por via de regra, acabam por causar graves problemas de erosão costeira no sector a sotamar. São as estruturas artificiais “pesadas” colocadas na praia submersa, e que, por vezes, causam impactes com elevada amplitude. São estes apenas alguns exemplos de como temos vindo a artificializar as zonas costeiras, modificando-as e adaptando-as ao que são as nossas (falsas?) necessidades do momento, e que, por via de regra, tentam propiciar uma mais ampla exploração do turismo.

Mas as consequências de desenfreadas ‘massificações’ turísticas, que conduzem invariavelmente a elevadas pressões urbanísticas, com crescimentos exponenciais de população (marcados por forte sazonalidade), infra-estruturas básicas, parques e serviços de apoio, não se limitam a alterações profundas da morfologia costeira, pois têm também reflexos muito pesados na qualidade de vida das populações locais, que directa ou indirectamente dependem dos recursos marinhos. As elevadas quantidades de água extraídas para consumo e uso humano, em épocas balneares, conduzem a preocupantes rebaixamentos

dos níveis freáticos com consequentes contaminações de aquíferos costeiros. Também as elevadas cargas poluentes rejeitadas directamente para o mar sem qualquer tratamento, ou com um nível de tratamento inadequado, vão contaminando ou poluindo as águas com utilizações balneares e os recursos costeiros, com consideráveis impactes ambientais. Com frequência, as alterações dos factores ambientais dão origem a alterações qualitativas nos ecossistemas estabelecidos (e.g. composição específica, biodiversidade, etc.).

Todavia, o litoral como espaço turístico, para os grandes operadores que dominam o mercado, mais não é do que mercadoria que, na maior parte dos casos, passado algum tempo deixa de ser facilmente vendável, ou porque o meio ficou alterado e perdeu as características que o tinham transformado em destino turístico desejável e rentável e/ou porque o público utilizador / consumidor, sedento de novidade, de exotismo e de ambientes diferentes, se saturou desta “novidade” e procura novos destinos mais prometedores. Os trechos costeiros / destinos turísticos já explorados são então abandonados pelos principais operadores (que se deslocam para áreas ainda virgens), acabando por ser explorados por outros, mais vocacionados para o turismo de massas. Numa última fase, esses trechos costeiros / destinos turísticos ficarão desgastados, exauridos e desvalorizados, obrigando à prática de “preços de saldo” para conseguirem, ainda, ter turistas que justifiquem a existência das unidades hoteleiras e, por arrasto, as demais infra-estruturas (saneamento básico, defesas costeiras, etc.). Por via de regra, o nível de resiliência dos sistemas foi ultrapassado. A exploração intensiva e excessiva de praticamente um único recurso acabou por fazer com que, em grande parte dos casos, o potencial de exploração da maioria dos outros recursos naturais tivesse sido desperdiçado.

Tudo isto se sabe há já muito tempo! Certo é que o conhecimento do funcionamento dos processos costeiros era mais do que rudimentar até ao início do século XX. Era uma zona na maioria desocupada e com pouco ou nenhum interesse, um “território do vazio” nas palavras sagazes de Alain Corbin<sup>1</sup>. Porém, a partir de meados do século passado o conhecimento destes sistemas começou a ser fortemente ampliado. Infelizmente, e em parte devido ao aludido desconhecimento científico, já em muitos litorais a ocupação era muito intensa, atingindo proporções que inviabilizam, em termos práticos (económica e politicamente exequíveis), a decisão de desocupação e renaturalização. Actualmente, apesar do muito que já se sabe, há a percepção clara de que muito há ainda para estudar, por forma a perceber bem o modo de funcionamento destes sistemas. Mas o conhecimento existente poderia e deveria evitar a persistência no erro, o que, para mal das actuais camadas jovens e das gerações futuras, continua incompreensivelmente a verificar-se, quiçá ainda com maior intensidade.

Se em muitos litorais europeus e norte-americanos a situação agora existente não deixa alternativas económicas e politicamente viáveis, obrigando a manter e a proteger o que existe, o mesmo não se verifica na maior parte dos outros litorais. Na Europa (relevando-se, em Portugal, o caso do Sudoeste Alentejano e Costa Vicentina, um dos últimos trechos costeiros “selvagens” europeus) e na América do Norte há ainda grandes trechos costeiros com pouca ocupação e, em especial, nos países não europeus de língua portuguesa, onde a maior parte do litoral está quase completamente virgem. Perante os resultados da experiência passada e o actual nível de conhecimento científico há todas as condições para não se repetirem os mesmos erros. Todavia, quando se vai para o mundo real, constata-se que não é isso que acontece. Os princípios de ocupação e de exploração dos litorais arenosos continuam a ser, na essência, os mesmos que foram praticados ao longo do século XX nos sectores costeiros que agora constituem problemas irresolúveis, e que representam, não raro, encargos financeiros elevadíssimos para o erário público, isto é, para a generalidade dos cidadãos. É um pouco como se gestores, estados e países fossem como os jovens. Os pais podem informá-los e explicar-lhes que determinadas coisas não devem ser feitas. Todavia, eles só se convencem e verdadeiramente aprendem quando cometem, eles próprios, esses erros.

Como se disse, a situação na maior parte das zonas ribeirinhas é de pouca ocupação ou, mesmo, de quase inexistência de pressão antrópica directa. Por outro lado, mesmo nos litorais sobre-ocupados, cuja exploração está perto de ser (ou é já) não sustentável, muito há a fazer para melhorar (ou tentar sanear) a situação. O actual conhecimento científico viabiliza um tipo de actuação muito mais esclarecido, sem paralelo no Passado.

Como dizia Almada Negreiros, “*quando nasci já se conheciam as palavras que hão-de salvar o Mundo. Só falta salvá-lo ...*”. Neste caso concreto, desde há algumas décadas que a Ciência nos vem ensinando formas de salvar o litoral; só falta salvá-lo ... A Revista de Gestão Costeira Integrada é um veículo de transmissão desses ensinamentos e de experiências que vão sendo ensaiadas. Que a comunidade científica, a sociedade civil e, particularmente, que os gestores e os políticos possam beneficiar dessa transmissão e divulgação de conhecimentos são os objectivos primordiais da Comissão Científica da RGCI.

---

1 Alain Corbin (1989) – *O Território do Vazio. A Praia e o Imaginário Ocidental*. Tradução do original francês “Le territoire du Vide. L’Occident et le Désir du Rivage”, editado pela Aubier (Paris) em 1988. Editora Schwarcz, São Paulo.

No número da RGCI que agora se publica são debatidos vários dos temas a que acima se fez alusão. Efectivamente, a monitorização dos litorais arenosos, actividade básica sem a qual qualquer tentativa de gestão costeira se arrisca a ser completamente ineficaz, precisamente por ser aplicada a um território cuja evolução e estado actual são desconhecidos, é o tema do artigo de Baptista *et al.*, (2008), onde é apresentado um método rápido, relativamente económico e com elevada precisão, que pode ser aplicado em qualquer trecho costeiro mundial. É através da monitorização que se pode ter uma percepção mais clara da vulnerabilidade dos trechos costeiros e dos riscos aí existentes, designadamente do risco de inundação provocada por condições hidrodinâmicas extremas e/ou por elevações do nível marinho. Este é o assunto debatido por Vargas *et al.* (2008) que, com base no estudo de uma praia estuarina, propõem um método que, utilizando diferentes cenários, permite determinar limites de inundação e proceder a uma avaliação preliminar da vulnerabilidade à inundação. Quando a vulnerabilidade e os riscos são elevados, para evitar que o funcionamento dos sistemas conduza a destruições e elevados prejuízos financeiros, é preciso intervir. Em muitos dos casos, principalmente quando a costa já está intensivamente utilizada e/ou muito ocupada, há várias alternativas de intervenção, sendo as principais técnicas de protecção debatidas e exemplificadas no artigo de Fortunato *et al.* (2008). Uma dessas técnicas de intervenção, que pode mesmo melhorar as condições de utilização para certas actividades, é a construção de recifes artificiais, tema este explanado em Voorde *et al.* (2008). Com a utilização intensiva das praias verifica-se uma correspondente antropização dos ambientes naturais, o que, mais tarde ou mais cedo, acaba por ultrapassar os níveis de resiliência e a capacidade de suporte desses trechos costeiros. Este importante assunto é analisado em Silva *et al.* (2008), especificamente nas praias de Porto Seguro, no Brasil. Com a ocupação turística muito intensiva do litoral, principalmente, como é costume, quando existe sazonalidade muito marcada, surgem muitos problemas relacionados com as infra-estruturas, designadamente com os sistemas sanitários. É este o tema analisado por Wagner & Bellotto (2008).

Assim, mais uma vez, a RGCI põe à disposição dos investigadores lusófonos, e da comunidade científica internacional em geral, uma série de artigos que abrange elevada diversidade temática. Todavia, há que estar consciente que a Gestão Costeira é de tal forma complexa, e que os assuntos (disciplinares e temáticos) que integra são de tal forma diversificados, que urge intensificar a publicação e divulgação de métodos de obtenção de dados baseados nas novas tecnologias que não param de evoluir, bem como de análises de problemáticas muito diferenciadas, designadamente as que incidem sobre a ampla diversidade de ambientes costeiros existentes no enorme espaço geo-político que está unido pela mesma língua: o português.

É isso que, sempre com grande empenho, muito entusiasmo e elevado profissionalismo nos propomos a continuar a fazer, com a colaboração cada vez maior e mais interessada da comunidade científica.

#### **A Comissão Editorial da RGCI**

J. Alveirinho Dias  
Marcus Polette  
J. Antunes do Carmo



## Aplicação de metodologias de monitorização GPS em litorais arenosos: Geração de modelos de elevação do terreno \*

### *Application of GPS survey methodologies in sandy shore environments: Generation of digital elevation models*

Paulo Baptista<sup>1</sup>, Luísa Bastos<sup>1</sup>, Telmo Cunha<sup>2</sup>,  
Cristina Bernardes<sup>3</sup>, João Alveirinho Dias<sup>4</sup>

---

#### RESUMO

A rapidez no processo de monitorização de segmentos litorais constituídos por praias arenosas relativamente extensas, aliada a níveis de precisão indispensáveis para estudos de evolução da linha de costa e de caracterização morfodinâmica implica, frequentemente, o desenvolvimento de novas metodologias. Durante as últimas décadas, os levantamentos de campo foram efectuados recorrendo, principalmente, a técnicas fotogramétricas ou de geodesia clássica. Com o advento das técnicas de geodesia espacial, novas metodologias de base terrestre e aérea foram introduzidas nos programas de monitorização litoral.

O presente trabalho apresenta um protótipo que foi desenvolvido para monitorizar, de forma eficiente e produtiva, as morfologias presentes em praias arenosas. Este protótipo recorre à utilização do Sistema de Posicionamento Global (= "Global Positioning System" – GPS), incorporando um sistema multi-antena GPS montado numa plataforma móvel - um veículo todo-o-terreno apropriado para se deslocar em ambiente de praia. A monitorização é efectuada sob a forma de uma rede de perfis longitudinais e transversais relativamente à linha de costa, que incluem toda a praia sub-aérea, desde o limite de esprai da onda até à base do cordão dunar frontal, ou outra variação topográfica significativa do terreno. A partir da rede de perfis GPS obtida, cuja densidade é definida, em cada caso, de acordo com as características do terreno, é gerado um modelo de elevação do terreno (= "Digital Elevation Model" – DEM). A partir desse DEM é possível extrair

---

1 - Autor correspondente - [renato.baptista@fc.up.pt](mailto:renato.baptista@fc.up.pt), Observatório Astronómico – Faculdade de Ciências – Universidade do Porto, Alameda do Monte da Virgem, 4430-146 Vila Nova de Gaia, Portugal, Phone: +351 227861290; Fax: +351 227861299

2 - Instituto de Telecomunicações – Universidade de Aveiro, Campus de Santiago, 3810 Aveiro, Portugal

3 - Departamento de Geociências - Universidade de Aveiro, Campus de Santiago, 3810 Aveiro, Portugal

4 - FCMA/CIMA – Universidade do Algarve, Campus de Gambelas, 8005-139 Faro, Portugal

---

\* Submissão - 20 Novembro 2007; Avaliação e Decisão - 8 Janeiro 2008; Recepção da versão revista - 9 Fevereiro 2008; Aceitação - em 12 Fevereiro 2008; Disponibilização on-line - 11 de Março 2008

informação relevante para caracterização morfodinâmica de praias arenosas, nomeadamente o volume da praia emersa, o declive da face da praia, a localização de bermas e de outros elementos morfológicos.

No que diz respeito à eficácia da metodologia proposta, os testes de validação que foram realizados permitem concluir que a precisão final dos DEMs é superior a 0,10 m (RMS) (valores médios de RMS entre 0,07 e 0,09 m). Relativamente à produtividade alcançada verifica-se que esta é dependente, essencialmente, do estado morfodinâmico da praia. Em praias dissipativas, a experiência adquirida permite constatar que é possível monitorizar, em média, três quilómetros de praia por hora, considerando uma largura média de praia de cerca de 150 m. Estes valores decrescem para cerca de um quilómetro de praia por hora quando se trata de praias reflectivas, com terraço de maré, cúspides bem desenvolvidas, e uma ou mais bermas na média e alta praia.

A presente metodologia pode considerar-se promissora para a realização de programas regulares de monitorização de baixo custo, oferecendo vantagens adicionais de independência relativamente às condições meteorológicas, permitindo, por conseguinte, a caracterização do impacto de temporais.

---

## ABSTRACT

*The development of survey systems characterised by high accuracy and productivity is fundamental when it is intended to establish regular monitoring programmes in large littoral stretches. The acquired data is fundamental to study the shoreline evolution trends and to support other morphodynamic studies.*

*During the last decades, the general methodological approach for the establishment of coastal monitoring programmes was essentially based on photogrammetry or classical geodetic techniques. With the advent of new geodetic techniques, space based and airborne based, new methodologies were introduced in coastal monitoring programmes. The use of the Global Positioning System (GPS) to support land based sandy beach studies started in the 1990's. In most of the works cited in the scientific literature the GPS antenna is adapted in a land vehicle or transported on the top of a surveying pole by the operator. Others applications include the use of GPS integrated with active sensors in aerial platforms, like the Airborne Laser Scanning (ALS), known by the acronym LIDAR (Light Detection and Ranging). These techniques allow high productivity and accuracy in sandy shore survey, with additional advantages in relation to photogrammetry related with the possibility of generate Digital Elevation Models (DEMs). However, the high cost of these systems limits the generalisation of its application in sandy shore environments.*

*Most of the errors that affect GPS techniques when land based, on-foot methodologies are employed, are related with careless operation during the survey. Heterogeneous burying and inclination of the telescopic pole where the GPS antenna is installed induce random errors that can reach several tens of centimetres. In the case of kinematic GPS surveys where the telescopic pole is carried on-hand, without a contact point with the ground, it is difficult to assure a constant distance in relation to the ground surface. When the kinematic GPS antennas are installed in land vehicles, systematic position errors can be committed due to ground slope changes. These errors affect the positioning precision, but can be compensated if more than one GPS antenna is used in the vehicle.*

*This paper concerns with the development of a monitoring prototype, to survey the sandy shore morphologies, which is based in the use of the GPS. This prototype has a multi-antenna GPS based system mounted on a fast surveying platform, a land-vehicle appropriate for driving in the sand (four-wheel quad). This system was conceived to perform a network of profiles in sandy shores stretches, since the swash line until the frontal dune baseline (sub-aereal beach), in littoral stretches with several kilometres of extension. From the acquired data high precision Digital Elevation Models (DEMs) can be generated. From these models, it is possible to compute the sedimentary volume present in the sub-aereal beach, the beach face slope, to locate the sand cusps, bermes, the frontal dune baseline and other morphological elements present in sandy shores.*

*An analysis of the accuracy and precision of some Differential GPS (DGPS) kinematic methodologies is presented. The development of an adequate survey methodology is the first step in the morphodynamic shore characterisation or in the coastal hazard assessment. The sampling method and the computational interpolation procedures are important steps to produce reliable 3D surface maps as close as possible to the reality. The quality of several interpolation methods used to generate grids was tested in the areas where there were data gaps. The results obtained allow to conclude that with the developed survey methodology, it is possible to survey sandy shores stretches, under spatial scales of kilometres, with vertical accuracy in the final Digital Elevation Models (DEMs) higher than 0,10 m (RMS). This precision is slightly better than the precision cited in the literature for the DEMs obtained from ALS when applied in shore context. After validation with independent techniques the precision of a DEM obtained by ALS is situated between 0.15 and 0.25 m (RMS) in the vertical component.*

*The productivity of the proposed methodology depends on the beach morphodynamic state. From previous experience in dissipative beaches it can be concluded that it is possible to survey littoral stretches of about three kilometres extension per hour. In reflective beaches these values decrease to one kilometre per hour.*

Since 2002 several study cases have been conducted in Portuguese west coast, which include exposed, semi-exposed and protected sandy beaches. These studies have been carried out on regular seasonal bases that allow a short-term morphodynamic characterisation.

The present methodology can be considered promising since it allows to perform relatively low cost regular monitoring programmes, with additional advantages regarding the possibility of surveying in almost all meteorological conditions, that is of fundamental importance to analyse the storms impact over sandy shores.

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de metodologias de monitorização de elevada precisão, eficientes, produtivas e de baixo custo, pode ser considerado um aspecto de primordial importância quando o objectivo se relaciona com o estabelecimento de programas regulares de monitorização de litorais arenosos.

No estudo actual de praias arenosas, os dados de campo referentes aos elementos morfológicos do terreno são relativamente escassos. Os tradicionais perfis topográficos transversais à praia, realizados com teodolitos ou estações totais, apenas permitem uma representação discreta, muito pontual, das morfologias litorais, sobretudo quando o número de perfis efectuados é reduzido relativamente à extensão do segmento litoral que se pretende estudar. O estabelecimento de DEMs a partir destas metodologias é frequentemente inviabilizado por limitações de cobertura espacial dos dados de campo.

Em contrapartida, os sistemas de laser aéreo de varrimento (= "Airborne Laser Scanning" - ALS), permitem uma cobertura espacial de elevada densidade, a partir da qual é possível gerar DEMs. Após validação por técnicas independentes, a precisão de DEMs obtidos por ALS situa-se entre os 0,15 e os 0,25 m (RMS) na componente vertical, considerando, como contexto de realização dos testes, praias arenosas (Meredith *et al.*, 1999; Krabil *et al.*, 2000; Woolard & Colby, 2002). O elevado custo destes sistemas inviabiliza, contudo, a generalização da sua aplicação à monitorização de praias arenosas.

Quando são utilizadas técnicas GPS, a metodologia de monitorização consiste, normalmente, na utilização de uma antena GPS adaptada a uma mochila que é transportada pelo operador. Esta abordagem proporciona maior produtividade do que o tradicional teodolito ou estação total (Morton *et al.*, 1992). Todavia, não é suficientemente produtiva para permitir, de forma rápida, a geração de DEMs em segmentos litorais relativamente extensos. As plataformas móveis, tais como veículos todo-terreno aos quais são adaptados receptores GPS, permitem ultrapassar estas restrições.

Uma limitação inerente à utilização de um veículo todo-o-terreno ao qual é adaptada uma antena GPS, prende-se com a redução da precisão no posicionamento relacionada com a impossibilidade de manter o bastão, que fixa a antena, numa posição vertical. De acordo com as inclinações do veículo, que são uma função da própria inclinação do terreno, ocorrem desvios relativamente à vertical local da antena que afectam a precisão das posições obtidas (Huang *et al.*, 2002). Estes erros na determinação das posições do terreno podem ser corrigidos, recorrendo a sistemas multi-antena adaptados ao veículo (Groat, 2000; Cunha, 2002).

De acordo com os desenvolvimentos efectuados por Baptista *et al.*, (*no prelo*) apresenta-se, neste trabalho, um sistema GPS multi-antena de elevada precisão adaptado a um veículo todo-o-terreno. É ainda apresentado um sistema uni-antena transportada pelo operador de campo que tem como objectivo monitorizar praias arenosas de reduzida dimensão e/ou de acesso difícil para veículos todo-o-terreno. São apresentados os resultados de alguns testes realizados para avaliar a eficiência do sistema. A precisão dos DEMs gerados a partir das presentes metodologias é confrontada com aquela que é obtida por outras metodologias de aquisição de dados de campo.

## 2. METODOLOGIAS

### 2.1 . Sistema DGPS multi-antena adaptado a um veículo tipo moto-quatro

Uma das dificuldades inerentes à utilização de GPS em modo diferencial (DGPS) cinemático adaptado a um veículo prende-se com a eventual redução da precisão do sistema. Havendo uma só antena, a relação entre a posição do solo e a da antena apenas pode ser aproximada pela subtracção, na direcção da vertical do local, da altura da antena ao solo (supostamente conhecida e constante). Os desvios relativos à vertical provocados pela inclinação do terreno induzem um erro na posição, erro esse que será tanto maior quanto maior for o comprimento do bastão que fixa a antena, para um mesmo ângulo de inclinação.

Para avaliar o erro associado a esse desvio da

vertical considere-se, como exemplo, uma praia intermédia, de acordo com a classificação morfodinâmica proposta por Short (1999) para litorais micro-mareais. Numa praia com essas características, o declive da face da praia pode rondar os 5°. As variações de inclinação da superfície do terreno afectam a atitude de um veículo que nele se desloque em duas das suas componentes: a de inclinação lateral (= “roll” ou  $\sim$ ) e a de mergulho (= *pitch* ou *b*). Considerando que esse veículo transporta uma antena a uma altura de 1,5 m relativamente ao solo, são de esperar erros, na determinação da posição, de 0,13 m em planimetria, e de 0,006 m em altimetria, para um ângulo de inclinação da superfície do terreno de 5° relativamente a um plano horizontal de referência. Os erros obtidos em altimetria podem considerar-se pouco significativos, mesmo quando se definem ângulos de inclinação superiores (por ex: para ou igual a 10°, o erro é de 0,022 m). O mesmo não ocorre na componente planimétrica, a qual acusa erros decimétricos para esses valores angulares.

No processo de monitorização de praias, erros de grandeza decimétrica em planimetria são problemáticos em algumas situações, nomeadamente em estudos que envolvam a monitorização da linha de costa, usando, como indicador desse limite, a base do cordão dunar frontal.

Face às presentes evidências foi desenvolvido um sistema multi-antena que visa corrigir os erros de planimetria e altimetria (Figura 1). Esse sistema consiste em duas antenas GPS colocadas transversalmente relativamente à direcção de movimento (uma terceira antena GPS pode ser colocada para determinação do ângulo de mergulho). Através do cálculo da posição de ambas as antenas, é estimado o ângulo de inclinação do braço que une a antena exterior ao solo, sendo este assim compensado.

A opção pela utilização de um braço de apoio lateral tem como objectivo facilitar a monitorização da base da duna. Esse braço apresenta, no entanto, outro tipo de vantagens, mais concretamente ao nível da segurança para o operador no processo de monitorização da crista de bermas ou de escarpas de erosão talhadas em bermas (Figura 2a). Também no caso da realização de perfis pelo limite de esprai da onda, a utilização do braço lateral traduz-se em maior segurança e facilidade operacional (Figura 2b). O sistema do braço lateral foi desenvolvido de modo a poder ser facilmente aplicado ao veículo no início de cada campanha, podendo ser adaptado ao seu lado esquerdo, ou direito, de acordo com o interesse de monitorização. Foi prestada atenção à pressão do pneu

da roda lateral, de forma a garantir que não ocorram variações significativas na altura da estrutura entre várias campanhas. Uma vantagem decorrente da rapidez de execução consiste na capacidade de monitorizar, ao longo de vários quilómetros, o limite da baixa-mar. Outra vantagem prende-se com a possibilidade de monitorizar a praia após eventos de temporal.



Figura 1. Sistema DGPS multi-antena adaptado a veículo moto-quadro. O sistema é composto por duas antenas GPS cinemáticas, as quais são instaladas num braço articulado fixo ao veículo. *in: Baptista et al. (no prelo).*

*Figure 1. Four-wheel motor quad multi-antenna DGPS system. This system is composed by two kinematic GPS antennas installed on an articulate arm fixed to the vehicle. in: Baptista et al. (in press).*

### Sistema DGPS uni-antena transportado manualmente

Quando a zona que se pretende estudar tem uma área reduzida ou é de difícil acesso a veículos, como seja o caso de uma praia com grande quantidade de afloramentos rochosos, o sistema DGPS que recorre à utilização de uma antena transportada pelo observador é o mais prático. Tendo em conta a necessidade de assegurar elevada precisão, optou-se neste caso por desenvolver um sistema em que a antena GPS é fixa a um bastão na base do qual é adaptada uma roda (Figura 3). O bastão é transportado pelo operador na vertical, de forma a manter uma altura constante da antena, relativamente ao solo, ao mesmo tempo que a roda acompanha as variações da topografia do terreno.

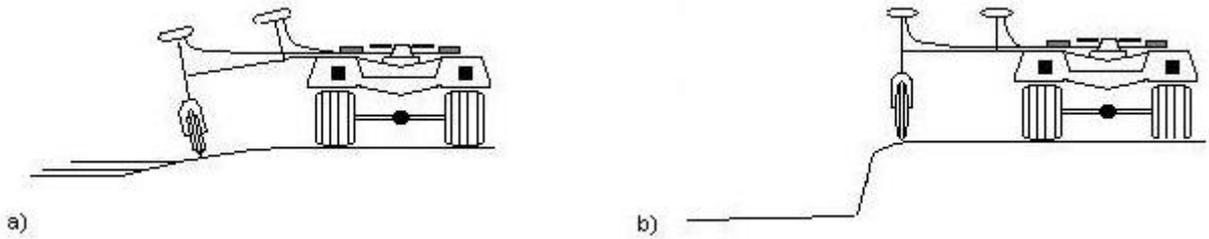


Figura 2. Representação esquemática do sistema DGPS multi-antena em condições de monitorização. a) monitorização da linha de espraio da onda; b) monitorização da crista da berma. Adaptado de Baptista *et al.* (*no prelo*).

Figure 2. Schematic representation of the four-wheel motor quad multi-antenna DGPS system in labour conditions. a) Surveying the near shore zone; b) Surveying the berm ridge. Adapted from Baptista *et al.* (*in press*).



Figura 3. Sistema DGPS uni-antena transportado manualmente pelo operador. O sistema é composto por uma antena GPS montada num bastão na base do qual é adaptada uma roda. A antena é conectada ao receptor GPS que é transportado pelo observador. *in: Baptista et al. (no prelo)*.

Figure 3. On-foot DGPS single-antenna system. This system is composed by one GPS antenna on the top of a telescopic pole mounted on a wheel. The antenna is connected with a GPS receiver transported on the back of the operator. *in: Baptista et al. (in press)*.

Este sistema apresenta vantagens de manuseamento em relação a sistemas em que o bastão é adaptado a uma mochila, uma vez que não é possível controlar, neste último caso, nem a distância em relação ao solo nem os locais exactos de passagem. Apesar das limitações espaciais da área a monitorizar, esta metodologia apresenta vantagens relativamente aos tradicionais perfis obtidos pelos métodos de geodesia clássica. Destaca-se a maior rapidez no processo de aquisição de dados e um maior volume de informação por perfil realizado.

### Método de levantamento de campo

Um dos primeiros aspectos no planeamento do trabalho de campo relaciona-se com a escolha da distribuição espacial dos dados. A presente metodologia de monitorização permite fazer a aquisição de dados segundo perfis. De acordo com a velocidade de deslocação do veículo, considerando o sistema multi-antena adaptado a um veículo moto-quadro, e da cadência de aquisição de dados, a qual é pré-definida pelo operador do sistema, a distribuição espacial das posições poderá variar num perfil. Para um receptor GPS que opera a 5 Hertz, é possível recolher cinco posições por segundo. Se o veículo se desloca a uma velocidade constante de 5m/s é possível obter posições espaçadas metro a metro ao longo do perfil.

Tendo em conta que o objectivo final é a geração de um DEM, torna-se necessário definir uma rede de perfis longitudinais e transversais à linha de costa. As relações entre o número de perfis e a dimensão da área geográfica determinam uma maior ou menor capacidade em representar a morfologia do terreno. Como base de trabalho considera-se que o número de perfis transversais e longitudinais realizados num determinado segmento litoral de praia emersa deve ser escolhido de acordo com as características morfológicas do terreno. Os perfis longitudinais e transversais devem ser efectuados de forma a delinear, da melhor forma possível, as principais morfologias de praia, tais como bermas, cúspides e terraços de maré. Assim, numa praia com características reflectivas, considerando a classificação morfodinâmica de Short (1999), o número de perfis a realizar deverá ser superior ao que será necessário numa praia dissipativa, uma vez que nesta última estão

ausentes muitas das formas de praia supramencionadas.

O facto de se deixar ao operador de campo a decisão sobre a densidade de informação a recolher constitui, por si só, a introdução de um factor subjectivo no processo de aquisição. Contudo, a forma como a presente metodologia foi desenvolvida não deixa muitos graus de liberdade à forma de aquisição da informação. Duas possibilidades podem ser consideradas. A primeira consiste na predefinição de uma rede de perfis para uma dada área geográfica, os quais devem ser monitorizados, cumprindo escrupulosamente os alinhamentos predefinidos em todas as campanhas que possam vir a ser realizadas nessa área. Essa possibilidade exige, porém, a incorporação de um sistema de tempo real (= “*Real Time kinematic*” – RTK) à metodologia desenvolvida. Nesse caso, e em teoria, deixa de haver subjectividade na aquisição de dados, por ser retirada, ao observador, a possibilidade de opção em cada situação. A segunda possibilidade consiste em dar, ao operador de campo, a liberdade de escolha da rede de perfis a ser monitorizada em cada campanha de observação.

Tendo, porém, em atenção que os perfis de praia sofrem mudanças morfológicas sazonais significativas, torna-se difícil, se não impossível, seguir alinhamentos pré-definidos. Em muitos litorais arenosos do mundo, o perfil de calmaria caracterizado por uma praia com características reflectivas, com cúspides e terraço de maré, alterna com um perfil de temporal características mais dissipativas, no qual estão presentes, por vezes, escarpas talhadas em bermas. Em cada caso, a rede de perfis a realizar deve respeitar a localização exacta dessas formas de praia, as quais devem ser delineadas ao longo dos limites de variação de pendor.

### 3. DESEMPENHO DAS METODOLOGIAS

O desempenho dos sistemas de monitorização apresentados é efectuado à luz das várias fontes de erro que podem ser consideradas no processo de levantamento de campo. Essas fontes de erro podem ser classificadas em quatro grupos principais, nomeadamente: instrumentais, metodológicos, operacionais e do método de levantamento de campo.

#### 3.1. Erros instrumentais

Cada medida GPS em modo diferencial é afectada por uma fonte de erro que depende da distância entre a estação de referência e a estação móvel. De acordo com Hofmann-Wellenhof *et al.* (1998), as precisões horizontal e vertical são, respectivamente, de 0,01 m

e 0,02 m, às quais se adiciona o factor ( $2 \text{ ppm} \cdot d$ ), em que  $d$  representa a distância entre as estações de referência e móvel. Se for considerada uma distância média entre ambas as estações de 10 quilómetros, a precisão instrumental será de 0,03 m em planimetria e de 0,04 m em altimetria. Em posicionamento cinemático é de prever, contudo, uma degradação da precisão para distâncias superiores a 10 quilómetros.

#### 3.2. Erros metodológicos

Em Baptista *et al.* (*no prelo*), são apresentados os resultados de vários testes de validação realizados para avaliar a exactidão e a precisão de ambas as metodologias propostas neste trabalho. Os testes que visam avaliar a exactidão foram realizados considerando a comparação entre medidas efectuadas por uma técnica independente, com recurso a uma estação total, e medidas obtidas pelo sistema DGPS uni-antena, ao longo de perfis transversais à praia. Os resultados obtidos indicam que as diferenças entre ambas as técnicas nas componentes horizontal e vertical são da ordem do centímetro. Em geral, essas diferenças são inferiores a 0,03 m.

Os testes de precisão tiveram como objectivo comparar o desempenho das metodologias apresentadas na secção anterior, em condições de trabalho de campo. Uma rede de perfis longitudinais e transversais à linha de costa foi monitorizada por ambas as metodologias. A precisão foi avaliada em pontos situados no cruzamento de perfis, os quais constituíram pontos de controlo. A diferença na componente vertical do posicionamento, entre ambas as metodologias, considerando os pontos de controlo, foi inferior a 0,02 m.

#### 3.3. Erros operacionais

As medidas obtidas pelo sistema uni-antena DGPS são afectadas por inclinações do bastão ao qual está adaptada a antena. Essas inclinações podem ser provocadas pelo operador, devido a descuidos no transporte do bastão. Como exemplo, para uma antena transportada a uma altura de 2 m relativamente ao solo e considerando, nessa situação, um desvio da vertical de  $10^\circ$  no bastão ao qual está adaptada a antena, é induzido um erro de 0,34 m na componente planimétrica da posição e 0,03 m na componente altimétrica. Por conseguinte, a experiência do operador de campo é um factor relevante para a produção de bons resultados.

Relativamente ao sistema multi-antena DGPS apresentado, deve ser referido que este apenas corrige

os erros da componente de inclinação lateral do veículo, ou seja, dos movimentos rotativos do bastão vertical em relação ao eixo longitudinal do veículo. A componente de mergulho, a qual está relacionada com movimentos rotativos do bastão vertical em relação ao eixo transversal do veículo, pode ser corrigida com a utilização de uma terceira antena, segundo uma direcção perpendicular à linha formada pelas outras duas antenas. Uma vez que as principais inclinações do terreno nas praias arenosas onde foram realizados os testes (costa ocidental de Portugal) ocorrem quando o veículo se desloca na direcção longitudinal da praia, considerou-se ser pouco relevante a introdução de uma terceira antena GPS.

### 3.4. Erros associados ao método de monitorização

Conforme foi referido na secção anterior, o método de monitorização consiste na realização de perfis longitudinais e transversais à linha de costa. Esses perfis podem ser considerados como a base para a interpolação posterior e consequente geração do DEM relativo ao segmento em estudo. Por conseguinte, quanto melhor a cobertura de um

determinado segmento litoral, ou seja, quanto maior for o número de perfis longitudinais e transversais, melhor será o suporte para a interpolação que irá gerar o DEM. Todavia, um volume de informação demasiado denso representa custos acrescidos, relacionados com a maior duração da monitorização, bem como de dificuldades acrescidas, relacionadas com algumas rotinas de processamento. Em oposição, um volume de informação demasiado escasso pode impedir uma representação satisfatória da superfície monitorizada.

Em Baptista *et al.* (*no prelo*), são apresentados os resultados de um teste que consistiu na avaliação do volume sedimentar médio de uma praia, por comparação de dois DEMs gerados a partir de grelhas de perfis, cujo espaçamento médio é significativamente distinto (Figura 4a e 4b). No primeiro caso, o espaçamento entre perfis transversais e longitudinais é de cerca de 20 m (Figura 4a) e, no segundo, é de cerca de 10 m (Figura 4b). Saliente-se, que não houve preocupação em manter constante a distância entre perfis, mas apenas de delinear as morfologias do terreno. Por conseguinte, a distribuição geral dos perfis no terreno não é

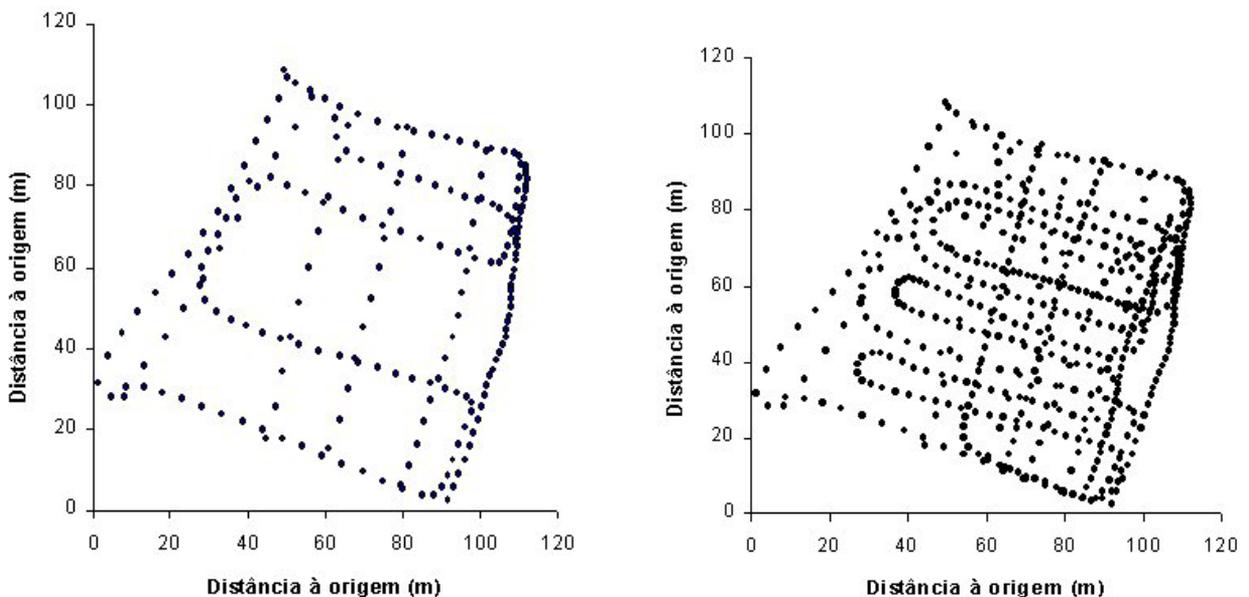


Figura 4. Representação de dois níveis de densidade de perfis realizados por DGPS. a) média densidade de perfis permite delinear satisfatoriamente as principais morfologias do terreno (espaçamento médio entre perfis de 20 metros); b) elevada densidade de perfis (espaçamento médio entre perfis de 10 metros).

Figure 4. Representations of two levels of DGPS sandy shore profiles densities. a) Medium profile density that allow to delineate the main sandy shore morphologies (profiles are spaced 20 meters); b) High profile density (profiles are spaced 10 meters).

uniforme. Os levantamentos de campo para este teste foram efectuados no mesmo local e em simultâneo. Para a geração do DEM utilizou-se um método interpolador que recorre a redes de triângulos irregulares (*Triangular Irregular Networks – TIN*). Os resultados obtidos indicam que a diferença média na componente altimétrica entre as duas superfícies geradas por interpolação, ou seja, entre os dois DEMs, é de cerca de 0,009 m.

#### 4. GERAÇÃO DE MODELOS DE ELEVACÃO DO TERRENO

Diversos critérios devem ser considerados para a selecção de um determinado método interpolador, quando o objectivo se prende com a geração de um DEM. Entre os mais importantes destacam-se os que estão relacionados com a qualidade do modelo final em função do objectivo do trabalho. De referir que deve ser analisada a semelhança de valores entre os pontos ou nós gerados pelo método interpolador e as posições originais situadas na sua vizinhança.

A análise da grelha de resíduos fornecida pelos programas de interpolação é, normalmente, uma boa forma de avaliação das diferenças. Um outro critério é a simples análise visual do modelo gerado, o qual não deve evidenciar linhas de ruptura ao longo da sua superfície. Outros critérios estão relacionados com os recursos logísticos, em termos de capacidade de computação e tempo de processamento.

Muito embora a análise dos resíduos proporcionada por um programa de interpolação forneça indicações sobre a qualidade do método de interpolação, continuam a existir incertezas relativas ao comportamento do método para zonas afastadas dessa vizinhança. Essa situação é particularmente pertinente quando a forma de distribuição dos dados originais é feita sob a forma de perfis, como no caso do presente método de monitorização.

Com o objectivo de avaliar o comportamento de vários métodos de interpolação, apresentam-se os resultados de um teste em que se comparam diversos métodos de interpolação locais, relativamente a um conjunto de pontos de controlo afastados da rede de perfis, realizados pelas metodologias desenvolvidas, e que não foram usados para a interpolação. Basicamente, pretende-se determinar, para um conjunto de pares ordenados ( $X$ ,  $Y$ ), as diferenças de altura ( $Z$ ) entre a grelha gerada por um determinado método interpolador e um conjunto de posições de base DGPS que não foram usadas na interpolação. Nesse teste considerou-se, para os vários métodos

de interpolação utilizados, um espaçamento de 1 metro entre linhas e respectivos nodos gerados.

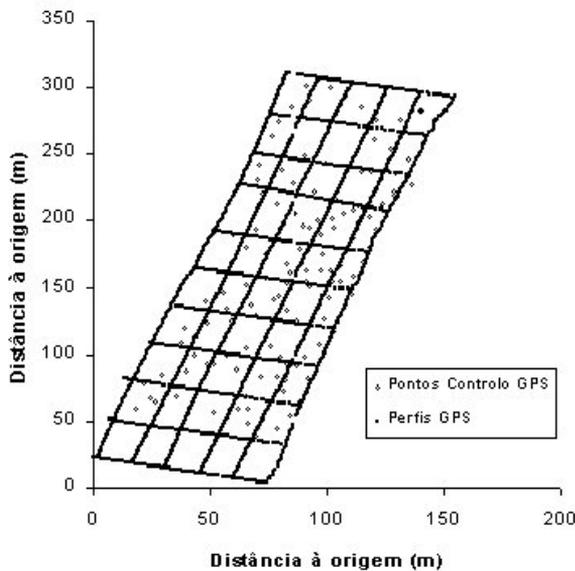
Foram testados seis métodos de interpolação, nomeadamente o método de interpolação da superfície através de redes de triângulos irregulares (= "*Triangular Irregular Network*" – *TIN*) (Lee & Schachter, 1980); o método de mínima curvatura (= "*Minimum Curvature Spline*" – *MCS*) (Smith & Wessel, 1990); o método do inverso da distância (= "*Inverse Distance Weight*" – *IDW*) (Davis & John, 1986), o método de krigagem (= "*kriging*" – *Krig*) (Cressie, 1990), e os métodos do vizinho mais próximo (= "*Nearest Neighbor*" – *NeN*) e do vizinho natural (= "*Natural Neighbor*" – *NaN*) (Sibson, 1980, 1981). Desses métodos deve ser referido que o método *MCS* não funciona como um interpolador exacto, ou seja não respeita as posições dos dados de entrada, neste caso das posições *GPS*. Neste caso a interpolação visa a suavização da superfície obtida.

Na (Figura 5a) representa-se uma rede de perfis realizada por DGPS cinemático com a metodologia uni-antena DGPS, num segmento de praia com 300 m de extensão e cerca de 80 m de largura. O espaçamento entre perfis transversais é de cerca de 30 m e os longitudinais estão espaçados cerca de 20 m. Estão também indicados pontos que representam um conjunto de cento e vinte e oito posições discretas, as quais constituem os designados pontos de controlo relativamente ao método de interpolação. Essas posições foram obtidas pela mesma metodologia e, portanto, com o mesmo nível de precisão do obtido para a rede de perfis. De referir que todos os dados foram obtidos durante a mesma campanha, pelo que representam as mesmas condições de observação.

Considera-se esse segmento suficientemente representativo das zonas normalmente monitorizadas, uma vez que inclui a face da praia, uma berma de separação para a média praia, e uma outra berma de separação para a alta praia. Na Figura 5b representa-se o mapa de contorno da superfície obtida pelo método da mínima curvatura. Na Tabela 1 indicam-se os volumes absolutos das 6 superfícies geradas, bem como as diferenças relativas entre os volumes de cada uma delas e o volume obtido pelo método da *MCS*. Essas diferenças são mais acentuadas no caso dos métodos do vizinho mais próximo e do vizinho natural. Relativamente à área, representam-se os valores da área da superfície obtida, a qual varia de acordo com o método.

A análise estatística efectuada, também indicada na Tabela 1, pretende avaliar qual o método que melhor se ajusta à superfície real do terreno, tendo

como base de comparação; as cento e vinte e oito posições de base obtidas por controlo *DGPS*. Apresenta-se a média da diferença entre as altitudes obtidas na grelha interpolada e as altitudes das posições de controlo *DGPS*. Indicam-se, igualmente, os mínimos e os máximos encontrados, bem como o erro médio quadrático (RMSE – “*Root Mean Square Error*”). Por comparação entre os vários métodos verifica-se que a *MCS*, o *TLN* e o *Kriging* apresentam alguma coerência, não só em termos de resultados obtidos como também relativamente aos pontos de controlo. Nestes métodos, a média das diferenças na componente altimétrica entre a superfície gerada por interpolação e a superfície do terreno varia entre os 0,02 m e os 0,03 m. Nos restantes métodos essas diferenças são superiores, atingindo os 0,013 m no método do vizinho mais próximo.



## 5. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA A SEGMENTOS ARENOSOS DO LITORAL PORTUGUES

Diversas aplicações das metodologias apresentadas neste trabalho, têm sido efectuadas ao longo dos últimos anos no litoral ocidental de Portugal (Figura 6). Os estudos de caracterização morfodinâmica que têm sido efectuados são

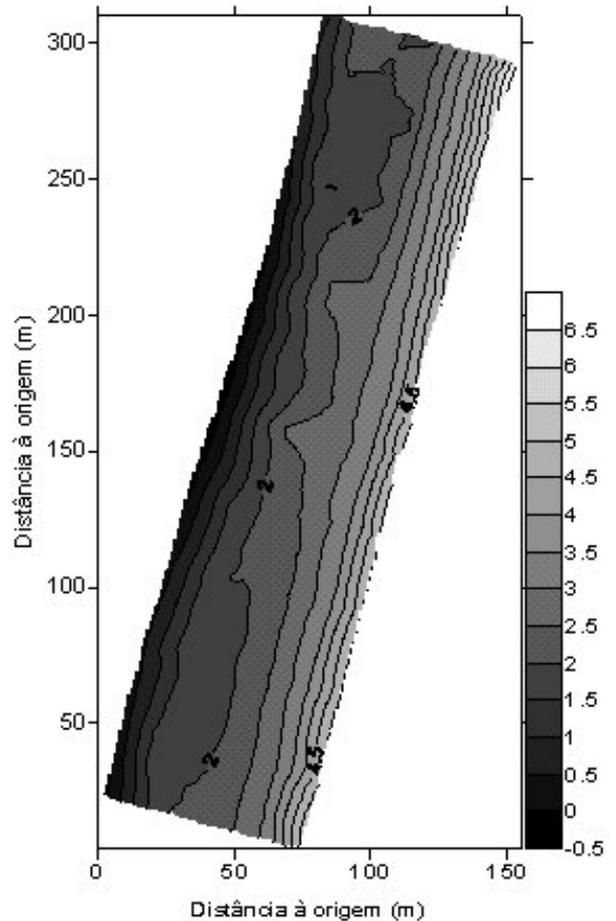


Figura 5. Representação de um teste realizado na praia para avaliar a qualidade do *DEM* gerado por interpolação da grelha de perfis. Neste teste são comparados seis métodos de interpolação relativamente a um conjunto de pontos de controlo não usados para a interpolação. A zona monitorizada tem cerca de 300 metros de extensão e 80 metros de largura. O espaçamento entre perfis é de cerca de 30 metros. a) perfis *DGPS* realizados numa zona de teste. Vários pontos de controlo *DGPS* indicados na figura como pontos discretos foram realizados em zonas afastadas dos perfis. b) Mapa de curvas de nível obtido a partir do método de interpolação *TIN* (in Baptista *et al.* (no prelo).

Figure 5. Representation of the test performed on the beach to evaluate the *DEM* surface quality. In this test it is compared *DEMs* generated by several interpolation methods to a set of control points that was not used for the interpolation. The zone under survey has about 300 meters extension and 80 meters wide. Space between profiles is about 30 meters. a) *DGPS* profiles carried out in a test zone. Several *DGPS* control points indicated in the figure by discrete points were performed between the profile network. b) Contour map of sand level obtained from *TIN* interpolated method (in Baptista *et al.* (in press).

Tabela 1. Diferenças entre seis métodos de interpolação.

Table 1. Differences between six interpolation methods.

Metodo de interpolação	Resultados obtidos*		Análise estatística**			
	Volume (m3)	Área (m2)	média	máximo	mínimo	RMS
MCS	29762	18892	-0,02	-0,3	0,13	0,078
TLN	29878	19151	-0,028	-0,41	0,11	0,086
Kriging	29895	19164	-0,026	-0,3	0,12	0,079
IDW	29777	17671	-0,041	-0,58	0,23	0,15
NaN	29498	18985	-0,032	-0,32	0,11	0,086
NeN	29950	18959	-0,013	-0,69	0,57	0,23

\* O volume e a área foram calculados num segmento litoral com 300 metros de extensão e 80 metros de largura. A interpolação foi realizada com base numa grelha de perfis longitudinais e transversais DGPS.

\*\* Diferenças médias, máximas e mínimas na componente vertical entre os nodos gerados por interpolação e os pontos de controlo DGPS. Foram usados 128 pontos de controlo.

suportados por programas de monitorização de macro-escala, considerando a classificação de Larson e Kraus (1995). Por conseguinte, a escala temporal da monitorização é sazonal (bi a trimestral) e a escala espacial é da ordem dos quilómetros. Os objectivos prendem-se com a quantificação das variações morfológicas e volumétricas de restingas, como é o caso da restinga do Rio Douro (NW Portugal) (Baptista *et al.*, 2003), com a análise do impacte morfodinâmico de obras de defesa costeira, de que é exemplo o quebramar da Aguda (NW Portugal) (Baptista *et al.*, 2004a; Baptista *et al.*, 2006) ou, ainda, com a caracterização morfodinâmica de praias expostas, como é o caso das que ocorrem no litoral da laguna de Aveiro (NW Portugal) (Baptista *et al.*, 2004b). Algumas praias encastradas do litoral da costa Vicentina (SW Portugal) têm sido mais recentemente alvo de monitorização, nomeadamente a praia das Furnas em Vila Nova de Milfontes (Gama & Baptista, 2006).

O estabelecimento de correlações entre volumes sedimentares obtidos e dados de agitação marítima, tem também permitido estudar a capacidade de recuperação sedimentar de segmentos de praia após eventos de temporal (Baptista *et al.*, 2006a).

A título ilustrativo apresentam-se de seguida alguns DEMs obtidos a partir da monitorização pelas metodologias apresentadas em dois segmentos litorais que têm sido alvo de um programa regular de monitorização.

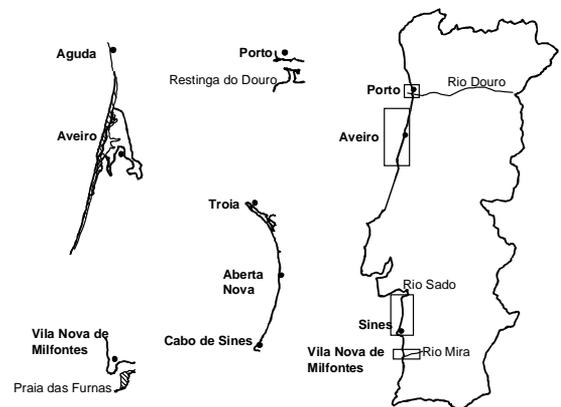


Figura 6. Localização geográfica de alguns segmentos litorais, da costa Oeste de Portugal, que têm sido alvo de monitorização pelo sistema DGPS multi-antena adaptado a veículo moto-quatro. a) Restinga do rio Douro no Porto; b) Praia da Aguda e praias marítimas localizadas ao longo da barreira arenosa da laguna de Aveiro; c) Praia da Aberta Nova localizada no arco litoral Tróia - Sines; d) Praia das Furnas localizada na foz do rio Mira em Vila Nova de Milfontes.

Figure 6. Geographic location of some littoral stretches, in the West Portuguese coast, that have been surveyed by the four-wheel land vehicle DGPS multi-antenna system. a) Douro river sand spit near Porto city; b) Aguda sandy shore and maritime sand shores situated along the sand barrier of Aveiro lagoon; c) Melides sandy shore located in the littoral arc Tróia - Sines; d) Furnas sandy shore located in the mouth of Mira river in Vila Nova de Milfontes.

### 5.1. Restinga localizada na foz do Rio Douro (NW Portugal)

A restinga localiza-se no estuário do rio Douro, o qual é o mais importante curso fluvial do Norte de Portugal. Esse corpo arenoso encontra-se enraizada na margem Sul do estuário e tem uma extensão média de cerca de 800 metros. A sua largura média é de cerca de 300 m, embora sofra variações significativas de largura ao longo do ano. Em termo de área média, calculada tendo como referência o nível médio do mar, esta tem variado entre os 220000 e os 270000 m<sup>2</sup>. As variações que têm sido registadas devem ter em conta a sazonalidade das condições de agitação marítima que induzem uma alternância entre erosão e acreção sedimentar na praia marítima da restinga e também no seu extremo Norte. A monitorização da restinga iniciou-se em finais de 2001 tendo-se mantido até à actualidade um programa regular de observações de cadência trimestral. Na Figura 7a apresenta-se a grelha de perfis realizada pelo sistema DGPS multi-antena adaptado a um veículo moto-quatro em Dezembro de 2007. A distribuição espacial dos perfis obdeceu aos critérios definidos anteriormente (ver secção: Método de levantamento de campo). A monitorização decorreu em condições de baixa-mar de maré-viva tendo a monitorização sido realizada em cerca de três horas. Na Figura 7b apresenta-se o DEM obtido após interpolação da rede de perfis obtida por

DGPS. Recorreu-se ao método de interpolação TIN. Os resultados obtidos indicam um volume sedimentar médio de cerca de 880000 m<sup>3</sup>, acima do nível médio do mar, distribuidos por uma área de cerca de 245000 m<sup>2</sup>. A figura apresenta de forma evidente a presença de cúspides, na praia marítima da restinga, as quais são definidas pelo recortado das curvas de nível.

### 5.2. Praia da Aberta Nova (SW de Portugal)

A praia da Aberta Nova situa-se no litoral SW de Portugal e está integrada no arco litoral Tróia – Sines. O arco litoral Tróia Sines constitui um troço litoral arenoso, com largura variável entre os 60 e os 180 m, que se estende por cerca de 65 quilómetros desde o estuário do rio Sado, a Norte, até ao Cabo de Sines, a Sul. Esta importante unidade fisiográfica do litoral português tem a configuração de um arco, côncavo exposto para Oeste, com alongamento aproximado NW-SE no sector mais setentrional (restinga de Tróia), N-S no sector central (onde se situa a praia da Aberta Nova) e NE-SW no sector meridional (onde se localiza o Cabo de Sines).

A praia da Aberta Nova tem uma largura média de 100 m e um declive da face da praia (tanb) que varia entre os 0,17 e 0,06, de acordo com Gama (2005). Ao longo de toda a praia desenvolvem-se cúspides com comprimento médio de 40 metros, os quais se mantêm ao longo de todo o ano. Na Figura 8 está

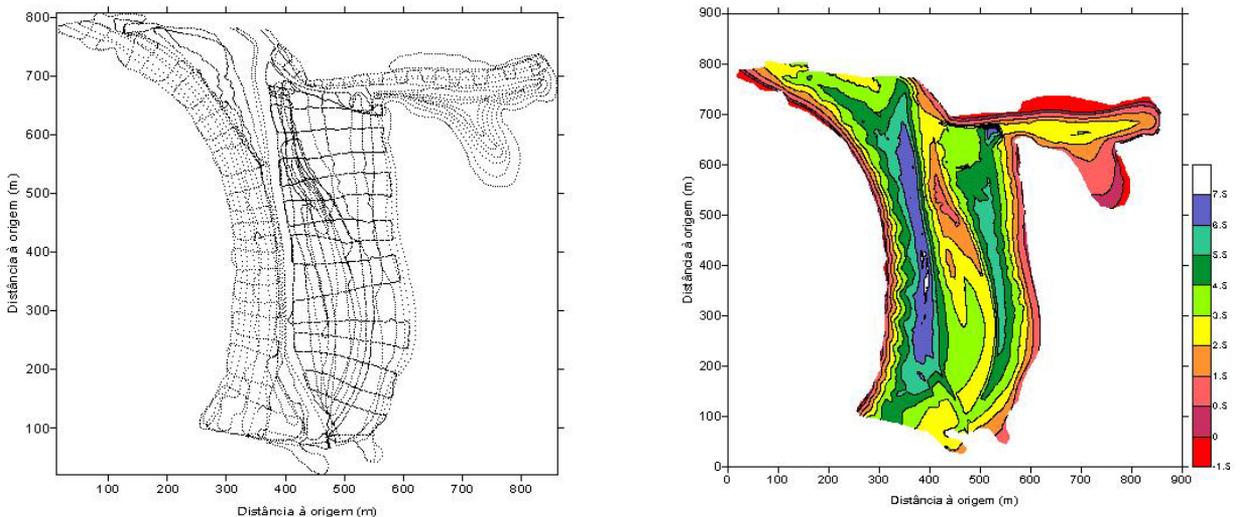


Figura 7. a) Rede de perfis DGPS realizados na restinga do rio Douro (NW de Portugal) b) Mapa de curvas de nível obtido após interpolação dos perfis DGPS. Recorreu-se ao interpolador TIN para a geração do DEM.  
 Figure 7. a) Network of DGPS profiles carried out in Douro River sand spit (NW Portugal) b) Contour map obtained after interpolation of the DGPS profiles. The DEM was obtained by TIN interpolation.

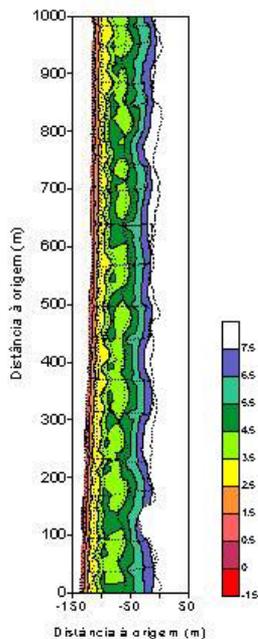


Figura 8. Mapa de curvas de nível para a praia da Aberta Nova (SW Portugal). Nesse mapa está representada, a preto, a rede de perfis DGPS que serviu de base para a interpolação. Foi usado o interpolador TIN.

Figure 8. Contour map for the Melides Beach (SW Portugal). It is also represented the network of DGPS profiles in black colour. It was used the TIN interpolator for the DEM generation.

representado o DEM de um pequeno segmento dessa praia com 1 quilómetro de extensão. Está também representada, a preto, a rede de perfis realizada pela metodologia do sistema DGPS multi-antena adaptado a veículo todo o terreno. O levantamento que serviu de suporte à interpolação foi realizado em Fevereiro de 2008, após um período em que decorreram temporais, tendo a monitorização sido efectuada no período de cinquenta minutos. Este segmento de praia tem uma área de 155000 m<sup>2</sup> e um volume aproximado de 560000 m<sup>3</sup>. A partir do DEM foram extraídos perfis transversais à linha de costa, com um espaçamento de 250 m. A Figura 9 representa quatro desses perfis, os quais serviram de base para o cálculo do declive da face da praia. Os resultados obtidos indicam um declive médio de 0,13, o qual, considerando a classificação morfodinâmica de Wright & Short (1984), é indicador de uma praia com características intermédias.

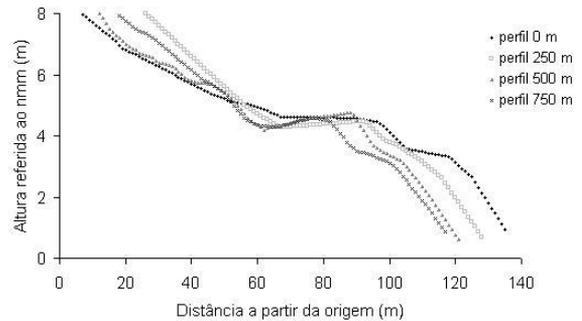


Figura 9. Representação de quatro perfis topográficos, perpendiculares à linha de costa, extraídos do DEM indicado na Figura 8. Os perfis estão espaçados de 250 em 250 metros.

Figure 9. Representation of four cross shore topographic profiles, that was extracted from the DEM of Figure 8. The profiles are spaced 250 m.

## 6. DISCUSSÃO

O estabelecimento de programas de monitorização de praias, tendo como objectivo a caracterização morfodinâmica, exige que sejam utilizadas técnicas que, potencialmente, ofereçam elevada precisão. No presente caso de estudo utilizaram-se técnicas DGPS em modo cinemático, com resolução de ambiguidades OTF (“On The Fly”), as quais permitem obter precisões de ordem centimétrica em todas as componentes.

Os testes de validação realizados permitiram comprovar que as metodologias de monitorização desenvolvidas, nomeadamente os sistemas uni-antena e multi-antena, apresentam erros de ordem centimétrica (inferiores a 0,05 m) em todas as componentes, sendo adequados para representação das morfologias da praia.

Relativamente aos testes de exactidão, verificou-se que as diferenças médias obtidas entre ambas as técnicas consideradas, nomeadamente a estação total e o DGPS - sistema uni-antena, são, normalmente, inferiores a 0,02 m. Uma vez avaliada a exactidão do sistema DGPS uni-antena, procedeu-se aos testes de precisão. Estes permitiram avaliar o desempenho dos sistemas uni-antena e multi-antena. Foram considerados pontos de controlo DGPS estático. A diferença média obtida nas três componentes relativamente aos pontos de controlo estático foram, por norma, inferiores a 0,05 m. As maiores diferenças ocorreram em dois casos, nos quais a componente planimétrica acusa uma diferença de 0,08 m e a respectiva componente altimétrica apresenta uma diferença de 0,07 m.

Para interpretar estes dois casos, dois aspectos devem ser considerados. Em primeiro lugar, os sistemas *DGPS* cinemáticos uni-antena e multi-antena estão em movimento quando passam pelos pontos de controlo estático. Em segundo lugar, estes sistemas registam posições a uma cadência elevada, mas não contínua. Por conseguinte, é perfeitamente possível que o registo de posições nos pontos de controlo estático seja feito antes ou após a passagem por esses pontos.

A aquisição de dados por intermédio de perfis conduz sempre a uma distribuição não homogênea de informação, a qual se concentra ao longo dos perfis, mas está ausente em áreas mais ou menos extensas. Muito embora os resultados obtidos sejam promissores relativamente ao desempenho do sistema, importa avaliar a qualidade do *DEM* gerado, tendo em conta aspectos relacionados com a densidade de informação recolhida e o método de interpolação adoptado.

Os testes relativos à densidade da rede de perfis, e à influência desta no volume calculado a partir do modelo final, permitiram verificar que quando as morfologias do terreno são bem delineadas por perfis se obtém uma superfície final que representa essas mesmas morfologias.

Finalmente, verificou-se na interpolação, através de ensaios realizados com pontos de controlo no terreno, que os valores médios e de *RMS* relativos à diferença entre a superfície gerada pela interpolação e a superfície do terreno são inferiores nos casos dos métodos de *MCS*, *TIN* e *Krig*, relativamente aos métodos do *IDW*, *NeN* e *NaN*. Tendo em conta que o *MCS* não é um interpolador exacto, e que o método *krig* implica uma maior morosidade no processo de geração da grelha por interpolação, considera-se o método de *TLN* como uma boa opção para a interpolação de redes de perfis *DGPS*.

Os exemplos de aplicação em alguns sectores litorais de Portugal são ilustrativos da produtividade da metodologia de monitorização. Os dois casos apresentados permitem ainda documentar a possibilidade de monitorizar corpos arenosos de dimensão média (da ordem dos quilómetros) num reduzido período de tempo, como é o caso de restingas, desde que o coberto vegetal não seja demasiado denso, incluindo neste caso praias fluviais e marítimas. Relativamente às praias marítimas é possível delinear as morfologias presentes, de modo a permitir a reconstituição nos *DEMs* de cúspides, bermas, escarpas de erosão e outras formas presentes.

## 7. CONCLUSÃO

O desenvolvimento de um sistema multi-antena *DGPS* adaptado a um veículo moto-quatro visa dar resposta a uma lacuna na exploração das potencialidades oferecidas pelo *GPS* para monitorização de praias. Este sistema apresenta, pela forma como foi desenvolvido e implementado, alguns aspectos que se podem considerar inovadores, e que importa sublinhar. Um deles relaciona-se com a adaptação de um braço articulado externo a um veículo todo-o-terreno tipo moto-quatro, permitindo aceder aos limites de algumas formas de praia, como sejam as cristas das bermas, as cristas de arribas de erosão talhadas na média e alta praias e a base do cordão dunar frontal, em condições de segurança para o veículo e respectivo operador. A utilização de duas antenas no braço externo adaptado ao veículo moto-quatro permite determinar, com rigor centimétrico, as coordenadas da base desse braço mesmo com a inclinação lateral do veículo. A definição de uma rede de perfis longitudinais e transversais à linha de costa, em oposição aos perfis transversais tradicionalmente realizados em estudos de macro-escala espacial, permite uma melhor cobertura espacial dos segmentos litorais monitorizados. O controlo da densidade da rede de perfis, em função da distribuição espacial das morfologias presentes nos segmentos litorais monitorizados, permite melhorar o rigor final do modelo representativo da superfície do terreno.

Todos estes aspectos contribuem para aumentar a qualidade dos *DEM* e, por conseguinte, proporcionar fiabilidade a análises subsequentes. Além do sistema multi-antena, o sistema uni-antena revela-se adequado para monitorização de pequenas áreas e/ou de locais de acesso mais difícil.

Em relação à precisão de *DEMs* obtidos pelas presentes metodologias verifica-se que esta é superior a 0,10 m (*RMS*) na componente vertical (valores de *RMS* médios entre 0,07 e 0,09 m). Esta precisão é ligeiramente superior àquela que tem sido referida na literatura para os *DEMs* obtidos a partir de sistemas *ALS*, quando aplicados ao contexto de praias. Nestes casos a literatura científica refere valores de *RMS* entre os 0,15 e 0,25 m.

Destaca-se, finalmente, o baixo custo das metodologias propostas, especialmente no que diz respeito a aspectos relacionados com a logística e operacionalidade do sistema, o qual pode operar em praticamente todas as condições meteorológicas. Esta é, porventura, uma das mais importantes vantagens do sistema, quando o objectivo se prende com a

realização de programas que incluem monitorização sistemática do litoral.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi parcialmente financiado pelo projecto RIMAR - Riscos Naturais Associados a Variações do Nível do Mar (FCT – PRAXIS 2/2.1/MAR/1743/95). Os autores agradecem ainda o apoio prestado pelo Observatório Astronómico da Universidade do Porto e Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro. Paulo Baptista foi parcialmente financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia SFRH/BPD/20221/2004. Paulo Baptista agradece ainda os apoios técnicos do CESAM (Centro de Estudos do Ambiente e do Mar), sem os quais o trabalho de campo não seria possível.

## BIBLIOGRAFIA

- Baptista, P., Bastos, L., Jesus, M.E. & Correia E. (2003) - Morphodynamic Evolution of the Sand-Spit in the Mouth of Douro River Through DGPS Monitorization. *Actas do 3º Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics (RCEM 2003)*. Barcelona, Espanha, 1060-1067.
- Baptista, P., Bastos, L. & Veloso-Gomes, F. (2004a) - Impacte Morfodinâmico de uma Obra de Protecção Costeira: O Quebra-mar da Aguda. *Actas da 4ª Assembleia Luso-Espanhola de Geodesia e Geofísica*. Figueira da Foz, Portugal, 27-28.
- Baptista, P., Bastos, L., Cunha, T., Bernardes, C., Dias, A. (2004b) - Monitorização de Litorais Arenosos. *Actas da III Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia*. Aveiro, Portugal. Dezembro 2002. Edições Lidel, Maio 2004, pp. 77-85.
- Baptista, P., Bastos, L., Bernardes, C. & Veloso-Gomes, F. (2006) - Evolução do litoral da Praia da Aguda (NW de Portugal) após a construção de um quebramar destacado. *Actas do 5º Simposio sobre a Margem Ibérica Atlântica*. Aveiro, Portugal, 25-26.
- Baptista, P., Bastos, L., Bernardes, C. & Taborda, R. (2006a) - Large Scale Morphodynamics Characterisation of Exposed Sandy Beaches by DGPS. *Journal of Coastal Research*, Special Issue nº 39, 237-241.
- Baptista, P., Bastos, L., Bernardes, C., Cunha, T. & Dias, J.A. (no prelo). Monitoring Sandy Shores Morphologies by DGPS – A Practical Tool to Generate Digital Elevation Models. *Journal of Coastal Research*. DOI 10.2112/07-0861.1.
- Cressie, N.A.C. (1990) - The Origins of Kriging. *Mathematical Geology*, 22, 239-252.
- Cunha, T. (2002) - *High Precision Navigation Integrating Satellite Information – GPS – And Inertial System Data*. Tese de Doutoramento (não publicada). Universidade do Porto, Portugal, 215 p.
- Davis, J. & Jonh, C. (1986) - *Statistics and Data Analysis in Geology*. John Wiley and Sons, New York.
- Gama, C. (2005) - *Dinâmica de Sistemas Sedimentares do Litoral Ocidental Português a Sul do Cabo Espichel*. Tese de Doutoramento (não publicada). Universidade de Évora, Portugal, 359 p.
- Gama, C. & Baptista, P. (2006) - Evolução dos campos dunares contíguos às praias das Furnas e da Amoreira (Litoral Sudoeste de Portugal). *Actas do 5º Simposio sobre a Margem Ibérica Atlântica*. Aveiro, Portugal, 81-82.
- Groat, C.G. (2000) - *U.S. Geological Survey: Facing the New Century*. Sea Technology, 41(1), 45-47.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. & Collins, J. (1998) - *Global Positioning System – Theory and Practice*. 4<sup>th</sup> Edition, Springer-Verlag, Inc.
- Huang, J., Jackson, D. W. T. & Cooper, J. A. G. (2002) - Morphological Monitoring of a High Energy Beach System Using GPS and Total Station Techniques, Runkerry, Co. Antrim, Northern Ireland. *Journal of Coastal Research*, SI36, 390-398.
- Krabill, W.B., Wright, C.W., Swift, R.N., Frederick, E.B., Manizade, S.S., Yungel, J.K., Martin, C.F., Sonntag, J.G., Duffy, M., Hulslander, W. & Brock, J.C. (2000) - Airborne Laser Mapping of Assateague National Seashore Beach. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66, 65-71.
- Larson, M. & Kraus, N. C. (1995) - Prediction of Cross-Shore Sediment Transport at Different Spatial and Temporal Scales. *Marine Geology*, 126, 111-127.
- Lee, D.T. & Schachter, B.J. (1980) - Two Algorithms for Constructing a Delaunay Triangulation. *International Journal of Computer and Information Sciences*, 9(3), 219-242.
- Meredith, A. W., Eslinger, D. & Aurin, D. (1999) - *An Evaluation of Hurricane – Induced Erosion along the North Carolina Coast Using Airborne LIDAR Surveys*. National Oceanic and Atmospheric Administration Coastal Services Center Technical

- Report, NOAA/CSC/99031-PUB/001.
- Morton, R.A., Leach, M.P., Paine, J.G. & Cardoza, M.A. (1992) - Monitoring Beach Changes Using GPS Surveying Techniques. *Journal of Coastal Research*, 9(3), 702-720.
- Short, A. D. (1999) - *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. Andrew D. Short (eds). John Wiley & Sons Ltd, England.
- Sibson, R. (1980) - A Vector Identity for the Dirichlet Tessilation. *Mathematics Proc. Cambridge Phil. Soc.*, 87, 151-155.
- Sibson, R. (1981) - *A Brief Description of Natural Neighbour Interpolation, Interpreting Multivariate Data*, V. Barnett editor, John Wiley and Sons, New York.
- Smith, W.H.F. & Wessel, P. (1990) - Gridding with Continuous Curvature Splines in Tension. *Geophysics*. 55(3), 293-305.
- Woolard, J.W. & Colby, J.D. (2002) - Spatial Characterization, Resolution, and Volumetric Change of Coastal Dunes Using Airbone LIDAR: Cape Hatteras, North Carolina. *Geomorphology*, 48, 269-287.
- Wright, L.D. & Short, A.D. (1984) - Morphodynamic Variability of Surf Zones and Beaches: A Synthesis. *Marine Geology*, 56, 93-118.



## **Análise da Vulnerabilidade de uma Praia Estuarina à Inundação: Aplicação à Restinga do Alfeite (Estuário do Tejo) \***

### ***Vulnerability Analysis of an Estuarine Beach to Inundation: Application to Alfeite Spit (Tagus Estuary)***

Catarina I. C. Vargas<sup>2</sup>, Filipa S. B. F. Oliveira<sup>1, 2</sup>, Anabela Oliveira<sup>2</sup>, Nuno Charneca<sup>2</sup>

---

#### **RESUMO**

A ocorrência de condições hidrodinâmicas extremas em zonas ribeirinhas de estuários e lagunas, ambientes privilegiados para a ocupação humana, pode conduzir a avultados prejuízos materiais e humanos. Revela-se prioritário o desenvolvimento de ferramentas de avaliação da vulnerabilidade destas regiões para apoio ao seu planeamento.

Neste estudo é proposta uma metodologia de base para a previsão de níveis extremos de inundação das zonas ribeirinhas de ambientes estuarinos resultantes da acção combinada de vários fenómenos hidrodinâmicos. Esta metodologia é aplicada ao estuário interno do Tejo, numa área cuja morfologia se tem mantido estável à mesoescala (década) e à escala anual: a restinga do Alfeite, na margem Sul do estuário. Os resultados desta aplicação foram integrados num MD'T (Modelo Digital de Terreno), para facilitar a análise de vulnerabilidade da área em estudo aos fenómenos simulados. A metodologia proposta tem em conta os fenómenos indutores de inundação em zonas estuarinas e costeiras: i) elevados níveis de maré, ii) sobrelevação meteorológica, iii) sobrelevação associada a cheia, iv) subida do NMM (nível médio do mar) e v) agitação marítima em situação de tempestade. Trata-se de uma metodologia robusta que integra modelos amplamente divulgados e aplicados para estes fenómenos: modelo hidrodinâmico de ondas longas, modelo de geração – propagação de ondas pelo vento, e modelo morfodinâmico que simula o impacte da hidrodinâmica no perfil de praia. A futura substituição de cada um dos modelos aplicados por novos, mais avançados, permitirá, melhorar a precisão das previsões.

A previsão do impacte das condições hidrodinâmicas extremas verificadas no dia 29/01/06 no Alfeite permitiu avaliar a precisão da metodologia proposta por comparação do limite superior da escarpa (marca de limite de inundação) simulado e registado após a tempestade. A subavaliação em cerca de 40cm relativamente ao limite registado dever-se-á à não consideração do processo de espraio, às incertezas relativas às condições de vento, à falta de dados de agitação marítima extrema para calibrar o modelo de ondas, entre outros factores de menor peso. A análise dos resultados de simulação de cenários de níveis extremos de água em frente à restinga do Alfeite permitiu concluir que extremos de agitação marítima,

---

1 - autora correspondente: foliveira@lnec.pt

2 - LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

sobreelevação meteorológica e níveis excepcionais de maré astronómica são os fenómenos que mais contribuem para os níveis de inundação nesta zona do estuário. A subida do NMM agrava o impacto desses fenómenos a médio e longo prazo. A análise do MDT permite prever que a inundação da restinga terá início pelo seu extremo Este, estendendo-se o alagamento para o seu interior, ocorrendo, numa situação mais extrema, galgamento da duna primária com alagamento quase total da restinga. A alteração morfológica da praia, a destruição das dunas e do ecossistema de sapal, o assoreamento da baía do Seixal e a destruição de infraestruturas são alguns dos impactos possíveis da conjugação destes fenómenos.

**Palavras-chave:** risco de inundação, previsão de níveis extremos, hidrodinâmica estuarina e costeira, gestão costeira, estuário do Tejo.

---

## ABSTRACT

*The coastal areas sheltered from maritime storms are the most highly populated of the world. The Tagus Estuary in Portugal is an example of an estuarine zone of high population density that combines several types of anthropogenic pressures (harbour activities, human occupation of waterfronts, urban residual water discharges, among others) and an area of important ecological value (Tagus Estuary Natural Protected Area). The sustainable coexistence of these different uses requires in-depth knowledge of a number of existing risks. The vulnerability assessment of these waterfronts to extreme hydrodynamic conditions is commonly left to second plan when compared with directly exposed coastal environments or river environments, but these events may lead to huge environmental, structural and human damages.*

*This study proposes a generic methodology for the prediction of extreme levels of inundation in coastal embankments. These events result from the combined action of several hydrodynamic phenomena. This methodology is applied to the Alfeite spit, located in the South margin of the Tagus estuary, an area where significant medium-term (decade) and annual morphological alterations have not been verified. The results of this application were integrated in a DTM (Digital Terrain Model) to help the vulnerability analyses of the studied area to the simulated phenomena.*

*The proposed methodology accounts for the phenomena responsible for flooding in estuarine and coastal zones: i) high tide levels, ii) storm surge, iii) surge related with river flood, iv) mean sea level rise and v) wave characteristics in a storm situation. This robust methodology integrates well known and vastly applied models for these phenomena: an hydrodynamic model for long waves, a wind wave generation – propagation model, and a morphodynamic model to simulate the hydrodynamic impact on the beach profile (where occur the biggest alterations of free surface level). The future exchange of these models for new more advanced models will allow the increase of the predictions precision and thus, the improvement of the methodology.*

*The simulation of the extreme hydrodynamic conditions verified in 29/01/06 at Alfeite was used to evaluate the methodology precision when applied to this environment, by comparing the location of the scarp upper limit (mark of inundation limit) obtained by simulation with the one registered after the storm. The underestimation of about 40cm relatively to the observed data can be due to the non consideration of the swash process, to the uncertainty related with wind conditions, to the lack of wave climate information to proceed to wave model calibration, among other factors of less importance. Analysis of simulation results for extreme water level scenarios at Alfeite spit led to the conclusion that extreme wave heights, storm surge and exceptional tide levels are the phenomena which give the highest contribution for inundation levels in this estuarine area. Mean sea level rise intensifies the impact of these phenomena in the medium and long run. The Alfeite spit MDT, including the isolines of inundation from the scenarios, shows that the spit inundation would start at its East limit, would progress towards its internal region, and, in extreme conditions, with the occurrence of primary dune overwash almost all of the spit would be flooded. The beach morphological changes, the dune and the salt-marsh ecosystem destruction, the Seixal bay siltation and the infrastructures destruction (roads, beach infrastructures, and some military harbour structures) are some of the possible impacts of these phenomena.*

**Keywords:** inundation risk, extreme levels prediction, coastal and estuarine hydrodynamic, coastal management, Tagus estuary.

---

## 1. MOTIVAÇÃO

Desde tempos remotos que o Homem, no momento da escolha do local onde se fixar, dá preferência a zonas estuarinas e lagunares, por serem ambientes abrigados de intempéries marítimas, abundantes em recursos naturais e de boas condições

de acesso e abrigo à navegação. Efectivamente, a maioria das cidades mundiais mais populosas situa-se precisamente nas zonas adjacentes a estes ambientes costeiros. Portugal não é excepção, com algumas das suas maiores cidades (Lisboa, Porto, Setúbal, Aveiro, Faro) localizadas junto de estuários e lagunas.

A ocupação humana destas regiões tem-se intensificado nas últimas décadas, aumentando a pressão sobre a linha de costa com a crescente artificialização das frentes ribeirinhas, facto que acentua a importância do estudo dos riscos naturais nestas zonas, em particular o risco de ocorrência de fenómenos hidrodinâmicos extremos.

As inundações são fenómenos que, num curto período de tempo (horas a dias), podem causar grandes prejuízos económicos, sociais e ambientais. De acordo com o último relatório do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) (Meehl *et al.*, 2007), prevê-se o aumento da intensidade dos temporais marítimos em algumas regiões do globo e, consequentemente, o aumento do risco de inundação das zonas costeiras. As mais recentes projecções para a região da Europa prevêem aumento do risco de cheias (EEA, 2004), de inundações costeiras e de erosão costeira (Eurosion, 2004). As previsões de Andrade *et al.* (2006), no âmbito do Projecto SIAM (*Climate Change in Portugal: Scenarios, Impacts, and Adaptation Measures*), reforçam a possibilidade de aumento da intensidade da agitação em situação de temporal. O impacto das inundações será intensificado pela subida do NMM prevista (Nicholls *et al.*, 2007), a menos que sejam atempadamente aplicadas medidas de mitigação. O incentivo ao estudo da evolução recente e projecção futura destes fenómenos bem como o estabelecimento de medidas adaptativas para minimização dos seus impactos é um dos objectivos mais importantes do 7.º Programa Quadro de financiamento à investigação europeia.

É da coincidência de vários fenómenos hidrodinâmicos extremos (*e.g.*, nível de maré elevado, com tempestade e cheia) que resultam as inundações de consequências mais graves, sendo demonstrativo disto mesmo as maiores inundações ocorridas nos últimos 50 anos na zona ribeirinha de Lisboa (Andrade *et al.*, 2006). Para além de danos económicos e sociais directos, as inundações podem ter consequências ambientais desastrosas, nomeadamente: a transição para zonas húmidas de terrenos ribeirinhos mais baixos, a destruição das zonas húmidas e a afectação da biodiversidade e libertação de produtos tóxicos devido ao alagamento de estações de tratamento de águas residuais ou de fábricas. No entanto, a maioria dos estudos de inundação em zonas ribeirinhas não considera todos os fenómenos relevantes em jogo, nem as suas interacções.

O conhecimento da frequência de valores extremos de fenómenos hidrodinâmicos e respectivos períodos de retorno (baseado em longas séries de

registos) é de grande utilidade prática para projectar portos e outras estruturas costeiras, estimar limites de zonas de inundação, e apoiar a gestão integrada destas zonas, prevenindo deste modo riscos económicos, sociais e ambientais mais avultados.

A maior consciencialização para esta problemática, motivada sobretudo pelas grandes inundações que têm ocorrido na Europa Central e do Norte, tem conduzido ao aparecimento de directrizes europeias que visam minimizar as suas consequências. A Proposta de Directiva do Parlamento e Conselho Europeu relativa à avaliação e gestão do risco de inundação (Comissão das Comunidades Europeias, 2006) estabelece linhas estratégicas para a promoção de uma acção concertada na definição dos planos de gestão de risco de inundação de bacia hidrográfica e área costeira afectadas. Esta proposta foi já aprovada pelo Parlamento e Conselho Europeu em 25/04/2007, estabelecendo 2015 como ano limite para a definição dos planos de gestão do risco de inundação por cada estado membro. Também na Comunicação da Comissão das Comunidades Europeias (2004), que define uma Estratégia Temática sobre Ambiente Urbano refere-se que “a expansão das cidades deve ser planificada e inserir-se numa estratégia global a longo prazo, com impactos ambientais identificados e minimizados (...). As alterações climáticas futuras podem implicar que os actuais planos para novas urbanizações já não sejam adequados, por exemplo devido a maiores riscos de inundações.”

Em Portugal, as preocupações relativas aos impactos de níveis extremos em zonas ribeirinhas têm vindo a aumentar. Andrade *et al.* (2006) propõem uma estratégia para a criação de ferramentas de apoio à decisão na minimização de impactos de níveis do mar extremos em Portugal que inclui: o aumento dos locais de recolha de informação maregráfica, para melhorar a previsão e projecção dos fenómenos; a melhoria da cobertura topográfica da faixa ribeirinha até à curva de nível dos 10m acima do NMM; e a determinação de limites de inundação, para a construção de cartas de vulnerabilidade que apoiem a tomada de decisão sobre os usos possíveis nas zonas marginais. Pretende-se que a “Estratégia de Gestão Integrada da Zona Costeira Nacional”, neste momento em elaboração, e as medidas resultantes da aplicação da Directiva relativa à avaliação e gestão do risco de inundação, que deverá ser transposta para o direito nacional até 2009, sejam instrumentos impulsionadores da definição de medidas que minimizem os impactos decorrentes de inundações e da subida do NMM em estuários e lagunas.

Em ambientes estuarinos, na transição entre rio e costa aberta, ocorre a combinação de fenómenos hidrodinâmicos extremos típicos de ambientes fluviais e costeiros. Na determinação de cotas extremas de inundação em áreas ribeirinhas de estuários actuadas por agitação marítima de origem oceânica ou local, não é suficiente a utilização isolada de modelos de simulação das condições hidrodinâmicas junto à costa (ondas e correntes litorais), prática corrente em costa aberta, ou de modelos hidrodinâmicos de ondas longas (utilizados em estuários abrigados da agitação oceânica e sem condições de desenvolvimento de ondas no seu interior), sendo necessário recorrer a uma combinação dos dois tipos de modelos. A determinação de cotas extremas de inundação em margens estuarinas arenosas requer, em particular, a aplicação de um modelo morfodinâmico do perfil de praia, possibilitando uma definição dinâmica dos limites inundáveis.

Este estudo tem, portanto, como objectivo principal estabelecer uma metodologia de previsão de níveis de inundação, decorrentes de fenómenos hidrodinâmicos extremos, em margens arenosas (praias) de ambientes estuarinos.

A metodologia é implementada no estuário do Tejo e testada na restinga do Alfeite, localizada na margem Sul deste sistema (Figura 1). Com base nos limites de inundação calculados para determinados cenários e apresentados em MDT, desenvolve-se uma análise da vulnerabilidade desta zona estuarina a níveis de água extremos, com utilidade na sua gestão integrada.

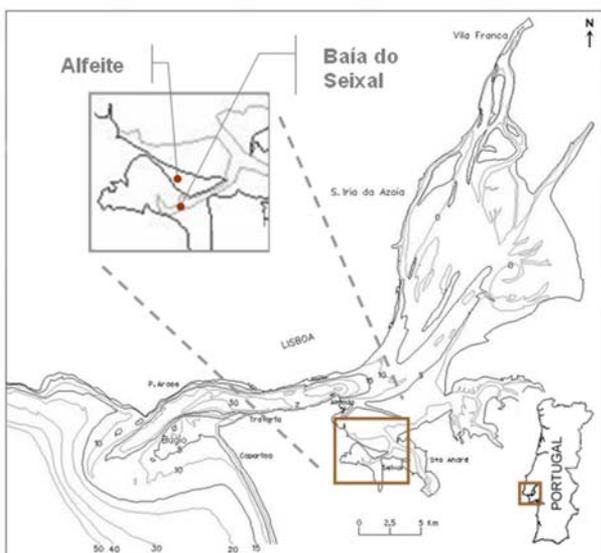


Figura 1. Estuário do Tejo e restinga do Alfeite.  
Figure 1. Tagus estuary and Alfeite spit.

Com efeito, o estuário interno do Tejo, apesar de estar protegido das ondas de geração oceânica pelo seu estreito canal de embocadura (Oliveira, 2000), tem uma extensão de *fetch* suficiente para a geração e propagação de ondas no seu interior. A configuração particular deste estuário (Figura 1) exige, portanto, uma abordagem integrada e inovadora na avaliação do impacte combinado de níveis de água elevados, agitação marítima e correntes de maré presentes neste ambiente, combinando modelos que simulem os vários processos.

## 2. METODOLOGIA

A metodologia proposta permite simular a contribuição dos seguintes fenómenos na indução de níveis de água extremos (NAE):

- maré astronómica (MA);
- caudal fluvial (C);
- sobreelevação meteorológica (SM);
- fenómenos decorrentes da agitação marítima (AM) gerada no estuário interno; e
- subida do NMM (SNM).

O nível máximo atingido num determinado instante numa zona ribeirinha de um sistema de características hidrodinâmicas semelhantes às do estuário interno do Tejo, representado esquematicamente na Figura 2, é dado pela soma da contribuição de cada um dos agentes intervenientes nesse instante:

$$NAE = MA + C + SM + AM + SNM \quad (1)$$

Esta metodologia integra vários modelos de modo a que a previsão da acção combinada dos fenómenos intervenientes na inundação seja possível: um modelo hidrodinâmico de ondas longas, um modelo de geração – propagação de ondas curtas, e um modelo morfodinâmico que simula a evolução morfológica do perfil de praia. Os vários passos da metodologia consistem em:

1 – Modelar a evolução espacial e temporal da superfície livre e correntes de maré no estuário do Tejo com o modelo hidrodinâmico ELCIRC (Zhang *et al.*, 2004) (aplicação descrita em detalhe em Rocha *et al.*, 2007). Nestas simulações é imposta a maré na fronteira jusante do modelo e o caudal do rio na fronteira montante (escolhida de forma a não ter influência de maré). Assim obtém-se o nível de superfície livre atingido em frente à área de estudo e

respectiva corrente de maré no período de interesse do estudo;

2 – Estimar os parâmetros de onda em frente à praia, recorrendo a um modelo de geração - propagação de ondas (modelo SWAN, Booij *et al.* (1999), aplicado ao estuário do Tejo conforme descrito por Santos *et al.*, 2006), impondo a elevação determinada no passo 1 da metodologia e as condições de vento a simular;

3 - Prever o nível alcançado pelas ondas na praia, utilizando um modelo que simula a hidrodinâmica, o transporte sedimentar e a evolução do fundo ao longo de um perfil de praia transversal à linha de costa (faixa do estuário onde ocorrem as maiores alterações de nível de superfície livre, devido ao empolamento das ondas, rebentação, *setup* e espraio). Note-se que o modelo utilizado, modelo LITPROF (DHI, 2007b), considera todos os processos hidrodinâmicos relevantes à excepção do espraio, conforme se descreve em Vargas *et al.* (2007). Conhecida a topohidrografia inicial e as características granulométricas ao longo do perfil, são impostas, no ponto inicial do perfil, séries temporais de dados de nível do mar, de corrente de maré, e de parâmetros de agitação marítima, calculados conforme os passos anteriores (1 e 2) da metodologia. O topo da escarpa desenvolve-se no perfil de praia é a cota de inundação (Figura 2).

Na Figura 3 encontra-se esquematizada a metodologia anteriormente descrita, na sua aplicação à restinga do Alfeite.

Para prever níveis excepcionais de inundação e avaliar os respectivos impactes na área de estudo foram definidos cenários de inundação

(subsecção 3.3) que combinam valores extremos dos fenómenos hidrodinâmicos (subsecção 3.2). Os níveis de inundação determinados são apresentados em MDT sobre imagem de satélite, permitindo concluir sobre o impacte de fenómenos hidrodinâmicos extremos nesta área. É avaliada a precisão da aplicação da metodologia à área de estudo (subsecção 3.4) simulando as condições hidrodinâmicas verificadas no evento de tempestade marítima registado a 29 de Janeiro de 2006.

### 3. APLICAÇÃO

#### 3.1 Área de estudo

A restinga do Alfeite fica situada na margem Sul do estuário interno do Tejo (Figura 1). Esta restinga, bem como outras praias e restingas de areia nesta zona, desenvolveram-se devido à sua exposição à acção da agitação marítima predominante de N-NE (d direcção dos ventos dominantes e de maior *fetch* do estuário interno). Estudos recentes de caracterização da evolução geomorfológica desta formação permitem concluir que as alterações que se têm registado ao longo da última década (Freire, 1999; Valente *et al.*, 2006) e à escala anual (Oliveira & Vargas, 2007; Vargas *et al.*, 2007) são negligenciáveis.

Em termos morfológicos, a restinga do Alfeite tem uma cota máxima de 6,20m acima do ZH no istmo a Oeste, reduzindo progressivamente a sua cota para Este, direcção do seu crescimento entre os sécs. XVI e XX (Freire, 1999). Ela é limitada a Norte pela praia do Alfeite (com valor económico enquanto espaço de uso balnear e de apanha de bivalves), rodeada por canais de navegação para o trânsito de *catamarans*

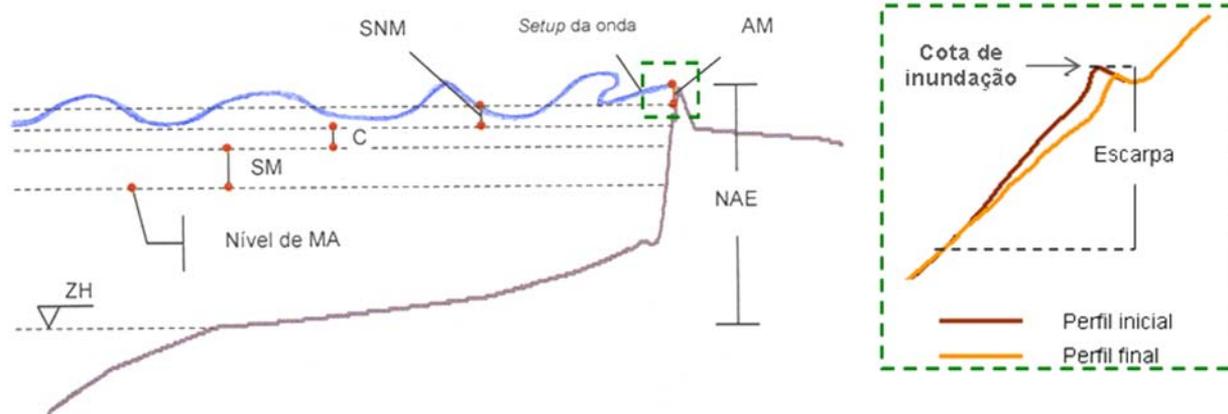


Figura 2. Esquema dos fenómenos hidrodinâmicos contribuintes para o nível de inundação (topo da escarpa).  
Figure 2. Scheme of the hydrodynamic phenomena which contribute for the inundation level (scarp upper limit).

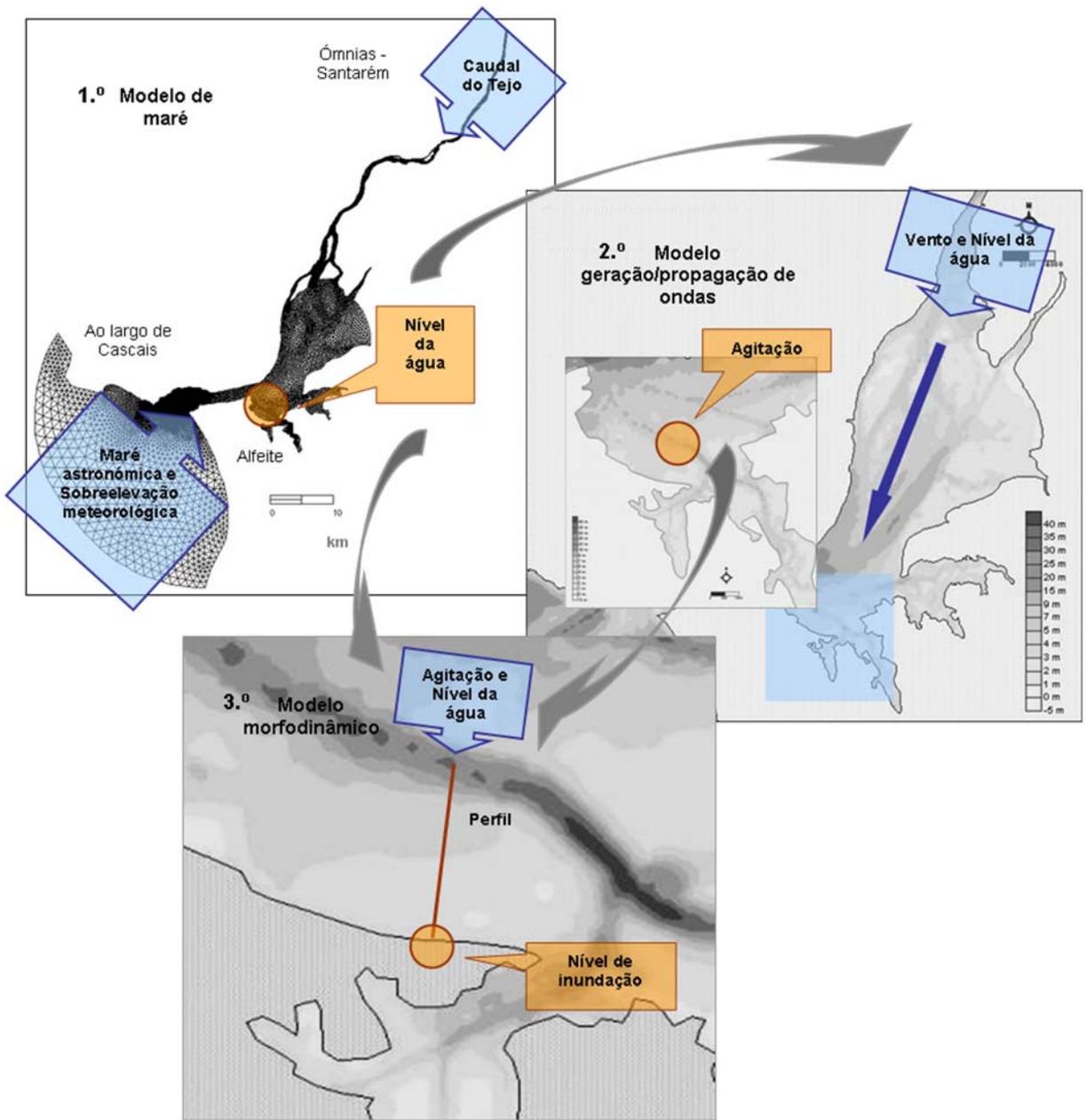


Figura 3. Esquema da metodologia de previsão de níveis de inundação no Alfeite.  
Figure 3. Methodology scheme for inundation levels prediction in Alfeite.

(Canal do Barreiro a Norte e do Seixal a Este), pelo cais de acostagem do Seixal a Sudeste, pela base naval do Alfeite a Oeste e pelo Sapal de Corroios (zona de interesse ecológico) a Sudeste.

### 3.2 Fenómenos hidrodinâmicos

Apresentam-se de seguida os vários fenómenos hidrodinâmicos, possíveis consequências e o conhecimento estatístico dos seus extremos na área de aplicação.

#### Maré

A amplitude de maré no estuário do Tejo aumenta da embocadura para montante, até à zona da Póvoa de Sta. Iria, e decresce depois para montante até Vila Franca de Xira. Este aumento é mais pronunciado no canal e mais lento na zona do estuário interno (Fortunato *et al.*, 1999).

Em Cascais, junto à fronteira jusante, a amplitude máxima média de maré é de 3,50m (Tabela 1), com base nas previsões do IH (Instituto Hidrográfico) para o período de 1980 a 2003.

Tabela 1. Valores médios das previsões de maré do IH, para Cascais, para o período de 1980 a 2003.  
*Table 1. Mean values of IH tide predictions at Cascais, for the 1980-2003 period.*

	Amplitude de maré [m]	Nível de preia-mar (acima do ZH) [m]
Águas vivas	2,79	3,47
Máximo	3,50	3,83

#### Caudal Fluvial

As flutuações do caudal fluvial têm maior importância na zona montante do estuário interno do Tejo, decrescendo a influência deste fenómeno com o alargamento da secção de escoamento para jusante (Elias, 1992). É expectável, portanto, que um grande aumento de caudal tenha pouca expressão na sobrelevação do nível de superfície livre na região do Alfeite.

Em condições médias de escoamento o caudal fluvial do rio Tejo pode ser representado, na fronteira montante, precisamente na estação hidrométrica de Ómnias - Santarém (módulo do escoamento médio para a série hidrológica de 1990/91 a 2002/03, SNIRH, <http://snirh.pt/>), pelo caudal fluvial anual médio de 335m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>.

Relativamente a caudais extremos, a cheia de 1979, com um caudal médio diário registado em Ómnias de aproximadamente 12 000m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, foi considerada a maior cheia ocorrida no Tejo nos últimos 100 anos. O caudal médio diário correspondente ao período de retorno de 50 anos, derivado a partir da curva de escoamento médio diário da cheia de 1979 por Rocha *et al.* (2007), estima-se em aproximadamente 9 500m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>.

#### Sobreelevação meteorológica

Os estudos de análise de registos de sobrelevação meteorológica na costa portuguesa têm-se restringido à costa aberta de Portugal Continental (zonas costeiras cobertas por marégrafos). Tabora & Dias (1992) desenvolveram o primeiro estudo sistemático de sobrelevações ocorridas ao longo da costa portuguesa, tendo analisado os dados de 8 estações maregráficas num período em que decorreram os temporais de Fevereiro - Março de 1978 e de Dezembro de 1981. Observaram valores máximos de sobrelevação em Cascais (fronteira jusante do estuário do Tejo) de 0,42 e 0,52m para cada uma destas tempestades, respectivamente. Mais recentemente, Andrade *et al.* (2006) estimaram valores de sobrelevação de 0,54 e 0,58m para os períodos de retorno 50 e 100 anos, por aplicação da distribuição de Gumbel (1958) à série de valores máximos anuais de sobrelevação do nível do mar em Cascais.

Uma sobrelevação no interior do estuário poderá produzir impactos importantes devido à área extensa e profundidade média reduzida desta região. Este fenómeno poderá conduzir, *e.g.*, a galgamentos da orla marginal, com consequente erosão de áreas de sapal ou de restingas e praias, e à injeção de sedimentos grosseiros no interior das zonas marginais.

No dia 29/01/06 ocorreu a conjugação do anticiclone dos Açores localizado nas Ilhas Britânicas e uma depressão a Oeste do território Continental Português (Figura 4a). Através da Figura 4b, em que é apresentada a sobrelevação na fronteira jusante (resultante da diferença entre o nível do mar registado e a maré astronómica prevista para o dia), verifica-se que o pico de baixa pressão atravessou a região por volta das 13h produzindo uma sobrelevação de aproximadamente 0,33m em Cascais.

#### Agitação marítima

A praia do Alfeite é actuada exclusivamente por ondas geradas no estuário interno. O regime de agitação marítima anual médio em frente ao Alfeite caracteriza-se por ondas com Hrms entre 0,05 e 0,40m

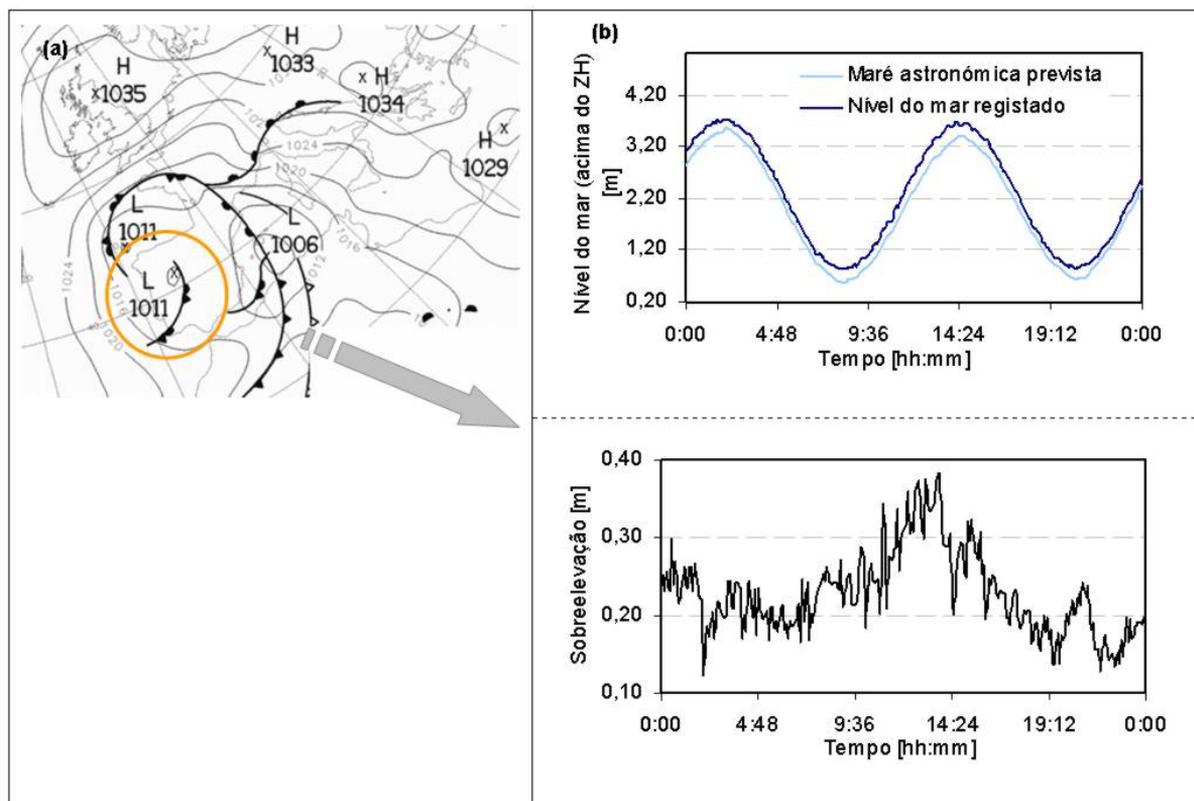


Figura 4. Informação meteorológica e maregráfica de dia 29/01/06: (a) carta de superfície (Fonte: www.westwind.ch/); (b) sobreelevação na fronteira jusante.

Figure 4. Meteorological and maregraphical information at 29/01/06: (a) surface chart (Source: www.westwind.ch/); (b) surge at downstream boundary.

propagando-se do quadrante Norte, com origem nos ventos do mesmo quadrante com maior frequência de velocidades entre 1,0 e 6,0m.s-1 (Oliveira & Vargas, 2007; Vargas *et al.*, 2007). O impacto da agitação marítima resultante de condições meteorológicas mais adversas não pode ser negligenciado quando se estuda a vulnerabilidade da restinga à inundação.

A agitação marítima observada no interior do estuário do Tejo no dia 29 de Janeiro de 2006 atingiu características pouco habituais na zona. Analisando os registos da estação meteorológica Lisboa/Gago Coutinho do Instituto de Meteorologia (IM), entre as 14 e as 22 horas deste dia (Figura 5), o vento, soprando do octante NE, alcançou velocidades superiores a 8,0 m.s-1 que, de acordo com apuramentos climatológicos do IM (1994), são consideradas excepcionais. Note-se que a esta direcção do vento corresponde a maior extensão de *fetch* do estuário interno.

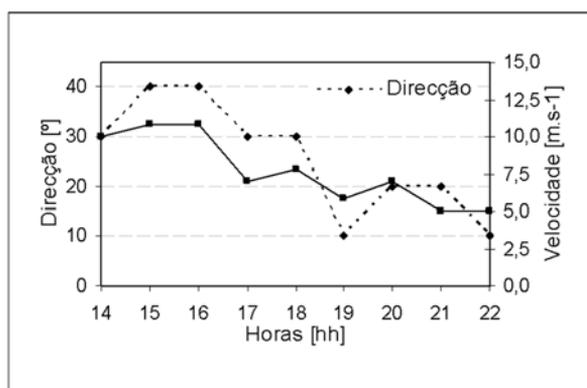


Figura 5. Parâmetros de vento de 29/01/06 (Fonte: IH, 2006).

Figure 5. Wind parameters at 29/01/06 (Source: IH, 2006).

Do processo de transformação das ondas que se propagam em direcção à costa, resultam uma série de fenómenos contribuintes para o nível alcançado pelo mar (*setup*, espraio e galgamento por espraio e/ou por inundação). Em regime de tempestade, alturas de onda mais elevadas produzem um *setup* maior, logo, a susceptibilidade à inundação é também maior. Da mesma forma, em geral, o espraio das ondas atinge níveis tanto mais elevados de perfil de praia quanto maior a energia das ondas. O galgamento ocorre quando o nível de espraio da onda ou o nível do mar com sobrelevação excede o limite máximo da praia (altura da crista da duna primária), classificando-se em galgamento por espraio ou galgamento por inundação, respectivamente (Donnelly *et al.*, 2005). Na sequência da tempestade de 29/01/06 foram registados vestígios de galgamento por inundação na área mais elevada da restinga do Alfeite (no istmo - parte Oeste da restinga) (Figura 6b). Note-se que o processo de espraio não é considerado na metodologia estabelecida, pelo que é expectável a subestimação dos níveis de inundação calculados.

#### Subida do nível médio do mar

Prevê-se que os estuários, lagunas e rias sejam as zonas costeiras mais afectadas pela subida do NMM (Ferreira *et al.*, 2001). Entre estes ambientes, os estuários do Sado e do Tejo e as rias de Aveiro e Formosa, de margens densamente povoadas, serão provavelmente os mais afectados a nível social e

económico, dada a morfologia suave dos terrenos adjacentes.

Em termos de impactes ambientais da subida do NMM, poderão ocorrer perdas de importantes extensões ribeirinhas. O previsível assoreamento destas bacias de maré costeiras conduzirá à perda de sapais, com repercussões directas na nidificação e migração de aves, a fenómenos de subsidência e à substituição da morfologia plana intertidal com canais subtidaes pouco profundos, por rastos de maré mais altos e canais subtidaes mais profundos (Pethick, 1996). É também expectável a salinização de aquíferos e a ampliação da intrusão salina em estuários. Grande parte destas regiões está classificada ou identificada como de interesse ecológico segundo convenções internacionais, pelo que a subida do NMM resultará na perda de áreas de importante valor ecológico.

Têm-se vindo a realizar vários estudos para conhecer a evolução recente do NMM com base na análise de dados de estações maregráficas. Entre os estudos a nível global salientam-se os desenvolvidos por King (1975) e Pirazzolli (1986), nos quais se concluiu ter ocorrido uma subida de 1,5mm.ano<sup>-1</sup> em Portugal (não são referidos as estações, os dados e a metodologia utilizados) e de 1,4mm.ano<sup>-1</sup> em Cascais (fronteira jusante deste estudo), respectivamente. Dos estudos para a costa portuguesa destacam-se os de Costa (1987) e Dias & Taborda (1988, 1992), que mostram ter-se verificado subidas de 1,2 e 1,3mm.ano<sup>-1</sup> na fronteira jusante, respectivamente.

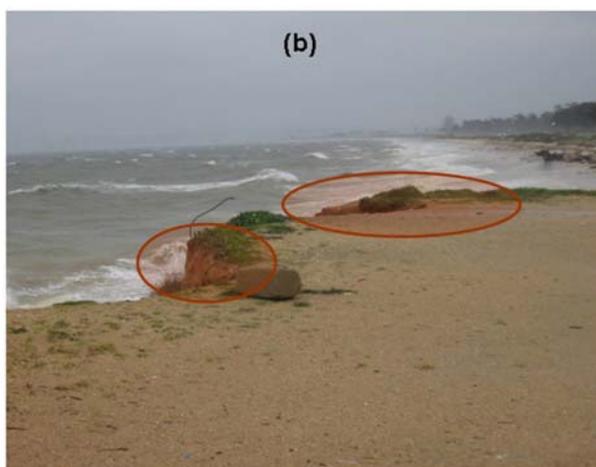


Figura 6. Vestígios de galgamentos ocorridos em Março de 1996 (Fonte: Freire, 1999) (a) e no dia 29/01/06 (por cortesia da Dr.<sup>a</sup> Paula Freire) (b).

Figure 6. Residual marks of overwash that took place in March 1996 (Source: Freire, 1999) (a) and at 29/01/06 (Dr. Paula Freire courtesy) (b).

Os estudos de evolução recente do NMM servem de base à projecção da evolução do NMM. O grau de incerteza associado a estas previsões resulta da reduzida dimensão temporal das séries de registos maregráficos disponíveis. Para a área de interesse deste estudo, a série maregráfica de Cascais é a mais longa registada em Portugal, com mais de um século. Admitindo que a evolução do NMM no século XXI é semelhante à evolução observada no século passado, a projecção da taxa média de subida no NMM para este século seria 1,3mm.ano<sup>-1</sup>, de acordo com Dias & Tabora (1988, 1992). Considerando a actual aceleração da subida no NMM, será prudente considerar uma taxa de evolução superior. Dias & Tabora (1988) ensaiaram um ajustamento exponencial à série maregráfica de Cascais, que revelou um coeficiente de correlação 0,71:

$$y = 56,27 (1,012)^{(x-1880)} + 2000 \quad (2)$$

Em que  $x$  é o ano civil e  $y$  é o NMM em mm.

As projecções do NMM no futuro, num horizonte de 50 e 100 anos, em relação ao NMM no corrente ano de 2007 são, para este ajustamento, de 0,21 e 0,59m, respectivamente.

### 3.3 Cenários

Antes de descrever os cenários estabelecidos note-se que não devem ser somados extremos de cada fenómeno (*e.g.*, nível elevado de maré astronómica + sobre-elevação meteorológica + agitação marítima + projecção da subida do NMM), pois é espectável que um evento com esta combinação de extremos tenha uma baixa probabilidade de ocorrência, sendo pouco realista (Bell & Coco, 2005). Seria de todo o interesse avaliar o impacte de cenários de período de retorno conhecido. Face à insuficiência de dados hidrodinâmicos do estuário interno, tal não é possível.

Os cenários estudados são apresentados na Tabela 2 e combinam:

- Os valores de sobre-elevação determinados em Cascais para os períodos de retorno 50 e 100 anos (Andrade *et al.*, 2006), assumindo que estes valores não variam muito na fronteira jusante;
- As projecções de subida do nível do mar para os anos de 2057 e 2107 em Cascais, segundo o ajustamento exponencial de Dias & Tabora (1988), e assumindo mais uma vez que estas pouco variam para a fronteira jusante;
- Os caudais fluviais anual médio, e das cheias de período de retorno 50 e 100 anos (Rocha *et*

*al.*, 2007) na fronteira montante;

- Os níveis de preia-mar de águas vivas médio e de preia-mar máxima médio (tabelas de maré do IH de 1980 a 2003) na fronteira jusante; em preia-mar, com as correntes de maré a transitarem do sentido enchente para vazante, os valores do módulo da corrente são negligenciáveis (menores valores ao longo de um ciclo de maré);
- A agitação marítima no interior do estuário para o evento excepcional de vento, de 10,8m.s<sup>-1</sup> soprando de 40°N, registado no dia 29/01/06, considerada em todos os cenários.

Assume-se como cenário de referência a combinação do nível previsto de preia-mar de águas vivas médio na fronteira jusante, 3,47m acima do ZH, com o caudal fluvial anual médio na fronteira montante, 335m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. O cenário mais gravoso testado corresponde à coincidência de sobre-elevação meteorológica de período de retorno de 100 anos, com nível previsto de preia-mar de águas vivas médio, para o NMM projectado para o ano de 2107 na fronteira jusante, com caudal de cheia dos 100 anos na fronteira montante, e agitação marítima resultante da tempestade excepcional registada recentemente no estuário interno.

Note-se que nos cenários definidos não se considera o impacte da corrente de maré nos níveis de inundação. Com efeito, por recurso ao modelo hidrodinâmico e de transporte sedimentar LITDRIFT (DHI, 2007a), verifica-se que a influência de um pico de maré em frente à praia (corrente longitudinal de 0,3 m.s<sup>-1</sup>) no nível de inundação a determinar é negligenciável para as condições hidrodinâmicas testadas nos vários cenários e verificadas no dia 29/01/06.

### 3.4 Avaliação da precisão da metodologia

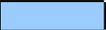
A precisão desta metodologia, quando aplicada à restinga do Alfeite, foi avaliada para a tempestade marítima registada a 29 de Janeiro de 2006, comparando os impactes previsto e registado no perfil de praia da área de estudo. Claramente, a precisão da metodologia depende dos modelos matemáticos que a integram. Por isso, a sua futura melhoria deverá ser feita através da substituição de cada um dos modelos aplicados por novos, mais avançados.

Conhecidos o caudal médio mensal em Ómnias para o mês de Janeiro de 2006, 642m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, e o nível de maré do dia 29/01/06 registado pelo marégrafo de Cascais, simulou-se o nível do mar no estuário do

Tabela 2. Cenários estabelecidos para níveis extremos.

Table 2. Established sceneries for extreme water levels.

Cenários	Caudal na fronteira montante (Ómnias) [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]			Fronteira jusante (foz do Tejo)					
	Anual médio	Cheia dos 50 anos	Cheia dos 100 anos	Amplitude de maré [m]		Sobreelevação meteorológica [m]		Subida NMM [m]	
				Máx. média	Águas vivas média	50 anos	100 anos	Ano 2057	Ano 2107
Ref.									
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
	335	9 500	12 000	3,50	2,79	0,54	0,58	0,21	0,59

Legenda:  Cenário de referência  
 Teste isolado de cada fenómeno  
 Cenário mais gravoso

Tejo para um período de 10 dias (de 21 a 31 de Janeiro) e analisou-se o resultado em frente à praia do Alfeite para o dia da tempestade. A tempestade marítima coincidiu com uma maré viva (preia-mar de águas vivas 3,40m acima do ZH em Cascais). De modo análogo ao observado nos dados, verifica-se que a amplitude de maré simulada para o Alfeite é ligeiramente superior à registada em Cascais (Figura 7a), assim como um pequeno desfasamento temporal em preia-mar e baixa-mar (ligeiro atraso no Alfeite).

O nível simulado para o Alfeite pelo modelo de maré é superior ao previsto pelo IH para o porto secundário do Arsenal do Alfeite (Figura 7b). Este resultado era expectável dado que a simulação inclui o efeito de sobrelevação não considerado nas previsões de maré astronómica (Figura 4b).

Na Figura 8a apresentam-se as séries dos parâmetros de onda (obtidas com o modelo de geração - propagação para as condições de vento) e níveis de superfície livre (resultantes do modelo de maré) do episódio de tempestade (Figura 5). Constatase que as maiores alturas de onda coincidem com o período do mais elevado de maré e com direcções perpendiculares ao perfil de praia (entre 0° e 20°N).

Por fim, a alteração morfológica do perfil de praia

simulada com o modelo morfodinâmico (resultante da acção das condições hidrodinâmicas na Figura 8a), pode ser comparada com a alteração de perfil registada após o evento de tempestade marítima (Figura 9). O topo da escarpa simulado situa-se 42cm abaixo do registado, indicativo de que os níveis de inundação determinados para os cenários estabelecidos de condições hidrodinâmicas extremas serão inferiores aos que se registariam na realidade.

A subestimação do nível de inundação explica-se pelos erros associados à aplicação de cada modelo e aos valores de registos utilizados:

- Os erros quadráticos médios nas elevações devidas à maré, avaliados para 1972 em 13 estações ao longo de todo o estuário, são de 9cm por defeito, sendo da mesma ordem de grandeza na zona do Alfeite (Fortunato *et al.*, 1999).

- A não consideração do processo de espraiamento no modelo morfodinâmico tem como consequência uma redução da região activa da praia, com uma subavaliação do nível máximo atingido pelas ondas, conforme já concluído antes, através da comparação de resultados numéricos com resultados de experimentação laboratorial (Oliveira, 2005).

- Apesar do modelo de geração – propagação de ondas ser amplamente aplicado para a simulação de condições de agitação marítima na aproximação a ambientes de costa aberta, ele carece de calibração para condições de tempestade em ambientes de *fetch* restrito, objectivo que é logisticamente de difícil concretização.

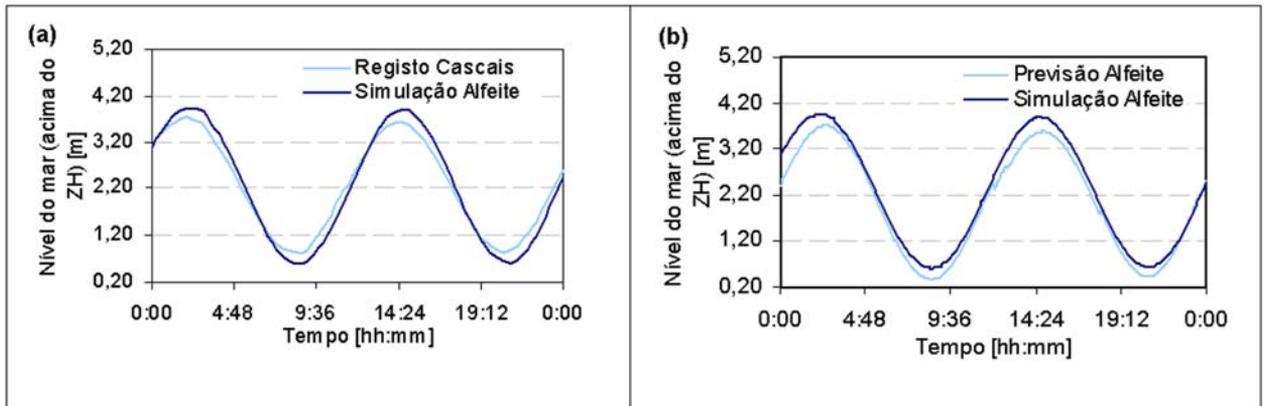


Figura 7. Comparação do nível de superfície livre simulado em frente ao Alfeite com o registado em Cascais (a) e o previsto no Alfeite (b) a 29/01/06.

Figure 7. Comparison of simulated free surface level in front of Alfeite with the one registered in Cascais (a), and with the one predicted for Alfeite (b) at 29/01/06.

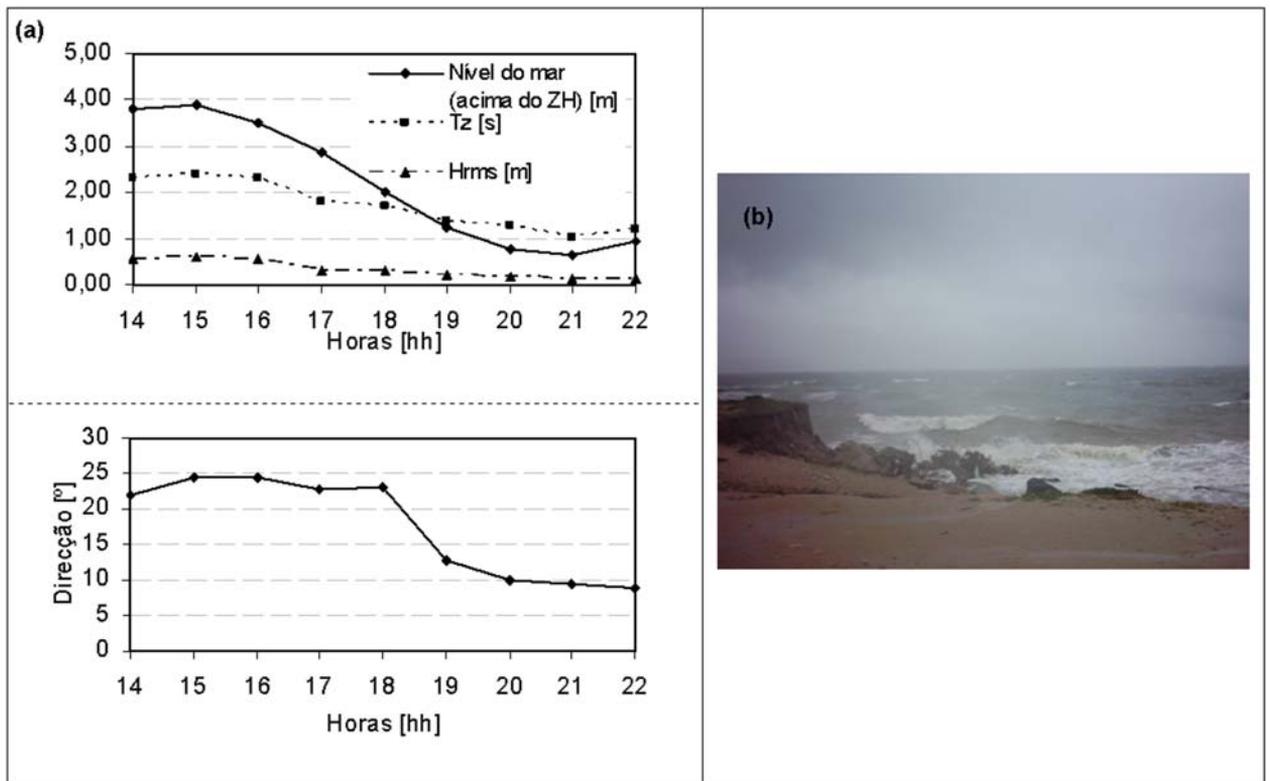


Figura 8. Parâmetros de agitação marítima simulados (a) e panorama das condições hidrodinâmicas no Alfeite (b) para o dia 29/01/06.

Figure 8. Simulated storm wave parameters (a) and hydrodynamic conditions snapshot at Alfeite beach (b) at 29/01/06.

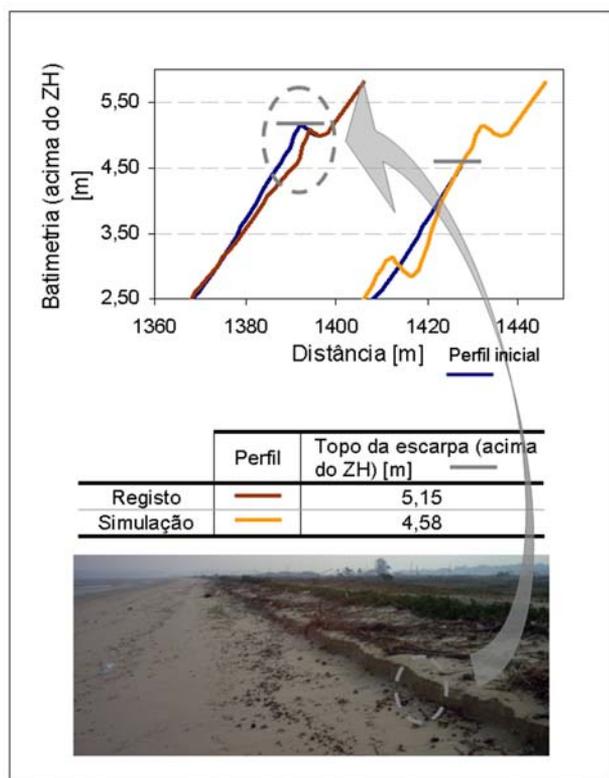


Figura 9. Comparação das alterações de perfil registada e simulada.

Figure 9. Comparison between registered and simulated profile changes.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Determinado o nível de inundação alcançado em cada um dos cenários através da metodologia proposta, prevê-se galgamento da duna primária no cenário 7, o mais gravoso, e níveis de inundação coincidentes com o nível registado na tempestade de

dia 29/01/06 para os cenários 1, 2 e 4 (Figura 10). O galgamento da duna primária da praia retratado na Figura 6a, produzido por condições hidrodinâmicas extremas ocorridas em Março de 1996, confirma a ocorrência relativamente recente no Alfeite de eventos com impacte semelhante ao determinado para o cenário mais gravoso estudado.

Analisando os resultados das simulações da superfície livre no interior do estuário do Tejo, obtidos por forçamento da fronteira jusante com sobrelevação (com origem meteorológica e nas projecções de subida do NMM) conjugada com o nível de maré de águas vivas média e por forçamento da fronteira montante com o caudal anual médio (cenários: de referência, 1, 2, 3, 4 e 7), verifica-se uma correlação linear entre a sobrelevação imposta na fronteira jusante e o nível estimado em frente à praia do Alfeite (Figura 11). Esta correlação permite, para as condições de nível de maré astronómica e de caudal do Tejo (nas fronteiras jusante e montante, respectivamente) que estão na sua origem, extrapolar o nível de água em frente ao Alfeite para uma dada sobrelevação (na gama dos 0,00 a 1,20m) na fronteira jusante.

Nos cenários em que apenas se variou o caudal do Tejo na fronteira montante (cenários de referência, 5 e 6), verifica-se que esta variação produz um aumento de nível de água pouco significativo no estuário interno em frente à restinga do Alfeite, de 1 cm no máximo (cenário da cheia dos 100 anos relativamente ao cenário de caudal médio anual). Com efeito, um elevado nível da água devido a um pico de caudal de cheia é atenuado assim que alcança o estuário interno, devido ao elevado alargamento da secção de escoamento, pelo que a sobrelevação produzida é desprezável.

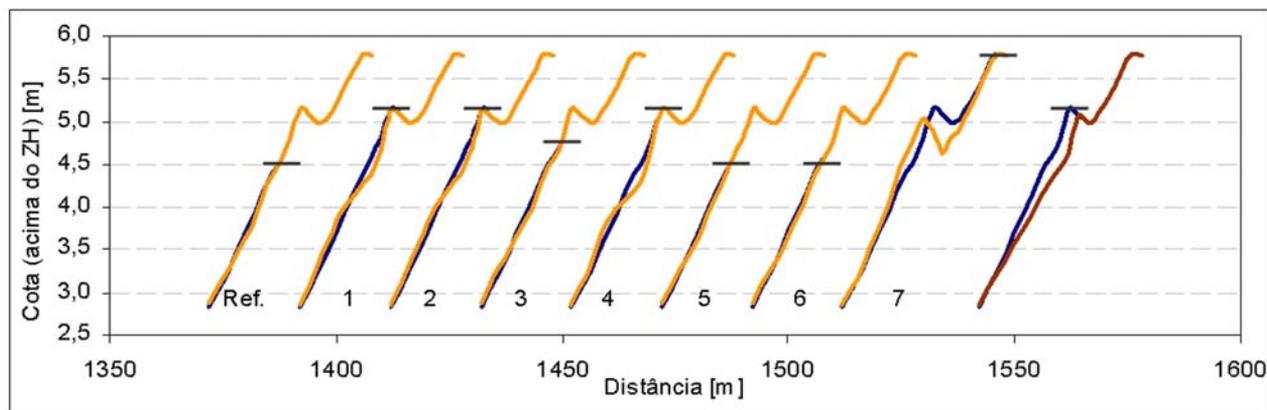


Figura 10. Relação entre o nível simulado em frente à praia do Alfeite e a sobrelevação na fronteira jusante.

Figure 10. Simulated level in front of Alfeite beach vs surge at downstream boundary.

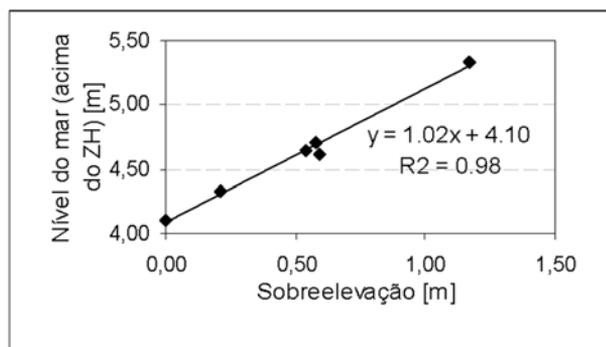


Figura 11. Nível de inundação função do nível da água e da altura de onda simulados em frente ao Alfeite.  
 Figure 11. Inundation level vs water level and wave height simulated in front of Alfeite.

A variação da altura de onda na sua aproximação à linha de costa é um fenómeno directamente dependente do nível de água. No entanto, no caso da restinga do Alfeite ela é pouco significativa de cenário para cenário exactamente porque os níveis de superfície livre simulados são muito elevados, o que reduz a influência do fundo (raso de maré) na atenuação da energia das ondas. As ondas determinadas (Hrms aproximadamente 0,60 m, conforme Tabela 3) têm um peso significativo no nível de inundação simulado, já que são responsáveis por um aumento de cerca de 0,50m no nível de inundação relativamente aos níveis simulados em frente à área

de aplicação.

Em síntese, os extremos de agitação marítima, de sobrelevação meteorológica e de maré astronómica são os fenómenos que, pela sua maior importância na indução de níveis de inundação, requerem especial atenção durante o desenvolvimento e melhoria de uma metodologia de previsão de níveis de inundação nas margens de estuários com as características do estuário interno do Tejo. Por outro lado a subida do NMM contribui para o agravamento das consequências dos três fenómenos indicados acima.

Seria de grande interesse uma análise probabilística dos cenários estabelecidos uma vez que os fenómenos implicados nos cenários de inundação, à excepção da maré astronómica, são dependentes entre si (resultam de variações de pressão atmosférica). Ter-se-ia, portanto, de determinar a probabilidade de ocorrência combinada dos vários fenómenos, só possível com vários anos de registos hidrodinâmicos no interior do estuário. No entanto, esta tarefa não é viável uma vez que as séries existentes são de duração reduzida (e.g., série maregráfica com um ano de duração, Fortunato *et al.*, 1999). Em estudos recentes de previsão de inundações têm vindo a ser aplicados métodos para a previsão da probabilidade combinada de extremos (e.g., os estudos de Viegas (2006), Andrade *et al.* (2006) e GIOC (2000) para ambientes de costa aberta; e de Rózinski *et al.* (2007) para uma zona estuarina).

Tabela 3. Nível de água e altura de onda, observados e calculados, à entrada e dentro do estuário, para os cenários estabelecidos.

Table 3. Water level and wave height, observed and calculated, at the entrance and inside the estuary, for the established scenarios.

Cenário	Observação na fronteira jusante	Simulação em frente à restinga do Alfeite*		Simulação na praia**
	Nível do mar máx. (acima do ZH) [m]	Nível da água máx. (acima do ZH) [m]	H <sub>rms</sub> [m]	Nível de inundação [m]
Ref	3,47	4,11	0,56	4,6
1	4,01	4,65	0,57	5,2
2	4,05	4,71	0,57	5,2
3	3,68	4,32	0,56	4,8
4	4,06	4,61	0,57	5,2
5	3,47	4,12	0,56	4,6
6	4,43	5,12	0,59	5,2
7	4,64	5,34	0,60	5,8

\* No início do perfil de praia

\*\* No final do perfil de praia

Os níveis de inundação calculados foram integrados no MDT para a restinga do Alfeite. Este MDT, em que são mapeadas as isolinhas dos níveis de inundação calculados para os vários cenários (Figura 12), é o resultado da combinação de informação topo-hidrográfica em formato vectorial de várias origens: i) Carta Topo-hidrográfica do Estuário do Tejo do IH (última actualização em 2005); ii) Carta Militar 1/25 000, n.º 144, série M888 do Instituto Geográfico do Exército; iii) pontos levantados com um GPS (*Global Positioning System*) em trabalho de campo realizado para cobrir zonas da restinga mais propensas a alterações (Ponta dos Corvos, no limite Este da restinga, berma e duna

primária); e iv) levantamentos topo-hidrográficos de três perfis transversais à praia por recurso a estação total fixa no ponto mais elevado de um dos perfis. Seria possível uma melhor representação do terreno caso existisse informação topo-hidrográfica com maior resolução espacial e toda recolhida na mesma data (salienta-se que a carta i) é constituída por informação de diferentes datas).

Por análise do mapeamento das isolinhas de inundação da restinga do Alfeite, supondo um alagamento progressivo da restinga devido à subida do nível de inundação, é possível antecipar que: a Ponta dos Corvos seria a primeira região afectada; o alagamento desta região alastrar-se-ia para o interior



Figura 12. MDT da restinga do Alfeite, com identificação das isolinhas de inundação determinadas.

Figure 12. Alfeite spit DTM identifying the determined inundation isolines.

da restinga; e, para níveis mais elevados acabaria por ocorrer galgamento da duna primária da praia, com praticamente toda a restinga a ser alagada à excepção da região do istmo (região mais elevada da restinga com cota máxima de 6,20m acima do ZH). Nesta situação extrema ocorreria uma alteração significativa da morfologia da restinga devido ao intenso transporte sedimentar resultante da forte tensão de fundo induzida por ondas e correntes, e consequente destruição da vegetação protectora e do corpo dunar, bem como a alteração do ecossistema de sapal.

Salienta-se, a variabilidade longitudinal de exposição da face da praia relativamente à acção da onda. Tal facto deve-se à variabilidade da extensão do raso de maré. A menor extensão de raso na região Oeste da restinga permite antecipar que a rebentação ocorre mais próximo da linha de costa do que a verificada na região central e Este da restinga.

Na sequência de um galgamento total da restinga poderá existir uma tendência de migração da restinga para sul, com injeção de sedimentos no Sapal de Corroios e Baía do Seixal e desequilíbrio deste ecossistema traduzido em danos na sua flora e fauna. É igualmente espectável uma alteração da morfologia do raso de maré, na vertente norte da restinga, com consequências para a sua fauna bêntica. Em termos de infraestruturas, o apoio de praia situado no extremo Este da restinga e as vias de comunicação na sua zona central (estrada principal com orientação NW-SE, que liga o istmo da restinga ao seu extremo Este, e restantes caminhos) seriam as primeiras a ser afectadas, seguindo-se a base naval do Alfeite.

Tendo em conta os cenários de inundação estudados, recomenda-se a restrição da ocupação das zonas identificadas como vulneráveis à inundação, tendo em atenção que os resultados desta análise subavaliam as faixas de inundação. O MDT também poderá ser melhorado o que só será possível com a recolha de informação topo-hidrográfica mais detalhada desta região ribeirinha.

## 5. CONCLUSÕES

Neste estudo estabeleceu-se uma metodologia para a determinação de níveis de inundação em margens arenosas de estuários protegidos da agitação marítima oceânica mas com condições para geração e propagação de ondas no seu interior. Esta metodologia foi aplicada ao estuário interno do Tejo impondo condições hidrodinâmicas de ocorrência excepcional neste ambiente. A definição de uma metodologia de previsão de impactes de condições

hidrodinâmicas extremas em ambientes costeiros abrigados é de grande importância na medida em que, sendo as suas margens intensamente procuradas para ocupação humana e possuindo ambientes naturais com elevado valor patrimonial, um evento extraordinário pode provocar danos avultados. O estudo do impacte de níveis de inundação nestes ambientes costeiros tem sido relegado para segundo plano sendo dada prioridade a zonas de costa aberta ou a regiões ribeirinhas estritamente influenciadas pelo caudal de rios. Pretende-se que a metodologia proposta constitua, através do seu aperfeiçoamento, uma ferramenta que apoie de forma eficaz a elaboração de cartas de vulnerabilidade fundamentadas nos processos hidrodinâmicos característicos destas zonas ribeirinhas, ferramentas essenciais ao planeamento da sua ocupação. A utilização de modelos amplamente conhecidos, testados e aplicados na simulação dos processos hidrodinâmicos (modelo ELCIRC de hidrodinâmica de ondas longas, modelo SWAN de geração – propagação de ondas curtas e modelo LITPROF de morfodinâmica de perfil de praias arenosas) dão garantia de robustez à metodologia adoptada. A combinação destes modelos constitui um importante passo de inovação nesta área, ao permitir que, em ambientes tão complexos como o estuário do Tejo, os processos físicos relevantes sejam considerados de forma integrada.

Aplicando a metodologia à restinga do Alfeite para simular o impacte das condições hidrodinâmicas conhecidas para um evento de tempestade marítima recente, foi estimado um nível de inundação cerca de 40cm inferior ao registado. A subestimação do nível da água deve-se aos erros associados à aplicação dos modelos e aos dados de origem, entre os quais se destacam: a não consideração do processo de espraio no modelo morfodinâmico de perfil de praia; a incerteza associada às condições de vento; a ausência de dados de agitação marítima que permitam calibrar o modelo de geração – propagação de ondas curtas em condições de tempestade (seriam necessárias séries de registos de agitação marítima suficientemente extensas para cobrirem episódios excepcionais nesta zona); e erros médios quadráticos de aproximadamente 9cm por defeito na previsão das elevações da maré nesta zona do estuário. Note-se que para as condições extremas de agitação marítima simuladas o efeito das correntes de maré no nível de inundação na área de estudo é negligenciável, razão pela qual estas correntes não foram consideradas na aplicação da metodologia.

A aplicação da metodologia na previsão de níveis de inundação extremos na restinga do Alfeite foi precedida da análise de estudos de probabilidade de ocorrência e de projecção de fenómenos hidrodinâmicos extremos no estuário e da definição de cenários teóricos de coincidência destes fenómenos. Os resultados das simulações para os vários cenários definidos permitem concluir que a sobrelevação meteorológica, a agitação marítima de tempestade e níveis extremos de maré astronómica são os fenómenos de maior impacto na ocorrência de inundação na restinga do Alfeite, a qual é agravada pela subida do nível do mar.

O mapeamento no MDT da restinga do Alfeite dos limites de inundação obtidos para os vários cenários estudados permite desenvolver uma avaliação preliminar da vulnerabilidade desta formação geológica à inundação. Por observação do MDT, é possível antecipar que a inundação desta formação iniciar-se-ia pelo seu extremo Este, estendendo-se o alagamento para o seu interior e, num cenário mais gravoso, acabaria por ocorrer galgamento da duna primária com alagamento quase total da restinga. Em termos de impactos: a praia, dunas e regiões de sapal sofreriam alterações morfológicas em resultado de galgamentos, com eventual destruição da vegetação dunar e do ecossistema de sapal; poderia haver uma tendência de recuo da restinga para sul e de assoreamento da baía do Seixal devido a injeção de areia resultante de galgamentos e arrastamento; as vias de comunicação sobre a restinga, o apoio de praia a Este e a base naval do Alfeite seriam as infraestruturas afectadas. Faz-se notar que, se a informação topo-hidrográfica disponível tivesse melhor resolução espacial, haveria menor incerteza na análise de vulnerabilidade apresentada.

A aplicação desta metodologia deverá ser precedida do estudo da distribuição de probabilidade de ocorrência conjunta de vários fenómenos extremos, o que permite identificar condições extremas realistas a simular tendo em conta o risco associado (não é razoável simular eventos de probabilidade muito remota, resultantes da ocorrência simultânea de vários fenómenos excepcionais). A análise de registos geológicos de eventos de inundação nas áreas de estudo pode apoiar o estudo de probabilidade de ocorrência e de identificação de limites de inundação. Estudos de projecção da tendência evolutiva da frequência e intensidade dos fenómenos de origem climática (cheias, sobrelevações meteorológicas e ventos de elevada intensidade) poderão enriquecer o estudo de limites

de inundação, permitindo obter futuramente cartas de vulnerabilidade à inundação incentivando um planeamento que considere as alterações climáticas.

No que concerne a melhorias futuras da metodologia apresentada, salienta-se a necessidade de desenvolvimento e aplicação de um modelo morfodinâmico bidimensional que permita simular as rápidas alterações morfológicas e hidrodinâmicas em situação de tempestade (em substituição do modelo de perfil) e a consideração dos processos de espraio e galgamento nesse mesmo modelo.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos técnicos Luís Simões Pedro, Vítor Pisco e Dr. Lourival Trovisco pela produção do MDT para a restinga do Alfeite; ao Dr. Nuno Lima pelo tratamento dos pontos levantados com GPS; ao Dr. Alexandre Coli pelas simulações de geração - propagação de onda em frente à praia do Alfeite; à Dr.<sup>a</sup> Paula Freire, ao Dr. Rui Taborda e à Dr.<sup>a</sup> Ana Silva pelos levantamentos topo-hidrográficos dos perfis de praia e toda a informação sedimentológica; ao Eng.<sup>o</sup> João Rocha e Eng.<sup>o</sup> João Fernandes pelo estabelecimento dos caudais na fronteira de montante do modelo hidrodinâmico; ao Prof. Joseph Zhang e Prof. António Melo Baptista pelo modelo ELCIRC; e à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento no projecto BERNA (POCTI/CTA/45431/2002) [http://www.dha.lnec.pt/nec/english/studies/berna/berna\\_uk.html](http://www.dha.lnec.pt/nec/english/studies/berna/berna_uk.html).

## BIBLIOGRAFIA

- Andrade, C., Pires, H.O., Silva, P., Taborda, R. & Freitas, M.C. (2006) - Zonas Costeiras. In: F.D. Santos e P. Miranda (eds.), "Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação - Projecto SLAM IP", Gradiva, Lisboa.
- Bell, R.G. & Coco, G. (2005) - Natural Hazards Management: Wave-assisted coastal flooding. *Water & Atmosphere*. 13(1), 16-17. Disponível em: [http://www.niwascience.co.nz/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0004/51565/flooding.pdf](http://www.niwascience.co.nz/__data/assets/pdf_file/0004/51565/flooding.pdf).
- Booij, N., Ris, R.C. & Holthuijsen, L.H. (1999) - A Third-generation Wave Model for Coastal Regions, Part I, Model Description and Validation, *J. Geophysical Research*, 104 (C4), 7649-7666.
- Comissão das Comunidades Europeias (2004) - COM(2004) 60: *Comunicação da Comissão ao Conselho, ao Parlamento Europeu, ao Comité Económico e Social e ao Comité das Regiões "Para uma estratégia*

- temática sobre ambiente urbano”, 60, de 11 de Fevereiro de 2004, 58 p. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2004:0060:FIN:PT:PDF>.
- Comissão da Comunidades Europeias (2006) - COM(2006) - 15 final: Proposta de directiva do Parlamento Europeu e do Conselho relativa à avaliação e gestão de inundações, 15 final, de 18 de Janeiro de 2006, 20 p. Disponível em: [http://europa.eu.int/eur-lex/lex/LexUriServ/site/pt/com/2006/com2006\\_0015pt01.pdf](http://europa.eu.int/eur-lex/lex/LexUriServ/site/pt/com/2006/com2006_0015pt01.pdf)
- Costa, C.N.L. (1987) - *Tendência evolutiva do nível médio do mar nos portos de Leixões, Cascais e Lagos*. Instituto Hidrográfico, 9 p.
- DHI (2007a) - *LITDRIFT – Longshore Current and Littoral Drift: LITDRIFT User Guide*. Danish Hydraulic Institute, Denmark, 108p.
- DHI (2007b) - *LITPROF - Profile Development: LITPROF User Guide*. Danish Hydraulic Institute, Denmark, 74p.
- Dias, J.M.A. & Taborda, R. (1988) - Evolução recente do nível médio do mar em Portugal. *Anais do Instituto Hidrográfico*, 9, 88-97.
- Dias, J.M.A. & Taborda, R. (1992) - Tidal gauge data in deducing secular trends of relative sea level and crustal movements in Portugal. *Journal of Coastal Research*, 8/3, 655-659.
- Donnelly, C., Ranasinghe, R. & Larson, M. (2005) - Numerical modelling of beach profile change caused by overwash. In: “*Proceedings of Coastal Dynamics 2005*”.
- EEA (2004) - *Impacts of Europe’s Changing Climate: An Indicator-Based Assessment*. EEA Rel. 2/2004, European Environment Agency, Copenhagen, 107 pp. Disponível em: [http://reports.eea.europa.eu/climate\\_report\\_2\\_2004/en](http://reports.eea.europa.eu/climate_report_2_2004/en)
- Elias, N.T.P. (1992) - *Nova ponte do Tejo em Lisboa. Caracterização das condições hidrodinâmicas e de estabilidade dos canais*. Rel. 212/92 – NET, LNEC, Lisboa, Portugal. (não publicado).
- EuroSION (2004) - *Living with Coastal Erosion in Europe: Sediment and Space for Sustainability. Part-1 Major Findings and Policy Recommendations of the EUROSION Project. Guidelines for implementing local information systems dedicated to coastal erosion management*. In: “*Coastal erosion – Evaluation of the need for action*”, Directorate General Environment, European Commission, 54 pp. Disponível em: <http://www.euroSION.org/reports-online/part1.pdf>
- Ferreira, Ó., Dias J.M.A. & Taborda, R. (2001) - Implications of sea-level rise for Portugal. *Journal of Coastal Research*. (em impressão)
- Fortunato, A.B.; Oliveira, A., Baptista, A.M. (1999) - On the effect of tidal flats on the hydrodynamics of the Tagus estuary. *Oceanologica Acta*, 22/1, 31-44.
- Freire, P.M.S. (1999) - *Evolução morfo-sedimentar de margens estuarinas (estuário do Tejo, Portugal)*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 320 p.
- GIOC (Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de Universidad de Cantabria) (2000) - *Atlas de inundación del litoral peninsular español*. Universidad de Cantabria, Santander.
- IM (1994) - *Valores normais decendiais correspondentes ao período de 1961-1990 – região de Ribatejo e Oeste*. Instituto de Meteorologia, Lisboa, Portugal. (não publicado).
- Gumbel, E.J. (1958) - *Statistics of Extremes*. Columbia University Press, New York, 375 pp.
- King, C.A.M. (1975) - *Introduction to Marine Geology and Geomorphology*. Edward Arnold Publishers Lda, 309 p.
- Meehl, G.A., T.F. Stocker, W. Collins, P. Friedlingstein, A. Gaye, J. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti and Co-authors (2007) - Global climate projections. In: Solomon, S., Manning, D.Q.M., Chen, Z., Nicholls, R.J., P.P. Wong, V.R. Burkett, J.O. Codignotto, J.E. Hay, R.F. McLean, S. Ragoonaden and C.D. Woodroffe (2007) - Coastal systems and low-lying areas. In: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J., Hanson, C.E. (eds.), “*Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*”, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 315-356. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4-wg2-chapter6.pdf>
- Oliveira, F.S.B.F. (2000) - Numerical simulation of wave propagation in the entrance of the Tagus estuary. In: Spaulding et al. (eds.), “*Estuarine and Coastal Modeling*”, VI, ASCE, 510-525.
- Oliveira, F.S.B.F. (2005) - Combined Wave and Tidal Effects on Sandy Beaches at a Short-Term Time Scale. In: “*Proceedings of the First International Conference on Coastal Conservation and Management in the Atlantic and Mediterranean*”, 455-467.
- Oliveira, F.S.B.F. & Vargas, C.I.C. (2007) - Evaluating the geomorphologic stability of an estuarine sandy beach. In: “*Proceedings of the International Symposium on Integrated Coastal Zone Management*”. 2007, Arental, Noruega. (aceite)

- Pethick, J. S. (1996) - The Geomorphology of Mudflats. In: Nordstrom, K., Roman, C. (eds.), "Estuarine Shores: Evolution, Environments, and Human Alterations". John Wiley & Sons, Chichester, 185-211.
- Rocha, J.S., Oliveira, A., Fernandes, J.N., Pinto, L. & Oliveira, F.S.B.F. (2007) - *Estudo hidráulico e hidrológico do concelho de Vila Franca de Xira. Carta de delimitação da zona de cheia*. Rel. 61/07 – NRE/NEC, LNEC, 80 p., Lisboa, Portugal. (confidencial).
- Rózinski, G., Ostrowski, R., Pruszek, Z., Szmytkiewicz, M. & Skaja, M. (2006) - Data-driven analysis of joint coastal extremes near a large non-tidal estuary in North Europe. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 68, 317-327.
- Santos, J.A., Capitão, R., Colí, A.B., Fortes, C.J. & Freire, P. (2006) - Previsão da agitação marítima no estuário do Tejo utilizando o modelo SWAN. In: APRH (ed.), "Proceedings do 8º Congresso da Água", Figueira da Foz, 13 a 17 de Março. Disponível em: <http://www.dha.lnec.pt/nec/portugues/estudos/berna/publicacoes/santos-et-al06.pdf>.
- Taborda, R. & Dias, J.M.A. (1992) - Análise da sobrelevação do nível do mar de origem meteorológica durante os temporais de Fevereiro/Março de 1978 e Dezembro de 1981. *Geonovas*, n.º 1, Especial Geologia e o Ambiente, 89-97.
- Valente, C., Freire, P.M.S. & Taborda, R. (2006) - Evolução morfológica da praia estuarina do Alfeite à Mesoescala. *VII Congresso Nacional de Geologia*. Portugal. Disponível em: <http://www.dha.lnec.pt/nec/portugues/estudos/berna/publicacoes/cgeologia06.pdf>.
- Vargas, C.I.C., Oliveira, F.S.B.F. & Carvalho, F. (2007) - Numerical study of a low energy beach morphodynamic. *Recursos Hídricos*. (em publicação)
- Viegas, T. (2005) - *Níveis de Inundação em Zonas Costeiras: Metodologia de Cálculo*. Relatório de estágio, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 120p.
- Zhang, Y., Baptista, A.M., Myers, E.P., (2004) - A cross-scale model for 3D baroclinic circulation in estuary-plume-shelf systems: I. Formulation and skill assessment. *Continental Shelf Research* 24 (18), 2187-2214.





## Dinâmica Fisiográfica da Orla Costeira: Estudos de Reabilitação e Protecção

*Coastal Dynamics: Rehabilitation and Protection Studies*

A.B. Fortunato<sup>1,2</sup>, M. Clímaco, F. Oliveira, A. Oliveira, F. Sancho, P. Freire

---

### RESUMO

Apresenta-se uma panorâmica geral sobre os principais problemas relacionados com a fisiografia costeira e as principais técnicas de protecção da orla costeira. Referem-se os processos físicos responsáveis pela dinâmica sedimentar, e os principais problemas a ela associados que afectam praias e embocaduras de estuários e lagunas. As soluções mais comuns para este tipo de problemas são depois revistas de forma crítica. Finalmente, três casos de estudo são utilizados para exemplificar problemas e soluções, e, simultaneamente, ilustrar abordagens seguidas em estudos de engenharia: uma praia encaixada em erosão (praia de Hac-Sá, República Popular da China), um sistema no Rio de Janeiro, Brasil, composto por uma praia arqueada (praias de Leblon, Ipanema e Arpoador), um canal e uma laguna com problemas simultâneos de erosão e assoreamento e uma embocadura lagunar com problemas de assoreamento e de estabilidade (Lagoa de Óbidos, Portugal).

### ABSTRACT

This paper presents an overview of the major problems associated with the coastal dynamics and the main techniques adopted for coastal protection. The key physical processes responsible for sediment dynamics are summarized, as well as the problems associated with this dynamics that affect beaches and tidal inlets. The most common solutions for this type of problems are then critically reviewed. Finally, three case studies are used to exemplify several problems and solutions, and, simultaneously, to illustrate some of the approaches used in coastal engineering studies: a pocket beach (Hac-Sá, China), a system composed by three beaches, an inlet and a coastal lagoon, with both erosion and accretion problems (Leblon, Ipanema and Arpoador beaches, Rio de Janeiro, Brazil) and a tidal inlet with accretion and stability problems (Óbidos lagoon, Portugal).

---

1 Autor correspondente: [afortunato@lnec.pt](mailto:afortunato@lnec.pt)

2 LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

endereços electrónicos dos co-autores: [mclimaco@lnec.pt](mailto:mclimaco@lnec.pt), [foliveira@lnec.pt](mailto:foliveira@lnec.pt), [aoliveira@lnec.pt](mailto:aoliveira@lnec.pt), [fsancho@lnec.pt](mailto:fsancho@lnec.pt), [pfreire@lnec.pt](mailto:pfreire@lnec.pt)

## 1. INTRODUÇÃO

A orla costeira tem constituído, desde sempre, uma zona de intensa atracção para o Homem por oferecer condições propícias a diversos usos, como a pesca, a agricultura, actividades portuárias e de transporte, a defesa, actividades de lazer, etc. Para além da sua importância socio-económica, a orla costeira apresenta elevado valor ambiental devido à riqueza e variedade dos seus habitats, muitos dos quais proporcionam também a protecção natural das zonas interiores a inundações.

As zonas costeiras são constituídas por diversos elementos morfo-sedimentares, interdependentes através de processos hidrodinâmicos, sedimentares, morfológicos e ecológicos. Estas características conferem à orla costeira uma dinâmica natural complexa, que nem sempre é compatível com os usos a que está sujeita. A sua intensa ocupação e pressão antrópicas (cerca de dois terços da população mundial vive em zonas costeiras) tornam-na cada vez mais vulnerável à acção de factores naturais (tempestades, tsunamis, subida do nível médio do mar) e, também, à própria acção do Homem (redução de fontes sedimentares, dragagens, extracção de inertes, destruição de sistemas dunares, introdução de fontes de poluição). Como consequência, assiste-se a fenómenos com graves riscos associados, como a erosão costeira, o assoreamento de embocaduras de estuários e de lagunas e a poluição de zonas sensíveis.

Perante o impacto económico, social e ecológico desses fenómenos, e na perspectiva de um aumento dos riscos devido à evolução climática futura, a resposta adequada terá que ser dada no sentido de um planeamento e gestão integrados. Esta gestão terá necessariamente que se suportar no conhecimento da dinâmica da orla costeira tendo em conta a sua interdependência com o oceano e a zona terrestre, nomeadamente, as bacias hidrográficas. Só neste contexto será possível prever a evolução dos sistemas face a alterações naturais ou introduzidas pelo Homem e propor, quando necessário, medidas mitigadoras adequadas.

### 1.1 Dinâmica sedimentar da orla costeira

#### 1.1.1. Processos físicos

A morfologia do litoral é o resultado visível da dinâmica sedimentar, isto é, das trocas de sedimentos que ocorrem dentro de cada unidade morfo-sedimentar e através das suas fronteiras. Estas trocas ou fluxos de sedimentos são, por sua vez, forçadas pelos agentes ou acções dinâmicas intervenientes na zona costeira, dos quais as mais importantes são: a agitação marítima, as correntes de maré, o vento, as correntes litorais e o caudal fluvial (em embocaduras). A importância relativa destes agentes varia de local para local, sendo, no entanto, comum a forte predominância da acção de marés em estuários, e da agitação marítima e das correntes litorais em costas oceânicas abertas. Por outro lado, o transporte de sedimentos médio anual em qualquer zona costeira resulta do efeito acumulado dos transportes associados aos vários agentes, que variam ao longo do tempo, com realce para a possibilidade de, por vezes (e.g. durante tempestades marítimas), poderem ocorrer alterações morfológicas rápidas e significativas. Destaque-se por último a ocorrência de tsunamis – ondas geradas por movimentos verticais do fundo marinho – que apesar de ocorrerem com muito baixa frequência, podem provocar enorme transporte de sedimentos e, conseqüentemente, ocasionar bruscas e expressivas alterações na morfologia litoral.

Dada a sua complexidade, o transporte litoral de sedimentos é geralmente abordado segundo as duas componentes: transversal e paralela à costa. A onda é o agente fundamental de qualquer delas, através de correntes que gera na faixa de rebentação. Na primeira componente prevalece o transporte pelas ondas e correntes transversais, enquanto na segunda os sedimentos são arrastados predominantemente pelas correntes longilitorais.

#### 1.1.2. Principais problemas

O resultado do balanço sedimentar em determinada zona costeira, isto é, o balanço entre os sedimentos que entram e que saem essa zona, determina o equilíbrio ou o desequilíbrio da mesma. Um litoral em desequilíbrio pode, assim, encontrar-

se em erosão (retrocesso da linha de costa) ou em acreção (avanço da linha de costa). A erosão costeira constitui um dos principais problemas de gestão do litoral, implicando a perda directa de território terrestre e a alteração das actividades humanas em seu redor. Em particular, a erosão costeira pode-se traduzir, entre outras consequências, em perda de património construído ou natural, custo acrescido de protecção ou de reconstrução, deslocação de pessoas e de actividades económicas, e inconveniente para a actividade turística (em expansão mundial). A erosão costeira é um processo natural, mas que é muitas vezes também provocado ou exacerbado por acções antrópicas. Actualmente, 20% da costa europeia encontra-se em erosão, sendo que igual percentagem da população vive em municípios litorais (Projecto EUROSION, <http://www.eurosion.org/>). Em Portugal, esta percentagem é certamente muito superior. Estes números mostram a importância deste fenómeno a nível europeu, que tem paralelo a nível mundial.

Enquanto a erosão é a principal preocupação em praias, o assoreamento é frequentemente um problema nas embocaduras de estuários e lagunas.

As embocaduras são zonas morfologicamente complexas, constituídas por canais e bancos de areia, onde o transporte de sedimentos é controlado pela acção conjunta das ondas e das correntes de maré (Fortunato, 2006). As embocaduras constituem a via de comunicação entre os estuários e o mar, para embarcações, para a matéria dissolvida e em suspensão na água e para os próprios seres vivos, o que lhes confere uma grande importância económica e ambiental.

O estudo da sua dinâmica sedimentar reveste-se de uma grande complexidade, que deriva fundamentalmente dos equilíbrios por vezes delicados entre agentes de características marcadamente diferentes (Fortunato, 2006): por um lado, a agitação marítima, que promove o assoreamento, e, por outro, as correntes devidas à maré e aos caudais fluviais, que asseguram a manutenção da abertura das embocaduras. Estes agentes interagem entre si de várias formas, como a geração de correntes pela agitação, a refração das ondas pelas correntes e o incremento das tensões de atrito pelas ondas. Por exemplo, a agitação marítima é responsável pelo

trânsito litoral, que, ao ser interceptado pelas embocaduras, favorece o seu assoreamento.

A estabilidade das embocaduras estuarinas e lagunares decorre geralmente de um equilíbrio, por vezes precário, entre a enchente e a agitação marítima, que tendem a colmatar a embocadura, e o jacto de vazante, que tende a mantê-la aberta (Bruun, 1978). Este equilíbrio dinâmico pode ser quebrado por acontecimentos naturais ou por intervenções humanas, levando a grandes alterações morfológicas, tais como o fecho da embocadura ou a migração da aberta. Exemplos de acontecimentos naturais incluem grandes temporais, cheias, furacões ou tsunamis, que podem alterar radicalmente a fisiografia de uma embocadura em muito pouco tempo.

Algumas intervenções humanas podem também gerar alterações importantes em embocaduras. São exemplos a perda de área das lagunas por aterros para urbanização e construção de salinas ou tanques para aquacultura, que conduzem a reduções do prisma de maré e consequentemente da capacidade das correntes de vazante de expulsarem os sedimentos marinhos, e a construção de esporões nas praias adjacentes a embocaduras, que altera o afluxo natural de sedimentos às mesmas.

As alterações morfológicas das embocaduras podem ainda causar problemas de qualidade da água e riscos materiais (Fortunato, 2006). O seu assoreamento dificulta as trocas entre estas lagunas e o mar, contribuindo para os problemas de qualidade da água nestas lagunas (Oliveira et al., 2006), os quais podem ter graves consequências económicas e ambientais, tais como a proibição da apanha de bivalves e a ocorrência de mortandades de peixes. A migração das embocaduras pode também pôr em risco o património construído, tal como construções marginais e vias de comunicação.

### *1.1.3. Causas*

A erosão costeira e o assoreamento de embocaduras ocorrem, muitas vezes, naturalmente. No entanto, em múltiplos casos, são as acções humanas, directa ou indirectamente, que alteram a evolução natural dos sistemas e potenciam a ocorrência desses fenómenos, que, pelo impacto negativo que conduzem, se tornam em problemas.

Como principais causas dos problemas referidos, encontram-se a redução de fontes aluvionares, a interrupção do trânsito litoral, o avanço da ocupação terrestre (com obras fixas) e as alterações climáticas. Relativamente à primeira, tem-se verificado em inúmeros casos uma redução da quantidade de sedimentos (média anual) que chega à zona costeira resultante da construção de barragens ao longo dos rios, da execução de obras de regularização nestes, da extracção de inertes e da execução de dragagens para a criação ou manutenção de canais de navegação.

Por seu turno, a construção de portos, molhes de embocaduras e outras obras costeiras (p. ex., esporões, quebra-mares e defesas frontais) pode provocar a redução e mesmo a interrupção do trânsito litoral de sedimentos predominante em determinada zona, alterando o equilíbrio (dinâmico) existente. Desta alteração resulta, frequentemente, a erosão costeira a sotamar das estruturas marítimas e acreção a barlar.

A edificação nas margens de rios e estuários e no litoral (muitas vezes sobre sistemas dunares), têm também contribuído para a alteração das fontes aluvionares e do comportamento natural hidro-sedimentar das praias (Oliveira, 2003b), induzindo ou agravando os problemas de erosão.

Por fim, destaque-se a crescente preocupação com as alterações climáticas (Santos et al., 2002; Santos e Miranda, 2006), em particular com a consequente subida do nível do mar, e suas implicações na zona costeira, nomeadamente, o recuo da linha de costa. No entanto, outros factores como o potencial aumento da frequência e intensidade de tempestades marítimas e a alteração da direcção predominante da agitação marítima podem exacerbar os problemas de erosão costeira e de assoreamento de embocaduras.

## 1.2. Soluções

### *Praias*

Referem-se, em primeiro lugar, os tradicionais métodos de protecção costeira: defesas longitudinais aderentes; esporões; quebra-mares destacados; e alimentação artificial.

As defesas longitudinais aderentes (Figura 1) são usadas, em geral, em situações de emergência em que é necessário proteger a todo o custo património em risco ou em obras de carácter definitivo para protecção

costeira, contra a erosão ou inundação. Pelo acréscimo de reflexões e turbulência que originam, estas obras podem conduzir ao rebaixamento da praia e induzir efeitos erosivos na orla arenosa subjacente e nas zonas contíguas adjacentes.



Figura 1 – Exemplo de defesa longitudinal aderente na praia de Castro Urdiales (Cantábria, Espanha). Example of longitudinal defence in the Castro Urdiales beach (Cantábria, Spain).

Num dado trecho de costa, quando existe um desequilíbrio significativo do seu balanço aluvionar, isto é, quando sai mais material do que entra nesse trecho, a construção de esporões (Figura 2) pode permitir uma reorientação da costa, reduzindo a intensidade do transporte e reequilibrando o balanço aluvionar no trecho. A saturação sedimentar dos esporões com areias por meio de um enchimento artificial pode minimizar os eventuais impactes negativos temporários do corte sedimentar provocado por aquelas obras. Os esporões têm efeitos secundários muito diferentes consoante sejam utilizados como obras de retenção ou de contenção. Na segunda hipótese, os efeitos secundários são bastante reduzidos. Têm sido usados na estabilização da costa, em alguns casos conjuntamente com alimentação artificial, e na fixação de embocaduras.

Os quebra-mares destacados (Figura 3) são mais aplicáveis em zonas onde a energia da agitação



Figura 2 – Exemplos de campos de esporões: restinga do Lobito (Angola) e Costa de Caparica (Portugal).  
Examples of groin fields: Lobito sand spit (Angola) and Costa da Caparica (Portugal).

marítima e as amplitudes de maré são moderadas ou reduzidas.

O seu funcionamento hidráulico pode ser caracterizado pela capacidade de dissipar energia e de proporcionar condições de deposição das areias entre a linha de costa e a estrutura.

Estas obras modificam os processos de transporte longitudinal e transversal, podendo conseguir-se com a sua utilização o controlo e a reversão de uma dada situação de erosão.

A praia constitui ela própria a melhor forma de dissipar a energia das ondas. O método de alimentação artificial (Figura 4) está sobretudo indicado para casos de alargamento de praias, de criação de praias artificiais ou em algumas situações em que existe um défice aluvionar de valor baixo.

A alimentação artificial é mais viável técnica e economicamente quando se verificam conjuntamente as seguintes quatro condições: tratar-se de uma zona de grande importância turística ou densamente povoada; o regime de agitação marítima ser moderado; existirem reservas de areia adequada em locais próximos; e não haver grandes condicionamentos ambientais e ecológicos. É evidente que estas quatro condições raramente existem simultaneamente, inviabilizando muitas vezes o recurso a este método.

Não há regras simples nem gerais para a escolha do melhor método de protecção costeira a utilizar.



Figura 3 – Exemplo de quebra-mares destacados na praia de O Palo (Málaga - Espanha).  
Examples of detached breakwaters in the beach of O Palo (Málaga – Spain).

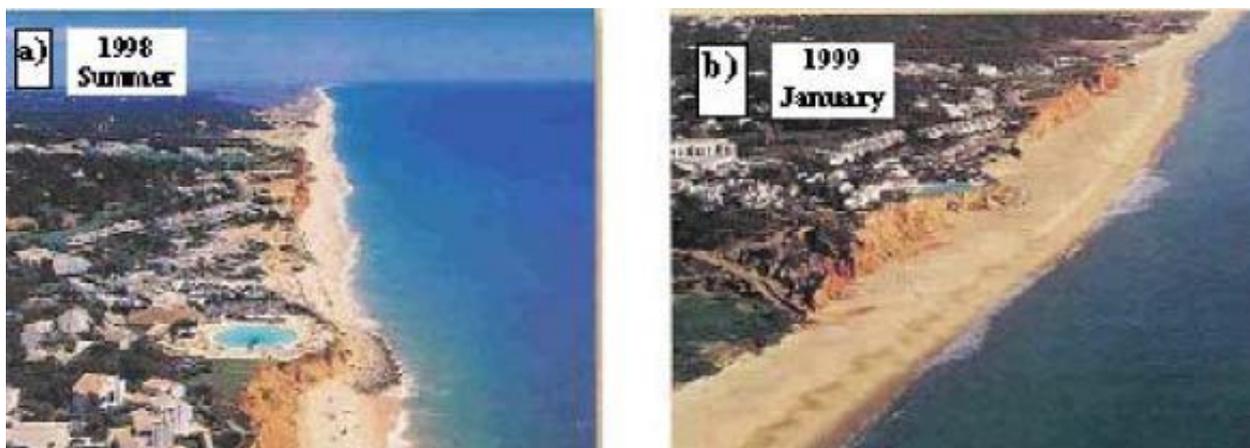


Figura 4 – Exemplo de alimentação artificial na praia de Vale do Lobo (Portugal). Situações anterior (a) e posterior (b) à alimentação artificial. Example of artificial nourishment in Vale do Lobo (Portugal). Situations before (a) and after (b) the artificial nourishment.

Essa escolha depende de vários factores, de que se destacam: os valores globais e a resultante dos trânsitos sedimentares; o clima de agitação marítima; o regime de marés; a morfologia e a geologia da costa; a configuração do perfil arenoso; as características das areias; a disponibilidade de reservas de areias; e a experiência de anteriores obras de protecção.

Para além da intensa investigação sobre os métodos tradicionais referidos, tem sido feito um grande esforço no desenvolvimento de novas tecnologias de protecção costeira de baixo custo. Como exemplos de soluções de protecção menos convencionais (Figura 5) referem-se: os sacos de polipropileno cheios de areia; os gabions; e os geotêxteis.

Embora existam situações de aplicação de algumas novas tecnologias com sucesso, de um modo geral os resultados obtidos ficaram aquém do esperado, e geralmente só são aplicáveis em zonas costeiras de energia moderada ou reduzida.

Das experiências nacional e internacional do LNEC, pode-se concluir que a maior utilização de um método em detrimento dos outros tem a ver com as condições específicas de cada país, para além da política nacional definida nesta matéria. Essas condições específicas são, por exemplo: as características e condições naturais da costa; a tradição e experiência; e os materiais e tecnologias disponíveis.

### *Embocaduras*

As soluções para resolução dos problemas de instabilidade, assoreamento e meanderização de embocaduras podem ser agrupadas em dois tipos:

- Soluções baseadas em obras fixas visíveis (incluindo quebra-mares salientes, quebra-mares aderentes e muros guia);

- Dragagens e outras soluções (dragagens de estabelecimento de canais e reposicionamento da embocadura, descarregadores de areia e sistemas de transposição – by-pass – de areias).

A utilização de quebra-mares salientes para fixar e estabilizar embocaduras é uma solução clássica, utilizada na grande maioria das embocaduras (Figura 6). Apesar de existirem casos em que não se revelou eficaz (Figura 6b), esta é sem dúvida a solução mais comum para o tipo de problema em análise. Têm simultaneamente como objectivo fixar a embocadura, evitar a penetração de sedimentos de origem marinha no estuário e concentrar as correntes de vazante para favorecer a saída de sedimentos.

Os quebra-mares aderentes (Figura 7) não constituem uma solução completa para os problemas das embocaduras, dado que não impedem a migração da aberta nem reduzem o assoreamento do corpo de água a montante. No entanto, podem contribuir para alguma redução destes problemas, na medida em que podem impedir o progresso da meandrização do canal da embocadura.

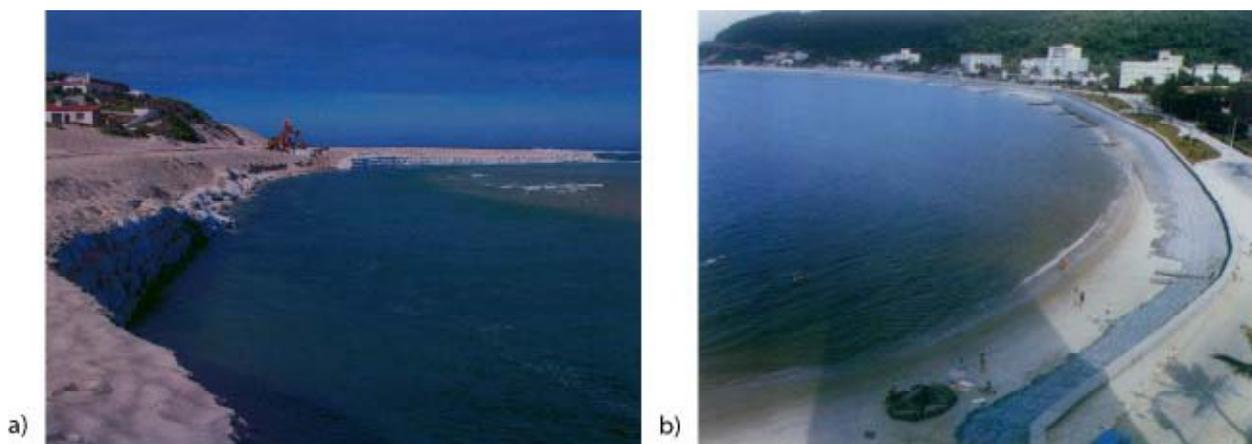


Figura 5 – Exemplos de protecção costeira: a) sacos de polipropileno na margem sul da Lagoa de Óbidos (Portugal); b) gabions na Praia de Caiobá (Paraná - Brasil). Examples of coastal protection: a) polypropilene sand bags in the Óbidos lagoon (Portugal); b) gabions in the Caiobá beach (Paraná – Brazil).



Figura 6 – Exemplos de aplicação de quebra-mares para estabilização de embocaduras: a) projecto para a Lagoa Rodrigo de Freitas, Brasil (cortesia da Fundação Rio Águas); b) Fish Pass, E.U.A. (Davies e Zarillo, 2003). Examples of the use of breakwaters to stabilize tidal inlets: a) Project for the Rodrigo de Freitas Lagoon, Brazil; b) Fish Pass, U.S.A. (Davies and Zarillo, 2003).

Os diques de guiamento têm sido também aplicados em alguns locais, com o objectivo de evitar a meandrização dos canais da embocadura (Figura 8). Estas obras contribuem para o bom funcionamento hidráulico do sistema, ao limitar a meandrização do canal. O dique de guiamento construído na margem norte da Lagoa de Óbidos em Portugal (Figura 8) tem funcionado de forma adequada, evitando a meandrização para Norte do canal da embocadura e protegendo esta margem. Este sucesso motivou a proposta de um dique de guiamento para a margem sul, como parte integrante

de uma solução mais vasta para a embocadura da Lagoa de Óbidos (Fortunato e Oliveira, 2007).

Outra solução utilizada (Seabergh, 2002) consiste na construção de descarregadores (ou armadilhas) de areia (sand traps). Estas estruturas visam promover a deposição de areia em locais pré-definidos, mais fáceis de dragar, evitando o assoreamento em locais onde ele é mais indesejável. Este tipo de solução permite manter os canais de navegação operacionais com menor frequência e custo de dragagem. Os descarregadores de areia são adequados para costas onde o transporte litoral tem um sentido dominante



Figura 7 – Quebra-mar aderente à margem (in Clímaco, 2003). Sea-wall breakwater (from Clímaco, 2003).



Figura 8 – Dique de guiamento junto à Foz do Arelho, Portugal. Guiding wall near Foz do Arelho, Portugal.

bem marcado. As areias que se depositam nos descarregadores são dragadas e lançadas a sotamar da embocadura, de forma a continuarem o seu trânsito litoral. Esta solução é também geralmente associada à presença de quebra-mares salientes.

Os problemas associados ao assoreamento de embocaduras estão frequentemente associados à presença de trânsito litoral intenso com um sentido bem definido. Para este tipo de problemas existe outra abordagem – sistemas de transposição de areias – que permite interceptar os sedimentos a barlar da embocadura, evitando a acumulação no canal de acesso, e transpô-los para jusante por bombagem, de modo a evitar a erosão nas praias nesta zona, o que ocorre frequentemente quando se constrõem estruturas de retenção a barlar como esporões ou quebra-mares salientes. O sistema de transposição de areias na embocadura do rio Tweed na Austrália é um exemplo da aplicação destes sistemas (Figura 9).

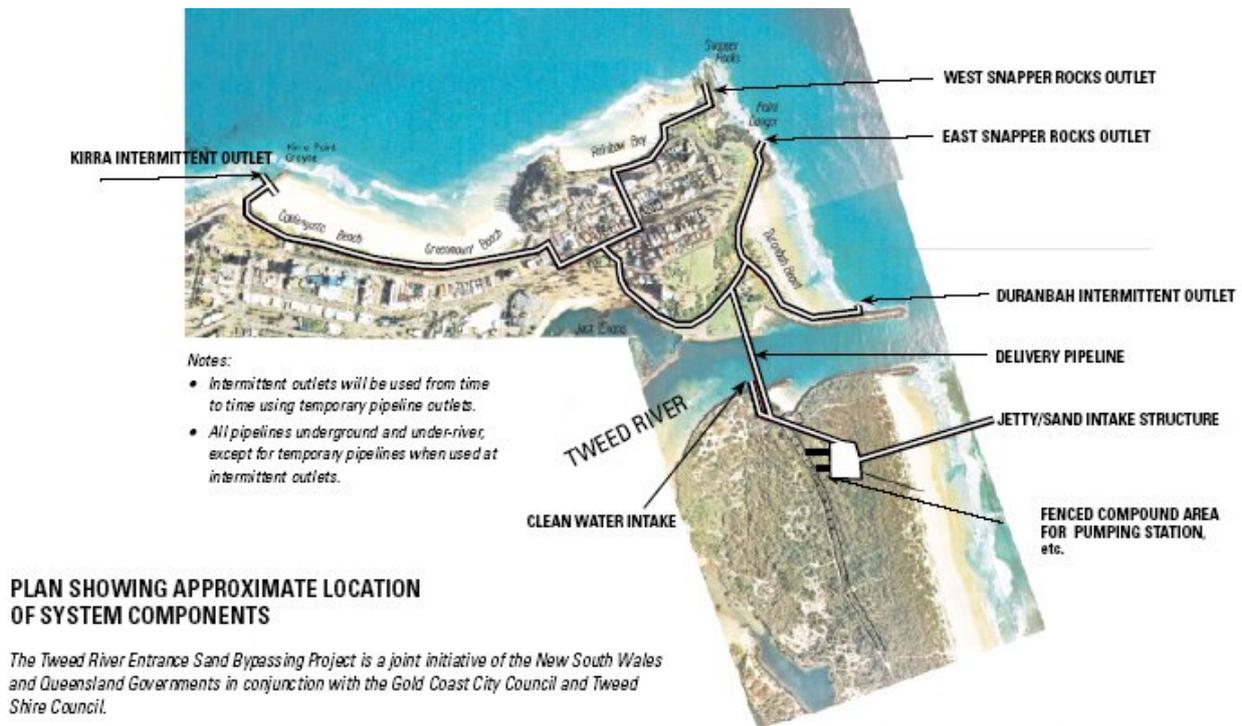


Figura 9 – Sistema de transposição de areias na embocadura do rio Tweed, Austrália (fonte: [www.epa.qld.gov.au/sandbypass](http://www.epa.qld.gov.au/sandbypass)). Tweed River Entrance sand bypassing system, Austrália (source: [www.epa.qld.gov.au/sandbypass](http://www.epa.qld.gov.au/sandbypass)).

### 1.3. Casos de estudo

#### *Hac-Sá (Macau, República Popular da China)*

Em Outubro de 2000 ocorreu um surto erosivo no trecho sul da praia de Hac-Sá, localizada na ilha de Coloane em Macau, que causou uma redução considerável de largura da faixa arenosa, um rebaixamento do perfil da praia emersa e a destruição de infra-estruturas, de apoio balnear e outras, localizadas no topo da praia (Figura 10). Dado o elevado impacto socio-económico desta situação, foi solicitado ao LNEC um estudo de diagnóstico das causas do surto erosivo e uma proposta de soluções alternativas de reabilitação da praia. O estudo compreendeu duas fases: na primeira, caracterizou-se a situação actual da hidrodinâmica e dinâmica sedimentar e diagnosticaram-se as causas do surto erosivo; na segunda, estudaram-se soluções alternativas de reabilitação baseadas em alimentação artificial e obras fixas.

A praia de Hac-Sá, com cerca de 1,2 km de extensão e desenvolvimento longitudinal na direcção

NNE-SSW, é uma praia encaixada entre dois promontórios e exposta a ESE (Figura 10). A face da praia é constituída principalmente por areia fina escura com diâmetro mediano de 0,17 mm, sendo, no entanto, possível observar areia branca (constituída maioritariamente por quartzo) com diâmetro mediano entre 0,3 e 1,5 mm, desde o sector central ao sector norte da praia. Na zona submersa, desde aproximadamente 1,8 m abaixo do nível médio, o fundo marítimo é constituído por lodo com elevado conteúdo de argila (superior a 38%), sendo o diâmetro mediano variável entre 2 e 9 mm, e o declive médio é bastante suave (cerca de 0,2%).

A metodologia aplicada na caracterização da dinâmica sedimentar baseou-se: i) na caracterização dos agentes forçadores da dinâmica costeira com importância local (regime de ventos, tufões, maré astronómica, sobrelevação meteorológica, regime de correntes e regime de agitação marítima), realizada através da análise de séries de registos meteorológicos (vento, pressão atmosférica e pluviosidade), de registos de agitação marítima (obtidos pela bóia-

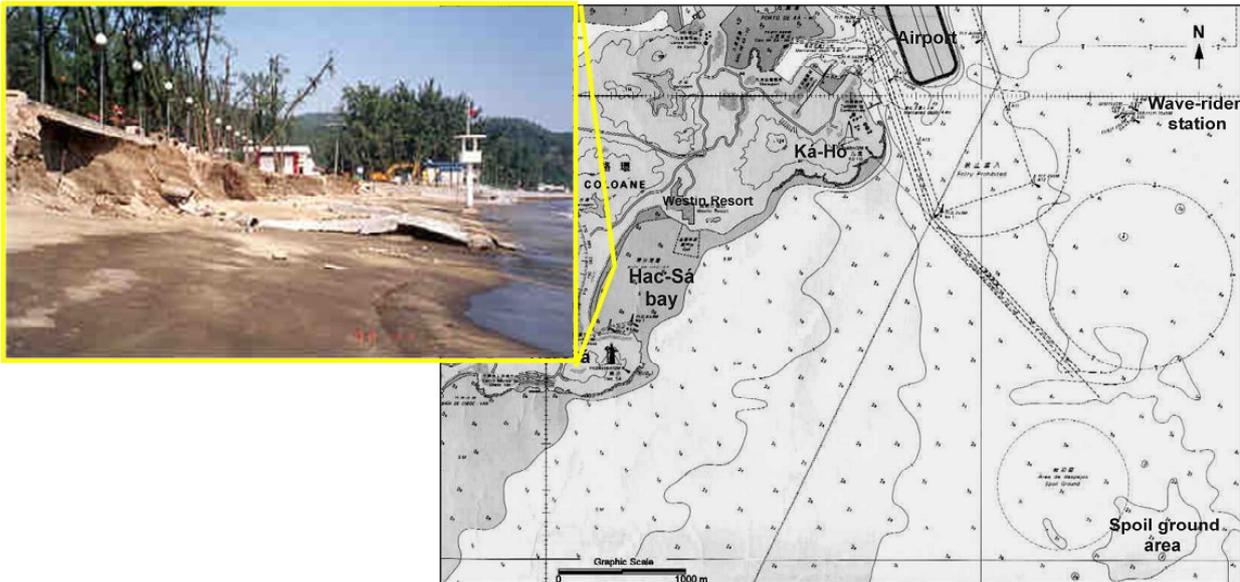


Figura 10 – Baía de Hac-Sá (baseado no mapa “Macau, China. Portos de Macau, Taipa e Coloane.”, 2001, Capitania dos Portos); e fotografia do impacto da erosão em Outubro de 2000. Hac-Sá Bay (based on the map “Macau, China. Portos de Macau, Taipa e Coloane.”, 2001, Capitania dos Portos); photograph from the impact of the erosion in October, 2001.

ondógrafo, assinalada na Figura 10) e de registos do nível do mar; ii) na avaliação da evolução morfológica recente do sistema praia (inclui fundo marítimo e contorno terrestre), realizada através da comparação de levantamentos topo-hidrográficos da zona de estudo (com extensão até 5 km da praia, onde se localiza o banco de depósitos de dragados, assinalado na Figura 10), entre si, e com fotografias aéreas rectificadas, de diferentes datas (desde 1985); e iii) na avaliação dos processos de dinâmica sedimentar (transporte sedimentar longitudinal e transversal) e seus mecanismos de interacção, realizada através de modelação matemática (de propagação de ondas marítimas, de evolução do perfil de praia a curto prazo e de evolução da linha de costa a médio e longo prazo).

O estudo mostrou que a linha de costa tem grandes oscilações sazonais (Figura 11) em resposta às condições de agitação marítima, especificamente, à variabilidade significativa da direcção das ondas (Oliveira, 2003a). Dadas as características geomorfológicas de praia encaixada, o transporte longitudinal líquido é nulo, ou seja, a movimentação sedimentar está confinada entre os promontórios. No entanto, o transporte longitudinal total anual médio é cerca de  $120 \times 10^3 \text{ m}^3$ : de Abril a Setembro o



Figura 11 – Variações sazonais da linha de costa anteriores à erosão de Outubro de 2000. Seasonal variations of the coastline before the erosion of October 2000.

transporte total residual ( $60 \times 10^3 \text{ m}^3$ ) tem sentido para norte, produzindo um aumento da largura de praia no extremo norte e diminuição no extremo sul; de Outubro a Março verifica-se o oposto, ocorrendo no final de Março a maior largura de praia do ano no sector sul (Oliveira et al., 2003). Relativamente à distribuição transversal do transporte longitudinal, concluiu-se que o transporte longitudinal se prolonga desde a face da praia até 2,8 m abaixo do nível médio. Através da simulação matemática de eventos de

tempestade, também foi possível concluir sobre a resposta do perfil de praia relativamente à acção erosiva das ondas: nestas condições, em que predomina o transporte transversal de sedimentos, verifica-se um rápido recuo do perfil de praia, que no caso de uma tempestade típica para esta zona chega a alcançar cerca de 10 m (Oliveira, 2003b).

Nas 3 últimas décadas, a baía de Hac-Sá sofreu grandes alterações, quer no seu contorno terrestre quer no seu fundo: i) os promontórios foram alargados sobre o mar através de aterros e posterior protecção da acção das ondas com enrocamento (Figura 12); ii) construíram-se infra-estruturas, de apoio balnear e outras, na parte superior da praia (Figura 12), bastante avançadas em particular no sector sul, que causaram a redução da largura de praia; iii) ocorreu um assoreamento generalizado (à taxa média 2-3 cm/ano), dentro e em frente à baía (Figura 13), devido à alteração das condições hidrodinâmicas causada pela construção do aeroporto de Macau (assinalado na Figura 10); e iv) verificou-se o crescimento de um banco de areia em frente à praia devido à deposição de dragados (assinalado na Figura 10).

Relativamente às causas de erosão, investigou-se o impacto de 6 potenciais factores: condições de

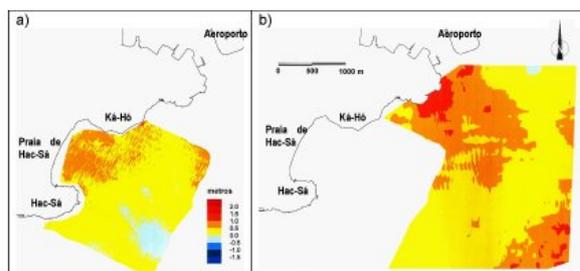


Figura 13 – Evolução morfológica do fundo marítimo: a) entre 1985 e 2002; b) entre 1985 e 2001. Morphological evolution: a) between 1985 and 2002; b) between 1985 and 2001.

agitação; alteração da propagação das ondas gerada pelo depósito de dragados em frente à praia (Oliveira, 2006); ocorrência de níveis do mar excepcionais; dragagens de manutenção do canal de acesso ao Clube Náutico; descargas pluviais (alteração dos locais de descarga directa na praia devida à ocupação do topo da praia); e avanço das construções (a insuficiente largura emersa da praia não permite a recuperação natural do perfil de praia, uma vez que a acção directa das ondas sobre as estruturas não dissipativas presentes no topo da praia aumenta o volume de transporte sedimentar da praia para o largo). Concluiu-

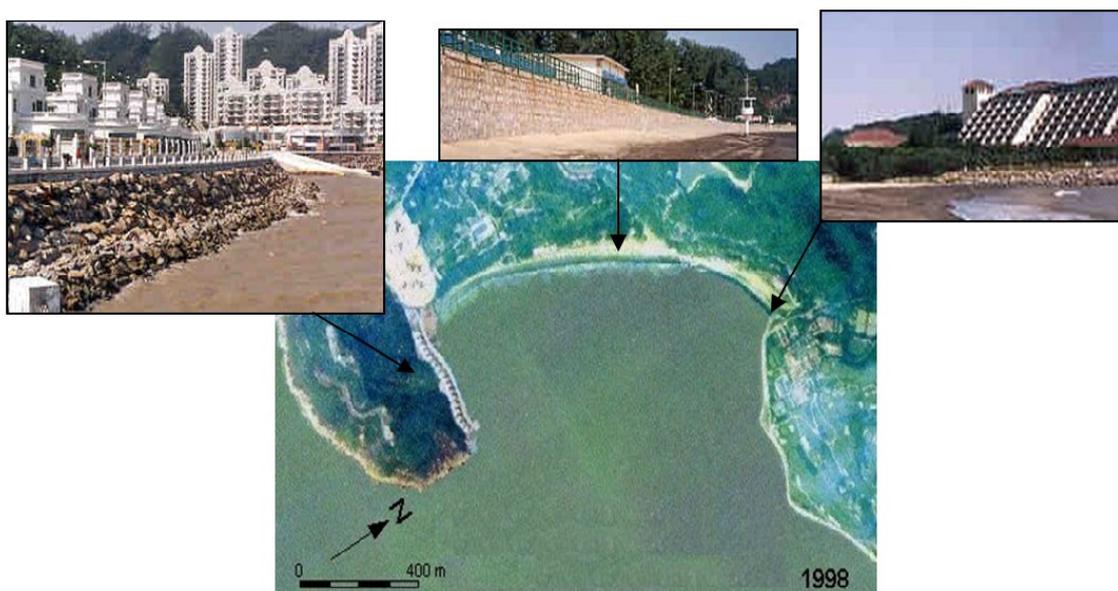


Figura 12 – Baía de Hac-Sá (fotografia aérea rectificada de 1998 e fotos oblíquas de 2002). Hac-Sá Bay (aerial photo from 1998, and oblique photos from 2002).

se que a alteração da propagação das ondas e o avanço das construções que ocorreu nas últimas décadas foram as principais causas da erosão, apesar das dragagens de manutenção do canal de acesso ao Clube Náutico terem contribuído para o desencadear do surto erosivo, através do pequeno recuo da linha de costa induzido no sector sul da praia.

Conhecidas as características da dinâmica sedimentar e as causas da erosão, foram propostas 3 soluções para reabilitação da praia, todas baseadas em alimentação artificial (Figura 14): a) reforço de areia em toda a praia; b) implementação de estrutura transversal a meio da praia e reforço de areia em ambos os trechos; e c) implementação de um quebra-mar submerso, paralelo à direcção principal da praia, no sector sul da baía e reforço de areia na praia. Analisado o comportamento morfodinâmico das soluções, após ajustamento natural do perfil de praia à nova configuração, com base em modelação matemática da evolução da linha de costa a médio e longo prazo, concluiu-se sobre as suas vantagens e inconvenientes. A solução c), apesar de diminuir a energia incidente no sector sul da praia e, por isso, diminuir o recuo da linha de costa a médio e curto prazo neste sector, iria causar grandes alterações na dinâmica natural da praia e possivelmente a deposição de lodo no extremo sul. Esta solução tem um maior grau de risco associado à previsão dos processos físicos costeiros e morfologia da praia a longo prazo. A solução a) apresenta as seguintes vantagens sobre a solução b): maior estabilidade morfológica devida à ausência de flutuações da linha de costa na parte central da praia; manutenção do comprimento original da praia, oferecendo condições mais favoráveis ao uso recreativo do que a partição da praia em duas; reabilitação da praia com uma solução não estrutural, permitindo a manutenção da dinâmica natural da praia, i.e., dos seus processos físicos principais e mecanismos de interacção; e menor custo.

Pelas razões apresentadas recomendou-se a solução a): fornecimento de  $400 \times 10^3 \text{ m}^3$  de areia de forma distribuída ( $333 \text{ m}^3$  por metro longitudinal de praia) para obtenção de um alargamento de 60 m da praia após ajustamento do perfil (com valor mínimo da nova cota máxima igual a 3,7 m). Com vista a manter o perfil de equilíbrio natural da praia e o mesmo comportamento hidro-sedimentar que o

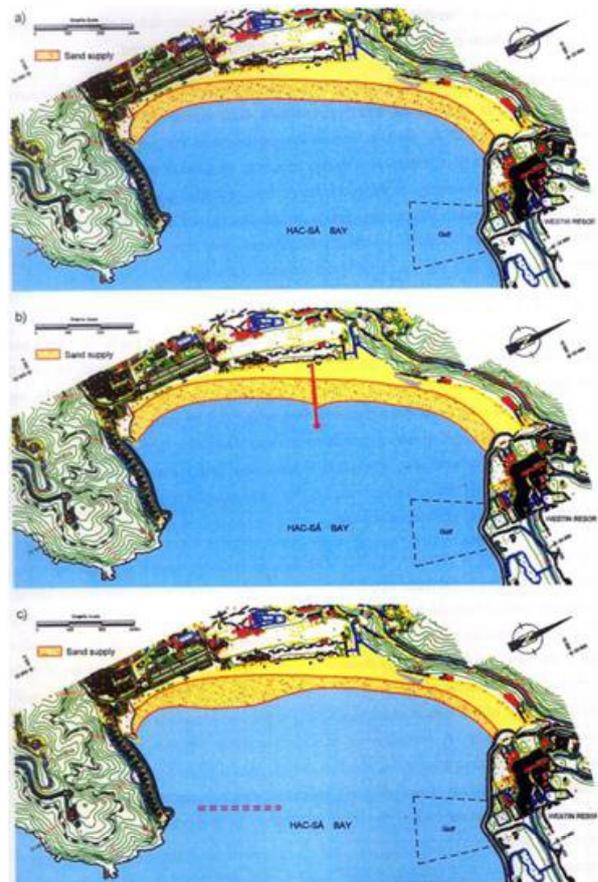


Figura 14 – Esquema das soluções propostas para reabilitação da praia de Hac-Sá. Proposed solutions for the rehabilitation of the Hac-Sá beach.

material nativo, a areia a fornecer terá que ter um diâmetro mediano ( $D_{50}$ ) compatível ( $0,33 \text{ mm} < D_{50} < 0,50 \text{ mm}$ ;  $0,12 \text{ mm} < D_{10} < 0,18 \text{ mm}$ ;  $1,50 \text{ mm} < D_{90} < 2,50 \text{ mm}$ ). Para além desta solução, fizeram-se recomendações para intervenções complementares para melhoramento das condições da praia: construção de um pequeno muro-guia ao longo do canal de acesso ao Clube Náutico, para evitar a fuga de areia da praia após dragagem; desvio da drenagem de águas pluviais e remoção das saídas directas para a praia; controlo do avanço das infra-estruturas sobre a praia; e fim do despejo de dragados em frente à praia.

*Praias de Leblon, Ipanema e Arpoador (Rio de Janeiro, Brasil)*

O estudo visou a reabilitação ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas e das praias de Ipanema, Leblon e Arpoador. Os seus objectivos gerais eram melhorar a qualidade da água da Lagoa através do aumento dos caudais que se escoam pelo Canal do Jardim de Alah e reabilitar a orla marítima adjacente, que sofria de problemas de erosão desde há algumas décadas.

Foram previamente definidos, no âmbito de outras componentes do estudo, o volume de trocas de água entre a Lagoa e o mar compatível com a resolução dos problemas de qualidade da água e as características hidrodinâmicas do futuro escoamento no Canal do Jardim de Alah. Estabelecidos estes parâmetros, coube à componente de Dinâmica Costeira a resolução das seguintes questões: conseguir uma redução drástica dos assoreamentos que ocorriam permanentemente na embocadura exterior do canal do Jardim de Alah, através do prolongamento dos pequenos molhes existentes, garantindo dessa forma uma livre e permanente comunicação da Lagoa com o mar, sem necessidade de dragagens de manutenção significativas; e promover o alargamento das praias por meio de alimentação artificial, de forma a obter a melhoria das condições balneares e a garantir que o Passeio Marginal deixasse de ser atacado pelas ondas.

A morfologia das praias de Leblon, Ipanema e Arpoador (Figura 15) é caracterizada pela existência de uma orla arenosa contínua, com 3,7 km de comprimento, ligeiramente arqueada, voltada aproximadamente a sul e constituída por areias médias, de diâmetro mediano da ordem de 0,4 mm.

A largura da faixa emersa varia de 70 a 100 m nas praias do Leblon e de Ipanema, e de 20 a 40 m na praia do Arpoador, estando sujeita a variações interanuais. Estas variações podem originar situações persistentes de oscilação global da massa de areia: para Este, engordando o Arpoador e emagrecendo o Leblon; para Oeste, engordando a praia do Leblon e emagrecendo a do Arpoador.

A propagação da agitação marítima entre o largo e as praias apresenta-se muito complexa, devido à existência de diversas ilhas: a Ilha Redonda, o grupo das Ilhas Cagarras e a Ilha Rasa (Figura 16). Estas ilhas constituem obstáculos à propagação das ondas originando a geração de zonas de sombra, com orientação e extensão que dependem da direcção e do período da onda incidente. A análise da propagação das ondas até à batimétrica 10 m foi efectuada por simulação em modelo numérico de 21 diferentes casos de combinação de rumo ao largo e período (Oliveira, 2002). A sobreposição destas zonas de sombra cria um padrão complexo de distribuição de alturas e



Figura 15 – Praias de Leblon, Ipanema e Arpoador, e Canal do Jardim de Alah (Brasil). Leblon, Ipanema and Arpoador beaches, and Jardim de Alah Channel (Brazil).

rumos ao longo das praias. Foi efectuada uma caracterização detalhada desses parâmetros, tendo sido definidos 7 regimes de agitação marítima local, indispensáveis para a modelação da dinâmica costeira.

As marés na orla marítima da Lagoa são do tipo semi-diurno, com desigualdades diurnas. As variações de nível de origem astronómica originam oscilações, entre as preia-mares e as baixa-mares, que podem atingir 1,40 m em águas vivas máximas.

O conjunto das praias em estudo forma uma unidade sedimentar praticamente independente, isto é, constitui um trecho costeiro sem trocas significativas com as orlas arenosas que lhe ficam anexas, a Este e a Oeste. A dinâmica sedimentar é caracterizada por transportes sólidos longitudinais que se processam num e noutro sentido, os quais são aproximadamente iguais, em ano médio, dada a situação geral de equilíbrio do arco formado pelas praias. A quantificação dos transportes globais efectuada em cinco pontos dessa orla arenosa, com diferentes fórmulas de cálculo, forneceu valores

contidos na gama de 700.000 a 1.000.000 m<sup>3</sup>/ano. Esta constante movimentação de elevados caudais de areia ao longo das praias explica a grande dificuldade de manter desobstruída a embocadura do Canal do Jardim de Alah, o que só é conseguido através de constantes dragagens de manutenção.

O cálculo da distribuição do transporte longitudinal no perfil das praias, efectuada com modelos de evolução da linha de costa (DHI, 2000; Vicente e Clímaco, 2003), apresentou um valor anual acumulado praticamente nulo abaixo da batimétrica 10 m e muito diminuto abaixo da de 8 m. A forte diminuição dos transportes de areia no perfil, quando se progride no sentido das maiores profundidades, confirmou que o problema do assoreamento do Canal do Jardim de Alah podia ser resolvido através do prolongamento dos molhes que actualmente fixam a sua embocadura.

As simulações mostraram ainda que um forte temporal pode, só por si, originar recuos da linha de água nas praias do Leblon e do Arpoador da ordem

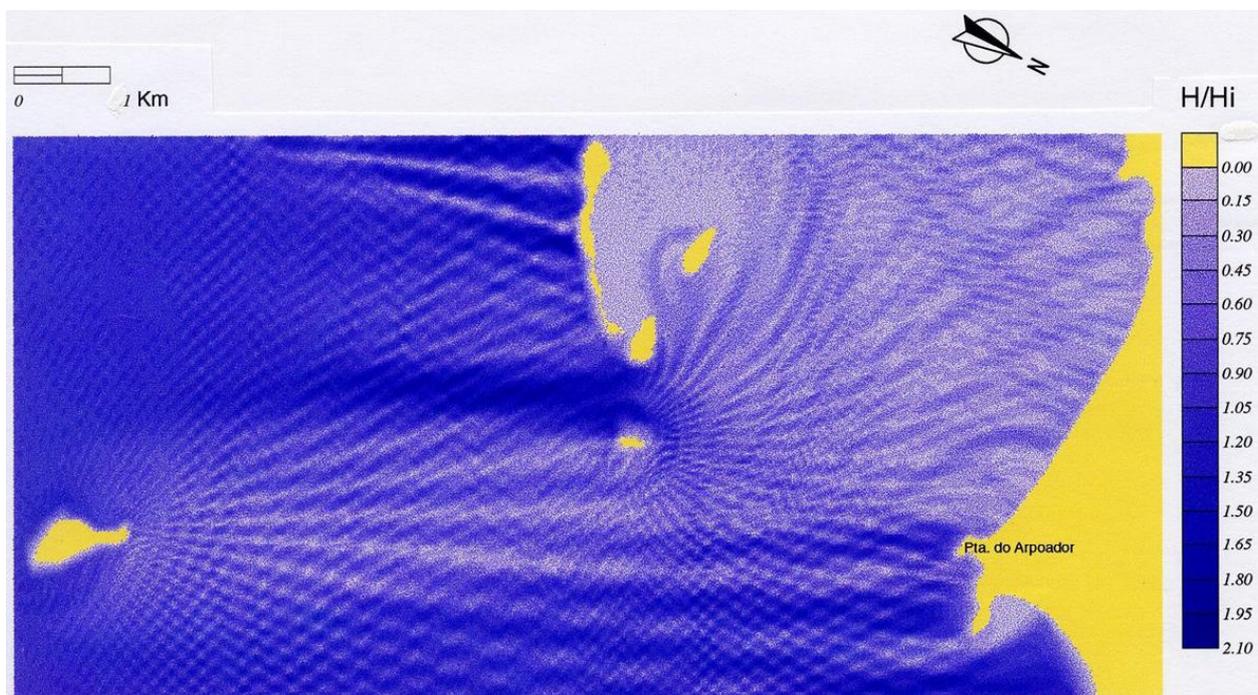


Figura 16 – Propagação da agitação marítima desde o largo até às praias de Leblon, Ipanema e Arpoador. Exemplo de resultados obtidos com um modelo matemático. Wave propagation from the ocean to the beaches of Leblon, Ipanema and Arpoador. Example of results from a mathematical model.

de 40 e 20 m, respectivamente.

As praias em estudo caracterizam-se por uma estabilidade aluvionar global, que decorre da permanência da massa de areia entre as pontas rochosas que as limitam, estando sujeitas, apesar desta estabilidade, a desequilíbrios morfológicos que originam episódios erosivos.

Simularam-se com os referidos modelos de evolução da linha de costa, numa operação de calibração, as principais evoluções sofridas pelas praias nas últimas décadas. Estas simulações permitiram uma satisfatória interpretação, compreensão e reprodução da dinâmica das praias e das suas configurações de equilíbrio e de oscilação.

Analisaram-se várias soluções alternativas, pouco diferentes entre si, que apresentavam as seguintes características gerais: acentuado prolongamento dos molhes, da ordem dos 200 m, deslocando a embocadura para uma zona de maiores profundidades, onde a redução da capacidade de transporte minimizava os problemas de assoreamento; diferentes aprofundamentos do canal existente com vista a intensificar o volume de trocas entre a laguna e o mar; e diferentes configurações da boca dos molhes para tentar reduzir a penetração da agitação marítima e sua propagação no interior do canal.

Da análise destes resultados destacam-se os seguintes aspectos: forte atenuação da agitação marítima no interior do canal, o que elimina os riscos de galgamento do Passeio Marginal e inundação da avenida; predominância do transporte em suspensão sobre o arrastamento no canal do Jardim de Alah; e assoreamento muito diminuto da boca e canal definido pelos molhes, compatível com uma fácil manutenção.

Considerou-se que o melhoramento das praias de Leblon, Ipanema e Arpoador teria de passar por uma alimentação artificial. Simulou-se com modelação matemática, além da situação correspondente à configuração de equilíbrio médio, as situações mais acentuadas de oscilação no sentido do Leblon e do Arpoador, responsáveis pelas ocorrências de erosões nos extremos opostos do arco formado pelas praias. Nas condições de simulação foi incluído o prolongamento dos molhes, tendo sido analisado o efeito de compartimentação da orla arenosa determinado por este prolongamento. Esta obra

conduzirá ao quase anulamento das trocas sedimentares entre a praia do Leblon e as praias de Ipanema e do Arpoador, e afectará a forma como os dois trechos oscilarão nos processos de adaptação às referidas flutuações naturais, decorrentes de alterações da distribuição da energia do clima anual de agitação marítima pelos seus rumos de actuação.

Os resultados das simulações permitiram concluir que: é adequado um volume de enchimento de  $1,2 \times 10^6 \text{ m}^3$  de areia idêntica às das praias; os problemas de erosão da praia do Leblon ficam resolvidos devido à diminuição das oscilações da linha de água resultante da sua compartimentação pelos molhes, obras que impedem as trocas de areia com a praia de Ipanema; a praia de Ipanema beneficia de um aumento geral de largura, proporcionado pela alimentação artificial, que compensa uma maior oscilação junto à embocadura do canal do Jardim de Alah, devido ao referido efeito de compartimentação; e a praia do Arpoador beneficia de um alargamento mais reduzido dada a excessiva inflexão e avanço da



Figura 17 – Praia de Leblon e extremidade oeste da praia de Ipanema: solução proposta. Leblon beach and western tip of the Ipanema beach: proposed solution.

implantação local do Passeio Marginal.

A Figura 17 mostra a solução final proposta, que, até esta data, não foi ainda concretizada.

### *Embocadura da Lagoa de Óbidos (Portugal)*

A Lagoa de Óbidos (Figura 18), uma laguna situada na costa oeste de Portugal, tem uma área de 8 km<sup>2</sup> em preia-mar de águas vivas e uma profundidade máxima de 4 m relativamente ao nível médio. A sua pequena dimensão, os baixos caudais fluviais e o intenso transporte litoral têm levado a fechos da embocadura pelo menos desde o século XV (Henriques, 1992), reduzindo as trocas com o mar (Oliveira et al., 2006) e deteriorando a qualidade da água. Mais recentemente, construções nas margens da laguna foram postas em risco ou destruídas pela migração da embocadura. Estes problemas motivaram duas propostas de solução, uma envolvendo a construção de quebra-mares e outra o aumento da área da laguna. No entanto, ambas foram abandonadas após estudos detalhados, pelo que os problemas deste sistema apenas têm sido mitigados através de soluções temporárias baseadas em dragagens e na colocação de sacos de areia. O presente estudo visou propor uma solução mais duradoura e com menores custos

de manutenção. Dada a precisão limitada de todos os tipos de modelos morfológicos, a solução foi desenvolvida e analisada com recurso a vários modelos numéricos, empíricos e analíticos (Fortunato e Oliveira, 2007), após uma caracterização aprofundada da situação actual baseada em modelação e análise de dados de campo.

A solução proposta para a estabilização da embocadura da laguna consiste num esquema de dragagem de canais principais e secundários, na manutenção do guia-correntes existente, e na construção de um novo na margem sul (Figura 19).

O esquema de dragagens proposto tem como objectivos melhorar a capacidade de auto-manutenção e renovação da Lagoa. O número de canais na lagoa de Óbidos tem variado ao longo dos anos. Os canais propostos foram definidos com base na análise de dados históricos e na aplicação de um modelo empírico (Allersma, 1994) e do modelo numérico hidrodinâmico ELCIRC (Zhang et al., 2004). O canal norte mantém o alinhamento mais estável do último século, enquanto o canal sul foi adaptado para minimizar as perdas de carga. A secção dos canais foi definida através de um procedimento iterativo que combina o modelo ELCIRC com o modelo empírico de O'Brian (1969). O primeiro

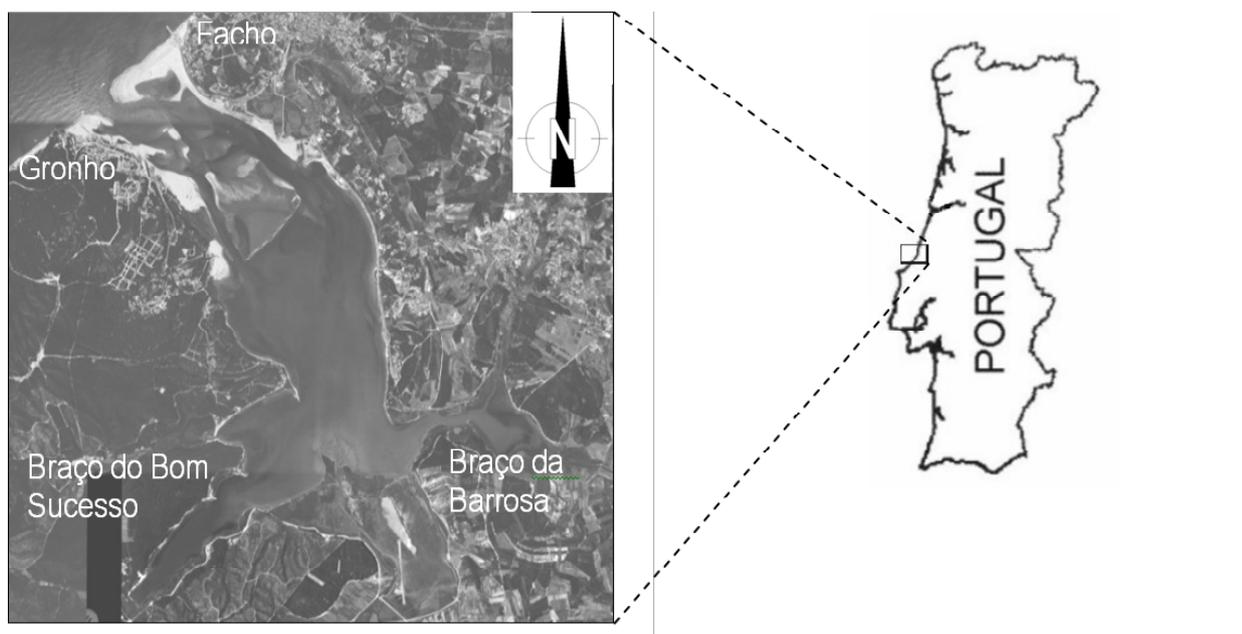


Figura 18 – Lagoa de Óbidos: localização e toponímia. Óbidos lagoon: location and place names.

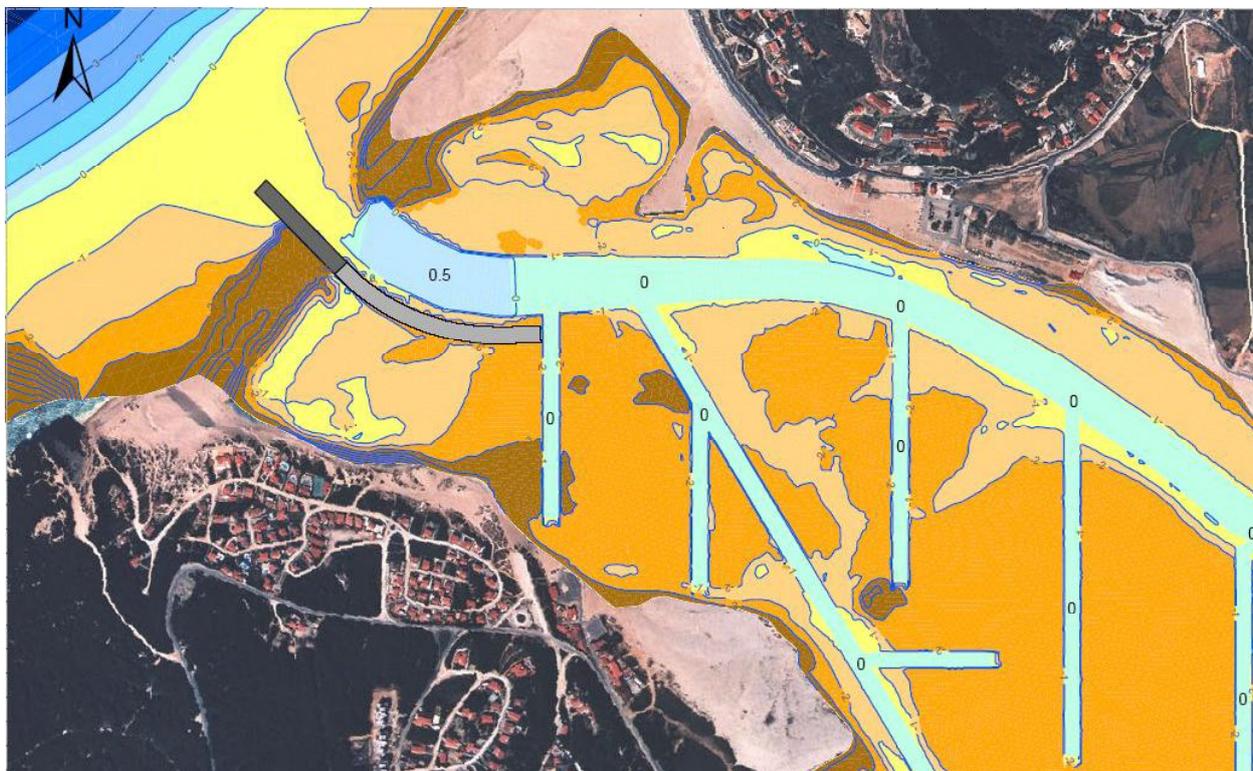


Figura 19 – Solução proposta para a embocadura da Lagoa de Óbidos. Proposed solution for the Óbidos lagoon tidal inlet.

permite calcular o prisma de maré para uma determinada geometria do canal, enquanto o segundo determina a secção transversal estável para um determinado prisma de maré.

Para além destes canais principais, propôs-se a dragagem de 7 canais secundários sobre os bancos de areia. Estes canais secundários visam facilitar o escoamento da água na vazante, melhorando a capacidade de automanutenção da embocadura (Fortunato e Oliveira, 2005a,b), e contrariar o assoreamento progressivo da laguna. Os resultados das simulações numéricas mostram que as dragagens propostas reforçam a eficiência hidráulica da embocadura, aumentam as correntes de vazante relativamente às de enchente e melhoram as trocas com o mar (por exemplo, o prisma de maré aumenta em 22% relativamente à situação após a dragagem de emergência de Julho de 2001).

Apesar das suas vantagens, as dragagens propostas não garantem a estabilidade da embocadura a longo prazo, uma vez que a meandrização e o assoreamento

dos canais poderiam repor a morfologia actual ao fim de meses ou anos. Para evitar grandes alterações morfológicas após as dragagens, propôs-se manter o guia-correntes construído em 1999 junto à margem norte, e construir um novo guia-correntes a sul do canal. O limite de jusante da nova obra é definido de forma a esta não afectar o trânsito litoral, minimizando o impacte na costa. Este guia-correntes tem dois trechos distintos: os 100 m de jusante têm um coroamento acima da máxima preia-mar de forma a evitar galgamentos; os 200 m de montante ficam submersos em preia-mar, reduzindo a intensidade das correntes de enchente e aumentando a das de vazante. Esta cota mais baixa minimiza também os impactes visuais, uma vez que parte da obra só fica visível durante parte do ciclo de maré.

Globalmente, a solução proposta permitirá manter a embocadura aberta com pouca necessidade de dragagens. Garantirá, ainda, a protecção das margens da laguna e a existência permanente de uma praia oceânica na margem sul.

### Considerações finais

Os problemas associados à dinâmica sedimentar da zona costeira têm implicações económicas, sociais e ambientais severas, afectando negativamente o turismo, a navegação, a pesca e os habitats. Acresce que há sinais claros de que estes problemas se vão agravar no futuro:

- Por um lado, as ameaças à zona costeira aumentam. As alterações climáticas, nomeadamente as alterações nos regimes de agitação marítima e a subida do nível médio do mar, aumentarão os problemas de erosão costeira. As alterações climáticas provocarão também cheias e secas mais intensas, o que promoverá a construção de barragens nas bacias hidrográficas. Esta construção será ainda fomentada pelo aumento dos preços dos combustíveis fósseis e pela necessidade de cumprir o protocolo de Kioto. Estas barragens retêm os sedimentos, reduzindo a sua afluência à zona costeira e potenciando os problemas de erosão costeira. Em países em forte desenvolvimento, a extracção de inertes para construção em rios e estuários tende a crescer, contribuindo também para o défice de sedimentos na zona costeira.

- Por outro lado, os efeitos económicos e sociais das alterações na zona costeira tornar-se-ão mais severos. A nível de navegação, há uma tendência para o aumento do comércio marítimo, da tonelagem dos navios porta-contentores, e da prática de náutica de recreio. Simultaneamente, o turismo ligado à prática banhar constitui uma fonte de receita crescente em muitos países. Finalmente, a percentagem da população que vive junto à costa tende a aumentar na generalidade dos países, aumentando o número de pessoas vulneráveis ao efeito de eventos extremos.

Apesar do aumento previsível das ameaças à zona costeira e da vulnerabilidade desta, há motivos para optimismo. A engenharia costeira tem evoluído muito nas últimas décadas, tendo sido desenvolvidas, testadas e aperfeiçoadas novas soluções para os problemas costeiros. Um melhor conhecimento dos processos físicos envolvidos, adquirido através de práticas de monitorização, associado a ferramentas de análise cada vez mais potentes, permitem-nos hoje desenvolver soluções mais eficazes e eficientes.

### AGRADECIMENTOS

O presente artigo foi apresentado no Seminário Manutenção e Reabilitação do Património Natural e Construído, realizado em Luanda, em Novembro de 2007, e uma versão preliminar foi publicada nas respectivas actas. Agradece-se ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil a autorização para publicação deste artigo. Agradecem-se ainda os contributos de três revisores anónimos que em muito contribuíram para a qualidade do artigo.

### BIBLIOGRAFIA

- Allersma, E. (1994) - Channels in Estuaries; 1-D Modelling of Parallel Channels. Report H1828. Delft, Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.
- Bruun, P. (1978) - Stability of tidal inlets: theory and engineering. Developments in geotechnical engineering, Vol. 23, Elsevier, Amsterdam.
- Clímaco, M. (2003) - Erosão da Margem Sul da Lagoa de Óbidos. Análise do Problema e Estabelecimento de Alternativas de Protecção. Rel. 62/03 – NEC, LNEC, Lisboa.
- Davies, R.A. & Zarillo, G.A. (2003) - Human-Induced Changes in Back-Barrier Environments as factors in Tidal Inlet Instability with Emphasis on Florida, ERDC/CHL CHETN-IV-57, U.S. Army Corps of Engineers.
- DHI Software (2000) - LITPACK - User Guide, Danish Hydraulic Institute, Denmark.
- Fortunato A.B. (2006) - Modelação numérica da dinâmica sedimentar em embocaduras. Programa de investigação e de pós-graduação na área científica de Hidráulica Marítima, LNEC.
- Fortunato, A.B. & A. Oliveira (2005a) - Influence of Intertidal Flats on Tidal Asymmetry, *Journal of Coastal Research*, 21/5: 1062-1067.
- Fortunato, A.B. & Oliveira, A. (2005b) - Promoting ebb dominance in coastal lagoons, J.M. Smith (ed.), Proc. 29th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, 2: 1173-1185.
- Fortunato, A.B., & Oliveira, A. (2007) - Case study: promoting the stability of the Óbidos lagoon inlet, *Journal of Hydraulic Engineering* 133/7: 816-824.
- Henriques, M. V. (1992) - Morphological evolution of the Óbidos Lagoon. *Journal of Coastal Research*, 8/3: 677-687.
- O'Brian, M.P. (1969) - Equilibrium Flow Areas of

- Inlets on Sandy Coasts, *J. Waterways and Harbours Div.*, 95: 43-52.
- Oliveira, A., Fortunato, A.B. & Rego, J. (2006). Effect of morphological changes on the hydrodynamics and flushing properties of the Óbidos Lagoon. *Continental Shelf Research*, 26/8: 917-942.
- Oliveira, F.S.B.F. (2002) - Wave climate modelling south of Rio de Janeiro in Brazil. *Continental Shelf Research*, 22/14: 2021-2034.
- Oliveira, F.S.B.F. (2003a) - Caracterização da agitação marítima na baía de Hac-Sá, Macau, 3<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Aveiro, Portugal, CD-ROM, 13 pp.
- Oliveira, F.S.B.F. (2003b) - Impact of anthropological pressure on the coastal area: cross-shore beach analysis. A case study, *CoastGIS'03*, Genova, Italy, CD-ROM, 8 pp.
- Oliveira, F.S.B.F. (2006) - Impact of a disposal area of dredged sediment in front of a beach. *Journal of Coastal Research*, 39/2: 801-805.
- Oliveira, F.S.B.F., Vicente, C. & Clímaco, M. (2003) - Characterisation of the sediment dynamics of Hac-Sá beach. *Macao. EPMESC IX: Computational Methods in Engineering and Science*, lu et al. (eds), pp. 779-786.
- Santos, F.D., Forbes, K. & Moita, R. (eds.) (2002). *Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures – SIAM Project*. Gradiva, Lisbon, Portugal.
- Santos, F.D. & Miranda, P. (eds.) (2006) - *Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação – SIAM II*. Gradiva, Lisboa.
- Seabergh, W.C. (2002) - *Weir Jetties at Coastal Inlets: Part 1, Functional Design Considerations*, ERDC/CHL CHETN-IV-53, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS <http://chl.wes.army.mil/library/publications/cetn>.
- Vicente, C. & Clímaco, M. (2003) - *Evolução de Linhas de Costa. Desenvolvimento e Aplicação de um modelo numérico*. ICT-ITH 42, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.
- Zhang, Y., Baptista, A.M. & Myers, E.M. (2004) - A cross-scale model for 3D baroclinic circulation in estuary-plume-shelf systems: I. Formulation and skill assessment. *Continental Shelf Research*, 24/18: 2187-2214.





## Estudo Preliminar da Geometria de um Recife Artificial para Protecção Costeira e para a Prática de Surf na Costa Oeste Portuguesa\*

### *Preliminary Study on the Geometry of an Artificial Reef for Coastal Protection and Surfing along the West Coast of Portugal*

Mechteld Ten Voorde<sup>1</sup>, Maria da Graça Neves<sup>2</sup>, José Simão Antunes do Carmo<sup>3</sup>

---

#### RESUMO

Grande parte da costa atlântica Portuguesa encontra-se hoje em dia bastante fragilizada e a necessitar de urgentes medidas reparadoras que satisfaçam simultaneamente os requisitos essenciais de protecção, salvaguardem a atracção turística e promovam o desenvolvimento sustentável. Terão sido fundamentalmente os grandes volumes de areias extraídos dos sistemas fluviais e das zonas portuárias, nas últimas décadas, que conduziram ao défice sedimentar generalizado que hoje se manifesta ao longo de grande parte da costa Portuguesa. Terão igualmente contribuído para este balanço negativo muitas das obras de regularização fluvial, de que se destacam as grandes barragens construídas essencialmente a partir de meadas do século passado, bem como a implementação de estruturas portuárias e de outras obras com finalidades de protecção local. Para o estudo das medidas mais adequadas a implementar recorre-se, hoje em dia, com frequência, a simulações numéricas com base em modelos matemáticos mais ou menos complexos, sendo o conhecimento das características do escoamento associadas às correntes e ondas de superfície, e a sua dependência relativamente à batimetria e à geometria da costa, de capital importância no dimensionamento destas estruturas de protecção, sejam elas submersas ou elevadas, aderentes ou destacadas.

Neste artigo apresentam-se de forma sucinta os trabalhos em curso realizados no âmbito da definição da geometria de um recife artificial. Os resultados dos estudos em modelo numérico sobre o funcionamento do recife realizados até ao momento no que respeita quer à protecção costeira quer à melhoria das condições para a prática de surf permitiram tirar as seguintes conclusões preliminares no que se refere às características geométricas da estrutura: 1. A presença da plataforma

---

<sup>1</sup> Autor correspondente - mvoorde@lnc.pt - Universidade de Coimbra, IMAR, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal.

<sup>2</sup> LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal. gneves@lnc.pt

<sup>3</sup> Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, 3030-788 Coimbra, Portugal. jsacarmo@dec.uc.pt

sob o recife em forma de delta é vantajosa no que se refere à protecção costeira da zona adjacente à estrutura; 2. O ângulo do recife deve ser próximo de 45°.

Palavras-chave: Recifes artificiais, obras de protecção, ondas para surf, modelação numérica

---

## ABSTRACT

A large part of the Portuguese Atlantic coast is at present very fragile, and urgent measures are needed to satisfy the essential requirements for its protection, preservation and promotion of the tourist attraction, and its sustainable development.

A deficit of sediments is clear all along the Portuguese coast, mainly due to the large volumes of sand extracted from river systems and port areas. Many of the works for regulating rivers, for example, the major dams built mainly since the middle of the last century, and the implementation of port structures and others constructed for local protection purposes, have contributed to this negative balance in sediment. Also natural factors, with increasing consequences, like the rising mean sea level and more frequent and intense storms, due to global warming, will contribute significantly for coastal erosion and consequent retreat of the coastal line. According to several studies, the rising of the mean sea level will reach values between 0.5 m and 1.5 m until the year 2100. Consequently, the natural protections will be destroyed and the erosive processes and modifications of the shoreline will be strongly increased by the action of intense waves and currents. These consequences are even more important when associated to an energetic sea, like the one acting on the occidental Portuguese coast.

The precarious dynamic equilibrium of the Portuguese coast is also fragile due to the fast grow of population. Large part of the existing problems in the coastal zone are, in any way, directly or indirectly connected with the progressive urban occupation of this zone. A strong degradation of the many existing natural protections is the consequence.

Another factor that has to be reconsidered is related to constructions of heavy engineering that are implemented in order to protect locally the littoral. The coastal zone of Portugal is nowadays in a strong artificial process with a growing number of fixed structures (groins, sea-walls, breakwaters, etc.) all along the littoral. Opposite to these conventional structures, a search for alternatives that take more into account the total environmental equilibrium in the Portuguese coastal zone should be undertaken.

Numerical simulations, based on more or less complex mathematical models, are often used nowadays to study the most appropriate measures to be implemented.

This paper presents the work in progress for the definition of the characteristics of an artificial reef for coastal protection and surfing, along a stretch of particular vulnerability of the Portuguese coastal zone. With this regard, theoretical considerations and numerical modeling are used. The computational model solves a non-linear equations system of the Boussinesq type. The main results obtained, so far, are presented and discussed. The results of studies on the functioning of the reef with regard to both the coastal protection and the improvement of surfing conditions allowed to draw the following preliminary conclusions regarding the geometric features of the structure: 1. The presence of a platform under the reef, in the form of delta, is advantageous regarding the protection of the coastal area behind the structure, 2. The angle of the reef should be around 45.

*Keywords:* Artificial reefs, coastal protection, surf waves, numerical modelling

---

## 1. INTRODUÇÃO

A acção das ondas e das correntes nas zonas litorais dos oceanos é em geral muito intensa, dando origem a movimentos quasi-permanentes dos materiais de fundo aí depositados.

A variabilidade das características das ondas e das correntes traduz-se em significativas alterações na capacidade de transporte do escoamento, o que, em consequência, conduz a modificações mais ou menos irregulares dos fundos e da geometria da costa.

O precário equilíbrio dinâmico das zonas costeiras, sendo afectado pelas mudanças cíclicas dos regimes de onda e da corrente, é ainda fragilizado por perturbações ligadas à actividade humana local

(construções e regularizações costeiras) e longínqua (extracções de sedimentos e obras de regularização fluvial, privando as zonas marítimas das correspondentes contribuições sedimentares).

Nesta conformidade, o conhecimento das características do escoamento associado às ondas e às correntes, e a sua dependência relativamente à batimetria e à geometria da costa, são de primordial importância no dimensionamento de obras marítimas, na previsão das consequentes modificações introduzidas na agitação marítima e ainda no transporte e deposição de sedimentos (Carmo e Marques, 2003; Ten Voorde et al., 2007).

### 1.1 Processos morfodinâmicos

Até finais da década de 70 foi prática corrente o recurso a modelos matemáticos do tipo linear para simular o efeito da refração produzida pela variação da profundidade na direcção de propagação da crista da onda e o efeito da difracção produzido pelo gradiente da amplitude ao longo da crista. No entanto, e porque se baseiam na teoria linear, esses modelos não devem ser utilizados em condições de água pouco profunda, nomeadamente em regiões costeiras e estuarinas (Carmo, 2004).

Ainda neste período, a previsão da evolução de uma praia era estabelecida empiricamente, a partir da experiência de casos similares ou recorrendo a modelação física em laboratório. Os métodos empíricos baseados em observações objectivas e em comparações com casos similares têm o mérito de serem simples e representativos, mas não permitem fazer previsões quantitativas. Os modelos físicos em laboratório permitem fazer estudos em condições bem controladas, mas colocam vários problemas ao nível das leis de semelhança, para além de serem muito dispendiosos (Carmo e Marques, 2003; Carmo, 2004).

Com um conhecimento teórico mais profundo dos fenómenos envolvidos e uma utilização mais eficiente dos métodos numéricos a par com o grande avanço e divulgação dos computadores, em especial a partir do início da década de 80, tanto em rapidez de processamento como em armazenamento de grande volume de informação, tornou-se possível o recurso a modelos matemáticos mais complexos e, por conseguinte, menos limitativos.

O estudo dos processos morfodinâmicos que ocorrem em regiões costeiras e estuarinas recorrendo a métodos numéricos, para a resolução espacial das equações, baseados em diferenças finitas, em elementos finitos ou ainda em volumes de controlo finitos, é hoje em dia uma prática generalizada e com resultados satisfatórios.

Grande parte das Universidades e Institutos de investigação portugueses possuem já as ferramentas e os conhecimentos científicos indispensáveis para, em conjunto com as instituições responsáveis pelo planeamento e gestão das zonas costeiras, procederem a uma programação e hierarquização das actividades e intervenções necessárias, privilegiando fundamentalmente uma atitude preventiva como forma de antecipar a resolução dos problemas, por oposição à gestão casuística e por norma reactiva que tem caracterizado a generalidade das intervenções na zona costeira portuguesa.

### 1.2 Agentes desequilibradores da linha de costa

As configurações das zonas arenosas da linha de costa portuguesa são, em geral, caracterizadas por extensas praias contínuas de fundo móvel, essencialmente determinadas pela relação dinâmica entre: i) o padrão de agitação incidente, principal agente modelador e responsável pela capacidade de transporte dos sedimentos, e ii) as características e disponibilidades de areias existentes na zona e das que a ela afluem transportadas fundamentalmente por acção das correntes litorais.

Presentemente, verifica-se uma tendência generalizada e continuada de recuo da linha de costa portuguesa em quase toda a sua extensão. Esta tendência é fundamentalmente atribuída a três factores: i) à subida do nível médio das águas do mar; ii) ao enfraquecimento irreversível das principais fontes aluvionares exteriores às zonas costeiras, em consequência de regularizações fluviais, alterações no aproveitamento dos solos e extracções de areias para a construção, entre outras (Dias, 2003) e iii) a intervenção humana, alterando pontualmente o padrão de agitação local e/ou os trânsitos sedimentares. Também a frequência e características meteorológicas extremas que se têm vindo a observar e que, segundo vários estudos, tenderão a agravar-se no futuro, é um fenómeno preocupante, pois são já hoje bem conhecidas as consequências gravosas deste fenómeno em alguns troços da costa portuguesa (Carmo e Marques, 2003).

A subida do nível médio das águas do mar será porventura o factor que menos contribuirá para a erosão costeira no tempo presente (estima-se que não ultrapasse os cerca de 10% a 15% na costa ocidental portuguesa).

Não há consenso entre os investigadores que se dedicam a esta temática quanto ao estabelecimento de uma relação directa entre o aumento da temperatura e o incremento da emissão de gases com efeito de estufa. Com efeito, como referem vários autores, indicadores razoavelmente fiáveis demonstram a existência de variações naturais da mesma ordem de grandeza relacionadas, por exemplo, com variações na órbita da Terra ou com a actividade vulcânica. Menos incertezas existem, porém, sobre os efeitos de um aumento generalizado da temperatura que, segundo vários investigadores, apontam para valores na ordem de 1,5°C a 4,5°C até ao ano 2100 (ASCE Task Committee, 1992; Kattenberg et al., 1996, in Houghton, 1997; IPCC, 2007; Miranda et al., 2002).

Por efeito de expansão térmica, um aumento

global da temperatura conduz necessariamente a uma subida do nível médio das águas do mar. Estudos conduzidos por Gornitz et al. (1982) (in ASCE Task Committee, 1992), mostram que um aumento da temperatura de 0.4°C num século terá conduzido a uma subida do nível médio de cerca de 5cm. Os efeitos adicionais de degelo das calotes esféricas e as alterações nos padrões globais de circulação oceânica contribuirão para a elevação do nível médio que, segundo vários estudos, se situarão no intervalo de 0,5m a 1,5m até ao ano 2100.

Ainda num contexto de alterações climáticas globais, têm sido recentemente observadas no Atlântico mudanças dos regimes de ventos e tempestades que terão reflexos nos climas de ondas e correntes e, obviamente, consequências ao nível da erosão costeira.

Do ponto de vista hidráulico, são várias as consequências negativas que poderão resultar de uma tão drástica subida do nível médio das águas do mar. Com efeito, aumentarão as amplitudes das marés e os comprimentos de onda (devido ao aumento da celeridade) e aumentarão também os prismas de maré (massas de água que são movimentadas em cada ciclo) e as correntes em baías e estuários. Estas alterações conduzirão, por outro lado, a intrusões salinas, a contaminação de aquíferos e a importantes impactos biológicos sobre habitats costeiros.

Para além da destruição de protecções naturais devido à elevação do nível médio do mar, também os processos erosivos e as consequentes modificações da linha de costa serão fortemente incrementados pela acção de ondas e correntes mais intensas.

De entre as diversas acções de origem antropogénica responsáveis por situações de erosão na costa portuguesa, a que urge pôr termo ou mitigar os seus efeitos, duas existem que poderão e deverão ser implementadas a curto prazo; são elas, uma redução significativa dos montantes de areia extraídos no meio hídrico e a utilização dos volumes dragados por razões de navegação na alimentação de praias. Como referido em Gomes e Pinto (1997), outras acções deverão ser igualmente equacionadas, como sejam: i) proceder a operações de transposição artificial (by-pass) das areias de barlar para sotamar (norte para sul) nas zonas portuárias onde existem extensos quebra-mares; ii) encontrar fontes alternativas de sedimentos para alimentação das praias recorrendo a depósitos submarinos, e iii) não autorizar a implantação de novos quebra-mares extensos para possíveis novos portos de pesca ou de recreio, os quais, a serem construídos, deverão ser inseridos nas

instalações portuárias existentes.

Ainda a nível local, a intervenção humana é com certeza o principal factor responsável pelas alterações na configuração da linha de costa e provavelmente também o principal responsável por parte do seu recuo generalizado e continuado em consequência do efeito cumulativo do conjunto dessas intervenções, isto devido à alteração do padrão de agitação local e à alteração temporária do trânsito sedimentar, que em geral se deverá traduzir em alguma perda de areias para maiores profundidades.

Segundo Ramos (1997), perante a tendência generalizada e continuada de recuo de grande parte da linha de costa portuguesa, uma atitude passiva, de “não intervenção”, conduzirá à diminuição ou desaparecimento de praias semi-encaixadas em costas de areia e rocha e a recuos de grande dimensão em costas arenosas extensas. Por conseguinte, importa reflectir sobre os tipos e formas de intervenção, de modo a não acelerar ainda mais o precário equilíbrio existente.

Sempre que possível, uma vez identificado um problema ou após a ocorrência de um acidente, dever-se-á ter uma atitude pró-natureza, isto é, intervir no sentido de auxiliar a natureza a procurar uma nova situação de equilíbrio. Por conseguinte, deverão excluir-se quaisquer formas de intervenção que contrariem a tendência natural para o estabelecimento de uma configuração dinamicamente estável. Uma atitude contrária conduzirá inevitavelmente, mais cedo ou mais tarde, a rupturas e prejuízos acrescidos com perdas de bens instalados a coberto de uma falsa sensação de segurança.

### 1.3 Objectivo

É neste contexto que surgem os recifes artificiais multifuncionais como alternativas viáveis a obras pesadas de engenharia. Estas construções têm vindo a ganhar cada vez mais adeptos, existindo hoje em dia alguns exemplos. O recife de Narrowneck, na Austrália, é um exemplo de sucesso (Jackson et al., 2005).

Os estudos que se apresentam neste artigo pretendem servir de base à implantação de possíveis recifes artificiais em trechos da região centro da costa portuguesa particularmente sensíveis. Assim, partindo de uma geometria simples do recife, um delta simétrico, resumem-se, neste trabalho, os estudos realizados até ao momento para a definição da geometria do recife, concretamente para a definição das suas dimensões em planta e em perfil.

Apresentam-se ainda propostas de trabalhos que deverão ser realizados para a determinação da geometria final do recife.

Os estudos de base realizados decorreram no âmbito de uma colaboração entre entidades públicas e privadas para a resolução de uma situação de grande fragilidade resultante da destruição de parte de um cordão dunar da costa Portuguesa, colocando em risco uma unidade industrial localizada na Leirosa, a sul da Figueira da Foz.

Este sistema dunar foi fortemente debilitado em consequência da implantação de um emissário submarino. Numa primeira fase, foi decidido reabilitar aquele cordão dunar através de enchimento com areia e replantação da zona intervencionada, utilizando para o efeito plantas adequadas (Reis e Freitas, 2002).

A ocorrência de um importante temporal, menos de um ano após conclusão das obras, provou ser insuficiente esta forma de estabilização, pelo que se entendeu estudar, numa segunda fase, a viabilidade de uma protecção frontal destacada que permitisse reduzir a acção dinâmica das ondas sobre a linha de costa, em particular sobre o campo dunar e ainda sobre a geometria e volumetria da praia (Carmo et al., 2005; Reis et al., 2005).

Contudo, atendendo à necessidade de uma intervenção urgente e aos custos de uma protecção “pesada” desta natureza, foi decidido procurar sensibilizar e envolver as comunidades locais e outras instituições públicas e privadas para submeter o estudo entretanto realizado a novas fontes de financiamento.

Como medida de recurso, foi na altura implementada uma solução com aplicação de

geotêxteis. No essencial, a metodologia adoptada consistiu no reforço da duna com geotêxteis através da construção de uma barreira de protecção com uma altura aproximada de 8m e um comprimento de 120m (Carmo et al., 2005; Reis et al., 2005), a qual foi em seguida coberta por uma camada de areia, prosseguindo os trabalhos com uma replantação adequada (Figura 1).

Os custos da solução implementada, incluindo a aquisição de material geotêxtil, a escavação e preparação da fundação a partir do nível médio do mar, a preparação e colocação das sucessivas camadas, o transporte e colocação da areia, a replantação, a rega, uma paliçada de protecção e uma escadaria de acesso, importaram em cerca de € 110 000.

Os dados recolhidos através dos procedimentos de monitorização subsequentes permitiram-nos manter algum optimismo em relação ao bom sucesso deste tipo de intervenção, o qual sendo, na altura, pioneiro em Portugal, constituiu um bom exemplo de reabilitação de sistemas dunares, a seguir noutras áreas de zonas costeiras com idênticas fragilidades (Reis et al., 2008).

Os estudos entretanto conduzidos no âmbito de um projecto de investigação permitiram evoluir para o reforço da protecção frontal do cordão dunar através da instalação de um quebra-mar destacado submerso. Considerando os custos envolvidos, foi decidido aproveitar a oportunidade para estudar a viabilidade de uma estrutura que garanta, por um lado, o reforço do sistema de protecção dunar instalado e que permita, por outro, a geração de ondas para a prática de surf (Ten Voorde et al., 2008).



Figura 1 - Processo construtivo da barreira de protecção e replantação da zona intervencionada (Antunes do Carmo, Janeiro 2006)

Figure 1 - Construction process of the protection barrier and replanting the dune system (Antunes do Carmo, January 2006).

Para a realização destes estudos foi necessário recorrer a levantamentos hidro-topográficos e a registos da ondulação obtidos em duas bóias direccionais ao longo de vários meses, complementando assim outros registos já existentes e igualmente utilizados. Foi ainda necessário proceder a uma caracterização dos regimes de ventos e de correntes na zona envolvente. Os custos envolvidos com a obtenção destes dados de campo importaram em cerca de € 25 000.

A construção de uma estrutura submersa utilizando material geotêxtil (recife artificial), como referido acima, deverá resultar mais simples, mais barata e mais funcional que as estruturas convencionais. Complementarmente, deverá ainda garantir os seguintes benefícios:

- Protecção costeira com reduzido impacto visual;
- Geração de ondas com características para a prática de surf;
- Importante enriquecimento ambiental da zona costeira;
- Criação de áreas com interessantes características para práticas de diversão e pesca;
- Benefícios económicos resultantes do aumento de fluxos turísticos.

Prevê-se que o montante necessário para a construção desta estrutura, incluindo a aquisição do material geotêxtil, a preparação dos contentores (tubos), o enchimento destes com areia, o seu transporte e colocação adequada no local, importe em cerca de € 500 000.

Neste momento, não existe ainda uma cultura de surf no local porque as condições não são as mais favoráveis para a prática deste desporto. No entanto, e dado que os surfistas se deslocam frequentemente para os locais onde existem boas condições para o surf, é de prever que se desloquem à Leirosa caso estas condições sejam criadas com a construção do recife.

#### 1.4 Metodologia

Para estudar as características hidrodinâmicas do escoamento junto ao recife, quer em perfil quer em planta, foi utilizado o modelo numérico COULWAVE (Lynett e Liu, 2002a e b), baseado em equações do tipo Boussinesq.

Assim, no ponto 2 descrevem-se sumariamente as características físicas e potencialidades do modelo numérico utilizado. No ponto 3 apresenta-se a geometria de base do recife. Nos pontos 4 e 5 apresentam-se as características geométricas do recife

em perfil e em planta, respectivamente. No ponto 6 apresentam-se os estudos realizados para a definição da distância do recife à linha de costa. Finalmente, no ponto 7 resumem-se as principais conclusões e apresentam-se alguns dos trabalhos em curso.

## 2. PRINCÍPIOS FÍSICOS E CARACTERÍSTICAS DO MODELO NUMÉRICO ADOPTADO

Os modelos clássicos do tipo Boussinesq, de que é exemplo o modelo de Peregrine (1967), usam aproximações polinomiais quadráticas para a distribuição vertical da velocidade, o que limita as suas aplicações, nomeadamente porque: i) não descrevem com suficiente rigor os efeitos dispersivos em condições de águas intermédias, e ii) apenas propagam correctamente ondas de baixa amplitude relativa. Estas limitações são consistentes com a hipótese fundamental das equações de Boussinesq, a qual considera que os efeitos dispersivos são da mesma ordem de grandeza dos efeitos não-lineares, ou seja, que  $O(\varepsilon) = O(\sigma^2)$ , com  $\varepsilon = a/h$  e  $\sigma = h/l \ll 1$  (hipótese fundamental da água pouco profunda).

As propriedades dispersivas dos modelos convencionais de Boussinesq têm vindo a ser melhoradas, através da modificação dos termos dispersivos (Madsen e Sorensen, 1992) ou usando uma velocidade de referência a uma altura previamente especificada (Nwogu, 1993). Esta técnica permite obter um sistema de equações cuja relação de dispersão linear pode ser ajustada de modo a que as características dispersivas em águas intermédias resultem muito próximas das da teoria linear da onda. Liu (1994) e Wei et al. (1995) estenderam a aproximação de Nwogu para ondas fortemente não-lineares, desenvolvendo modelos que podem não só ser aplicados em condições de águas intermédias mas também simular a propagação de ondas com elevados efeitos de interacção não-linear, isto é,  $\varepsilon = O(1)$ . Em geral, estes modelos resolvem equações com propriedades de dispersão linear bastante rigorosas até  $kh \approx 3$  (Nwogu, 1993).

Recorrendo a um polinómio de quarta ordem, Gobbi et al. (2000) desenvolveram um modelo com excelentes propriedades dispersivas até à ordem  $kh \approx 6$ . O comportamento não-linear foi fielmente conseguido até  $kh \approx 3$ . Naturalmente que esta melhoria de precisão do modelo em relação às aproximações anteriores foi acompanhada de um significativo esforço computacional.

A aproximação polinomial de quarta ordem

comporta resultados com derivadas espaciais de quinta ordem num sistema de equações muito complexo, requerendo um esquema numérico de resolução igualmente bastante complexo. Madsen e Schaffer (1998) e Agnon et al. (1999) desenvolveram um modelo de equações recorrendo a aproximações polinomiais de ordens ainda mais elevadas.

Todos estes desenvolvimentos têm por objectivo estender a aplicação de modelos de equações do tipo Boussinesq à propagação suficientemente rigorosa de ondas desde águas relativamente profundas até à zona de rebentação.

O modelo matemático resolvido pela estrutura computacional COULWAVE utiliza uma aproximação diferente para a obtenção de um sistema de equações de ordem superior. Em vez de recorrer a uma aproximação polinomial de ordem mais elevada para a distribuição vertical da velocidade, utiliza duas funções quadráticas com valores iguais numa interface que divide a coluna de água em duas camadas. Esta aproximação conduz a um sistema de equações sem as derivadas espaciais de ordem mais elevada resultantes do uso de funções polinomiais de ordem superior.

Neste programa computacional é adoptado um algoritmo de diferenças finitas para a resolução das equações, considerando uma ou duas camadas, sendo a estrutura numérica similar às apresentadas em Wei e Kirby (1995) e Wei et al. (1995). As diferenças entre o modelo aqui apresentado, para o sistema de uma única camada, e o apresentado em Wei et al. (1995) resultam da existência de termos adicionais, devidos à dependência temporal da profundidade, e do tratamento numérico de alguns termos dispersivos não-lineares.

As equações são resolvidas recorrendo a um esquema de previsão-correcção de ordem superior. No passo de previsão utiliza o modelo explícito de terceira ordem em tempo de Adams-Bashford e no passo de correcção recorre ao modelo implícito de quarta ordem em tempo de Adams-Moulton. O passo de correcção implícito utiliza um procedimento iterativo até satisfação de um critério de convergência previamente estabelecido.

Para simplificação das equações do esquema de previsão-correcção, as derivadas temporais da velocidade nas equações da quantidade de movimento são agrupadas na seguinte forma dimensional (Lynett e Liu, 2002a,b):

$$U = u + \frac{z_\alpha^2 - \zeta^2}{2} u_{xx} + (z_\alpha - \zeta)(hu)_{xx} - \zeta_x \left[ \zeta u_x + (hu)_x \right] \quad (1)$$

$$V = v + \frac{z_\alpha^2 - \zeta^2}{2} v_{yy} + (z_\alpha - \zeta)(hv)_{yy} - \zeta_y \left[ \zeta v_y + (hv)_y \right] \quad (2)$$

significando os índices x, y e t derivadas parciais,  $\zeta$  a variação da superfície livre e  $z_\alpha$  o nível  $z = z_\alpha(x, y, t)$  a que é medida a velocidade  $u_\alpha$ . Por questões de estabilidade e por serem requeridas menos iterações no processo de convergência, os termos não-lineares de origem dispersiva  $\nabla \left[ \zeta (\nabla \cdot (hu_\alpha)_t + h_u/\varepsilon) \right]$  e  $\nabla \left[ (\zeta^2/2) \nabla \cdot u_{\alpha t} \right]$  são reescritos na seguinte forma

$$\begin{aligned} \nabla \left[ \zeta \left( \nabla \cdot (hu_\alpha)_t + \frac{h_u}{\varepsilon} \right) \right] &= \nabla \left[ \zeta \left( \nabla \cdot (hu_\alpha) + \frac{h_t}{\varepsilon} \right) \right]_t - \nabla \left[ \zeta_t \left( \nabla \cdot (hu_\alpha) + \frac{h_t}{\varepsilon} \right) \right] \\ \nabla \left( \frac{\zeta^2}{2} \nabla \cdot u_{\alpha t} \right) &= \nabla \left( \frac{\zeta^2}{2} \nabla \cdot u_\alpha \right)_t - \nabla (\zeta \zeta_t \nabla \cdot u_\alpha) \end{aligned}$$

em que  $u_\alpha$  é o valor da velocidade  $u_\alpha(x, y, z_\alpha(x, y, t), t)$  medida ao nível  $z = z_\alpha(x, y, t)$ , obtendo-se a componente horizontal da velocidade  $u$  expressa em termos da velocidade  $u_\alpha$  por

$$u = u_\alpha - \sigma^2 \left\{ \frac{z^2 - z_\alpha^2}{2} \nabla (\nabla \cdot u_\alpha) + (z - z_\alpha) \nabla \left[ \nabla \cdot (hu_\alpha) + \frac{h_t}{\varepsilon} \right] \right\} + O(\sigma^4)$$

em que  $\sigma = h_0/l_0$  é um parâmetro adimensional, representando  $h_0$  e  $l_0$  escalas características dos comprimentos vertical e horizontal, respectivamente.

As equações da etapa de previsão escrevem-se

$$\zeta_{i,j}^{n+1} = \zeta_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{12} (23E_{i,j}^n - 16E_{i,j}^{n-1} + 5E_{i,j}^{n-2}) \quad (3)$$

$$U_{i,j}^{n+1} = U_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{12} (23F_{i,j}^n - 16F_{i,j}^{n-1} + 5F_{i,j}^{n-2}) + 2(F_1)_{i,j}^n - 3(F_1)_{i,j}^{n-1} + (F_1)_{i,j}^{n-2} \quad (4)$$

$$V_{i,j}^{n+1} = V_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{12} (23G_{i,j}^n - 16G_{i,j}^{n-1} + 5G_{i,j}^{n-2}) + 2(G_1)_{i,j}^n - 3(G_1)_{i,j}^{n-1} + (G_1)_{i,j}^{n-2} \quad (5)$$

em que

$$E = -h_t - [(\zeta + h) u]_x - [(\zeta + h) v]_y + \left\{ (\zeta + h) \left[ \left( \frac{1}{6}(\zeta^2 - \zeta h + h^2) - \frac{1}{2}z_\alpha^2 \right) S_x + \left( \frac{1}{2}(\zeta - h) - z_\alpha \right) T_x \right] \right\}_x + \left\{ (\zeta + h) \left[ \left( \frac{1}{6}(\zeta^2 - \zeta h + h^2) - \frac{1}{2}z_\alpha^2 \right) S_y + \left( \frac{1}{2}(\zeta - h) - z_\alpha \right) T_y \right] \right\}_y$$

$$F = -\frac{1}{2} \left[ (u^2)_x + (v^2)_x \right] - g\zeta_x - z_\alpha h_{xt} - z_{\alpha t} h_{xt} + (Eh_t + \zeta h_u)_x - [E(\zeta S + T)]_x - \left[ \frac{1}{2}(z_\alpha^2 - \zeta^2) (uS_x + vS_y) \right]_x - [(z_\alpha - \zeta) (u T_x + v T_y)]_x - \frac{1}{2} [(T + \zeta S)^2]_x$$

$$F_1 = \frac{\zeta^2 - z_\alpha^2}{2} v_{xy} - (z_\alpha - \zeta) (hv)_{xy} + \zeta_x [\zeta v_y + (hv)_y]$$

$$G = -\frac{1}{2} \left[ (u^2)_y + (v^2)_y \right] - g\zeta_y - z_\alpha h_{yt} - z_{\alpha t} h_{yt} + (Eh_t + \zeta h_u)_y - [E(\zeta S + T)]_y - \left[ \frac{1}{2}(z_\alpha^2 - \zeta^2) (uS_x + vS_y) \right]_y - [(z_\alpha - \zeta) (u T_x + v T_y)]_y - \frac{1}{2} [(T + \zeta S)^2]_y$$

$$G_1 = \frac{\zeta^2 - z_\alpha^2}{2} u_{xy} - (z_\alpha - \zeta) (hu)_{xy} + \zeta_y [\zeta u_x + (hu)_x]$$

e

$$S = u_x + v_y \quad T = h_t + (hu)_x + (hv)_y$$

Todas as derivadas espaciais de primeira ordem são calculadas com precisões de 4ª ordem ( $\Delta x^4 = \Delta y^4$ ), as quais requerem cinco pontos para o seu cálculo. As segundas derivadas espaciais são aproximadas por esquemas centrados de três pontos, resultando, por conseguinte, precisões de 2ª ordem para estas derivadas.

As expressões implícitas de 4ª ordem da etapa de correcção para a superfície livre,  $\zeta$ , e velocidades horizontais,  $u$  e  $v$ , escrevem-se

$$\zeta_{i,j}^{n+1} = \zeta_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{24} (9E_{i,j}^{n+1} + 19E_{i,j}^n - 5E_{i,j}^{n-1} + E_{i,j}^{n-2}) \quad (6)$$

$$U_{i,j}^{n+1} = U_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{24} (9F_{i,j}^{n+1} + 19F_{i,j}^n - 5F_{i,j}^{n-1} + F_{i,j}^{n-2}) + (F_1)_{i,j}^{n+1} - (F_1)_{i,j}^n \quad (7)$$

$$V_{i,j}^{n+1} = V_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{24} (9G_{i,j}^{n+1} + 19G_{i,j}^n - 5G_{i,j}^{n-1} + G_{i,j}^{n-2}) + (G_1)_{i,j}^{n+1} - (G_1)_{i,j}^n \quad (8)$$

O sistema de equações é resolvido começando pela etapa de previsão, obtendo-se em seguida os valores ds variáveis  $u$  e  $v$  via equações (1) e (2), respectivamente. Ambas as equações (1) e (2) resultam num sistema tridiagonal, após substituição das derivadas por diferenças finitas.

Uma vez previstos os valores das variáveis  $\zeta$ ,  $u$  e  $v$ , o passo seguinte consiste em corrigir os valores previstos destas variáveis recorrendo às expressões (6) a (8), sendo os valores finais das componentes da velocidade,  $u$  e  $v$ , calculados recorrendo de novo às equações (1) e (2), respectivamente. Após cada etapa implícita de correcção são reavaliados os erros, de

modo a verificar se é ou não necessário continuar o processo iterativo de correcção. É utilizado um duplo critério de verificação do erro, o qual consiste em verificar um ou ambos os critérios seguintes de erro local máximo e/ou erro local médio

$$\max \left| \frac{w^{n+1} - w_*^{n+1}}{w^{n+1}} \right| < \frac{\varepsilon}{100} \text{ e/ou } \frac{\sum |w^{n+1} - w_*^{n+1}|}{\sum |w^{n+1}|} < \varepsilon$$

Nestas expressões,  $w$  representa qualquer das variáveis  $\zeta$ ,  $u$  e  $v$ , e  $w_*$  representa os valores anteriores destas variáveis no processo iterativo. O valor do erro  $\varepsilon$  é considerado igual a  $10^{-6}$ .

O processo de rebentação da onda implementado no modelo COULWAVE é baseado num esquema descrito em Kennedy et al. (2000). Por se tratar de um modelo integrado na vertical, não é possível simular os efeitos tridimensionais que se desenvolvem fundamentalmente no plano vertical, em particular o processo de rebentação mergulhante. O esquema implementado considera termos adicionais de dissipação da energia de origem turbulenta, devida ao processo de rebentação, nas equações da quantidade de movimento, através de uma formulação paramétrica simples para a viscosidade turbulenta. Os termos adicionais de dissipação envolvem primeiras e segundas derivadas da velocidade, da profundidade e da viscosidade turbulenta, sendo o mecanismo de dissipação fundamentalmente função de um parâmetro de controlo e de variações temporais da

superfície livre. Apesar de conceptualmente simples e de fácil implementação, este esquema tem revelado uma razoável concordância entre resultados numéricos e experimentais para as diversas condições de agitação, tanto regular como irregular, em que o modelo tem sido aplicado.

### 3. GEOMETRIA DE BASE DO RECIFE

A escolha da geometria de um recife multifuncional, isto é, de uma estrutura que cumpra simultaneamente a função de proteger a costa e de melhorar as condições de surf nas proximidades da sua zona de implantação, está relacionada globalmente com o valor do ângulo de rebentação (peel angle). A determinação do valor do ângulo de rebentação é função das características da onda de projecto. Por exemplo, quanto maior for o valor da altura de onda menor será o valor do ângulo de rebentação, já que a onda rebenta antes e, conseqüentemente, refracta menos.

Outro aspecto determinante no dimensionamento do recife é a escolha do nível dos utilizadores: amadores, profissionais, etc. Neste estudo pretende-se que as condições de surf sejam as de surfistas amadores. Tal como se descreve em Ten Voorde et al. (2008), isto implica que o tipo de rebentação deve ser mergulhante (ou progressiva) e os valores do ângulo de rebentação devem ser superiores a  $40^\circ$ . Na Figura 2 apresentam-se, de forma esquemática, as geometrias de base do estudo.

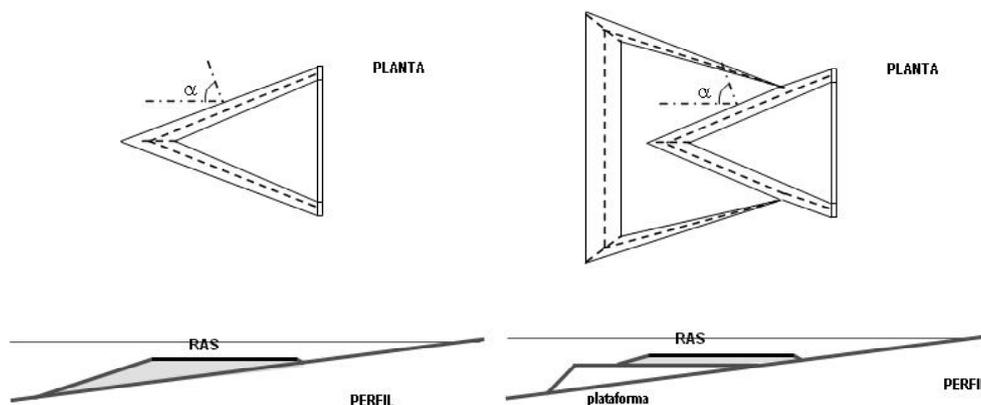


Figura 2 - Geometria de base do recife artificial utilizada no estudo.  
Figure 2 – Basic geometry of the artificial reef used in the study.

#### 4. DIMENSÕES EM PERFIL (2D)

As dimensões do recife a definir, no que se refere ao seu perfil, correspondem à profundidade da cota de coroamento da estrutura,  $s$ , e ao declive do talude,  $1:b$ , Figura 3. Os declives quer da plataforma quer do tardo do recife devem ser os menores possíveis, de forma a minimizar o volume total de material que compõe o recife.

##### 4.1. Declive do recife

Pretende-se construir uma estrutura tal que as ondas mais frequentes na costa oeste portuguesa rebentem sobre o recife com um tipo de rebentação mergulhante, como se referiu em 3. Assim, utilizando a teoria linear, fizeram-se alguns cálculos para verificar, com diferentes condições de agitação, qual o tipo de rebentação que se obteria para um determinado declive do recife.

Fizeram-se cálculos com declives,  $1:b$ , variáveis entre  $1:6$  e  $1:18$  (Ten Voorde et al., 2008) e alturas de onda na rebentação entre  $1,0$  e  $4,0$ m. O período manteve-se constante e igual a  $10,0$ s, que corresponde a ondas de vaga de ocorrência frequente na costa oeste portuguesa. Com base neste estudo optou-se por um declive de  $1:10$ , já que com este declive a onda de projecto no que respeita ao surf (de  $2,0$ m) apresenta rebentação mergulhante sobre o recife.

##### 4.2. Profundidade do recife

A cota de coroamento do recife é determinada por dois aspectos principais: deve ser suficientemente elevada para que a onda de projecto rebente sobre o recife e deve ser suficientemente profunda para não pôr em risco a segurança dos surfistas.

O primeiro aspecto está relacionado com a altura da onda de projecto e com a profundidade de rebentação. Assim, considerando que a altura de rebentação,  $H_b$ , igual a  $1,3h$  (Ten Voorde et al., 2008), onde  $h$  é a profundidade, para  $H_b = 2,0$ m obtém-se uma profundidade aproximada para o recife de  $1,5$ m.

Embora os surfistas tenham os seus próprios critérios de segurança, este factor deve ser tido em conta ao definir a cota de coroamento do recife. Para piscinas de mergulho, as regulamentações da FINA (Corbett et al., 2005) sugerem uma profundidade de submersão de  $1,8$ m. No entanto, os surfistas ao cáirem das pranchas não o fazem perpendicularmente, como no mergulho. Assim, esta profundidade pode ser reduzida sem colocar os surfistas em sérios riscos de danos físicos. Com base nestas considerações e nos trabalhos de Corbett e Tomlinson (2002), conclui-se que a cota de coroamento deve ser tal que a altura de água sobre o recife deve ser superior à altura de onda de projecto em águas profundas. Assim, para uma altura de onda de projecto igual  $1,5$ m em águas profundas teremos uma cota de coroamento do recife inferior a  $1,5$ m.

É de referir que a onda de projecto é aqui definida para as condições de baixa-mar, já que este é o nível crítico de maré em termos de profundidade sobre o recife. No entanto, o efeito do nível da maré no valor do ângulo de rebentação, especialmente em locais com grandes desníveis de maré, como é o caso da costa oeste portuguesa, deve ser tido em conta no estudo da geometria do recife.

A profundidade da plataforma deve ser também definida. Para a altura do delta foi definido um valor mínimo de  $2,5$ m (Ten Voorde et al., 2008), o que corresponde a uma profundidade da plataforma de  $4,0$ m ( $2,5$ m de altura do delta e  $1,5$ m de coroamento do recife).

Para estudar a influência do nível de maré nos valores dos parâmetros de surfabilidade, foram realizados cálculos em modelo numérico para diferentes níveis de maré (Ten Voorde et al., 2008). Assim, estudaram-se duas profundidades distintas, que correspondem a dois valores de  $s$  (ver Figura 3):  $1,5$ m (baixa-mar) e  $3,0$ m (nível médio). Na Tabela 1 apresentam-se os valores do ângulo de rebentação para estes dois níveis e para diferentes valores da altura de onda ao largo,  $H$ , e do período,  $T$ , e para uma

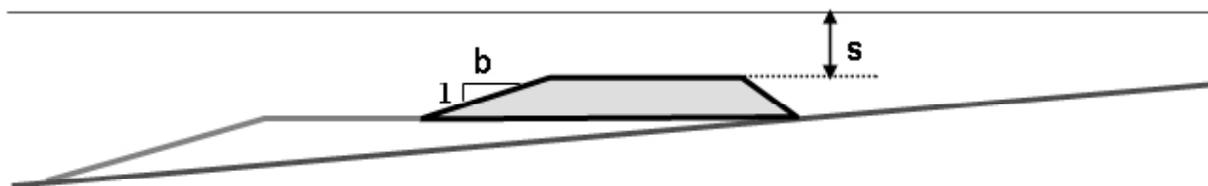


Figura 3 - Geometria em perfil do recife artificial utilizada no estudo.  
Figure 3 - Geometry in profile of the artificial reef used in the study.

Tabela 1. Valores do ângulo de rebentação para níveis de maré (valores de s) de 1,5m (a) e 3,0m (b).  
Table 1. Values of the peel angle for levels of submergence (s values) of 1,5m (a) and 3,0m (b).

a)	T\H	1.0m	2.0m	3.0m	4.0m	b)	T\H	1.0m	2.0m	3.0m	4.0m
	6s	*	<b>35.7</b>	<b>44.6</b>	-		6s	*	*	*	-
	10s	*	<b>38.6</b>	<b>49.5</b>	x		10s	*	*	*	<b>46.5</b>
	14s	-	<b>41.8</b>	x	x		14s	-	*	<b>42.3</b>	<b>51.1</b>

\* = ondas propagam-se sobre o recife sem rebentar

x = ondas rebentam antes de atingir o recife

- = condições raras na costa oeste portuguesa

profundidade da plataforma da 4,0m (baixa-mar) e 5,5m (nível médio).

Como se pode verificar, para o valor mais elevado do nível de maré, a altura de onda para a qual as ondas rebentam sobre o recife é igual ou superior a 3,0m, o que as torna inacessíveis para amadores. Além disso, o ângulo de rebentação apresenta valores demasiado altos (superiores a 40°), o que se traduz em ondas não surfáveis nem por profissionais.

Assim, pode concluir-se que a escolha da cota de coroamento deve ter em conta não só as características das ondas no que se refere à prática de surf em baixa-mar, mas também nos demais níveis de maré, tendo-se em mente ainda o tipo de surfistas para os quais o recife é desenhado.

## 5. DIMENSÕES EM PLANTA

As dimensões a definir, no que se refere à configuração do recife em planta, correspondem ao ângulo do recife,  $\alpha$ , e às dimensões e forma da plataforma, como apresentado na Figura 2.

### 5.1 Ângulo do recife

O ângulo inicialmente escolhido para a geometria de base, tal como referido em 3., foi de 66° e baseou-se em considerações de ordem teórica (Ten Voorde et al., 2008). No entanto, estas considerações não têm em conta o efeito da concentração de energia que ocorre devido à geometria do recife. Este ângulo também tem grande influência nas correntes que se geram a sotamar do recife e que influenciam a circulação de sedimentos, com impacto na protecção costeira.

Para determinar o ângulo do recife e estudar a sua influência no padrão de circulação fizeram-se simulações com o modelo COULWAVE (Lynett e Liu, 2002a), para um recife sem plataforma. Escolheram-se dois ângulos:  $\alpha = 66^\circ$  e  $\alpha = 45^\circ$ . Consideraram-se diferentes condições de agitação (H e T) e diferentes valores da distância entre a cota de coroamento e a superfície (s). Na Figura 4 apresentam-se os resultados das velocidades para H = 1,5 m e T = 9,0s, no caso de  $\alpha = 66^\circ$  e s = 1,5m, e para H = 1,5m e T = 10,0s, no caso de  $\alpha = 45^\circ$  e s = 0,5m, respectivamente. O valor de s = 0,5m, embora se encontre abaixo do nível mínimo recomendado (ver ponto 4.2), foi escolhido por corresponder ao utilizado nos ensaios de Ranasinghe e Turner (2006), como se explicará no ponto 6. Embora as condições apresentadas não sejam as mesmas, é possível verificar que no caso de  $\alpha = 66^\circ$  não se observam células convergentes no tardo da estrutura, o que ocorre para o caso de  $\alpha = 45^\circ$ .

Dado que é preferível, em termos de transporte de sedimentos, ter células convergentes no tardo da estrutura, já que estas poderão levar à ocorrência de sedimentação nessa zona, o ângulo de rebentação de 45° parece ser o mais adequado. No entanto, são necessários mais estudos para verificar a influência conjunta do valor do ângulo do recife e do nível de maré nos padrões de velocidades no tardo da estrutura.

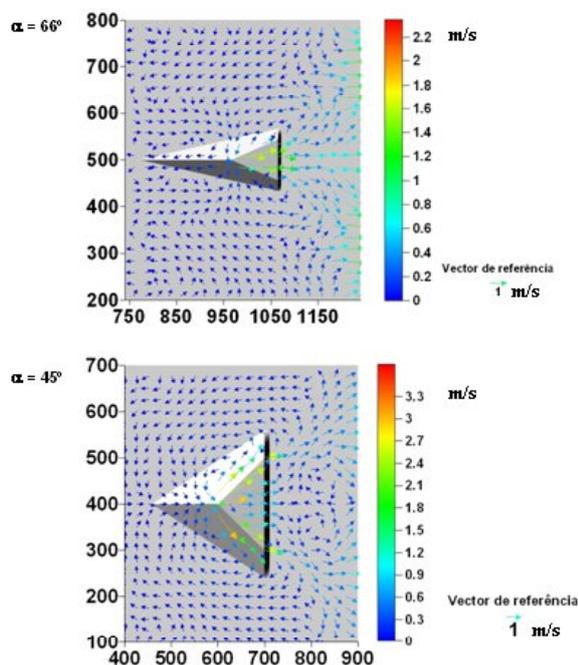


Figura 4 - Campos de velocidades obtidas com o modelo Coulwave para  $\alpha = 66^\circ$  e  $\alpha = 45^\circ$ , considerando  $H = 1,5\text{m}$  e  $T = 10,0\text{s}$ .

Figure 4 - Velocity field obtained by the Coulwave model for  $\alpha = 66^\circ$  and  $\alpha = 45^\circ$ , considering  $H = 1,5\text{m}$  and  $T = 10,0\text{s}$ .

## 5.2 Dimensões da plataforma

A existência da plataforma e a sua dimensão influenciam a agitação ao redor do recife. Para verificar em que medida isto ocorre, foram feitas simulações numéricas com o modelo COULWAVE (2DH), para uma onda de projecto de  $H = 1,5\text{m}$  e  $T = 9,0\text{s}$ . O ângulo do recife foi mantido em  $66^\circ$ . Na Figura 5 apresentam-se os resultados obtidos, em termos de velocidades em todo o domínio.

Como se pode observar, a plataforma influencia fortemente as velocidades no tardo do recife, levando a que, para os casos estudados, se gerem células convergentes perto da costa. No caso sem plataforma o padrão de velocidades é diferente, com células divergentes nessa zona. No entanto, a presença da plataforma induz velocidades dirigidas para o largo no delta da estrutura, que são prejudiciais para a prática de surf. Dado que, no caso em estudo, o principal objectivo do recife é a protecção costeira, a opção da plataforma deverá ser a escolhida. Para confirmar esta decisão, é necessário verificar o comportamento observado para um maior número de condições de agitação e nível de maré.

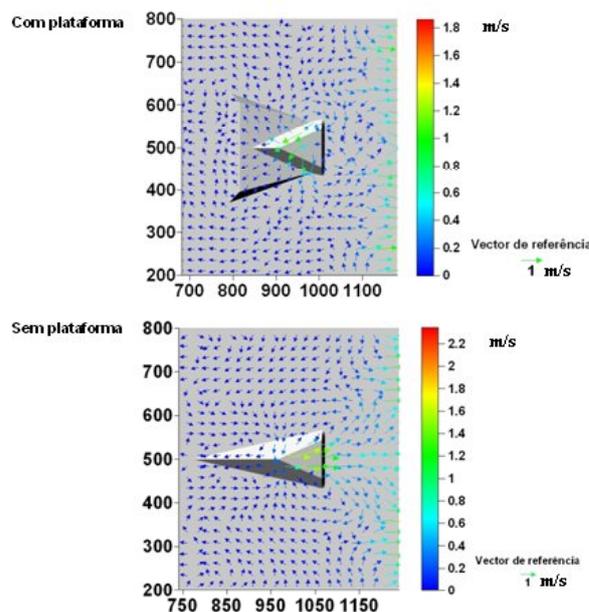


Figura 5 - Campos de velocidades obtidas com o modelo Coulwave para  $\alpha = 66^\circ$ ,  $H = 1,5\text{m}$  e  $T = 10,0\text{s}$ , com e sem plataforma.

Figure 5 - Velocity field obtained by the Coulwave model for  $\alpha = 66^\circ$ ,  $H = 1,5\text{m}$  and  $T = 10,0\text{s}$ , with and without platform.

## 6. DISTÂNCIA À LINHA DE COSTA

Um parâmetro que não está directamente relacionado com a geometria do recife, mas que é também determinante no que se refere à protecção costeira, é a distância do recife à linha de costa. Ranasinghe e Turner (2006) propuseram um modelo empírico que relaciona a resposta da costa com a distância do recife à linha de costa. De acordo com este modelo, a costa sofreria deposição caso  $S_a/SZW > 1,5$  e erosão quando  $S_a/SZW < 1,0$ , onde  $S_a$  é a distância entre o vértice do coroamento da estrutura e a linha de costa e  $SZW$  é a largura da zona de rebentação.

Para analisar a influência de  $S_a$  no padrão de velocidades no tardo do recife, foram realizadas simulações com o modelo Coulwave (2DH) para uma onda de projecto com  $H = 1,5\text{m}$  e  $T = 10,0\text{s}$ . O ângulo do recife foi mantido em  $45^\circ$  e o declive do recife é de 1:12, tal como nas simulações de Ranasinghe e Turner (2006). A distância entre a cota de coroamento e o nível de repouso é de  $0,5\text{m}$ . Na Figura 6 apresentam-se as características do caso de estudo, onde  $S$  é a distância entre o tardo da estrutura e a linha de costa. As condições testadas encontram-se descritas na Tabela 2.

Os resultados obtidos são apresentados na Figura 7 em termos do campo de velocidades. Da análise da figura pode verificar-se que, o caso 1, que é similar ao de Ranasinghe e Turner (2006), apresenta o mesmo padrão obtido por este autor, com quatro células circulares. O padrão dos restantes casos é semelhante ao do caso 1, com as mesmas 4 células na retaguarda do recife.

Os resultados obtidos não permitem tirar conclusões sobre qual é a melhor dimensão característica da distância do recife à costa. Note-se que todas as simulações foram realizadas com um ângulo do recife de 45°; tal conduz a que a estrutura seja mais estreita nos casos 2 e 3 que no caso 1, o que pode influenciar os resultados. Assim, é necessário efectuar um maior número de cálculos a fim de poder obter resultados conclusivos.

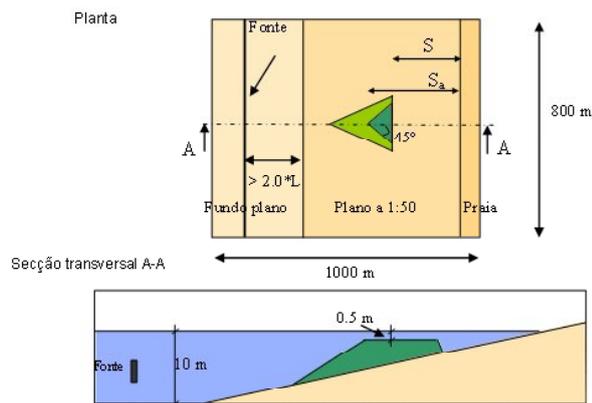


Figura 6 - Geometria do recife artificial utilizada nas simulações numéricas.

Figure 6 - Geometry of the artificial reef used in the numerical simulations.

Tabela 2. Condições dos testes realizados com o modelo Coulwave (2DH).

Table 2. Test conditions using the Coulwave model (2DH).

Teste	Sa (m)	S (m)	T (s)	H (m)	h (m)
1 (a)	250	200	10.0	1.5	10.0
2 (b)	300	200			
3 (c)	250	150			

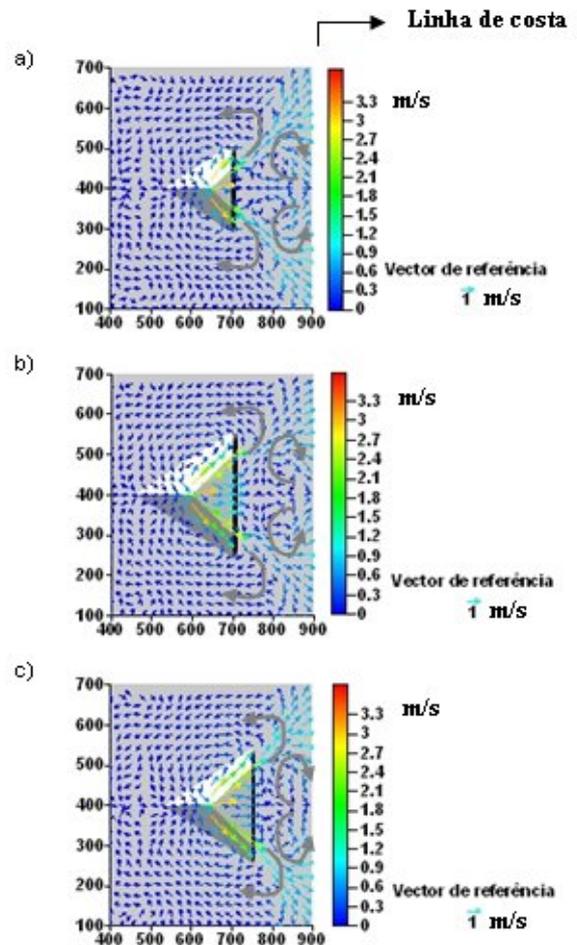


Figura 7 - Campos de correntes ao redor do recife para os casos dos testes 1(a), 2(b) e 3(c).

Figure 7 - Current fields around the reef for the test cases 1(a), 2(b) e 3(c).

## 7. TRABALHOS FUTUROS

Os resultados dos estudos em modelo numérico sobre o funcionamento do recife realizados até ao momento no que respeita quer à protecção costeira quer à melhoria das condições para a prática de surf permitiram tirar as seguintes conclusões preliminares no que se refere às características geométricas da estrutura:

- A presença da plataforma sob o recife em forma de delta é vantajosa no que se refere à protecção costeira da zona adjacente à estrutura;

- O ângulo do recife deve ser próximo de 45°.

Para confirmar os resultados obtidos, serão realizados ensaios em modelo numérico que permitam

aprofundar o conhecimento da influência do recife no transporte de sedimentos na zona da costa adjacente à estrutura e na melhoria das condições de surf da região. Serão analisados em maior detalhe a influência das seguintes características geométricas do recife:

- Presença da plataforma;
- Cota de coroamento da estrutura;
- Profundidade da plataforma;
- Ângulo do recife;
- Distância do recife à linha de costa.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projecto de investigação “Novos conceitos de protecção para a costa Portuguesa” (PTDC/ECM/66516/2006) financiado pela FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, Portugal.

Os autores agradecem ao Instituto de Investigação Interdisciplinar da Universidade de Coimbra, Portugal, o financiamento da Bolsa de Doutoramento da Eng. Mechteld ten Voorde.

## BIBLIOGRAFIA

- Agnon, Y., Madsen, P.A. & Schaffer, H. (1999) - A new approach to high order Boussinesq models. *Journal of Fluid Mechanics*, 399:319-333.
- ASCE Task Committee on Sea-Level Rise and Its Effects on Bays and Estuaries (1992) - Effects of sea-level rise on bays and estuaries. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(1):1-10.
- Carmo, J.S.A. (2004) Modelação hidrodinâmica em condições de água pouco profunda. Aplicações. *Revista Recursos Hídricos*, Ed. APRH, 25(2):43-56.
- Carmo, J.S.A. & Marques, J.C. (2003) - Proposta de princípios orientadores para o desenvolvimento sustentável da zona costeira Portuguesa. II Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, Recife, Brasil.
- Carmo, J.S.A., Reis, C.S. & Freitas, H. (2005) - Protecção dunar: Um caso de estudo na costa Portuguesa. III Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, Maputo, Moçambique.
- Corbett, B.B. and Tomlinson, R. (2002) - Noosa Main Beach Physical Modelling Griffith Centre for Coastal Management Research Report No. 17.
- Corbett, B.B., Tomlinson, R.B., Jackson, L.A. (2005) - Reef breakwaters for coastal protection safety aspects and tolerances. *Proceedings of the 17th*

- Australasian Coastal & Ocean Engineering Conference* (Adelaide, Australia).
- Dias, J.M.A. (2003) - Portugal e o Mar: Importância da Oceanografia para Portugal. e-book, in [http://w3.ualg.pt/~jldias/JAD/e\\_b\\_PortMar.html](http://w3.ualg.pt/~jldias/JAD/e_b_PortMar.html).
- Gobbi, M.F., Kirby, J.T. & Wei, G. (2000) - A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part II. Extension to  $O(kh)^4$ . *Journal of Fluid Mechanics*. 405:182-210.
- Gomes, F.V. e Pinto, F.T. (1997) - A opção “protecção” para a costa oeste portuguesa. In: G. Soares de Carvalho, F. Veloso Gomes e F. Taveira Pinto eds., *Colectânea de Ideias sobre a Zona Costeira de Portugal*. Associação Eurocoast-Portugal, pp. 163-186.
- Houghton, J. (1997) - *Global warming the complete briefing*. Cambridge University Press, 251 p.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2007) - *Climate Change 2007: Synthesis Report*. e-book in: [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf), 52p.
- Jackson, L.A., Tomlinson, R., Turner, I., Corbett, B., D’Agata, M., McGrath, J. (2005) - Narrowneck artificial reef; results of 4 yrs monitoring and modifications. *Proceedings of the 4th International Surfing Reef Symposium* (Manhattan Beach, California, USA). ([www.coastalmanagement.com.au](http://www.coastalmanagement.com.au))
- Kennedy, A.B., Chen, Q., Kirby, J.T. & Dalrymple, R.A. (2000) - Boussinesq modeling of wave transformation, breaking, and runup. Part I: 1D. *Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering* 126(1):39-47.
- Liu, P.L.-F. (1994) - Model equations for wave propagation from deep to shallow water. In: P. L.-F. Liu (ed.), *Advances in Coastal Engineering*, 1:125-157.
- Lynett, P. & Liu, P.L.-F. (2002a) - A Multi-Layer Approach to Water Wave Modeling *Journal of Fluid Mechanics*.
- Lynett, P. & Liu, P.L.-F. (2002b) - Modeling Wave Generation, Evolution, and Interaction with Depth Integrated, Dispersive Wave Equations - COULWAVE Code Manual, Cornell University Long and Intermediate Wave Modeling Package.
- Madsen, P.A. & Sorensen, O.R. (1992) - A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part II: A slowly varying bathymetry. *Coast. Engineering*. 18:183-204.
- Madsen, P.A. & Schaffer, H. A. (1998) - Higher order Boussinesq-type equations for surface gravity waves - Derivation and analysis. *Royal Society of*

- London A 356:1-60.
- Nwogu, O. (1993) - Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 119(6):618-638.
- Peregrine, D. H. (1967) - Long waves on a beach. *Journal of Fluid Mechanics*, 27:815-827.
- Ramos, F.S. (1997) - Uma estratégia de intervenção na linha de costa. . In: G. Soares de Carvalho, F. Veloso Gomes e F. Taveira Pinto eds., *Colectânea de Ideias sobre a Zona Costeira de Portugal*. Associação Eurocoast-Portugal, 151-161.
- Ranasinghe, R. & Turner, I.L. (2006) - Shoreline response to multi-functional artificial surfing reefs: A numerical and physical modeling study. *Journal of Coastal Engineering* 53:589-611.
- Reis, C.S. & Freitas, H. (2002) - Rehabilitation of the Leirosa sand dunes, *Littoral 2002: The Changing Coast*. Eurocoast/EUCC (Porto, Portugal, 22-26 Setembro), III:381-384.
- Reis, C.S., Freitas, H. & Antunes do Carmo, J. (2005) - Leirosa sand dunes: A case study on coastal protection. *Proc. IMAM 2005*, in: Guedes Soares, Garbatov & Fonseca (eds), *Maritime Transportation and Exploitation of Ocean and Coastal Resources*
- Reis, C.S., Antunes do Carmo, J. & Freitas, H. (2008) - Learning with nature: A sand dune system case-study (Portugal). *Journal of Coastal Research* (no prelo).
- Miranda, P., Coelho, F.E.S., Tomé, A.R. & Valente, M.A. (2002) - , 20th Century Portuguese Climate and Climate Scenarios, 2005. In: F.D. Santos, K. Forbes & R. Moita (eds.), *Climate Change in Portugal: Scenarios, Impacts and Adaptation Measures SIAM\_project*. E-book in: [http://www.siam.fc.ul.pt/SIAM\\_Book/2\\_ClimateScenarios.pdf](http://www.siam.fc.ul.pt/SIAM_Book/2_ClimateScenarios.pdf), 60 páginas
- Ten Voorde, M., Antunes do Carmo, J.S. & Neves, M.G., (2008) - Designing a Preliminary Multi-Functional Artificial Reef to Protect the Portuguese Coast, *Journal of Coastal Research* (no prelo).
- Ten Voorde, M., Didier, E., Neves, M.G., Anselmo, A., Aveiro, L., Gil, L. & Antunes do Carmo, J.S. (2007) - Modelação numérica de um recife artificial para a prática de surf: Comparação de resultados obtidos por três modelos matemáticos. *5as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Lisboa, Portugal, Outubro.
- Wei, G. & Kirby, J.T. (1995) - A time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. 120:251-261.
- Wei, G., Kirby, J.T., Grilli, G. & Subramanya, R. (1995) - A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part I. Highly nonlinear unsteady waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 294:71-92.



## Nível de Antropização X nível de uso das praias de Porto Seguro/BA: Subsídios para uma avaliação da capacidade de suporte\*

Iracema Reimão Silva<sup>1</sup>, Abílio Carlos da Silva Pinto Bittencourt<sup>2</sup>,  
Sylvio Bandeira de Mello e Silva<sup>3</sup>, José Maria Landim Dominguez<sup>4</sup>,  
José Rodrigues de Souza Filho<sup>5</sup>

---

### RESUMO

Como uma consequência direta da expansão das atividades turísticas nas praias do município de Porto Seguro, tem havido um considerável crescimento na população fixa nas áreas urbanas da sua região costeira, submetendo os ecossistemas a uma crescente pressão pelo turismo. Após uma análise do nível de antropização e das condições de acesso à região costeira em relação aos níveis de uso das praias por banhistas/turistas, foi possível discriminar duas zonas costeiras com características distintas. Na primeira, da praia de Mutá à praia de Pitinga – com excelente acessibilidade e com nível de antropização de médio a alto – os níveis de uso das praias não dependem desses parâmetros. Este fato é aqui relacionado à circunstância de que os usuários, uma vez freqüentando qualquer praia desta zona, podem freqüentar também as outras praias, pelas condições favoráveis que são oferecidas. Na segunda zona, da praia de Lagoa Azul à praia de Corumbau – com acessibilidade ruim ou muito ruim e baixos níveis de antropização – os níveis de uso das praias variam de uma

---

1 Autor correspondente, [iracemars@ucsal.br](mailto:iracemars@ucsal.br); [iracemars@yahoo.com.br](mailto:iracemars@yahoo.com.br), Superintendência de Pesquisa e Pós-Graduação/Universidade Católica do Salvador, Av. Anita Garibaldi, 2981, 41940-450 – Salvador, Bahia, Brasil.

2 Laboratório de Estudos Costeiros/CPGG /Instituto de Geociências/Universidade Federal da Bahia, Rua Caetano Moura, 123, CEP40210-340, Bahia, Brasil

3 Superintendência de Pesquisa e Pós-Graduação/Universidade Católica do Salvador, Av. Anita Garibaldi, 2981, 41940-450 – Salvador, Bahia, Brasil.

4 Laboratório de Estudos Costeiros/CPGG /Instituto de Geociências/Universidade Federal da Bahia, Rua Caetano Moura, 123, CEP40210-340 – Salvador, Bahia, Brasil.

5 Faculdade de Tecnologia e Ciências, Rua Yvan Barreto de Carvalho, Quadra 06, Travessa Petrobrás, nº 22, STIEP, CEP41770-150 – Salvador, Bahia, Brasil.

---

\* Submissão – 23 Outubro 2007; Avaliação - 4 Janeiro 2008; Recepção da versão revista - 20 Fevereiro 2008; Aceitação - em 21 Fevereiro 2008; Disponibilização on-line - 11 de Março de 2008

maneira que depende desses parâmetros. Nesse caso, as praias com melhores condições de acesso são as mais freqüentadas. A capacidade de acomodação ideal foi aqui avaliada segundo a percepção dos usuários em 8m<sup>2</sup> de praia para cada banhista/recreacionista. Tal nível pode ser visto como um nível de saturação para o estabelecimento da capacidade de suporte dessas praias, embora as áreas costeiras com maiores níveis de antropização (da praia de Ponta Grande à praia de Pitinga) apresentem níveis de uso inferiores ao nível ideal. Quanto às praias com baixos níveis de antropização (da praia de Pedra Grande à praia de Corumbau, e da praia de Lagoa Azul à praia de Taipe), é sugerido manter as condições atuais de acessibilidade com o propósito de preservar a sua qualidade ambiental.

---

## ABSTRACT

*As a direct consequence of tourism activities expansion in the beaches of Porto Seguro municipality, there is a considerable growth of fixed population and of urban areas in the coastal region, submitting the ecosystems to a growing pressure from tourism. After making an analysis of the human impact and of the accessibility conditions in the coastal region related to the beaches use levels from sea-bathers/tourists, it was possible to discriminate two coastal zones with distinct characteristics. In the first one, from Mutá beach to Pitinga beach, with excellent accessibility and with human impact from intermediate to high levels, the beach use levels do not depend on this parameters. This fact is here related to the circumstance that the users once frequenting any beach of this zone may be stimulated by the favorable conditions that are offered to frequent the others beaches. In the second zone, from Lagoa Azul beach to Corumbau beach, with bad or very bad accessibility and low human impact levels, the beaches use levels generally change in a way depending directly on this parameters. In this case, the beaches with better accessibility are most demanded. The ideal accommodation capacity was here evaluated following the users perception – 8 square meters of the beach for each sea-bather/tourist –, and such level could be seen as a saturation level for the establishment of the carrying capacity of these beaches although the coastal areas with high human impact levels (from Ponta Grande beach to Pitinga beach) present beach use levels lower than the ideal level. Regarding the beaches with low human impact levels (from Pedra Grande beach to Corumbau beach, from Lagoa Azul beach to Taipe beach) it is suggested to maintain the actual accessibility conditions in order to preserve its environmental quality .*

---

## 1. INTRODUÇÃO

O uso das praias para o turismo deverá se constituir em um dos mais significativos desafios de gerenciamento costeiro no século XXI (Orams, 2003). Efetivamente, as praias têm-se destacado como um dos ambientes naturais mais procurados pelos turistas em todo o mundo, em função da preferência recreacional de turismo e de lazer pelo modelo “sol, areia e mar” (Wiegel, 1994; Cin & Simeoni, 1994; Vera *et al.*, 1997; Kullenberg, 2001; Hall, 2001; Midaglia, 2001; MacLeod *et al.*, 2002; Ergin *et al.*, 2006). Como consequência, os ecossistemas costeiros estão sendo submetidos a uma grande pressão por atividades recreacionais, o que tem causado degradação ambiental, em alguns casos com destruturações irreversíveis (Smith, 1992; Breton *et al.*, 1996; Laskshmi & Rajagopalan, 2000; Coriolano, 2001; Midaglia, 2001; Orams, 2003; Pereira da Silva, 2004), fazendo com que algumas praias antes muito procuradas passem a não mais agradar aos turistas (Midaglia, 2001).

Em relação ao cenário acima, as políticas públicas têm tido quase sempre, como aponta Pereira da Silva (2004), um caráter meramente reativo, ao invés de proativo, consubstanciadas em intervenções visando

restabelecer o equilíbrio homem/ambiente. Todavia, como enfatizam Masselink & Hugles (2003), é necessário planejar um gerenciamento com o sentido de coordenar os diferentes usos da zona costeira, a fim de evitar conflitos. Como consideram Williams & Sothorn (1996), tal gerenciamento deve ter como propósito, fundamentalmente, conservar tanto quanto possível a qualidade do cenário costeiro no seu estado natural, facilitando ao público, ao mesmo tempo, a possibilidade de desfrutá-lo através de atividades recreacionais e a conservação do cenário natural. Com o sentido de alcançar tal objetivo, tem sido amplamente adotado o conceito de “capacidade de suporte” (De Ruick *et al.*, 1997; Inglis *et al.*, 2000; Archer & Cooper, 2001; Williams & Gill, 2001; Murphy, 2001; Silva, 2002; Polette & Rucci, 2003), que descreve a relação entre o tamanho da população que faz uso de uma determinada região e as mudanças causadas pela mesma nos recursos naturais. Ou seja, é assumido que existe, no caso das praias, um determinado número de pessoas, além do qual, a degradação das mesmas e da região imediatamente contígua à sua retaguarda poderá se tornar irreversível. Caso ocorra uma extensão crítica dos elementos de capacidade, é bastante provável que o lugar turístico entre em crise, podendo reduzir a sua competitividade

e declinar, como pressupõe o modelo do ciclo do produto para o turismo elaborado por Butler (1980), o qual prevê uma hipotética seqüência em seis estágios evolucionários: exploração, envolvimento, desenvolvimento, consolidação, estagnação e declínio ou rejuvenescimento.

O município de Porto Seguro/Bahia (Fig. 1), que é um dos principais pólos turísticos do Brasil, recebe anualmente mais de 1 milhão de turistas (Jornal A Tarde, 02/02/2006). Grande parte destes turistas é atraída pelos seus recursos naturais, especialmente pelas suas praias associadas a ecossistemas como recifes de corais, manguezais e falésias (Silva *et al.*, 2001), e pelos seus recursos culturais, sobretudo históricos, mas, também, por uma série de eventos que costumam ocorrer nas praias (festas, shows, músicas, danças, etc).

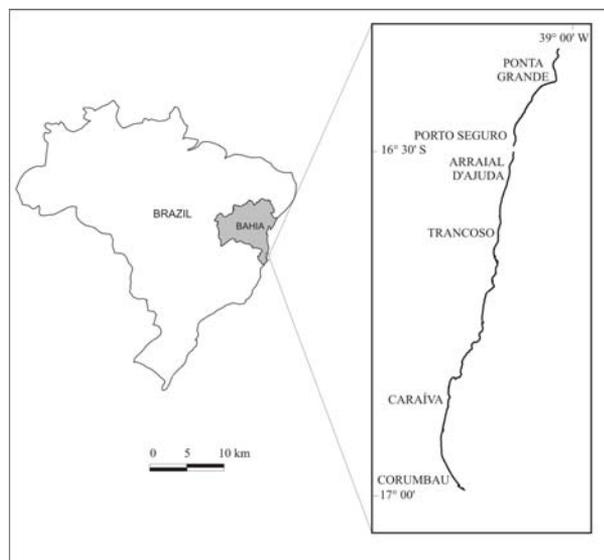


Figura 1. Mapa de localização do município de Porto Seguro.

*Figure 1. Map of location of Porto Seguro municipality.*

A ocupação e o turismo na região costeira do município de Porto Seguro vêm crescendo aceleradamente nos últimos anos, devido principalmente à melhoria nas vias de acesso e, hoje, essa região é um dos principais destinos turísticos do Brasil, já com destaque internacional (Silva, 1996). Na cidade de Porto Seguro a quantidade de leitos (em hotéis, pousadas, albergues e campings) passou de 6.853 em 1992 para 28.019 em 1998, atingindo em 2007, 32 mil leitos, segundo dados disponíveis na

Bahiatursa – Empresa de Turismo da Bahia (BAHIATURSA, 2001).

O crescimento da população do município de Porto Seguro é uma consequência direta da expansão das atividades turísticas: 34.661 habitantes em 1991 contra 95.721 habitantes em 2000, com base em censamentos oficiais, e 112.947 em 2007, segundo a última Contagem da População/IBGE (IBGE, 2007).

Pesquisas realizadas na região de Porto Seguro pela Secretaria de Cultura e de Turismo do Estado da Bahia e pela Bahiatursa, nos meses de janeiro e julho de 2001, mostraram o perfil do turista que visita esta região (BAHIATURSA, 2001). Segundo este trabalho, a maior parte dos turistas é formada por brasileiros (89,3%) vindos, principalmente, de São Paulo (28,1%), Minas Gerais (23,2%) e Rio de Janeiro (9,7%) e, o restante, de outros estados e de outras cidades da Bahia. Os turistas estrangeiros (10,7%) são formados especialmente por argentinos (7,5%). Além destes, são encontrados turistas vindos do Chile, Uruguai, Alemanha, Espanha, Itália, Portugal e Suíça. O passeio foi o principal motivo para a viagem da maior parte dos entrevistados (88,3%), sendo que os atrativos naturais foram apontados como a principal motivação para o passeio (95,1%). Dessa forma, pelo fato de as praias do município de Porto Seguro serem bastante procuradas por suas qualidades cênica e ambiental (Silva *et al.*, 2003), algumas praias têm sido submetidas a uma crescente pressão pública, já passando atualmente por uma fase de declínio quanto a essas qualidades, especialmente no que se refere à retirada da vegetação natural, degradação de manguezais e recifes de corais, poluição associada à presença de lixo e contaminação das águas costeiras com esgoto doméstico.

O objetivo do presente trabalho é oferecer subsídios para a estimativa da capacidade de suporte das praias do município de Porto Seguro, considerando o nível de antropização, as condições de acesso à sua orla marítima, o nível de uso atual e a capacidade de acomodação ideal das praias.

## 2. MÉTODOS

A parte dos dados utilizados no presente trabalho referentes ao nível de antropização e às condições de acesso foram extraídos de Silva (2004) que, para tanto, se baseou em dados cartográficos obtidos através da compilação de mapas geológicos e planimétricos, fotografias aéreas e imagens de satélite, bem como em levantamentos de campo realizados em

setembro/2000, outubro/2001 e janeiro/2002. Estes dados são aqui apresentados em relação aos diferentes segmentos da linha de costa discriminados por Silva *et al.* (2003) em função das características fisiográficas das praias (Fig. 2A). Quando aos dados referentes ao nível de uso atual das praias por banhistas/recreacionistas, foram obtidos por levantamentos de campo realizados em setembro/2006 e janeiro/2007 e, os referentes ao nível de uso ideal segundo a percepção dos usuários, durante janeiro/2007. Os levantamentos relativos ao nível de uso foram realizados para cada praia individualmente, a partir da identificação das mesmas em GUIA BAHIA LITORAL (2000). As praias, dessa forma, foram divididas em células de 50 m de comprimento (as células compreendendo as zonas do berma e da face da praia), sendo então medidas em cada uma delas as suas larguras inicial e final. A partir destes foi valores, foi realizada a área de cada célula. Em cada célula foi então realizada a contagem do número de pessoas. Para essa contagem, as caminhadas foram realizadas no horário de 11:00 às 16:00h, considerado como de maior frequência segundo a experiência comum local. Buscou-se sempre realizar esta contagem, bem como as medidas de cada célula de praia, nos dias em que este horário correspondia a alturas de marés durante ou próximas à baixa-mar. Foi então calculada a relação entre a área de cada célula e o número de frequentadores, encontrando, assim, a área, em metros quadrados, de praia disponível para cada banhista/recreacionista. A contagem dos frequentadores foi realizada nas zonas denominadas de ativa (face da praia, local próximo ao mar e usado, por exemplo, para a prática de jogos como frescobol) e *solarium* (berma, local onde as pessoas tomam banho de sol e usam cadeiras e sombreros) (Pollete & Raucci, 2003). Na mesma oportunidade, foram realizadas, de uma maneira aleatória, 200 entrevistas intencionais a fim de estimar a preferência dos usuários acerca da disponibilidade do espaço praial. Durante estas entrevistas os usuários indicaram o tamanho da área de praia que consideram ideal para o seu uso, escolhendo uma das seguintes categorias: entre 2 e 6m<sup>2</sup>, entre 6 e 10m<sup>2</sup>, entre 11 e 15m<sup>2</sup> e superior a 15m<sup>2</sup>.

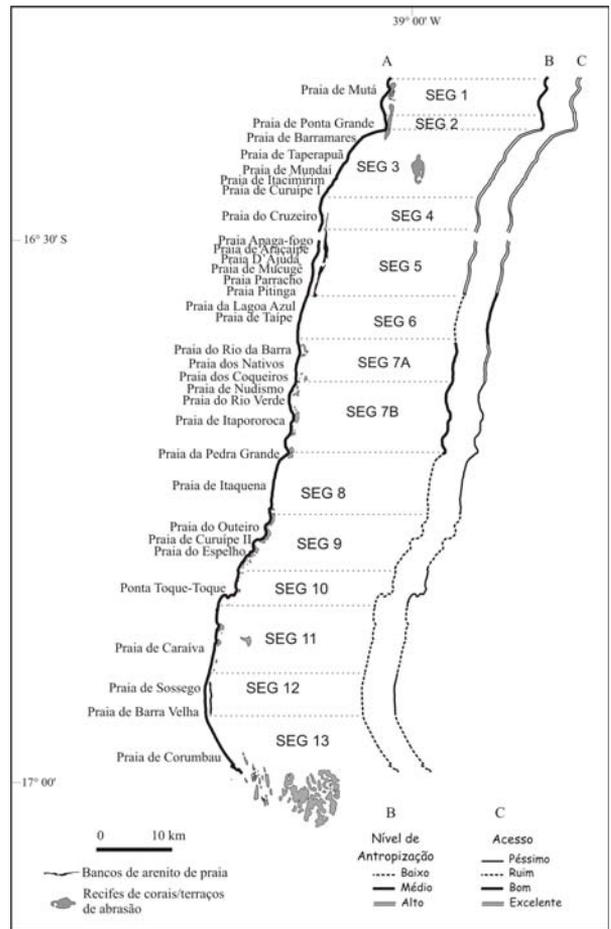


Figura 2. Linha de costa entre as praias de Mutá e Corumbau mostrando: A – morfologia costeira; B – diferentes níveis de antropização; C – condições de acesso.

Figure 2. Coastal line between the beaches of Mutá and Corumbau showing : A – coastal morphology; B- different levels of human impact; C: access conditions.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Condições de acesso às praias

O acesso à praia é um dos principais fatores condicionantes do seu uso. A construção de estradas que permitam o acesso às regiões costeiras favorece a sua ocupação e a atividade turística. Um outro fator importante é o acesso a partir das estradas até a praia. Na orla do município de Porto Seguro, em muitos locais, a ocupação por casas ou fazendas impede ou dificulta o acesso à praia. No caso dos trechos costeiros onde existem falésias ativas, o acesso, em geral, só é possível onde existem vales ou escadas que permitam o acesso à praia.

As praias foram classificadas em relação à qualidade de acesso através da discriminação dos trechos considerados com acesso péssimo, ruim, bom ou excelente (Silva, 2004) (Fig. 2C). Os trechos de praia com acesso péssimo são aqueles onde o acesso é dificultado ou impedido a) por propriedades que ocupam a retaguarda imediata da praia, como praticamente todo o trecho da praia de Itaquena à de Nudismo, b) por não existir praticamente nenhum tipo de estrada que permita este acesso, como nas praias de Sossego e Barra Velha e c) pela presença de falésias que não apresentam meios de acessar as praias, como no segmento 10. Foram classificadas como praias com acesso ruim aquelas a) onde o acesso é feito por estradas não asfaltadas em estado precário, que é o caso das praias de Caraíva e de Corumbau, e b) onde a presença de falésias não impede o acesso às mesmas, que é o que acontece nas praias do Outeiro, de Curuípe II e do Espelho. Praias com acesso bom são aquelas onde o mesmo é fácil, ainda que feito por estradas não asfaltadas, o que acontece nas praias de Taipe e de Lagoa Azul. Por fim, como trechos de acesso excelente foram considerados aqueles onde o acesso é feito por estradas asfaltadas até bem próximo à praia, o que é o caso das praias entre as de Pitinga e Mutá, e as do Rio da Barra, dos Nativos e dos Coqueiros.

### 3.2. Nível de antropização

Neste trabalho, o nível de antropização da região costeira à beira-mar é definido (Silva, 2004) como uma medida do grau de ocupação e dos impactos sofridos pelo ecossistema praias, avaliados a partir da análise dos seguintes aspectos: a) paisagem natural; b) poluição de canais ou rios; c) lixo; d) construções fixas à beira-mar; e) barracas de praia. Tais aspectos foram analisados em relação a cada um dos segmentos praias e receberam (Silva, 2004), arbitrariamente, os índices de 1 a 3 quando indicam, respectivamente, baixo, médio e alto grau de antropização, de acordo com a tabela 1, o que aparece expresso na tabela 2 e na figura 2B.

A alteração da paisagem natural é um importante indicador do nível de urbanização e antropização da região costeira. Na orla do município de Porto Seguro, nos locais mais urbanizados e de maior demanda turística, a paisagem natural, composta pela vegetação de restinga e de praia, terraços arenosos, manguezais, etc, foi substituída por construções como pousadas, hotéis, restaurantes, barracas de praia, quadras de esportes, estacionamentos, etc. A paisagem natural à

beira-mar encontra-se pouco alterada nos segmentos 1, 6, 7, 9, 10 e 11 (Fig. 3A), aos quais foi associado o índice 2 da tabela 1 (Tabela 2). Nos segmentos 8, 12 e 13 (Fig. 3B) a paisagem natural encontra-se praticamente inalterada pela ação antrópica e, nos segmentos de 2 a 5 (Fig. 3C), encontra-se bastante alterada, sendo atribuídos a estes segmentos, respectivamente, os índices 1 e 3 da tabela 1 (Tabela 2).

Tabela 1. Aspectos avaliados e os índices atribuídos a cada um deles indicando, respectivamente, baixo, médio e alto grau de antropização.

*Table 1. Evaluated aspects and assigned indexes to each beach showing, respectively, low, mean and high degree of human impact*

ASPECTOS AVALIADOS	ÍNDICE		
	1 (baixo grau de antropização)	2 (médio grau de antropização)	3 (alto grau de antropização)
Paisagem Natural	conservada	pouco alterada	alterada
Canais e Rios Poluídos	ausentes	—	presentes
Lixo	raro	—	comum
Construções Fixas à Beira-mar	nenhuma	poucas	muitas
Barracas de Praia	nenhuma	poucas	muitas

A descarga na praia de canais ou rios poluídos representa uma situação de grande impacto antrópico sobre o ecossistema praias. Na sede do município de Porto Seguro (Seg. 4) alguns canais que chegam à praia atravessam regiões de ocupação urbana desordenada, sem esgotamento sanitário, estando assim contaminados por esgoto doméstico. Dessa forma, para este segmento foi associado o índice 3 da tabela 1 e, para os demais, o índice 1 (Tabela 2).

A ocorrência de lixo ao longo das praias também é uma clara evidência de poluição. Nas praias de Porto Seguro foi considerada comum a ocorrência de lixo nos segmentos de 1 a 4 e 7, aos quais foi associado o índice 3 da tabela 1, enquanto aos demais, o índice 1 (Tabela 2).

A presença de construções fixas à beira-mar é também um importante indicador do grau de urbanização das praias (Cin & Simeoni, 1994). Essas construções (não discriminadas por Silva (2004) em termos de casas, pousadas, parques, estruturas de proteção etc], como foi mencionado anteriormente, alteram a paisagem natural, dificultam o acesso à praia e, quando muito próximas à linha de preamar de sizígia, impedem o livre recuo da faixa arenosa. Foi

Tabela 2. Nível de antropização das praias do município de Porto Seguro.

Table 2. Human impact level in the municipality of Porto Seguro.

Segmentos	Paisagem natural (a)	Canais ou rios poluídos	Lixo	Construções fixas à beira mar (b)	Barracas de praia (c)	Média (d)	Nível de antropização (e)
1	Pouco Alterada (2)	Ausentes (1)	Comum (3)	Poucas (2)	Poucas (2)	2,0	Médio
2	Alterada (3)	Ausentes (1)	Comum (3)	Muitas (3)	Nenhuma (1)	2,2	Médio
3	Alterada (3)	Ausentes (1)	Comum (3)	Poucas (2)	Muitas (3)	2,4	Alto
4	Alterada (3)	Presentes (3)	Comum (3)	Muitas (3)	Poucas (2)	2,8	Alto
5	Alterada (3)	Ausentes (1)	Comum (3)	Muitas (3)	Muitas (3)	2,6	Alto
6	Pouco Alterada (2)	Ausentes (1)	Raro (1)	Nenhuma (1)	Nenhuma (1)	1,2	Baixo
7	Pouco Alterada (2)	Ausentes (1)	Comum (3)	Poucas (2)	Poucas (2)	2,0	Médio
8	Conservada (1)	Ausentes (1)	Raro (1)	Nenhuma (1)	Nenhuma (1)	1,0	Baixo
9	Pouco Alterada (2)	Ausentes (1)	Raro (1)	Poucas (2)	Poucas (2)	1,6	Baixo
10	Pouco Alterada (2)	Ausentes (1)	Raro (1)	Nenhuma (1)	Nenhuma (1)	1,2	Baixo
11	Pouco Alterada (2)	Ausentes (1)	Raro (1)	Poucas (2)	Poucas (2)	1,6	Baixo
12	Conservada (1)	Ausentes (1)	Raro (1)	Nenhuma (1)	Nenhuma (1)	1,0	Baixo
13	Conservada (1)	Ausentes (1)	Raro (1)	Nenhuma (1)	Poucas (2)	1,2	Baixo

a) grau de antropização;

b) poucas barracas: quantidade inferior a 5 por segmento; muitas barracas: quantidade igual ou superior a 5 por segmento;

c) poucas: construções fixas à beira-mar ocupando menos de 50% do segmento; muitas: construções ocupando mais de 50% do segmento;

d) média aritmética dos valores de grau de antropização atribuídos em cada segmento: 1,0 – 1,6, Nível de Antropização Baixo; 1,61 – 2,3;

e) Nível de Antropização Médio; 2,31 – 3,0, Nível de Antropização Alto.

conferido o índice 3 da tabela 1 aos segmentos onde ocorrem construções fixas à beira-mar ocupando mais de 50% do segmento (Segs. 2, 4 e 5) (Fig. 3C), o índice 2, onde estas construções ocorrem em menos de 50% do segmento (Segs. 1, 3, 7 e 9) (Fig. 3A) e, por fim, o índice 1 aos segmentos onde estas construções não ocorrem (Segs. 6, 8) (Fig. 3B) (Tabela 2).

Um dos principais aspectos determinantes na escolha de uma praia por parte dos seus frequentadores é a presença de barracas de praia. Vários estudos (Tunstall & Penning-Rowsell, 1998; Morgan, 1999; MacLeod *et al.*, 2002) demonstram a preferência dos turistas por praias com as chamadas “facilidades” associadas às barracas de praia (como sanitários, chuveiros, cadeiras, bebidas, etc.). A presença das barracas de praia, especialmente nos locais mais frequentados, em geral acarreta impactos ao ambiente praiado associados à poluição das águas e sedimentos, presença de lixo, alteração da paisagem natural, alterações no balanço local de sedimentos, poluição sonora, alterações dos ecossistemas devido à utilização de iluminação artificial, etc. Assim, foi atribuído o índice 1 da tabela 1 aos segmentos onde não existem barracas de praia (Segs. 2, 6, 8, 10 e 12) (Fig. 3B), o índice 2 onde existem poucas barracas – considerado-se, neste caso, uma quantidade inferior

a cinco barracas por segmento – (Segs. 1, 4, 7, 9, 11 e 13) (Fig. 4A) e o índice 3 àqueles onde existem muitas barracas de praia – considerado-se, neste caso, uma quantidade igual ou superior a cinco barracas por segmento – (Segs. 3 e 5) (Fig. 4B) (Tabela 2).

A classificação do nível de antropização de cada praia (Silva, 2004) foi feita a partir da média aritmética dos índices atribuídos a cada um dos aspectos acima analisados, tendo sido considerados como de níveis de antropização baixo, médio e alto, respectivamente, os segmentos que obtiveram valores entre 1,0 e 1,6; 1,61 e 2,3; 2,31 e 3,0 (Tabela 2, Fig. 2B). Observa-se, assim, que a maior parte da orla do município de Porto Seguro apresenta níveis de antropização baixo e médio. Já a orla das sedes de Porto Seguro (Segs. 3 e 4) e de Arraial D’Ajuda (Seg. 5) apresentam um nível de antropização alto. A orla entre Itaquena e Corumbau (Segs. 8 a 13) apresenta um baixo nível de antropização, enquanto que as de Mutá (Seg. 1), Ponta Grande (Seg. 2) e de Trancoso (Seg. 7) um nível de antropização médio.

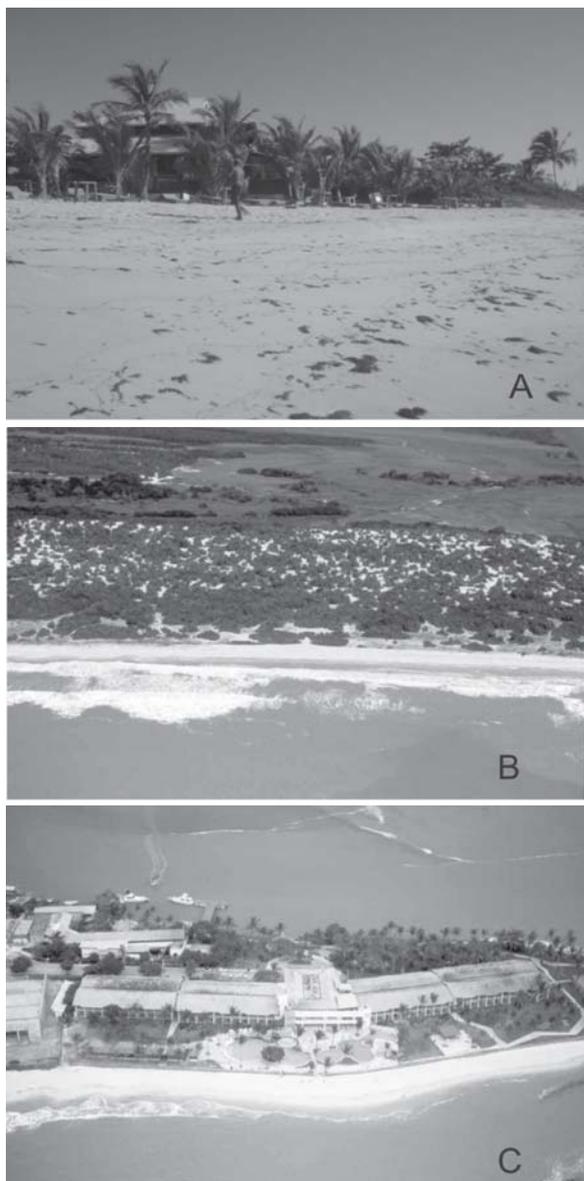


Figura 3. A) Paisagem natural pouco alterada, poucas construções fixas, poucas barracas de praia e praia pouco frequentada (Praia de Mutá) (Seg.1, Fig. 2); B) Paisagem natural conservada, ausência de barracas de praia e construções fixas (Praia de Itaquena) (Seg. 8, Fig. 2) e C) Paisagem natural alterada e muitas construções fixas à beira-mar (Praia de Apaga-fogo, em Arraial D'Ajuda) (Seg. 5, Fig.2).

*Figure 3. A) Few altered natural landscape, few fixed constructions, few cottages and beach less frequented (Praia de Mutá) (Seg.1, Fig.2); B) Preserved natural landscape, absence of cottages and fixed constructions (praia de Itaquena) (Seg. 8, Fig.2); C) Altered natural landscape and many fixed constructions in seashore (praia de Apaga-fogo, in Arraial D'Ajuda) (Seg.5, Fig.2).*



Figura 4. A) Poucas barracas de praia (Praia do Espelho) (Seg. 9, Fig. 2) e B) Muitas barracas de praia e praia muito frequentada (Praia de Pitinga) (Seg. 5, Fig. 2).

*Figure 4. A) Few cottages (Praia do Espelho) (Seg. 9, Fig.2) and B) Many cottages and very frequented beach (Praia de Pitinga) (Seg. 5, Fig.2).*

### 3.2. Níveis de uso atual e capacidade de acomodação ideal

A tabela 3 mostra a) a área de cada praia disponível para acomodação de banhistas/recreacionistas, b) a área média de cada praia utilizada por banhista / recreacionista (nível de uso atual), c) a capacidade de acomodação ideal de cada praia, em termos do número de pessoas por dia e d) a média de nível de uso atual para cada segmento costeiro. Em relação ao nível de uso atual, não foi encontrado, no dia em que foram visitadas, nenhum banhista/recreacionista nas praias dos segmentos 7B, 8 e 12 (Fig. 2A, Tabela 3). Quanto ao segmento 10, não foi possível acessar a sua praia, conforme mencionado anteriormente.

Tabela 3. Área de praia disponível para os banhistas/recreacionistas, nível de uso atual por praia e por segmento e capacidade de acomodação ideal nas praias do município de Porto Seguro.

Table 3. Available beach area to sea-bather/tourist, actual use level for each beach and for each segment and ideal accommodation capacity in the municipality of Porto Seguro.

Praias	Área de praia disponível para acomodação de banhistas /recreacionistas (m <sup>2</sup> )	Nível de uso atual por praia (área média utilizada por banh./rec.) (m <sup>2</sup> ) (janeiro/2007)	Capacidade de acomodação ideal (nº de pessoas por dia, considerando um nível de uso ideal de 8m <sup>2</sup> por banh./rec.)	Segmentos	Média do nível de uso atual por segmento (área média utilizada por banh./rec.) (m <sup>2</sup> ) (janeiro/2007)
Mutá	26000	90	3250	1	90
Ponta Grande	64000	165	8000	2	165
Barramares	18000	19	2250	3	18
Taperaçuá	23000	15	2875		
Mundaí	10000	14	1250		
Itacimirim	16000	22	2000		
Curuípe I	10800	20	1350		
Cruzeiro	14400	55	1800	4	55
Apaga-fogo	15000	32	1875	5	24
Araçaípe	10400	46	1300		
D' Ajuda	25000	36	3125		
Mucugê	12000	17	1500		
Parracho	12800	6	1600		
Pitinga	22000	8	2750	6	78
Lagoa Azul	48400	60	6050		
Taípe	119000	96	14875		
Rio da Barra	67500	49	8437	7A	22
Nativos	40000	9	5000		
Coqueiros	36000	8	4500		
Nudismo	16000	PD*	2000	7B	-
Rio Verde	22500	PD	2812		
Itapororoca	192000	PD	24000		
Pedra Grande	25000	PD	3125		
Itaquena	198000	PD	24750	8	-
Outeiro	21600	98	2700	9	65
Curuípe II	9000	47	1125		
Espelho	11200	50	1400		
Ponta Toque-Toque	NA**	-	-	10	-
Caraíva	240000	355	30000	11	355
Sossego	125000	PD	15625	12	-
Barra Velha	156000	PD	19500		
Corumbau	45000	380	5625	13	380

PD\* - Praia deserta no dia da visita

NA\*\* - Não acessível

As praias com maiores níveis de uso ao longo da orla do município de Porto Seguro são as de Parracho, Pitinga, Coqueiros e Nativos (Fig. 2A e Tabela 3) (Fig. 4B). Por outro lado, as com menores níveis de uso, ao lado daquelas já mencionadas anteriormente onde não foram encontrados banhistas/recreacionistas, são as de Ponta Grande, Caraíva e Corumbau (Fig. 2A e Tabela 3). Em relação a cada segmento costeiro, considerando a média do nível de uso das praias nele contidas, os que apresentam menores níveis de uso são os de número 3, 7A e 24, enquanto que os com maiores níveis de uso, os de número 13, 12 e 2 (Fig. 2 e Tabela 3).

Quanto à capacidade de acomodação ideal, como mencionado anteriormente, foi estimada considerando a percepção dos usuários das praias. Para tanto, foram utilizadas as praias com maior nível de uso (Tabela 3), tendo assim sido realizadas 80 entrevistas entre as praias de Parracho e Pitinga, 60, entre as de Nativos e Coqueiros e, 60, entre as de Barramares e Mundaí. Como resultado, a) 42% dos entrevistados indicaram uma preferência de disponibilidade de espaço praias entre 6 e 10m<sup>2</sup>, b) 27%, entre 2 e 6 m<sup>2</sup>, c) 16%, entre 11 e 15m<sup>2</sup> e d) 15%, acima de 15m<sup>2</sup>. Considerando que 42% dos entrevistados preferem uma área entre 6 e 10m<sup>2</sup>, teríamos um nível de uso ideal correspondente a uma área média de 8m<sup>2</sup> por usuário de praia. A partir desta área, considerada como de nível de uso ideal, e levando em consideração a área máxima disponível para acomodação dos banhistas por praia, foram estabelecidos valores referente à capacidade de acomodação ideal, expressa na tabela 3. Assim, segundo esse critério, as praias que apresentam as maiores capacidades de acomodação ideal na orla do município de Porto Seguro são as de Taipe, Itaquena, Itapororoca, Caraíva, Barra Velha e Sossego, enquanto que as com menores capacidades são as de Curuípe II, Mundaí, Aracaípe, Curuípe I, Espelho, Mucugê e Parracho (Fig. 2A e Tabela 3).

## CONCLUSÕES

Como uma consequência direta da expansão das atividades turísticas nas praias do município de Porto Seguro, tem havido um aumento considerável na população fixa e na ocupação urbana da região costeira, submetendo os ecossistemas costeiros a uma crescente pressão recreacional. Como aponta Silva (1996), tal fato pode ser constatado, por exemplo, pela grande proliferação de diversos equipamentos hoteleiros e de recreação e lazer, e pelo aumento de condomínios costeiros e outras construções à beira-

mar.

As praias com maiores níveis de uso, segundo levantamento de campo realizado em janeiro/2007, são as de Parracho, Pitinga, Coqueiros e Nativos, respectivamente com 6, 8, 8 e 9 m<sup>2</sup> de praia por banhistas/recreacionistas (Fig. 2A e Tabela 3). As com menores níveis de uso – ao lado das praias desertas, onde não foram encontrados banhistas/recreacionistas – são as de Corumbau, Caraíva e Ponta Grande, respectivamente com 380, 355 e 165 m<sup>2</sup> de praia para cada banhistas/recreacionistas (Fig. 2A e Tabela 3).

Quanto ao nível de uso ideal das praias, segundo a percepção dos usuários, a maior preferência (42%) indicou uma área de praia na faixa de 6 a 10 m<sup>2</sup> por banhista/recreacionista, tendo então o seu valor médio sido utilizado para o cálculo da capacidade de acomodação ideal, em função da área máxima disponível para a acomodação de banhistas/recreacionistas em cada praia (Tabela 3). Assim, as praias que apresentam as maiores capacidades de acomodação ideal são as de Caraíva, Itaquena e Itapororoca, respectivamente com potenciais de 30.000, 24.700 e 24.000 banhistas/recreacionistas por dia, enquanto que as com menores capacidades de acomodação são as de Curuípe II, Mundaí, Aracaípe, Curuípe I, Espelho, Mucugê e Parracho, respectivamente com potenciais de 1.125, 1.250, 1.300, 1.350, 1.400, 1.500 e 1.600 banhistas/recreacionistas por dia.

A figura 5 apresenta, para cada segmento de praia analisado, o seu nível de antropização (Fig. 2B), a média do nível de uso atual das suas praias (Tabela 3), e a condição de acesso ao mesmo (Fig. 2C). Os segmentos costeiros em que não foi encontrado nenhum banhista/recreacionista durante o levantamento de campo (Segs. 7B, 8 e 12) foram considerados como tendo o mais baixo nível de uso de toda a orla marítima. Na figura 5 podem ser discriminadas duas áreas com características bem distintas em relação ao comportamento dos parâmetros aqui analisados. Na primeira, correspondente aos segmentos de 1 a 5, não há nenhuma relação entre o comportamento desses parâmetros. Já na segunda área, correspondente aos segmentos de 6 a 13, constata-se que, de uma maneira geral, esses parâmetros variam de uma maneira diretamente proporcional. Esse comportamento diferenciado é aqui relacionado à condição de acesso e ao nível de urbanização. Assim, nos segmentos de 1 a 5, em que as condições de acesso foram avaliadas como excelentes, e os níveis de urbanização como variando de médio a alto [existindo aí facilidades

adequadas de acomodação e de alimentação em todos esses segmentos (Iracema R. Silva, observações não publicadas)], o banhista/recreacionista poderá se sentir estimulado, uma vez instalado em qualquer um desses segmentos, a frequentar as suas diferentes praias. Dessa maneira, poder-se-ia explicar o fato de o nível de uso não apresentar nenhuma relação com o nível de antropização e as condições de acesso (Fig. 5). Por outro lado, nos segmentos de 6 a 13, diferentemente, pelo fato de as condições de acesso, na sua quase totalidade, serem bem inferiores, bem como pelo fato de os níveis de urbanização serem também, na sua quase totalidade, inferiores aos dos segmentos 1 a 5 [sendo aí também as facilidades de acomodação e de alimentação inferiores ou mesmo inexistentes (Iracema R. Silva, observações não publicadas)], passará a haver uma tendência de as praias com melhores acessos e melhores facilidades serem mais procuradas. A par disso, as condições de acesso inferiores passam a inibir a movimentação dos banhistas/recreacionistas entre as diferentes praias desses segmentos mantendo-se, assim, de uma certa forma, “cativos” aos segmentos em que se hospedam. Nessas circunstâncias, é razoável esperar que o nível de uso, o nível de urbanização e a condição de acesso variem entre si de uma maneira diretamente proporcional (Fig. 5). Exceções a esse comportamento são observadas ao se passar dos segmentos 7A para 7B e do 9 para o 11. No primeiro caso, isso pode ser explicado pelo fato de, embora os segmentos 7A e 7B terem o mesmo nível de urbanização, o acesso aos mesmos apresentarem condições opostas extremas (Fig. 5). Em relação ao segundo caso, já que as condições de acesso e os níveis de antropização são os mesmos para os dois segmentos, o maior nível de uso (menor área disponível por banhistas) no segmento 9 pode estar relacionado à preferência dos banhistas por estas praias devido ao cenário criado pelas falésias presentes neste trecho costeiro.

Os níveis de uso atual e ideal aqui analisados em relação às praias do município de Porto Seguro poderão ser úteis para o seu gerenciamento costeiro. Assim, muito embora os segmentos com alto nível de antropização (Seg. 3, 4 e 5, Fig. 2) apresentem, na sua quase totalidade, níveis de uso atual de suas praias inferiores ao aqui considerado como de nível ideal (Tabela 3), tais níveis, considerando a média por segmento (Tabela 3), em uma primeira aproximação, já poderiam ser considerados como de saturação para fins de estabelecimento da capacidade de suporte dessas praias. Por outro lado, esses segmentos costeiros mais impactados, à semelhança do que

consideram De Ruick *et al.* (1997) para praias da África do Sul, poderiam ter o seu desenvolvimento maximizado para o uso humano, enquanto que, em relação aos segmentos com baixos níveis de antropização e ainda com baixos níveis de uso (Segs. 6 e de 8 a 13, Tabela 3, Fig. 2), seria recomendável os gestores considerarem a política de não favorecer, além do que existe atualmente, o acesso às praias, a fim de preservar a sua qualidade ambiental. Além disso, algumas praias, mesmo ainda não totalmente impactadas, como parece ser o caso daquelas dos segmentos 1, 2, 7A e 7B (Fig. 2), poderiam, eventualmente, ter o seu uso incentivado a fim de preservar as dos segmentos 6 e de 8 a 13.

Embora o presente trabalho, numa aproximação de primeira ordem, descreva um modelo para a região costeira do município de Porto Seguro que consegue explicar as relações existentes entre o nível de antropização, as condições de acesso e o nível de uso atual de suas praias, deve-se apontar, todavia, que existem incertezas e inaccurácias relacionadas às maneiras pelas quais os dados aqui utilizados foram coletados. Esse é o caso, por exemplo, das limitações relacionadas à metodologia adotada por Silva (2004) para avaliar o nível de antropização, numa escala que engloba amplos segmentos costeiros. Da mesma forma, deve-se levar em conta que o nível de uso ideal das praias, segundo a percepção dos usuários, depende de muitas características relacionadas ao indivíduo, não consideradas no presente trabalho (Edney & Jordan-Edney *apud* De Ruick *et al.*, 1997; MacLeod *et al.* 2002), tais como, idade, tipo de personalidade, sexo, e as características cultural e ocupacional. Acresce, ainda, em relação a isso, o relativamente pequeno número de entrevistados para a realização do presente estudo.

Por fim, quanto ao conceito de capacidade de suporte, deve-se ter sempre em vista, como advertem Polette & Raucci (2003), que muitos problemas resultantes do uso recreacional das praias podem não ser devidos ao número de usuários e, sim, ao seu comportamento.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos dois revisores anônimos pelas sugestões e ao CNPq (Conselho Nacional para o Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo financiamento da pesquisa.

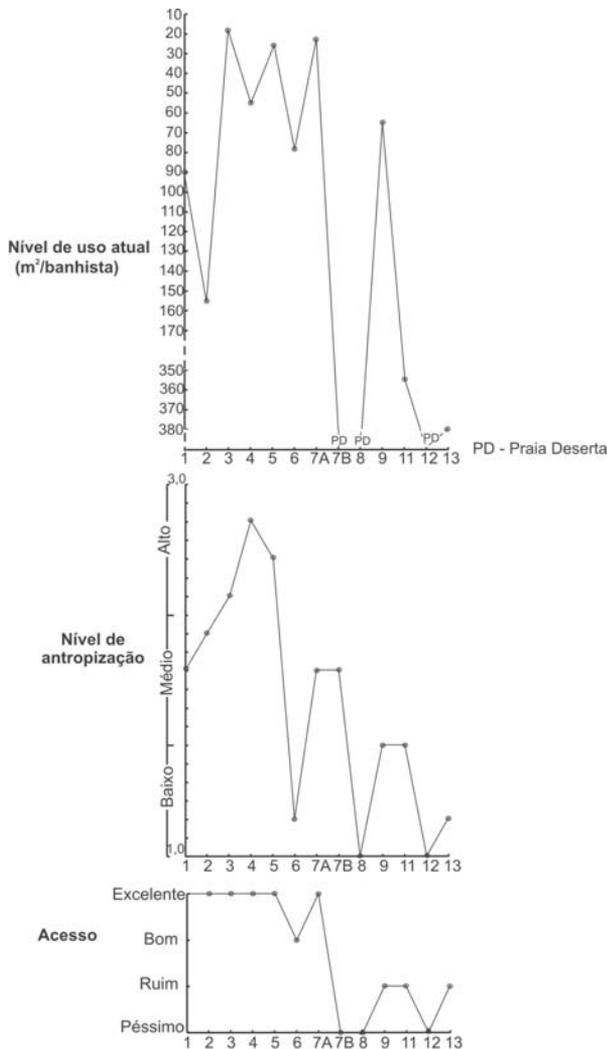


Figura 5. Gráfico indicando, para cada segmento de praia analisado, o seu nível de antropização, a média do nível de uso atual das suas praias, e a condição de acesso ao mesmo.

Figure 5. Graph indicating for each analysed beach its human impact level, the mean of the actual beach use level and the access condition.

## BIBLIOGRAFIA

Archer, B. & Cooper, C. (2001) - Os Impactos positivos e negativos do turismo. In: Theobald, W. F. (org). "Turismo Global". São Paulo, Editora Senac.

BAHIATURSA. (2001) – Pesquisa de Demanda Turística de Porto Seguro. Governo da Bahia/Secretaria de Cultura e Turismo/Bahiatursa, 158p. Salvador, Bahia.

Breton, F., Clapes, J., Marques, A., Pristley, G.K. (1996) – The recreational use of beaches and consequences for the development of new trends in management: the case of the beaches of the Metropolitan Region of Barcelona (Catalonia, Spain). *Ocean & Coastal Management*, 32(3):153-180.

Butler, R. W. (1980) – The concept of a tourist are cycle of evolution: implications for management of recourses. *Canadian Geographer*, 24(1):5-12.

Coriolano, L. N. M. T. (2001) - Turismo e Degradação Ambiental no Litoral do Ceará. In: Lemos, A. I. G. (ed.), "Turismo: Impactos Sócio-Ambientais". Editora Hucitec.

Cin, R. D. & Simeoni, U. (1994) – A Model for Determining the Classification, Vulnerability and Risk in the Southern Coastal Zone of the Marche (Italy). *Journal of Coastal Research*, 10(1):18-29.

De Ruycck, M. C., Soares, A. G., McLachlan, A. (1997) – Social Carrying Capacity as a Management Tool for Sandy Beaches. *Journal of Coastal Research*, 13(3):822-830.

Ergin, A., Williams, A. T., Micallef, A. (2006) – Coastal Scenery: Appreciation and Evaluation. *Journal of Coastal Research*, 22(4):958-964.

Guia Bahia Litoral (2000) – Mapas, acessos, fotos, eventos culturais, recursos naturais e descrições individuais de todas as praias do estado. Editora Castro Alves Ltda. Cruz das Almas, Bahia.

Hall, C. M. (2001) – Trends in ocean and coastal tourism: the end of the last frontier? *Ocean & Coastal Management*, 44:601-618.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Censo 2007. In: <http://www.ibge.gov.br>. Acedido em Mai2007.

Inglis, G. J., Hayden, B. J., Ross, A. H. (2000) – An overview of factors affecting the carrying capacity of coastal embayment for mussel culture. In: <http://govdocs.aquaculture.org/cgi/reprint/2004>. Acedido em Set 2006.

Kullenberg, G. (2001) – Contributions of marine and coastal area research and observations towards sustainable development of large coastal cities. *Ocean & Coastal Management*, 44:283-291.

Laskshmi, A. & Rajagopalan, R. (2000) – Socio-economic implications of coastal zone degradation and their mitigation: a case study from

- coastal villages in India. *Ocean & Coastal Management*, 44:749-762.
- MacLeod, M., Silva, C. P. da, Cooper, J. A. G. (2002) – A Comparative Study of the Perception and Value of Beaches in Rural Ireland and Portugal: Implications for Coastal Zone Management. *Journal of Coastal Research*, 18(1):14-24.
- Masselink, G. & Hugles, M. G. (2003) – *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. London, Hodder Arnold, G. B.
- Midaglia, C. L. V. (2001) - Turismo e Meio Ambiente no Litoral Paulista: Dinâmica da Balneabilidade das Praias. In: Lemos, A. I. G. (ed.), “*Turismo: Impactos Sócio-Ambientais*”. Editora Hucitec.
- Morgan, R. (1999) - Preferences and Priorities of Recreational of Beach Users in Wales, UK. *Journal of Coastal Research*, 15(3):653-667.
- Murphy, P. E. (2001) - Turismo e Desenvolvimento Sustentado. In: Theobald, W. F. (org). “*Turismo Global*”. Editora Senac.
- Orams, M. B. (2003) – Sandy Beaches as a Tourism Attraction: A Management Challenge for the 21<sup>st</sup> Century. *Journal of Coastal Research*, SI35:74-84.
- Pereira da Silva, C. (2004) – Landscape Perception and Coastal Management: A Methodology to Encourage Public Participation. *8<sup>th</sup> International Coastal Symposium*, CIT MAR/UNIVALI, Itajaí, SC, p. 116.
- Polette, M. & Raucci, G. D. (2003) – Methodological Proposal for Carrying Capacity Analysis in Sandy Beaches: A Case Study at the Central Beach of Balneário Comboriú (Santa Catarina, Brazil). *Journal of Coastal Research*, SI35:94-106.
- Silva, I. R. (2004) – *Praias da Costa do Descobrimento: uma contribuição para a gestão ambiental*. Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia, 227 p.
- Silva I. R., Bittencourt, A.C.S.P., Dominguez, J.M.L., Silva, S. B. M. e (2003) – Uma Contribuição à Gestão Ambiental da Costa do Descobrimento (Litoral Sul do Estado da Bahia): Avaliação da Qualidade Recreacional das Praias. *Geografia*, 28(3):397-414.
- Silva I. R., Bittencourt, A.C.S.P., Dominguez, J.M.L., Martin, L. (2001) – Principais Padrões de Dispersão de Sedimentos ao Longo da Costa do Descobrimento – Sul do Estado da Bahia. *Revista Brasileira de Geociências*, 31(3), 335-340.
- Silva, C. P. da. (2002) – Beach Carrying Capacity Assessment: How important is it? *Journal of Coastal Research*, SI36:190-197.
- Silva, S. B. M. e (1996) - Geografia, Turismo e Crescimento: o exemplo do Estado da Bahia. In: Rodrigues, A.A.B. (org.) “*Turismo e Geografia: Reflexões Teóricas e Enfoques regionais*”. São Paulo, Editora Hucitec.
- Smith, R. A. (1992) – Conflicting trends of beach resort development: A Malasian case. *Coastal Management*, 20(2):167-187.
- Tunstall, S. M. & Penning-Roswell, E. C. (1998) – The English Beach: Experiences and values. *The Geographical Journal*, 164(3):319-332.
- Vera, J. F.; Palomeque, F.L.; Marchena, M.J.; Anton, S. (1997) – *Análisis Territorial del Turismo*. Barcelona, Ariel.
- Wiegel, R. L. (1994) – Beaches – Tourism – Jobs. *Shore & Beach*, 62(2):4-5.
- Williams, P. W. & Gill, A. (2001) - Questões de Gerenciamento da Capacidade de Carga Turística. In: Theobald, W. F. (org). “*Turismo Global*”. Editora Senac.
- Williams, A. T. & Sothorn, E. J. (1986) – Recreational Pressure on the Glamorgan Heritage Coast, South Wales, United Kingdom. *Shore & Beach*, 54(1):30-37.

## Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário: Análise Econômica de Alternativas para Municípios Litorâneos - Estudo de Caso - Balneário Camboriú e Itajaí (SC), Brasil

### *Sewage Treatment Stations: Economic Analysis of Alternatives for Coastal Cities - Case Study Balneário Camboriú and Itajaí (SC), Brazil*

Andresa G. Wagner<sup>1</sup>, Valeria R. Bellotto<sup>2</sup>

---

#### RESUMO

Neste trabalho, considerado uma análise econômica, desenvolveram-se cenários com soluções alternativas para o tratamento de esgoto em municípios litorâneos, tomando como casos para estudo os municípios de Balneário Camboriú e Itajaí (SC, Brasil), que apresentam características distintas em termos de urbanização e fluxo turístico. A importância deste tema é evidenciada por um dos objetivos elencados nas Metas de Desenvolvimento do Milênio (MDGs) estabelecidas pela ONU que é de reduzir pela metade a população sem acesso sustentável à água potável e saneamento básico. No presente estudo, são analisados e discutidos três tipos de Estação de Tratamento de Esgoto – ETAR: individual (*wetland* construída), condominial e convencional, considerando que as três opções apresentam o mesmo nível de eficiência técnica e resultam em benefícios sócio-ambientais semelhantes. A análise econômica foi construída com valores de mercado, utilizando-se os critérios VPL – Valor Presente Líquido e TIR – Taxa Interna de Retorno. Independentemente da origem dos recursos – pública ou privada – entende-se este tipo de investimento como um projeto público. Além disso, aspectos não monetários também foram discutidos e os cenários selecionados foram analisados a partir dos critérios: econômico, sócio-ambiental e técnico. Aplicando os critérios econômicos VPL e TIR concluiu-se que é economicamente viável a combinação de unidades convencionais, condominiais e individuais de tratamento de esgoto para atender às demandas dos dois municípios, apesar de suas diferenças em relação ao tipo de urbanização e fluxo turístico.

**Palavras-chaves:** Sistemas de Tratamento de Esgoto, Análise de investimentos, Gestão ambiental

---

<sup>1</sup> Autora correspondente; [agwagner@furb.br](mailto:agwagner@furb.br). Universidade Regional de Blumenau, Centro de Ciências Sociais Aplicadas, Câmpus I, Rua Antônio da Veiga, 140 - Victor Konder, CEP 89012-900, Blumenau, SC-Brasil

<sup>2</sup> Universidade do Vale do Itajaí, Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar, CP 360, CEP 88320-220, Itajaí, SC-Brasil, [bellotto@univali.br](mailto:bellotto@univali.br)

## ABSTRACT

*In this work, considered as an economic analysis, it has been developed scenarios with alternative solutions for sewage treatment in coastal cities, using for case study the cities of Balneário Camboriú and Itajaí (SC, Brazil), which represent different models of urbanization and touristy fluxes. The main idea is to provide actual subsidiary information for the stakeholders involved in urban planning and management, mainly the decision-makers of the developing countries, where the basic sanitation is one of the most critical challenges. Accordingly to the World Health Organization (WHO) about 2.4 billion people globally live under highly unsanitary conditions, in such a manner that their exposure to risks of incidence and spread of infectious diseases, are enormous. Assessing the costs and impacts of different technical and policy actions provides a critical input to decision taking and policy making. The importance of this issue is highlighted by one target of the Millennium Development Goals (MDG) of the United Nations (UN) that is to “halve by 2015 the proportion of people without sustainable access to safe drinking water and basic sanitation”. In the present study three types of sewage treatment stations were evaluated and discussed: individual (constructed wetland), “condominium system” and conventional, considering that these three technological options present the same level of technical efficiency and result in similar socio-environmental benefits. The economic analysis was built with market values, using the following criteria: NPV – Net Present Value and IRR – Internal Return Rate. Independent of the applied resources origin (public or private), this type of investment is understood as being a public project. Thus, non-monetary aspects were also discussed and selected scenarios were analyzed based on economic, socio-environmental and technical criteria. Applying the economic approaches NPV and IRR was ended that is economically viable the combination of conventional, “condominium system” and individual units of sewage treatment to assist the demands of the municipal districts of Balneário Camboriú and Itajaí, in despite of its differences in urbanization model and touristy fluxes.*

**Keywords:** Environmental Sewage Systems, Investment Analysis, Environmental Management

## 1. INTRODUÇÃO

A descarga de esgoto doméstico não tratado tem sido identificada como uma das maiores fontes de poluição de ambientes marinhos (UNEP/GPA, 2006). Segundo relatório do Programa Global de Ação para Proteção do Ambiente Marinho de Atividades Baseadas em Terra (GPA) (UNEP/GPA, 2006) esse problema ocorre principalmente em países em desenvolvimento; nos quais, somente uma parcela do esgoto doméstico é coletada, e as estações de tratamento existentes, em sua maioria, não funcionam de forma eficiente.

Os efeitos da descarga de esgoto não tratado no mar, ou mesmo em ambientes estuarinos, incluem (Clark, 2001; UNEP/GPA, 2006):

- a destruição de habitats, danos à biodiversidade e possível eutrofização, que pode levar à florações de algas, incluindo as algas nocivas;
- risco para a saúde humana, incluindo infecção pelo banho de mar e pelo consumo de frutos do mar contaminados e
- impactos negativos em atividades econômicas, como pesca e turismo.

Inúmeras são as localidades brasileiras que apresentam deficiências em seu saneamento ambiental. Representando esta realidade, os municípios catarinenses de Balneário Camboriú e Itajaí também carecem de investimentos neste setor.

Diante desta situação, muitos estudos têm indicado que as soluções devem primar pela simplicidade operacional nos processos de tratamento de esgoto. Além disso, a centralização dos sistemas tem sido questionada.

A subutilização de grandes ETAR tem justificado a discussão de sistemas descentralizados. ETAR condominiais reduzem o custo de transporte do esgoto, permitem a construção gradativa do sistema e são mais flexíveis numa eventual ampliação ou redução da capacidade de tratamento do que a opção centralizada. Outra alternativa são as ETAR individuais do tipo *wetland* construída. Elas são eficientes, simples, de baixo custo, requerem pouca manutenção e adaptam-se esteticamente ao ambiente.

Tratar o esgoto, além de beneficiar diretamente o meio ambiente, gera emprego e pode desencadear um processo de desenvolvimento econômico, inclusive no contexto regional. A redução de gastos com a saúde, a ampliação da capacidade produtiva das pessoas e a inclusão social de moradores de áreas carentes que tem esgotamento implantado são alguns dos benefícios indiretos gerados por ações neste setor.

O objetivo geral deste trabalho é a análise econômica de três tipos distintos de estações de tratamento de esgoto: convencional, condominial e individual; considerando as características locais dos municípios de Balneário Camboriú e Itajaí (SC), para sugerir cenários com soluções alternativas adequadas

que contribuam com a tomada de decisão dos gestores municipais. Além de analisar os valores monetários inerentes a este tipo de investimento, também foram discutidos aspectos sócio-ambientais resultantes das ações de saneamento. Os cenários pretendem contribuir com o processo decisório dos gestores, porém convém destacar que este não é um estudo de eficiência técnica do tratamento de esgoto, sendo considerado aqui que as três opções apresentam o mesmo nível de eficiência na depuração dos efluentes e são adequadas tecnicamente ao local e clima da região. Cenários na realidade, não representam uma previsão a respeito daquilo que irá acontecer, mas constitui-se num exercício sobre hipóteses inerentes a tomada de decisão, visando conhecer as alternativas possíveis e facilitando o convívio com a imprevisibilidade do futuro (Bethlem, 2004).

### 1.1. Saneamento Ambiental no Brasil

A ampliação dos sistemas de distribuição de água potável desencadeou novas preocupações em relação ao esgoto doméstico (Carrera-Fernandez & Garrido, 2002). O lançamento descontrolado de esgotos domésticos em rios, lagos e outros corpos de água, representa uma das principais causas da poluição hídrica no Brasil e no mundo (UNEP/GPA, 2006; Gonçalves & Souza, 1997). A precária rede de saneamento existente na maioria das cidades brasileiras, incluindo Balneário Camboriú e Itajaí, constitui-se na principal origem da poluição das águas, representando a mais importante pressão ambiental sobre os mananciais hídricos.

Segundo Margulis *et al.* (2002), os dados do Censo 2000 indicam que mais de 92% da população urbana conta com alguma forma de esgotamento sanitário, isto é, suas residências estão conectadas a rede de esgoto e/ou possuem fossa séptica ou rudimentar. Neto (1997) afirma que para levar o tratamento a toda a população brasileira, independente da classe social, somente será viável sob o aspecto sócio-econômico e ambiental se as soluções técnicas primarem pela simplicidade. Esta condição não deve ser entendida como uma opção pela segunda qualidade, pelo descaso com a eficiência e descuido com a construção, operação e manutenção do sistema.

Margulis *et al.* (2002) apresentam um custo médio por domicílio de U\$ 616,00 a U\$ 685,00 para implantar um sistema de coleta e tratamento de esgoto adequado para a população atualmente sem acesso a este serviço. Em documento com as prioridades dos municípios brasileiros (Brasília, 2000), são

apresentados dados do Banco Nacional de Desenvolvimento (BNDES) que indicam um investimento médio de US\$ 420,00 a US\$ 840,00 por domicílio atendido com coleta e tratamento de esgoto. A mesma fonte aponta custos médios anuais de operação entre US\$ 6,00 e US\$ 13,00 por unidade domiciliar. Por outro lado, demonstra-se que para cada U\$ 1 milhão investidos em esgotamento sanitário são criados 55 empregos diretos e 37 indiretos.

Poderão ocorrer também, tanto nas localidades objeto desta pesquisa, como nos demais municípios brasileiros, outros impactos positivos como a geração de novos negócios, a valorização dos imóveis, o desenvolvimento do potencial turístico e a ampliação da arrecadação municipal. Margulis *et al.* (2002) também constataram uma grande subutilização da capacidade instalada nas empresas de saneamento no Brasil: somente 20% da capacidade de tratamento é utilizada. Esta situação tem origem, em parte, no planejamento deficiente e nos elevados custos de manutenção de grandes ETAR. Estas grandes unidades foram privilegiadas pelas empresas, embora estações menores e menos onerosas pudessem proporcionar um efeito muito maior na qualidade dos rios em áreas ecológica e ambientalmente sensíveis. Parte considerável dos problemas que comprometam a ampliação dos serviços de saneamento é de natureza operacional, ou seja, decorrem da ineficiência no uso dos recursos investidos e não estão relacionados à necessidade de investimentos.

A subutilização das grandes ETAR serve de subsídio para a discussão sobre sistemas menores e de complexidade reduzida, já que o ganho de escala que justificou decisões anteriores parece não estar sendo bem aproveitado. A relação custo-benefício da centralização precisa ser revista a fim de ampliar a eficiência dos recursos aplicados no saneamento ambiental. A centralização prevê economias de escala devido ao dimensionamento das ETAR, porém, na prática brasileira relatada na literatura, este benefício parece estar se perdendo. Explica-se: a economia de escala poderia ser obtida a partir de uma determinada quantidade tratada de esgoto, ou seja, os custos fixos são divididos pelo volume produzido. Quando a capacidade instalada é subutilizada, os custos fixos médios daí decorrentes ficam mais elevados do que o projetado, gerando perdas econômicas.

### 1.2. Descrição da área de estudo

Os cenários foram desenvolvidos e analisados considerando a realidade local dos municípios de

Balneário Camboriú e Itajaí situados no litoral Centro-Norte do Estado de Santa Catarina, Região Sul do Brasil. Algumas informações sócio-econômicas são apresentadas na tabela 1 e permitem identificar semelhanças e diferenças existentes entre estes municípios vizinhos que apresentam clima subtropical úmido e tem como limite leste o Oceano Atlântico.

Os referidos municípios pertencem a Associação dos Municípios da Região da Foz do Itajaí (AMFRI) e segundo o Zoneamento Ecológico-Econômico fazem parte da região hidrográfica do Vale do Itajaí. Demonstram taxa de urbanização e densidades demográficas maiores que a média estadual - 78,7% e 56,2 hab/km<sup>2</sup>, respectivamente. Segundo a Secretaria de Estado do Planejamento, Orçamento e Gestão (2003), os dois municípios apresentam índices menores de mortalidade infantil, que a média do Estado de Santa Catarina: 15,2 óbitos para cada 1000 nascidos vivos até 1 ano de idade. Além disso, o PIB (Produto Interno Bruto) per capita municipal supera a média do Estado, que é de US\$ 4.003,00. O IDH (Índice de desenvolvimento humano) apresentado na tabela 1 demonstra um bom nível de desenvolvimento sócio-econômico, apesar das deficiências existentes inclusive na infra-estrutura urbana das duas cidades. Balneário Camboriú obteve a 2<sup>a</sup> posição entre os municípios catarinenses e a 9<sup>a</sup> posição entre os

municípios brasileiros no ranking do IDH. Itajaí com este indicador alcançou a 117<sup>a</sup> colocação em SC e 507<sup>o</sup> lugar entre os municípios do Brasil. Isto demonstra que, apesar de vizinhos e litorâneos, existe uma representativa diferença sócio-econômica entre as duas entidades municipais, segundo o documento “Caracterização regional - Itajaí?” (Secretaria de Estado do Planejamento, Orçamento e Gestão, 2003)

### Balneário Camboriú

Município litorâneo fundado em 1964, tem no turismo a base de sua economia. Segundo Polette (2001), a partir da década de 1980, o município consolidou-se como cidade-balneária, alcançando um número de turistas maior que a população permanente. O expressivo aumento da população acarreta, sobretudo nos meses de verão, problemas na infra-estrutura urbana. A demanda por tratamento de esgoto muitas vezes supera a capacidade do sistema implantado, atendendo apenas parcialmente as necessidades da cidade (Kuroshima *et al.*, 2007). O dimensionamento ótimo do sistema de tratamento de esgoto em operação atende 86.700 habitantes, revelando-se aquém da demanda entre os meses de dezembro e fevereiro.

O Rio Camboriú, que deságua na porção sul da Enseada de Camboriú, é o corpo receptor do efluente da ETAR de Balneário Camboriú e do esgoto

Tabela 1. Informações sócio-econômicas dos municípios de Balneário Camboriú e Itajaí. PIB-produto interno bruto; IDH- índice de desenvolvimento humano.

Table 1. Socio-economic data from Balneário Camboriú and Itajaí cities. PIB - Gross domestic product ; IDH - Human Development Index.

INFORMAÇÕES SÓCIO-ECONÔMICAS MUNICIPAIS		
Descrição	Balneário Camboriú	Itajaí
População total - hab.	73.455	147.494
Domicílios	23.393	41.36
Superfície - Km <sup>2</sup>	46,4	303,1
Densidade demográfica - hab/km <sup>2</sup>	1.583,1	486,6
Taxa de urbanização - %	100	96,2
Domicílios ligados à rede geral de água - %	94,1	93,6
Domicílios ligados à rede geral de esgoto - %	82,5	35,2
Mortalidade Infantil - óbitos/1.000 nasc. Vivos até 1 ano	9,9	13,8
Renda per capita (2000) anual - US\$	366,23	211,45
PIB per capita (2000) anual - US\$	5.183,59	5.140,97
IDH (2000)	0,87	0,80

Fonte: Adaptado de: Secretaria de Estado do Planejamento, Orçamento e Gestão (2003)

doméstico *in natura* de Camboriú, um município vizinho.

Um monitoramento da qualidade da água do Rio Camboriú e da Enseada de Camboriú, no período entre os anos de 1997 e 2001, evidenciou uma elevação da descarga de esgoto doméstico nestes ambientes e, conseqüente deterioração da qualidade de suas águas, com elevação das concentrações médias de amônia e fósforo, principalmente, acompanhados de um acréscimo da demanda bioquímica de oxigênio (DBO<sub>5</sub>) (Kuroshima *et al.*, 2007). De outro lado, a aplicação de dióxido de cloro no tratamento do esgoto na ETAR de Balneário Camboriú, a partir de 1999, resultou em um decréscimo da contaminação bacteriana, avaliada pela contagem de coliformes fecais, principalmente nas águas da enseada, gerando uma melhora das condições de balneabilidade da praia central de Balneário Camboriú (Kuroshima *et al.*, 2007).

### Itajaí

A economia do município está baseada, principalmente, na atividade portuária e na indústria pesqueira. A população, aproximadamente 150 mil pessoas, é quase totalmente atendida pela rede geral com água potável, entretanto, somente um terço está ligado à rede de coleta de esgoto. Vale ressaltar que esta rede de coleta não é exclusiva de esgoto doméstico, mas refere-se à rede de drenagem pluvial. Embora aproximadamente 52% das moradias possuam fossa séptica (IBGE, 2000), esta água residuária não recebe tratamento complementar, sendo destinada inadequadamente aos corpos receptores mais próximos, gerando poluição hídrica (Rörig, 2005). Não há sistema de tratamento de esgoto em operação, nem tampouco alguma ETAR em funcionamento.

Rörig (2005) destaca que, o principal indicador de contaminação por esgoto doméstico, os coliformes fecais, apresentam contagens excessivas no Rio Itajaí-Açu nas áreas com maior percentual de urbanização, incluindo os municípios de Blumenau, Gaspar e Itajaí.

### 1.3. Investimentos em sistemas de tratamento de esgoto sanitário

Os investimentos em sistemas de tratamento de esgoto sanitário, mesmo quando realizados por investidores privados, deverão ser encarados pela sociedade como projetos públicos geradores de benefícios diretos e indiretos. Os benefícios indiretos

poderão ser de difícil mensuração e monetização. A redução de doenças infecto-contagiosas e melhores condições de vida são exemplos de benefícios proporcionados por projetos de saneamento ambiental que indiretamente afetam de forma positiva a sociedade. Para Faminow & Clemente (2002), mesmo que a mensuração monetária dos custos e benefícios ambientais não esteja disponível, é de suma importância listá-los e descrevê-los para apontar os impactos decorrentes deste investimento.

O financiamento público é justificável pelo menos em parte, devido à poupança resultante dos gastos com a saúde pública e com outras externalidades, como a melhoria da produtividade das pessoas. As tarifas, inclusive, representam um mecanismo de recuperação de custos associados à apropriação dos recursos naturais, considerados bens públicos. O relatório Geo Brasil 2002 (Santos & Câmara, 2002), indica o esgoto doméstico como a origem dos três problemas mais graves de poluição da água brasileira: coliformes fecais, poluição orgânica e fósforo. O controle dos dois últimos demanda os maiores custos.

#### 1.3.1 Análise de investimentos

A identificação e a quantificação monetária dos custos e benefícios do projeto permitem estruturar o fluxo de caixa (FC) esperado com o investimento. No fluxo de caixa apresentam-se todas as receitas e despesas relacionadas ao empreendimento ao longo de um determinado período (Carvalho, 2002). A partir do FC podem ser calculados o VPL (Valor Presente Líquido) e a TIR (Taxa Interna de Retorno), critérios econômicos largamente empregados na análise de projetos:

- VPL - Diferença entre o valor investido e o valor dos benefícios esperados no futuro, descontados para a data inicial, usando-se uma taxa de desconto (taxa de juros). Conhecer o valor presente dos recursos monetários que serão gerados no futuro é importante porque o valor da moeda modifica-se com o tempo. A taxa de desconto empregada contém expectativas positivas ou negativas em relação ao futuro da moeda e da economia. Considera-se que o projeto é economicamente viável diante de um VPL positivo.

- TIR - Representa a taxa de juros que um investimento proporciona ao investidor, isto ocorre porque são estimados custos menores que a soma das parcelas de benefícios esperados no futuro. Basicamente, espera-se que o fluxo

de caixa de projetos viáveis apresente uma TIR maior que a taxa mínima de atratividade (taxa de juros usada como referência, indicando o custo de oportunidade do investimento, sendo 12% a.a. neste trabalho).

Tanto o VPL como a TIR serviram como critérios econômicos nesta análise de investimento. São discutidas soluções para o tratamento de esgoto, coerentes com a realidade de Balneário Camboriú e Itajaí e, desta forma, torna-se importante conhecer alguns aspectos básicos inerentes às ETAR estudadas. A proposta deste estudo não é abordar concepções técnicas dos sistemas, mas discutir alternativas econômicas distintas do modelo convencional centralizado. Estas alternativas poderão ser avaliadas e adotadas tanto em Santa Catarina, como em demais municípios litorâneos situados entre outras regiões brasileiras ou mesmo em outros países com problemas semelhantes.

### **1.3.2 Sistemas de tratamento de esgoto sanitário** **Sistema convencional**

O sistema convencional existente em Balneário Camboriú é centralizado, ou seja, trata numa única ETAR o esgoto gerado pela cidade. Este sistema conta com lagoas de estabilização anaeróbias e facultativas, combinação comumente denominada de sistema australiano. Neste processo o esgoto é tratado em lagoas artificiais (taludes de terra), onde as algas promovem a aeração e as bactérias, a transformação da matéria orgânica. Juntas elas proporcionam o necessário equilíbrio ao sistema, ou seja, uma biodegradação compatível com o oxigênio produzido pelas algas (Neto, 1997; D'Avignon *et al.*, 2002).

#### **Sistema condominial**

Quanto ao sistema condominial aqui discutido, a descentralização do tratamento é a principal característica que o distingue do modelo convencional. Neste sistema também seriam empregadas lagoas de estabilização, entretanto seriam sistemas de menor dimensão, que tratariam o esgoto gerado por uma parcela da população. Assim, o tratamento não estaria concentrado em apenas uma estação e seria uma forma de solucionar o problema do volume variável de esgoto gerado, em função da flutuação da população. Para Neto e Campos (1999), em relação à descentralização, a tomada de decisão deve ser orientada pela disponibilidade de espaço e pela configuração do sistema de esgotamento já existente. Adotar mais de uma ETAR tende a resultar em

menores custos de transporte do esgoto. Dentro de certos limites, o tratamento concentrado tende a reduzir o custo por metro cúbico de esgoto tratado à medida que aumenta a capacidade produtiva de uma estação. Várias estações poderão necessitar de um número maior de funcionários e tendem a ampliar a complexidade dos serviços de controle.

Considerando a realidade brasileira, Morais *et al.* (1999), afirma que a possibilidade de construção gradativa do sistema representa a principal vantagem da opção condominial. A flexibilidade quanto à ampliação ou redução do sistema é uma característica importante, sobretudo para o município de Balneário Camboriú que conta com representativa população flutuante.

Costa *et al.* (2003) explicam que o condomínio resulta de uma delimitação que pode ser um quarteirão, uma quadra ou algo equivalente conforme cada cidade. Neto (1999) enfatiza que a participação da comunidade pode limitar-se a compreensão do sistema e ao pagamento pelo serviço, mas poderá ampliar-se, orientando as ações a partir do ponto de vista da comunidade e, até mesmo, contribuindo com a execução física das obras de implantação do sistema. Em comunidades carentes, a companhia de saneamento pode aceitar o trabalho da população para reduzir os custos de investimento. As ações diretas da comunidade dependerão de suas próprias características, capacidades e do modelo tecnológico e de gestão escolhido. O sistema condominial começou a se difundir no Brasil a partir dos anos 1980. As experiências nesta época predominavam no Rio Grande do Norte e atualmente estão espalhadas por vários estados brasileiros (Oliveira & Moraes, 2003).

#### **Sistema individual**

O sistema individual aqui analisado está baseado no tratamento físico-biológico através de zonas de raízes. Nesta análise, este sistema costumeiramente chamado de *wetland* construída, compõe-se de fossa séptica, filtro anaeróbico e leito alagado. Nem todos os sistemas contam com filtro anaeróbico, mas o uso do tanque séptico é bastante frequente para a retenção de sólidos. Vicznevski e Silva (2003) explicam que o tratamento ocorre através de processos físicos, químicos e bioquímicos e que, à medida que o esgoto avança pelo leito filtrante, as plantas absorvem seus nutrientes químicos e orgânicos, oxigenando o meio onde se processa o tratamento. Criam-se, assim, condições ideais para o desenvolvimento de bactérias que realizam a digestão da matéria orgânica,

eliminando também bactérias e microorganismos patogênicos presentes na água residuária.

Vicznevski & Silva (2003) consideram este sistema uma opção simples, de baixo custo, pouca manutenção e elevada eficiência. Vários estudos têm sido desenvolvidos no Brasil com relação à eficiência e a aplicabilidade deste tipo de tratamento em sistemas individuais. Alguns destes trabalhos são descritos e discutidos a seguir.

O tratamento de esgoto através de zona de raízes está sendo testado em Joinville, município situado na região norte de Santa Catarina, desde junho de 1999, sendo que até setembro de 2003, 17 unidades estavam implantadas (14 residências, uma escola, um hotel e um aeroporto). A manutenção até agora tem se restringido a retirada do lodo do tanque séptico e a poda das plantas para que elas desenvolvam seu sistema radicular.

Os critérios de dimensionamento das instalações, mesmo precisando de aperfeiçoamentos e adaptações para a realidade brasileira, são determinados em função do volume de efluente em m<sup>3</sup>, da DBO (demanda bioquímica de oxigênio) do efluente a ser tratado, da análise do solo, da legislação ambiental, da profundidade do lençol freático e do tipo de vegetação a ser empregado. Sezerino & Philippi (2003) consideram que estes critérios são muito variados, sendo que as faixas de aplicação no solo oscilam entre 1 a 5 m<sup>2</sup>/pessoa, quando as áreas plantadas com macrófitas são usadas como tratamento secundário; precedido geralmente de decanto-digestores como as fossas sépticas. Em Florianópolis, estado de Santa Catarina, os referidos pesquisadores monitoraram por 20 meses uma *wetland* construída e nenhum problema hidráulico foi constatado, não ocorreu a emissão de odor, a macrófita utilizada adaptou-se a realidade estética local e a qualidade do efluente final apresentou performances de remoção entre os níveis satisfatório e excelente.

Roston & Mansor (1999) explicam que nos leitos cultivados de vazão sub-superficial, cuja lâmina de água não fica exposta, o risco de proliferação de mosquitos e propagação de odores é reduzido, protegendo pessoas e animais da exposição a microorganismos patogênicos. Estes sistemas de tratamento têm demonstrado eficiência tanto no tratamento secundário como na remoção de nutrientes, principalmente o nitrogênio. Mesmo apresentando requisitos viáveis para a realidade brasileira, por depender basicamente da habilidade natural de certas plantas aquáticas e suas respectivas associações microbianas para despoluir a água, as

pesquisas sobre leitos cultivados ainda são bastante incipientes no Brasil. Feijó (2001) aponta a necessidade de ampliação dos estudos sobre este sistema, visando adaptá-lo às diversas regiões brasileiras e suas respectivas plantas nativas.

Van Kaick (2002) monitorou a implantação e operação de uma ETAR piloto com zona de raízes na Ilha Rasa no litoral do estado do Paraná e constatou que este tipo de tratamento de esgoto tem no Brasil e em outras regiões tropicais a vantagem de demandar áreas menores que em regiões de clima temperado, podendo alcançar uma longa vida útil. A água residuária, ao passar por uma fossa séptica e uma zona de raízes é submetida a duas etapas de tratamento: primário e secundário, respectivamente. As raízes funcionam como um filtro, evitando a liberação de odores. A ETAR monitorada por Van Kaick (2002) foi considerada viável para tratar o esgoto das residências situadas na linha de maré.

Sousa *et al.* (2000) avaliaram o desempenho de sistemas *wetlands* construídos no pós-tratamento do efluente de um reator anaeróbico de manta de lodo (UASB), empregado no tratamento de esgoto sanitário proveniente da cidade de Campina Grande, no estado da Paraíba, na região nordeste do Brasil. Os resultados mostraram uma grande eficiência do sistema, havendo uma remoção de matéria orgânica de 76 a 84%; enquanto a remoção de nitrogênio total foi de 87% e de fósforo total foi de 100%.

## 2. MÉTODO

### 2.1 Análise de investimentos

A análise de investimentos foi desenvolvida através dos critérios econômicos VPL (Valor Presente Líquido) e a TIR (Taxa Interna de Retorno). Os valores monetários, obtidos em projetos da companhia de saneamento (Engevix, 1998), permitiram a construção do fluxo de caixa (FC). Este foi projetado para um período de 20 anos e, seguindo a indicação do Banco Mundial para o Programa de Modernização do Setor de Saneamento (PMSS) do Governo Federal do Brasil, aplicou-se uma taxa de desconto de 12% ao ano. A tarifa considerada no fluxo de caixa foi baseada nos valores cobrados pela Companhia de Saneamento (CASAN) em 2003 e o volume per capita de esgoto a ser tratado anualmente (72 m<sup>3</sup>) derivou dos valores históricos médios de consumo, obtido da referida empresa de saneamento; correspondendo, também, aos números indicados na literatura. A receita per capita demonstrada nos

cenários resulta do valor monetário da tarifa por m<sup>3</sup> de esgoto multiplicado pelo volume gerado de esgoto anualmente por pessoa. As estações de tratamento de esgoto foram analisadas a partir de valores de mercado neste estudo, mesmo considerando este um projeto público.

Para se identificar o investimento per capita necessário, desenvolveu-se uma equação conforme o dimensionamento da ETAR convencional e condominial. Neste caso foram utilizados os dados: população atendida e investimento per capita, encontrados no projeto da CASAN para o município de Itajaí. Documento este cedido pela companhia de saneamento do município que desenvolveu o projeto do sistema de tratamento centralizado e convencional, mas não realizou o investimento devido ao montante de recursos necessários para sua plena implantação. Descentralizar o sistema passou a ser uma das opções em questão, demandando estudos como este que ora se apresenta. A mesma equação foi adotada para os dois tipos de estação, por se considerar aqui que a ETAR condominial representa uma ETAR convencional de menor tamanho. A partir de uma análise de regressão, a equação logarítmica neperiana demonstrou o melhor ajuste diante dos dados disponíveis e foi aplicada na construção dos cenários.

$$y = -94,607 \ln(x) + 1227 \quad (1)$$

x: População atendida por ETAR

y: Valor do investimento per capita

O investimento per capita para a implantação da ETAR individual foi de U\$ 151,60. O custo operacional per capita, baseado no custo de limpeza das fossas sépticas, foi estimado em U\$ 3,25 por ano - valores monetários levantados no mercado local e apurados em setembro de 2003.

Os dados primários foram obtidos por meio de pesquisa de campo exploratória a partir da aplicação de questionários em Balneário Camboriú e Itajaí. A consulta não teve cunho comprobatório e buscou levantar alguns aspectos relacionados à percepção ambiental dos consultados, cuja abordagem ocorreu, aleatoriamente, nos principais bairros dos municípios supracitados.

## 2.1 Desenvolvimento e Seleção dos Cenários

Considerando a população a ser atendida, foram desenvolvidos vários cenários, combinando até três

tipos de ETAR. Para cada município em questão foram selecionados três cenários a partir de aspectos técnicos, econômicos e sociais. Esta seleção foi baseada nos seguintes pontos:

·Aspecto técnico: população a ser atendida, disponibilidade de área, configuração do sistema de esgotamento existente no município e flexibilidade quanto à ampliação ou redução do sistema.

·Aspecto econômico: investimento per capita, custo operacional per capita e resultados obtidos com o cálculo do VPL e da TIR.

·Aspecto social: uma pesquisa de campo foi realizada e permitiu identificar, sob o ponto de vista da comunidade, a importância dos critérios econômico, técnico e sócio-ambiental, relacionados ao tratamento do esgoto. Este resultado contribuiu com a escolha dos cenários.

Teixeira & Heller (2003) desenvolveram um modelo de priorização de investimento neste setor considerando indicadores epidemiológicos e financeiros. Os autores adotaram o VPL como indicador econômico, a taxa de mortalidade infantil serviu como indicador de saúde. Concluíram que tanto critérios epidemiológicos, como outros socialmente relevantes, não têm sido observados durante a definição dos investimentos que, muitas vezes, são orientados por demandas políticas nem sempre legítimas.

## 2.2 Análise dos Cenários Selecionados

A análise econômica dos três cenários, aqui denominados de A, B e C, foi confrontada com os resultados obtidos nos questionários de opinião pública e com o levantamento de áreas disponíveis. O levantamento dessas áreas foi efetuado junto às imobiliárias de Balneário Camboriú e Itajaí. A classificação dos cenários em "A", "B" ou "C", não exprime ordem de prioridade ou importância, estas letras servem somente de identificação, sendo que os três cenários são considerados coerentes com a realidade local, cabendo ao gestor municipal avaliar e escolher a proposta adequada ao seu plano de governo e às diretrizes definidas para o desenvolvimento regional. O processo de escolha também deverá ser auxiliado por estudos de engenharia, visando determinar as especificidades das alternativas tecnológicas discutidas aqui.

A idéia de que algum tratamento é melhor que nenhum norteou o desenvolvimento deste estudo. Margulis *et al.* (2002) sugerem que para ampliar a cobertura das redes públicas de esgoto pode ser mais

coerente abrir mão de um efluente de excelente qualidade, em prol de uma coleta e tratamento condizentes com a realidade brasileira, que buscar um tratamento do mais elevado nível de eficiência, que esteja disponível somente a uma parcela muito pequena da população.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Cenários selecionados para Balneário Camboriú

A tabela 2 apresenta de forma consolidada e resumida os três cenários selecionados para o município de Balneário Camboriú. Vale lembrar que cada cenário representa uma proposta de solução na qual foram combinadas ETAR convencionais, condominiais e individuais.

Cenário A – Foram combinados os três tipos de ETAR propostos neste estudo. Levando em conta a

existência de uma ETAR convencional com capacidade instalada para atender 87 mil pessoas, sugeriu-se a complementação do atendimento com quatro ETAR condominiais e 9750 *wetland* construídas.

A partir da equação logarítmica, obteve-se o valor do investimento per capita necessário (US\$ 80,76) para a implantação de ETAR condominiais, dimensionadas aqui para atender 31 mil pessoas. Este valor é substancialmente maior que o investimento per capita na ETAR convencional, mas ainda é inferior aos US\$ 151,60 necessários por pessoa para a implantação de uma *wetland* construída. Conseqüentemente, os valores do VPL e da TIR também indicam vantagem econômica para a ETAR convencional e condominial em relação à opção individual. Mesmo assim, todos os sistemas são viáveis economicamente, considerando os critérios econômicos empregados, VPL positiva e TIR superior a 12% ao ano.

Tabela 2. Cenários selecionados para o município de Balneário Camboriú. VPL – Valor Presente Líquido e TIR – Taxa Interna de Retorno

Table 2. Select scenarios for Balneário Camboriú city. VPL – Net Present Value and TIR – Internal Return Rate.

Balneário Camboriú										
População atendida com sistema actual - pessoas				População aproximada durante o verão (dez-fev) - pessoas		Ampliação necessária	Volume per capita de esgoto - m3 anual	Tarifa m3 esgoto tratado - US\$	Períodos de projecto - anos	Taxa desconto anual %
87000				25000			72	0,5847	20	12
Solução combinada				Valores per capita US\$						
Cenário	Quantidade ETAR	Tipo de ETAR	População atendida por ETAR	Custo		Receita	Saldo operac.	VPL	TIR %	
				Investimento	operac. anual	opeac. anual				
A	1,00	convencional	87.000,00	49,04	2,21	42,10	39,89	248,93	81,3	
	4,00	condominial	31.000,00	80,76	2,21	42,10	39,89	217,21	49,4	
	9.750,00	individual	4,00	151,60	3,25	42,10	38,85	138,59	25,3	
B	1,00	convencional	87.000,00	49,04	2,21	42,10	39,89	248,93	81,3	
	3,00	condominial	40.000,00	72,92	2,21	42,10	39,89	225,04	54,7	
	10.750,00	individual	4,00	151,60	3,25	42,10	38,85	138,59	25,3	
C	1,00	convencional	87.000,00	49,04	2,21	42,10	39,89	248,93	81,3	
	4,00	condominial	40.750,00	72,35	2,21	42,10	39,89	225,61	55,1	

ETAR – Estação de Tratamento de Esgoto

Cenário B – Esta proposta de solução conjuga uma ETAR convencional para atender 87 mil pessoas, 3 ETAR condominiais com capacidade para tratar o esgoto de 40 mil usuários cada e 10.750 *wetland* construídas, no qual cada unidade atende a 4 pessoas. Neste cenário, o investimento per capita na ETAR condominial foi estimado em U\$ 72,92 e um VPL de U\$ 225,04 para um período de 20 anos e uma TIR de 54,7%. Nesta proposta previu-se uma ETAR condominial a menos que no Cenário A, mas de maior dimensionamento, reduzindo o valor do investimento per capita e aumentando o VPL e a TIR. A sugestão de três ETAR condominiais ao invés de quatro é válida diante de uma eventual indisponibilidade de grandes áreas. No caso da *wetland* construída, os valores per capita de investimento (U\$ 151,60), do VPL (U\$ 138,60) e da TIR (25,3%) são iguais aos do Cenário A e para os demais cenários apresentados.

Cenário C - Aqui se combina a ETAR convencional existente, que atende 87 mil pessoas, com quatro ETAR condominiais, sendo cada uma com capacidade para atender 40.750 usuários. Nesta proposta não se previu a *wetland* construída, supondo que avaliações posteriores poderiam demonstrar impedimentos técnicos para o emprego deste tipo de estação de tratamento. O investimento per capita necessário para a implantação da ETAR condominial é de U\$ 72,35. Este valor é justificado pelo dimensionamento adotado para esta ETAR: 40.750 pessoas.

### 3.2 Cenários selecionados para Itajaí

Do mesmo modo que Balneário Camboriú, os três cenários selecionados para o município de Itajaí também foram consolidados e os resultados resumidos são apresentados na tabela 3.

Cenário A – Nesta proposta foram combinados os três tipos de ETAR. Sugeriu-se uma ETAR convencional para atender 75 mil usuários, duas ETAR condominiais que atenda 30 mil pessoas cada e 3.750 *wetland* construídas, sendo tratado o esgoto de 4 pessoas por unidade. O investimento per capita na ETAR convencional foi estimado em U\$ 53,60, com VPL de U\$ 244,37 e TIR de R\$ 74,4%. Estes valores, quando comparados com os resultados obtidos para a ETAR condominial e individual, apresentaram uma vantagem bastante positiva em termos monetários, entretanto, outros aspectos serão posteriormente discutidos.

Cenário B – Esta proposta conta com uma ETAR convencional (80 mil usuários) e duas ETAR

condominiais (35 mil usuários por ETAR). Seguindo o mesmo raciocínio do Cenário C de Balneário Camboriú, simulou-se um cenário sem *wetland* construída por se considerar possível a existência de algum impedimento técnico para o uso deste sistema ou, simplesmente, para fornecer mais uma possibilidade de solução para que o gestor possa escolher entre as três alternativas apresentadas.

Cenário C – Este cenário foi baseado na ideia de descentralização do tratamento do esgoto. Ao invés de contar com uma grande ETAR, procurou-se dividir a produção de esgoto tratado em quatro unidades condominiais e 2.500 unidades individuais de tratamento. A ETAR condominial, dimensionada para atender 35 mil pessoas cada, gerou uma estimativa de investimento per capita de U\$ 77,03, um VPL de U\$ 220,94 e uma TIR de 51,8%.

## 4. DISCUSSÃO

### 4.1 Cenários selecionados para Balneário Camboriú

Cenário A – Nesta proposta de solução (1 ETAR convencional, 4 ETAR condominiais e 9.750 *wetland* construídas) considerou-se a disponibilidade de área para a implantação da ETAR condominial e da *wetland* construída. No levantamento realizado nas imobiliárias, quatro áreas foram identificadas como possíveis para a localização das estações de tratamento de esgoto condominiais. Além disso, a existência de ETAR condominiais e individuais representa uma grande flexibilidade quanto à ampliação ou redução do sistema de tratamento. Para um município como Balneário Camboriú que conta com uma representativa população flutuante, esta característica de flexibilidade revela-se muito importante. A implantação gradativa das ETAR também pode ser considerada uma vantagem, dada a restrição de recursos presente na companhia de saneamento e no setor público.

Neto & Campos (1999) afirmam que identificar a disponibilidade de espaço e a configuração do sistema de esgotamento já existente são requisitos fundamentais para a escolha das soluções em saneamento. Estes e outros autores explicam que, contar com ETAR descentralizadas, pode reduzir os custos de transporte do esgoto. Morais et al. (1999), expõe a possibilidade de construção gradativa do sistema como a principal vantagem da opção condominial. Por este e outros motivos, Sobrinho & Tsutiya (1999), apontam que o modelo de

Tabela 3. Cenários selecionados para o município de Itajaí. VPL – Valor Presente Líquido e TIR – Taxa Interna de Retorno

Table 3. Select scenarios for Itajaí citie. VPL – Net Present Value and TIR – Internal Return Rate.

<i>Itajaí</i>									
População a ser atendida - pessoas 150000				Volume per capita de esgoto - m3 anual 72	Tarifa m3 esgoto tratado - US\$ 0,5847	Períodos do projeto - anos 20	Taxa desconto anual % 12		
Solução combinada				Valores per capita US\$					
Cenário	Quantidade ETAR	Tipo de ETAR	População atendida por ETAR	Investimento	Custo operac. anual	Receita operac. anual	Saldo operac.	VPL	TIR %
A	1,00	convencional	75.000,00	53,60	2,21	42,10	39,89	244,37	74,4
	2,00	condominial	30.000,00	81,76	2,21	42,10	39,89	216,21	48,7
	3.750,00	individual	4,00	151,6	3,25	42,10	38,85	138,59	25,3
B	1,00	convencional	80.000,00	51,62	2,21	42,10	39,89	246,35	77,3
	2,00	condominial	35.000,00	77,03	2,21	42,10	39,89	220,94	51,8
C	4,00	condominial	35.000,00	77,03	2,21	42,10	39,89	220,94	51,8
	2.5000,00	individual	4,00	151,60	3,25	42,10	38,85	138,59	25,3

ETAR Estação de Tratamento de Esgoto

condomínios vem sendo percebido como uma das alternativas para o elevado custo de implantação do sistema convencional. A flexibilidade quanto à ampliação ou redução do sistema é uma característica relevante, sobretudo, em municípios litorâneos com população flutuante.

A aplicação dos critérios econômicos VPL e TIR demonstrou que todos os sistemas são viáveis economicamente. Embora os valores monetários apresentados neste cenário sugiram vantagem econômica para a ETAR convencional, retoma-se aqui a discussão sobre a subutilização de grandes ETAR e os aspectos da descentralização discutidos nos parágrafos anteriores. No caso de Balneário Camboriú, a dependência de um sistema de tratamento de esgotos baseado em uma única ETAR é um fator crítico e questionável. A ETAR em funcionamento, com capacidade para atender 87 mil pessoas, supre a demanda da população residente, porém há insuficiência na prestação do serviço nos

meses de alta temporada – entre dezembro e fevereiro, tornando-se necessário decidir como alocar os recursos para sanar esta deficiência.

Este problema sazonal de infra-estrutura, comum em outros municípios litorâneos brasileiros, pode comprometer o meio ambiente e a saúde pública não apenas no verão, mas desencadear danos ambientais no longo prazo, colocando em risco inclusive a atividade turística da região. A ampliação do sistema de tratamento de esgoto de Balneário Camboriú representa uma condição fundamental para atenuar ou resolver as deficiências do saneamento local. (Kuroshima *et al.*, 2007)

Entretanto, investir numa ETAR grande e centralizada para atender a demanda média de 250 mil pessoas no verão tornará o sistema ocioso por aproximadamente nove meses por ano. Além do custo econômico desta ociosidade, existem implicações técnicas quanto ao funcionamento das lagoas de estabilização. A utilização parcial do sistema de

tratamento por períodos longos poderá comprometer o nível de eficiência do processo (Von Sperling, 1996). Esta discussão revela-se pertinente diante da contradição brasileira de ser carente em tratamento de esgoto e apresentar subutilização nos sistemas existentes.

Conjugar ETAR convencionais com condominiais poderá evitar o desperdício gerado pela ociosidade, apesar de inicialmente os valores monetários, do sistema centralizado, apresentarem vantagem em relação às outras alternativas de tratamento. No entanto, estes benefícios monetários poderão ser compensados por vantagens difíceis de serem mensuradas.

Embora o perfil urbano de Balneário Camboriú seja bastante verticalizado, em vários bairros existem muitas residências com jardim que poderiam suportar uma wetland construída. Um estudo visando um levantamento específico sobre esta disponibilidade de espaço teria de ser realizado, entretanto, a existência de fossas sépticas, algumas vezes acompanhadas de filtro anaeróbio, indica uma possibilidade de implantação de unidades complementares individuais de tratamento de esgoto. Os resultados da consulta à população indicaram que 27% dos entrevistados tinham pelos menos 10 m<sup>2</sup> de área livre de construção no terreno de sua casa. Além disso, 20,3% dos consultados apontaram o tratamento individualizado como a melhor opção de configuração do sistema de esgotamento sanitário.

Quanto às ETAR condominiais, elas poderiam ser gradativamente implantadas e, por serem menores, alcançariam em menos tempo a estabilidade do sistema físico-biológico se comparadas com uma ETAR convencional. A descentralização do sistema de tratamento tende a gerar menores custos de transporte do esgoto, apesar da necessidade de mais pessoas para realizar as atividades de controle, operação e manutenção dos processos. Esta relação custo-benefício pode ser positiva. A redução das despesas com transporte pode compensar positivamente a demanda por mão-de-obra. Além disso, 35,4% das respostas obtidas com a consulta a população, indicaram a preferência pelo modelo condominial.

Enfim, os aspectos apontados sugerem que o Cenário A, que combina uma ETAR convencional, quatro ETAR condominiais e 9.750 *wetland* construídas, representa uma proposta coerente com a realidade do município e pode ser uma solução viável para Balneário Camboriú que, assim como outras regiões litorâneas, carece de medidas urgentes para

atenuar as deficiências existentes em seu saneamento ambiental. Ações neste setor convergem para o desenvolvimento sustentável e contribuem com a continuidade das atividades turísticas na região.

Cenário B – Neste cenário (1 ETAR convencional, 3 ETAR condominiais e 10.750 *wetland* construída), a discussão apresentada no cenário anterior para justificar a importância do modelo condominial também é válida. Nesta proposta preveu-se uma ETAR condominial a menos que no Cenário A, considerando uma eventual indisponibilidade de grandes áreas.

No caso da wetland construída, os valores per capita de investimento (US\$ 151,60), do VPL (US\$ 138,59) e da TIR (25,3%) são iguais aos do Cenário A e para os outros cenários a serem apresentados. Apesar dos valores monetários do tratamento individual indicarem uma aparente desvantagem em relação aos resultados encontrados para a ETAR convencional e condominial, é importante observar que a TIR de 25,3% supera a taxa de desconto, também considerada taxa mínima de atratividade (12% ao ano, taxa adotada no Programa de Modernização do Setor de Saneamento do Governo Federal do Brasil), demonstrando ser economicamente viável esta alternativa. A simplicidade operacional desta ETAR, a existência de residências com área livre no terreno, a percepção dos entrevistados quanto à poluição gerada pelo esgoto, aliada à indicação de responsabilidade pessoal com o tema, sugerem a possibilidade de implantação deste tipo de tratamento. Uma eventual indisponibilidade de área para a construção de quatro ETAR condominiais torna o Cenário B uma proposta alternativa para a complementação do sistema de tratamento de esgoto de Balneário Camboriú.

Cenário C – Nesta proposta (1 ETAR convencional e 4 ETAR condominiais) não se previu a wetland construída, supondo impedimentos técnicos para a utilização deste tipo de estação de tratamento.

Neste cenário, devido ao dimensionamento adotado para a ETAR condominial (40.750 pessoas), o investimento per capita necessário para a implantação desta ETAR foi calculado em US\$ 72,35. Reforçando as considerações apontadas anteriormente sobre o modelo condominial, esta solução pode ser adequada, sobretudo, quando o montante de recursos necessários para a implantação total do sistema não estiver disponível. O formato condominial permite a construção gradativa do sistema, isto é, à medida que o atendimento vai sendo ampliado, incrementando as receitas geradas com a

prestação do serviço, outras ações podem ser desenvolvidas até que se atenda a toda a demanda. Atenuam-se, desta forma, as deficiências no saneamento ambiental deste município litorâneo, cuja economia está fortemente baseada no setor turístico, no qual a praia representa um dos principais atrativos da região.

#### 4.2 Cenários selecionados para Itajaí

Cenário A – Neste cenário (1 ETAR convencional, 2 ETAR condominiais e 3.750 *wetland* construídas), o investimento per capita na ETAR convencional foi estimado em U\$ 53,60, com VPL de U\$ 244,37 e TIR de 74,4%. Estes valores, em relação aos resultados obtidos para a ETAR condominial e individual, apresentam uma vantagem bastante positiva, entretanto, conforme a discussão apresentada no Cenário A de Balneário Camboriú, o modelo descentralizado apresenta aspectos que não podem ser ignorados. A flexibilidade, a possibilidade de implantação gradativa do esgotamento sanitário e a redução nos custos de transporte do esgoto representam pontos positivos deste modelo que poderia ser implantado em Itajaí (Morais *et al.*, 1999; Sobrinho & Tsutiya, 1999; Neto & Campos, 1999). Além disso, 39,1% da população consultada apontou o sistema condominial como mais indicado para o tratamento de esgoto.

Quanto a ETAR individual, estimou-se um investimento per capita de U\$ 151,60, para um VPL de U\$ 138,59 e TIR de 25,3%. Este modelo foi apontado por 21,7% dos entrevistados. Os resultados do questionário indicam que 54 % das pessoas consultadas contam com mais de 10m<sup>2</sup> de área livre no terreno, sugerindo uma possibilidade de implantação da *wetland* construída em muitas residências de Itajaí. Além disso, outros aspectos como simplicidade, baixo custo, pouca manutenção, elevada eficiência, adaptabilidade estética ao ambiente e a não produção de odores torna a *wetland* construída uma opção viável para tratar o esgoto das residências (Viczevski & Silva, 2003).

Descentralizar o tratamento, empregando unidades condominiais e individuais, pode contribuir com o saneamento ambiental do município, sobretudo diante da indisponibilidade do montante total de recursos financeiros necessários para a implantação de grandes ETAR. Entende-se ser preferível o atendimento parcial da população à ausência da prestação do serviço.

Cenário B – Nesta proposta (1 ETAR

convencional e 2 ETAR condominiais) seguiu-se o mesmo raciocínio do Cenário C de Balneário Camboriú, sendo simulado um cenário sem *wetland* construídas. Considerou-se que motivos técnicos poderiam impedir o uso deste sistema, além de simplesmente, representar mais uma sugestão de solução para que o gestor possa decidir entre as três alternativas aqui discutidas.

A proposta de duas unidades condominiais é, inicialmente, coerente com a disponibilidade de área verificada com algumas imobiliárias de Itajaí e com as respostas obtidas na consulta popular. Mesmo contando com uma pequena população flutuante, duas ETAR condominiais descentralizam o tratamento, reduzindo custos de transporte do esgoto, além dos outros benefícios já discutidos ao longo deste trabalho. Neste caso, a vantagem da flexibilidade do tratamento descentralizado não tem tanto peso quanto a possibilidade de implantação gradativa do sistema e a redução nos custos de transporte.

Cenário C – Neste cenário (4 ETAR condominiais e 2.500 *wetland* construídas), sugeriu-se não implantar a ETAR convencional, descentralizando o sistema através da adoção de um maior número de unidades de tratamento.

Nesta proposta, cada ETAR condominial foi dimensionada para atender 35 mil pessoas cada, resultando numa estimativa de investimento per capita de U\$ 77,03, um VPL de U\$ 220,94 e uma TIR de 51,8%. Conforme os critérios econômicos aqui discutidos, estes valores demonstram vantagem em relação à ETAR individual. Porém, combinar as duas alternativas de tratamento poderá reduzir custos de transporte, mitigar a dependência de uma única ETAR, assim como permitir a implantação gradual do sistema.

Observando as respostas dos entrevistados, sugerir 2.500 *wetland* construídas pode ser bastante coerente, quando 54% dos entrevistados têm mais de 10m<sup>2</sup> de área disponível no terreno de sua residência, além de 64,3% classificarem-se como responsáveis pela poluição da água. Estas informações fornecem indicativos para a adoção desta ETAR, visando atender uma parte da população da cidade.

Abdicar da ETAR convencional neste cenário não significa que este modelo não seja eficiente, tanto técnica quanto economicamente. Optou-se por excluir o tratamento centralizado por se considerar que uma grande ETAR pressupõe um elevado investimento, cujo financiamento nem sempre está disponível para o gestor público e/ou para a empresa de saneamento. A construção gradativa do sistema permite o

atendimento parcial da população. À medida que os recursos são obtidos, novas ETAR podem ser incrementadas até que a maioria das pessoas possa contar com este serviço de saneamento.

Este cenário resulta de uma análise que considera os benefícios não monetários, das *wetland* construídas e das estações condominiais, tão importantes quanto os valores apurados pelos critérios econômicos VPL e TIR do modelo convencional. Neste caso, entende-se que a vantagem monetária do sistema convencional pode ser compensada pelos aspectos positivos inerentes às opções descentralizadas. Também vale lembrar que a população consultada apontou que os benefícios do tratamento do esgoto são mais importantes, que os custos monetários inerentes ao sistema. Deste modo, os entrevistados consideraram o critério econômico menos importante que o critério sócio-ambiental, avalizando pelo menos em parte, uma possível adoção de soluções descentralizadas.

## 5. CONCLUSÕES

O saneamento ambiental representa um fator determinante tanto da sustentabilidade econômica, quanto sócio-ambiental das regiões litorâneas. Admite-se que as deficiências no tratamento de esgoto comprometam tanto o meio ambiente, quanto a saúde pública, desencadeando danos ambientais, que podem gerar efeitos de curto e longo prazo, colocando em risco setores produtivos, como a pesca, a maricultura e o turismo. Investimentos em saneamento, além de proporcionar os benefícios relacionados à salubridade, tendem a instigar o desenvolvimento sócio-econômico da região, acarretando novos investimentos em outros setores da economia.

Os três cenários propostos para os dois municípios constituem-se soluções alternativas diferentes, porém equivalentes. Cada proposta tem suas vantagens e desvantagens, por isso, a apresentação de três sugestões para cada município. Estas sugestões representam alternativas ao modelo centralizado de tratamento de esgoto. Esta análise, desde que considerados os aspectos locais, poderia ser estendida a outras regiões brasileiras. Neste estudo de caso, Balneário Camboriú e Itajaí foram analisados por apresentarem características distintas e representarem os principais tipos de urbanização dos municípios litorâneos no Brasil.

Aplicando os critérios econômicos VPL (Valor Presente Líquido) e a TIR (Taxa Interna de Retorno), amplamente empregados em análises de investimento, concluiu-se que é economicamente viável a

combinação de unidades convencionais, condominiais e individuais de tratamento de esgoto para atender às demandas dos municípios de Balneário Camboriú e Itajaí. Outros municípios brasileiros poderão se valer deste estudo para desenvolver as necessárias estratégias relacionadas à problemática do saneamento. As soluções descentralizadas têm significativa importância diante da indisponibilidade de recursos financeiros para as obras de uma grande ETAR convencional.

A intenção aqui não foi reduzir a importância da economia de escala prevista na implantação e operação de grandes ETAR. Buscou-se neste trabalho questionar o quanto este benefício pode ser decisivo em municípios com considerável população flutuante e/ou com limitações de recursos financeiros. Esta vantagem prevista com o dimensionamento das unidades não tem se generalizado na prática. A ociosidade encontrada em grandes ETAR tende a anular este benefício econômico que, muitas vezes, determina a escolha do sistema. Ao longo deste trabalho foram caracterizados sistemas menores que poderiam, quando bem administrados e operacionalizados, gerar outras vantagens, compensando a economia de escala. É necessário rever esta relação custo-benefício, sobretudo diante dos vultosos recursos exigidos para se implantar uma ETAR centralizada convencional.

Não se quis aqui sugerir um abandono do modelo dominante, principalmente, porque a capacidade potencial instalada e o know how desenvolvido devem ser aproveitados em benefício da sociedade brasileira. Ampliar a eficiência do sistema convencional é fundamental diante da limitação de recursos, mas sistemas descentralizados também poderiam ser implantados e aperfeiçoados. Enfim, este trabalho procurou demonstrar que ETAR convencionais, condominiais e individuais podem coexistir numa mesma cidade ou região, desde que sejam analisados critérios múltiplos e necessidades locais. Além disso, a comunidade deve ser envolvida no processo para reconhecer seu papel nos resultados do empreendimento.

## BIBLIOGRAFIA

- Bethlem, A. S. (2004) - *Estratégia empresarial: conceitos, processo e administração estratégica*. 5 ed. São Paulo, Atlas.
- Brasília (2000) - *Incorporação da coleta, tratamento e disposição do esgoto sanitário na agenda de prioridades dos municípios brasileiros*. <http://>

- www.cehcom.univali.br/educado/  
dossie\_agua\_esgoto.doc. Brasília, Brasil.  
Acedido Ago2003.
- Carrera-Fernandez, J. & Garrido, R.J. (2002) - *Economia dos recursos hídricos*. Salvador, Edufba.
- Carvalho, J. V. (2002) - *Análise econômica de investimentos: eva: valor econômico agregado*. Rio de Janeiro, Qualitymark.
- Clark, R.B. (2001) - *Marine Pollution*. New York, Oxford University Press.
- Costa, F. J. L. (2003)- *Estratégias de gerenciamento de recursos hídricos no Brasil: áreas de cooperação com o Banco Mundial*. [http://www.bancomundial.org.br/index.php?action=/content/view\\_folder&cod\\_object=89](http://www.bancomundial.org.br/index.php?action=/content/view_folder&cod_object=89)>. Brasília, Banco Mundial. Acedido em Ago03.
- D'Avignon, A. (ed) (2002) - *Manual de auditoria ambiental para estações de tratamento de esgotos domésticos*. Rio de Janeiro, Qualitymark.
- Engevix Engenharia S/C Ltda (1998) - *Projeto final de engenharia do sistema de esgotos sanitários de Itajaí: descrição detalhada da solução proposta*. Florianópolis, Brasil. (não publicado).
- Faminow, M. D.& Clemente, A. (2002) - *Projetos ecológicos*. In: Clemente, A. (ed.) "Projetos Empresariais e Públicos. São Paulo, Atlas.
- Feijó, J. (2001) - *Tratamento de esgotos sanitários através de escoamento sub-superficial em módulos com vegetais*. Dissertação de Mestrado, Universidade Regional de Blumenau.
- Gonçalves, F. B. e Souza, A.P. (1997) - *Disposição oceânica de esgotos sanitários: história, teoria e prática*. Rio de Janeiro, ABES.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2000) - *Fossa séptica Itajaí*. In: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/default.php>. Acesso Fev2007.
- Kuroshima, K.N., Barreiros, M.A.B., Laçava, L.A. & Costódio, P.F.S. (2007) – The influence of dioxide chloride on water quality of Balneário Camboriú beach, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 129, 179-187.
- Margulis, S; Hughes, G.; Gambrell, M. & Azevedo, L.G.T. (2002) - *Brasil: a gestão da qualidade da água: inserção de temas ambientais na agenda do setor hídrico*. [http://www.bancomundial.org.br/index.php?action=/content/view\\_folder&cod\\_object=89](http://www.bancomundial.org.br/index.php?action=/content/view_folder&cod_object=89) Brasil. Acedido em Jul03.
- Morais, J. C.; Florêncio, L. & Kato, M.T. (1999) - Avaliação de um sistema de esgotamento e tratamento descentralizado. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 20, 1999, ABES, Rio de Janeiro - Brasil. [http://www.saneamentobasico.com.br/Acervo/defaultresumo.asp?Id\\_Acervo=179](http://www.saneamentobasico.com.br/Acervo/defaultresumo.asp?Id_Acervo=179) \Acedido Fev2003.
- Neto, C. O. Andrade (1997) - *Sistemas simples para tratamento de esgotos sanitários: experiência brasileira*. Rio de Janeiro, ABES.
- Neto, C. O. Andrade (1999) - Participação da comunidade na implantação e na operação de sistemas de esgoto. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 20, 1999, ABES, Rio de Janeiro - Brasil. <http://www.saneamentobasico.com.br/> Acedido Fev2003.
- Neto, C. O. Andrade & Campos, J. R. (1999) - Introdução. In: Campos, J. R. (ed.), "Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbico e disposição controlada no solo". Rio de Janeiro: ABES, Projeto PROSAB.
- Oliveira, M.T.C.S. & Moraes, L.R.S. (2003) - Participação popular na implantação de redes de esgotamento sanitário do tipo condominial: um olhar da comunidade. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 22, 2003, Joinville - Brasil. ABES - Associação brasileira de engenharia sanitária e ambiental, 1 CD-ROM.
- Polette, M.(2001) - *Análise sócio-econômica para o desenvolvimento dos campos de Coral e Estrela do mar: estudo de impacto ambiental*, Univali/CTTMar, Itajaí, Brasil.(não publicado).
- Rörig, L.R. (2005) – *Usos múltiplos e qualidade das águas da bacia do baixo Itajaí-açu –SC: elementos para um gerenciamento integrado*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos, 295 p.
- Roston, D.M. & Mansor, M.T.C. (1999) - Tratamento de esgoto por sistema de leitos cultivados de vazão sub-superficial: avaliação de remoção de nitrogênio. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 20, 1999, ABES ,Rio de Janeiro - Brasil. [http://www.saneamentobasico.com.br/acervo/defaultresumo.asp?Id\\_Acervo=181](http://www.saneamentobasico.com.br/acervo/defaultresumo.asp?Id_Acervo=181). Acedido Fev2003.
- Santos, T.C.C. & Câmara, J.B.D. (eds.) (2002) - *Geo Brasil 2002: perspectivas do meio ambiente no Brasil*. IBAMA <http://www2.ibama.gov.br/~geobr/geo2002.htm>. Brasília, Brasil. Acedido em Ago03.
- Secretaria de Estado do Planejamento, Orçamento e Gestão. SDR - Secretaria de Desenvolvimento Regional: Itajaí. Governo do Estado de Santa Catarina (2003). - *Caracterização regional*. In: <http://>

- /www.icepa.com.br/Publicacoes/diagnostico/ITAJAI.pdf Acedido Jul2003.
- Sezerino, P.H. & Philippi, L.S. (2003) - Filtro plantado com macrófitas (wetlands) como tratamento de esgotos em unidades residenciais: critérios para dimensionamento. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 22, 2003, Joinville - Brasil. ABES - Associação brasileira de engenharia sanitária e ambiental, 1 CD-ROM.
- Sobrinho, P. Alem & Tsutiya, M. T. (1999) - *Coleta e transporte de esgoto sanitário*. São Paulo, Departamento de engenharia hidráulica e sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Sousa, J.T., Van Haandel, A.C., Consentino, P.R. da S. & Guimarães, A.V.A. (2000) - Pós-tratamento de efluente de reator UASB utilizando sistemas "wetlands" construídos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.4, n.1, 87-91.
- Teixeira, J.C. & Heller, L. (2003) - Priorização de investimentos em saneamento baseada em indicadores epidemiológico e financeiro. *Engenharia sanitária e ambiental*, v. 8, n.3, p.187-195.
- UNEP/GPA. (2006) - *The state of Marine Environment: Trends and processes*. UNEP/GPA, The Hague.
- Van Kaick, T.S. (2002) - *Estação de tratamento de esgoto por meio de zona de raízes: uma proposta de tecnologia apropriada para saneamento básico no litoral do Paraná*. Dissertação de Mestrado, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná.
- Vicznevski, Í.S. & Silva, C.G. (2003) - Tratamento biológico de esgoto com zona de raízes: experiência da Prefeitura Municipal de Joinville. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 22, 2003, Joinville - Brasil. ABES - Associação brasileira de engenharia sanitária e ambiental, 1 CD-ROM.
- Von Sperling, M. (1996) - *Princípios básicos do tratamento de esgotos: princípios do tratamento biológico de águas residuárias*. V.2. Belo Horizonte, Brasil, Departamento de engenharia sanitária e ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais.

