

## 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 espraio 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.

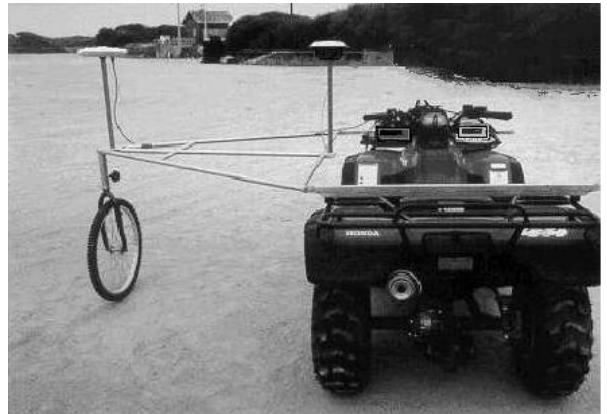


Figura 1. Sistema DGPS multi-antena adaptado a veículo moto-quadro. O sistema é composto por duas antenas GPS cinemáticas, as quais são instaladas num braço articulado fixo ao veículo. in: Baptista et al. (no prelo).

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.

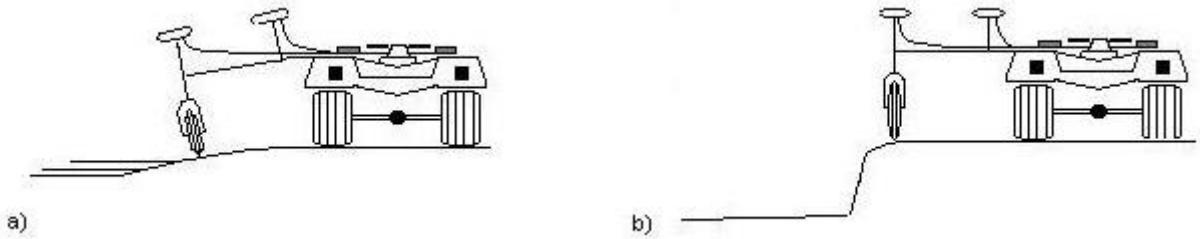


Figura 2. Representação esquemática do sistema DGPS multi-antena em condições de monitorização. a) monitorização da linha de espraio da onda; b) monitorização da crista da berma. Adaptado de Baptista *et al.* (*no prelo*).

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 prédefinida 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

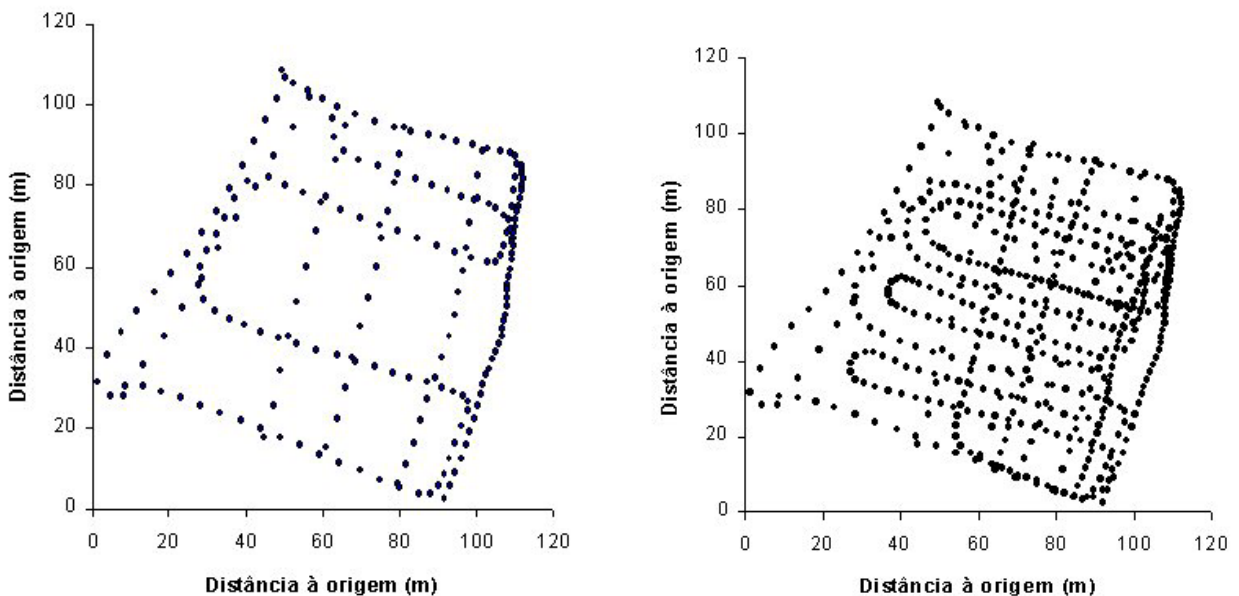


Figura 4. Representação de dois níveis de densidade de perfis realizados por DGPS. a) média densidade de perfis permite delinear satisfatoriamente as principais morfologias do terreno (espaçamento médio entre perfis de 20 metros); b) elevada densidade de perfis (espaçamento médio entre perfis de 10 metros).

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.

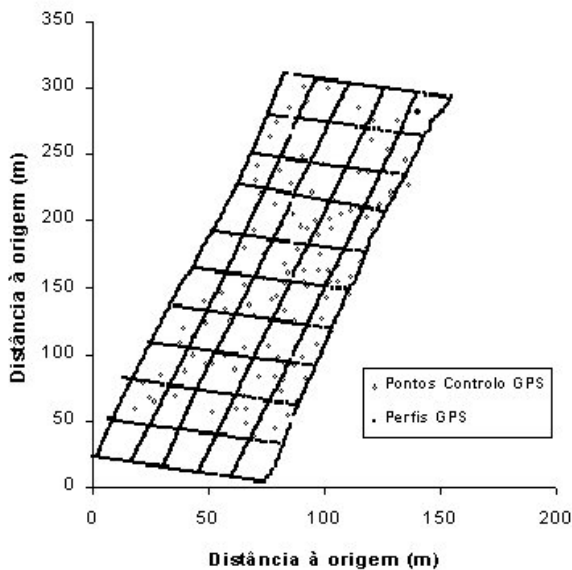
Na (Figura 5a) representa-se uma rede de perfis realizada por DGPS cinemático com a metodologia uni-antena DGPS, num segmento de praia com 300 m de extensão e cerca de 80 m de largura. O espaçamento entre perfis transversais é de cerca de 30 m e os longitudinais estão espaçados cerca de 20 m. Estão também 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

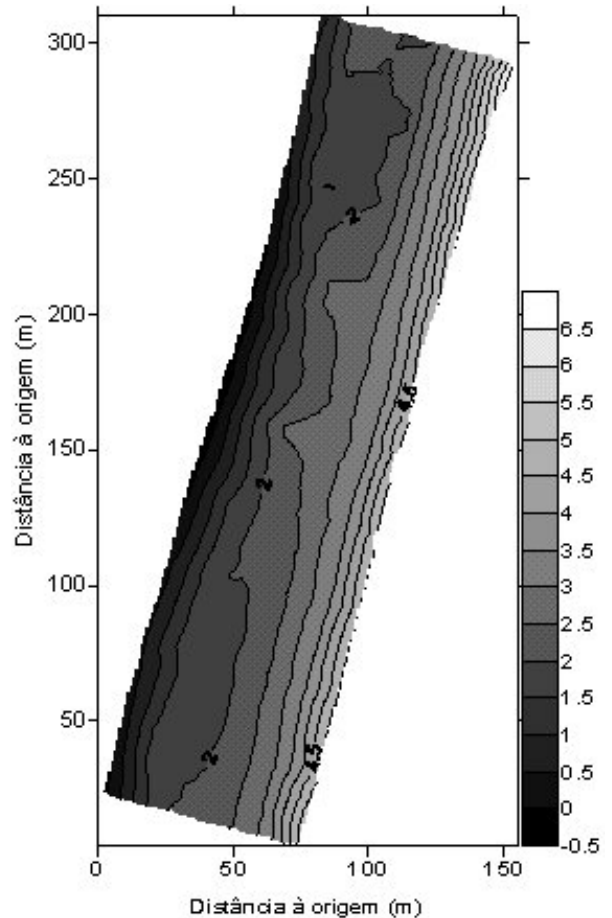


Figura 5. Representação de um teste realizado na praia para avaliar a qualidade do *DEM* gerado por interpolação da grelha de perfis. Neste teste são comparados seis métodos de interpolação relativamente a um conjunto de pontos de controlo não usados para a interpolação. A zona monitorizada tem cerca 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.

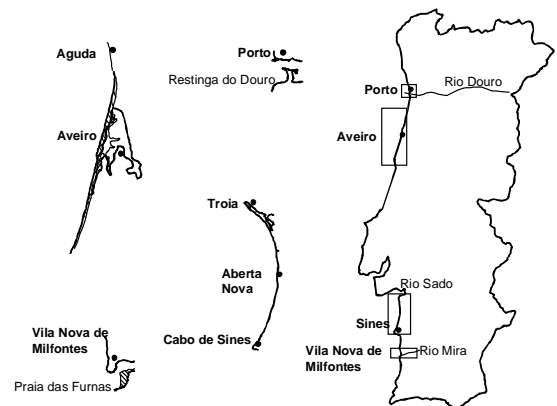


Figura 6. Localização geográfica de alguns segmentos litorais, da costa Oeste de Portugal, que têm sido alvo de monitorização pelo sistema DGPS multi-antena adaptado a veículo moto-quatro. a) Restinga do rio Douro no Porto; b) Praia da Aguda e praias marítimas localizadas ao longo da barreira arenosa 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 (tan $\beta$ ) 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

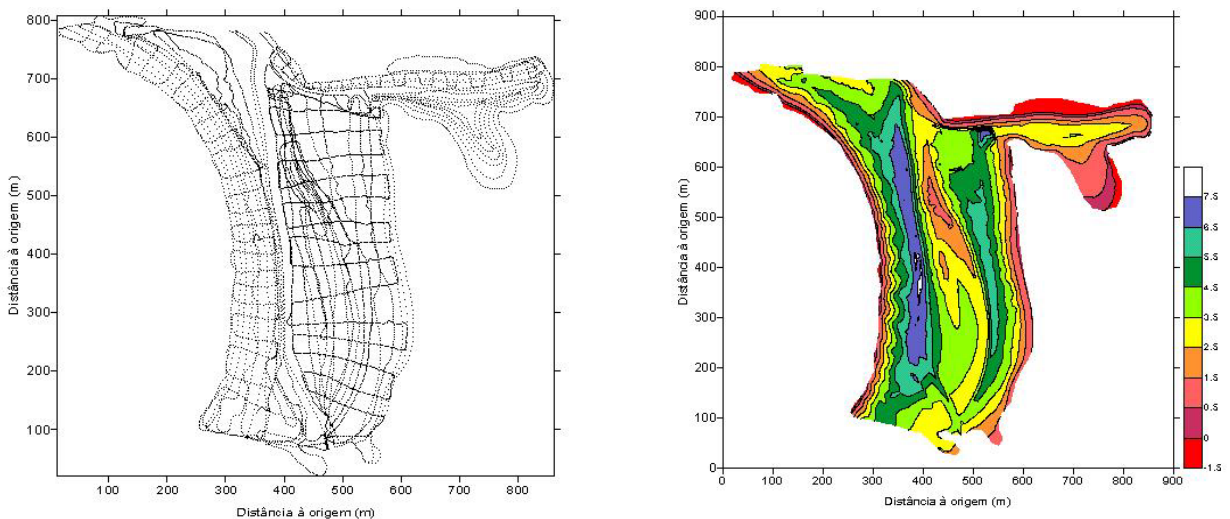


Figura 7. a) Rede de perfis DGPS realizados na restinga do rio Douro (NW de Portugal) b) Mapa de curvas de nível obtido após interpolação dos perfis DGPS. Recorreu-se ao interpolador TIN para a geração do DEM.  
 Figure 7. a) Network of DGPS profiles carried out in Douro River sand spit (NW Portugal)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

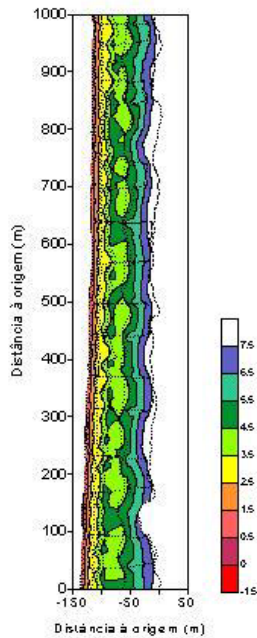


Figura 8. Mapa de curvas de nível para a praia da Aberta Nova (SW Portugal). Nesse mapa está representada, a preto, a rede de perfis DGPS que serviu de base para a interpolação. Foi usado o interpolador TIN.

*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.

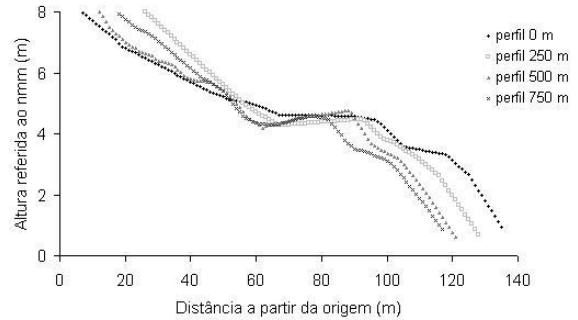


Figura 9. Representação de quatro perfis topográficos, perpendiculares à linha de costa, extraídos do DEM indicado na Figura 8. Os perfis estão espaçados de 250 em 250 metros.

*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 homogénea 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 Seachore 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.

