

ANÁLISE DA EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA DA RESTINGA DO RIO DOURO Analys of Morphological Evolution of Douro River Sand Spit

INÊS SANTOS ⁽¹⁾, ANA CLÁUDIA TEODORO ⁽²⁾ e FRANCISCO TAVEIRA PINTO ⁽³⁾

⁽¹⁾ Mestre em Modelação, Análise e Optimização de Processos Industriais, ⁽²⁾ Prof. Auxiliar, FCUP
Rua do Campo Alegre, 687, 4169-007 Porto, inesos@fe.up.pt, amteodor@fc.up.pt,

⁽³⁾ Prof. Catedrático, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, fpinto@fe.up.pt

Resumo

O Cabedelo é um corpo arenoso que se encontra na margem Esquerda (a Sul) do estuário do rio Douro e tem uma extensão média de cerca de 800 m. A sua largura média é de aproximadamente 300 m, embora sofra variações significativas de largura ao longo do ano e a área média, calculada tendo como referência o nível médio da água do mar, tem variado aproximadamente entre os 220 000 e os 270 000 m².

As variações que têm sido registadas devem ter em conta a sazonalidade das condições de agitação marítima que induzem uma alternância entre a erosão e acreção sedimentar na praia marítima da restinga e também no seu extremo Norte. Existe uma monitorização efectuada por técnicas DGPS iniciada em finais de 2001, tendo-se mantido até 2007 um programa regular de observações trimestral.

A evolução morfológica da restinga está maioritariamente relacionada com a agitação marítima e com os caudais fluviais. Estes dados poderão ajudar a explicar o seu comportamento sazonal, em particular após a ocorrência de tempestades e cheias. Por outro lado, os molhes recentemente construídos na foz do rio Douro poderão ter também, actualmente, uma influência significativa nessa evolução.

Este trabalho foi realizado com o intuito de melhorar o conhecimento sobre a forma como a restinga do rio Douro responde aos ciclos naturais de evolução e à influência que as actividades humanas exercem nessa evolução. Para tal, foram efectuadas análises e modelação da evolução morfológica do Cabedelo, utilizando métodos de interpolação que suportaram o cálculo da dimensão da restinga (áreas) e a construção da série temporal associada. A análise da série temporal teve por base o método de decomposição clássica e a previsão pelo método de Holt-Winters. A estimação de modelos para a configuração exterior da restinga usou técnicas de regressão linear e não linear, simples e múltiplas. A evolução da linha de costa do Cabedelo a partir de várias posições históricas referente ao período em estudo foi analisada tendo em vista a identificação das zonas de erosão e acreção de sedimentos, num ambiente SIG.

Palavras-chave: Séries temporais, métodos de regressão, restinga, rio Douro.

Abstract

The Cabedelo is a sand spit located on the left margin (South) of the estuary of the Douro River and has an average of about 800 m. Its average width is approximately 300 m, though it changes significantly in width over the years and the mean area, calculated by reference to the average level of seawater, has varied approximately between 220 000 and 270 000 m².

The changes that have been registered take into account the seasonality wave conditions that induce an alternation of sediment erosion and accretion in the seashore of the sandy split and also in the north side. There is monitoring by DGPS techniques which began in late 2001 and remained until 2007 with a program of regular quarterly observations.

The morphological evolution of the sandy spit is related to the wave climate and the river flows. These data may help explain their seasonal behavior, particularly after storms and floods. On the other hand, the newly built jetties at the mouth of the Douro River may also currently have a significant influence in this evolution.

This work was carried out in order to improve the knowledge about how the sandbank of the River Douro responds to the natural cycles of evolution and the influence of human activities in these developments.

To this end, different analysis and models were applied in order to study the morphological evolution of Cabedelo. Interpolation methods were applied to support the calculation of the size of the sandy spit (areas) and the construction of the times series on the areas. The analysis of time series was based on the decomposition method and the classical estimate though the method of Holt-Winters. The models estimation for the external shape of the sandy spit used linear and non-linear single and multiple regression techniques. The evolution of the coastline of Cabedelo for the period under study was analyzed with a focus on the points of erosion and accretion of sediment from various historic locations, in a GIS environment.

Keywords: Time series, Regression methods, sand spit, Douro river.

1. Introdução

1.1. Enquadramento do tema

Na foz do rio Douro existe uma restinga denominada de Cabedelo (figura 1). A sua formação deve-se à acumulação de areias e material proveniente da bacia hidrográfica do rio, que ao longo do seu transporte até ao mar, se vão acumulam junto à foz. Ao longo dos anos algumas das suas características, bem como a sua posição e dimensão têm sofrido alterações.

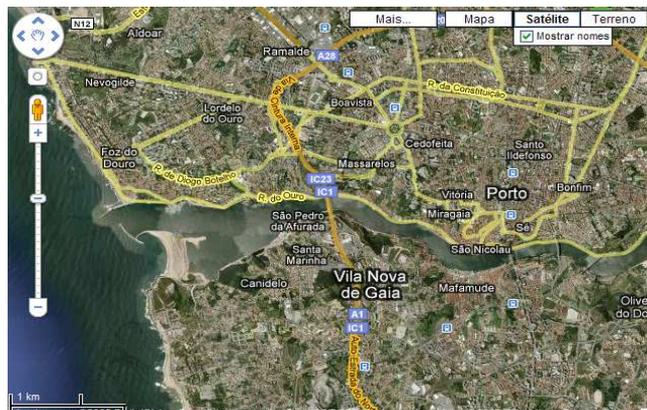


Figura 1. Estuário do rio Douro Fonte: GoogleEarth).

Algumas variações são sazonais devido à influência de parâmetros naturais, como seja a velocidade e direcção do vento, as descargas da barragem Crestuma-Lever, a agitação marítima, a altura da maré, as cheias enquanto outras devem-se a acções antropogénicas.

Desde o século XVIII que se constroem estruturas na foz do Douro com o objectivo de melhorar as condições de navegação.

O molhe de Luiz Gomes de Carvalho concluído em 1820, com 600 m de comprimento, estabelece uma separação clara entre a bacia de S. Paio e o canal do estuário.

Do lado do Porto, os molhes do Touro e de Felgueiras (molhes praticamente paralelos) foram construídos entre 1790 e 1886, aquando da colocação do farolim ainda hoje activo.

Entre Abril de 2004 e Março de 2009 foram construídos dois molhes: a Norte, uma articulação com o molhe de Felgueiras já existente no local, de forma a dar continuidade ao actual espaço urbano. Este molhe, do lado do Porto, tem 350 m e uma extensão de enraizamento de 200 m para terra e 7 m de altura acima do nível médio da água do mar.

A Sul, um quebra-mar destacado, de baixa cota de coroamento, galgável, exteriormente protegido por blocos de betão enriquecidos por minério de alta densidade, com 450 m de extensão (figura 2).

A ideia de minimizar as intervenções na margem sul, de forma a manter o Cabedelo como zona tão naturalizada quanto possível esteve presente, contudo a sua forma modificou-se significativamente (figura 3).

O objectivo principal deste trabalho relaciona-se com o conhecimento sobre a forma como a restinga do rio Douro responde aos ciclos naturais de evolução e à influência das actividades humanas que aí se exercem.



Figura 2. Intervenções antrópicas no estuário do rio Douro (Instituto Portuário e dos Transportes Marítimos, 2004).



Figura 3. Restinga antes (A) e após (B) a construção dos molhes. (Instituto Geográfico do Exército, 1995 e Google Maps, 2007).

1.2. Dados considerados

Para o conhecimento da evolução do Cabedelo, recorreu-se a técnicas diferenciais de posicionamento por satélite (DGPS), tecnologia que possibilitou a obtenção de dados precisos da linha de costa da restinga, cuja análise e interpretação permitiram inferir sobre o comportamento deste corpo arenoso durante o período de observação que decorreu entre Dezembro de 2001 e Setembro de 2007.

Esta monitorização foi efectuada inicialmente através da utilização de um sistema de antena simples GPS, evoluindo posteriormente para um sistema multi-antena GPS adaptado a um veículo moto-quatro.

A partir desta monitorização foi construída uma base de dados em SIG, que continha os 23 levantamentos relativos às observações.

Como foi referido anteriormente, a restinga do Douro sofre a influência activa da dinâmica marinha e fluvial, que condiciona o fornecimento e a remoção de sedimentos.

Na dinâmica fluvial foram considerados os caudais efluentes médios diários da barragem de Crestuma-Lever, localizada a cerca de 20,4 km da foz. Os dados dos caudais foram obtidos no *site* do SNIRH (Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos).

Na dinâmica marinha foram considerados a altura da maré e a agitação marítima. Toda a dinâmica oceânica pode ser englobada na agitação marítima. Os dados usados neste trabalho foram obtidos pela Bóia Ondógrafo da Estação de Leixões do Instituto Hidrográfico.

As Bóias Ondógrafo são utilizadas para a medição da altura e período das ondas e estão providas de sensores que medem a aceleração vertical do movimento da superfície livre do mar, de forma a obter dados relativamente às ondas. Dos dados disponibilizados pelo Instituto Hidrográfico foram utilizados os relativos à altura de onda significativa, o período de onda e a direcção da onda.

2. Metodologia

2.1. Métodos de cálculo de áreas

O cálculo de áreas de figuras geométricas e polígonos está perfeitamente definido por expressões matemáticas. No entanto, este cálculo para áreas geográficas é muito complexo, devido à irregularidade das suas linhas de fronteira, não existindo por isso uma fórmula matemática exacta.

Os softwares de SIGs, como o AutoCad®, ArcGis® e Surfer®, dispõem de técnicas gráficas parametrizadas para a determinação das áreas.

Um método possível passa por considerar a área geográfica como um polígono irregular. Um polígono irregular é aquele que não possui os ângulos com medidas iguais e os lados não possuem o mesmo tamanho. No cálculo da área de polígonos irregulares utiliza-se a decomposição do polígono em figuras geométricas regulares (triângulos, rectângulos, quadrados, etc.).

Para o cálculo de áreas de polígonos irregulares foi considerado um procedimento iterativo. O valor da área é inicializado a zero e vai sendo incrementada tantas vezes quantas o número de pontos existentes. Considerando que (x_i, y_i) é o ponto de índice i e n é o número total de pontos, a área é dada pela fórmula [1].

$$\text{área} = \sum_{i=0}^n \frac{|x_i * y_{i+1} - x_{i+1} * y_i|}{2} \quad [1]$$

2.2. Métodos de interpolação

Os dados disponíveis sobre a área (m²) da restinga não são igualmente espaçados, quer isto dizer que não existem dados para todos os meses. Para construir uma série temporal com os valores desconhecidos recorreu-se a métodos de interpolação.

A interpolação é uma técnica utilizada para a estimativa do valor de pontos não amostrados a partir de pontos amostrados na mesma área (nós de interpolação). A interpolação converte dados pontuais em dados contínuos, produzindo padrões que, posteriormente, podem ser comparados. O raciocínio que está na base da interpolação é que, em média, os valores tendem a ser similares em locais mais próximos do que em locais mais afastados.

Neste método o primeiro passo é traçar uma função interpoladora dos valores conhecidos. A função interpoladora é conseguida através de polinómios, funções spline, poliedros, triangulação, médias móveis ponderadas e superfícies de tendência.

As funções interpoladoras mais usuais são os polinómios e os splines.

A interpolação polinomial é caracterizada por ser muito sensível ao ruído, mesmo de pequena amplitude, proporcionando oscilações excessivas, o que não acontece com as splines. Com base no anteriormente referido, foram implementadas as splines.

2.3. Decomposição clássica

Segundo Box e Jenkins em 1976, por Shumway e Stoffer (2000), uma série temporal é um conjunto de observações ordenadas, y_t , cada uma observada num instante de tempo.

A análise de uma série temporal é o processo de identificação das características, padrões e propriedades importantes da série, utilizada para descrever em termos gerais o seu fenómeno gerador.

A decomposição das séries temporais começou a ser estudada nos finais do século XX e desenvolveu-se nos princípios deste século.

Dependendo da amplitude considerada, pode-se identificar três comportamentos ou efeitos associados a uma série temporal: o efeito de tendência, o efeito sazonal e as variações irregulares ao acaso. A estimação e a eliminação de alguns desses efeitos podem ser feitas através do método de decomposição clássica. Um modelo de decomposição clássica descreve uma série como sendo igual a:

$$X_t = f(m_t, S_t, Y_t) \quad [2]$$

em que as componentes são:

- Tendência - m_t ;
- Sazonalidade - S_t ;
- Componente aleatória, ruído estacionário - Y_t .

Visto isto, um modelo de decomposição clássica multiplicativo é da forma:

$$X_t = m_t * S_t * Y_t \quad [3]$$

e um modelo de decomposição clássica aditivo é da forma:

$$X_t = m_t + S_t + Y_t. \quad [4]$$

Nesta perspectiva de análise do comportamento de uma série temporal começa-se por retirar a sazonalidade da série com médias móveis, prossegue-se com a estimação da componente da tendência e finalmente estima-se a componente residual.

Sendo assim, este método consegue estimar e eliminar a tendência e a sazonalidade através dos seguintes passos:

1. Calcular a componente de tendência-ciclo, retirando essa componente através uma média móvel;
2. Considerar a componente sazonal constante;
3. Calcular os índices sazonais;
4. Calcular a série residual, que possui a forma:

$$\hat{Y}_t = X_t - \hat{m}_t - \hat{S}_t \quad [5]$$

2.4. Previsão de Holt-Winters

A previsão das séries é uma etapa importantíssima para a sua análise. O método de previsão de Holt-Winters é utilizado para séries não estacionárias com tendência e/ou sazonalidade.

Supondo que a série é descrita como $X_t = m_t + S_t + c_t$ em que m_t é representativo de uma tendência não constante e S_t é representativo de uma sazonalidade de período s .

O algoritmo de Holt-Winters determina-se usando as seguintes expressões:

$$F_{t+m} = \hat{a}_t + \hat{b}_{t-m} + \hat{c}_{t-s+m} \quad [6]$$

$$\hat{a}_t = \alpha (X_t - \hat{c}_{t-s}) + (1 - \alpha)(\hat{a}_{t-1} + \hat{b}_{t-m}) \quad [7]$$

$$\hat{b}_t = \beta (\hat{a}_t - \hat{a}_{t-1}) + (1 - \beta) \hat{b}_{t-1} \quad [8]$$

$$\hat{c}_t = \gamma (X_t - \hat{a}_t) + (1 - \gamma)\hat{c}_{t-s} \quad [9]$$

em que S representa:

- o comprimento da série;
- o nível da tendência no tempo $t - \hat{a}_t$;
- o declive da tendência no tempo $t - \hat{b}_t$;
- a componente sazonal - \hat{c}_t ;
- a previsão para o período m adiante $-F_{t+m}$;
- o valor observado - X_t ;
- os parâmetros exponenciais alisadores do nível, da tendência e da sazonalidade, respectivamente $\alpha, \beta, \gamma \in (0,1)$.

Para aplicar o método é necessário definir os valores iniciais das variáveis. A inicialização é realizada do seguinte modo:

$$\begin{aligned} \hat{a}_{s+1} &= X_{s+1} \\ \hat{b}_{s+1} &= (X_{s+1} - X_1)/s \\ \hat{c}_i &= X_i - (X_1 + \hat{b}_{s+1}(i-1)), i = 1, \dots, s+1 \end{aligned}$$

As constantes de alisamento $\alpha, \beta, \gamma \in (0,1)$ são escolhidas de forma a minimizar o erro quadrático médio.

Até este ponto, foi mostrado como obter previsões pontuais para a série, mas muitas vezes é necessário construir intervalos de confiança para as previsões, os chamados intervalos de previsão, isto é, pretende-se obter intervalos que se crê conterem o valor futuro da variável com determinada probabilidade.

Se pretende prever $X_{m+l}, l = 1, 2, \dots$ em que l representa o número de passos a prever e $m+l$ o horizonte de previsão e portanto $\hat{X}_m(l)$ é a previsão a l passos, o erro de previsão (a l passos) é dado por:

$$\hat{e}_m(l) = X_{m+l} - \hat{X}_m(l) \quad [10]$$

2.5. Métodos de regressão

A análise de regressão é uma metodologia estatística para estimar e modelar a relação entre uma ou mais variáveis, de tal forma que uma variável possa ser prevista a partir de outra(s). Um dos objectivos da análise de regressão é estimar os parâmetros desconhecidos do modelo.

Quando temos apenas duas variáveis e a relação entre elas pode ser explicada por uma recta estamos perante o caso mais simples de regressão, a regressão linear simples.

Na **regressão linear simples**, o modelo é descrito da seguinte forma:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, n \quad [11]$$

em que Y_i representa o i -ésimo valor da variável resposta, β_0 e β_1 os parâmetros (coeficientes de regressão), X_i o i -ésimo valor da variável preditora (é uma constante conhecida, fixo), ε_i o termo do erro aleatório com $E(\varepsilon_i)=0$ e $\sigma^2(\varepsilon_i)=\sigma^2$, ε_i e ε_j não são correlacionados $\Rightarrow \sigma(\varepsilon_i, \varepsilon_j)=0$ para todo $i, j; i \neq j$; (covariância é nula), $i=1, 2, \dots, n$.

Vamos supor que temos X_1, \dots, X_{p-1} variáveis predictoras. O modelo de **regressão linear múltipla**, com erros normais, é definido em termos das variáveis predictoras, ou seja,

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i,1} + \dots + \beta_{p-1} X_{i,p-1} + \varepsilon_i \quad [12]$$

em que $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{p-1}$ representam os parâmetros, $X_{i,1}, \dots, X_{i,p-1}$ são constantes conhecidas e ε_i são independentes com distribuição $N(0, \sigma^2)$ $i=1, 2, \dots, n$.

A função resposta para o modelo, como $E(\varepsilon_i)=0$, é dada por:

$$E(Y) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_{p-1} X_{p-1} \quad [13]$$

Existem, no entanto, muitas situações nas quais não é desejável, ou mesmo possível, descrever um fenómeno através de um modelo de regressão linear. O problema, diferentemente do caso linear, é que os parâmetros entram na equação de forma **não linear**. Desta forma não é possível simplesmente aplicar fórmulas para estimar os parâmetros do modelo.

A vantagem dos modelos não lineares é permitirem obter parâmetros que são facilmente interpretáveis. São exemplos de regressões não lineares simples, a Exponencial (eq. 14) e a Logarítmica (eq. 15), ou seja,

$$Y = ab^X \quad [14]$$

$$Y = a + b \ln(X) \quad [15]$$

Deve-se verificar se as variáveis independentes, X_1, \dots, X_{p-1} , contribuem significativamente para explicar a variação da variável-resposta Y . Quanto maior for esta contribuição, melhores serão os resultados da estimação e da previsão.

As hipóteses a testar são:

- $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_{p-1} = 0$ (hipótese nula)
- $H_1: \beta_j \neq 0$ para algum $j = 1, \dots, p-1$, (hipótese alternativa)

A rejeição de H_0 implica que pelo menos um dos regressores X_1, \dots, X_{p-1} contribui significativamente para explicar a variação de Y .

Caso não se rejeite H_0 , ter-se-á o modelo $Y = \beta_0 + \varepsilon$, ou seja, $E[Y] = E[\beta_0 + \varepsilon] = \beta_0$ (constante), concluindo-se que os X_1, \dots, X_{p-1} não contribuem para explicar a variação de Y . O modelo diz-se não significativo e não deve ser utilizado.

Para analisar a significância do modelo, o raciocínio é análogo ao utilizado na regressão linear simples e baseia-se na partição da soma de quadrados, a identidade da análise de variância, $SQ_T = SQ_R + SQ_E$. Em notação matricial,

$$SQ_T = Y^T Y - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n} \quad [16]$$

igual à soma dos quadrados total e que mede a variação total das observações em torno da sua média,

$$SQ_R = \hat{\beta}^T Y^T Y - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n} \quad [17]$$

e que representa a soma dos quadrados dos valores dados pela regressão, mede a quantidade de variação da variável dependente explicada pela equação de regressão e

$$SQ_E = Y^T Y - \hat{\beta}^T Y^T Y \quad [18]$$

que representa a soma dos quadrados do erro (ou residual), ou a variação devida ao erro, ou seja, mede a variação não explicada pelo modelo de regressão.

Pode-se, então, construir a tabela ANOVA, Quadro 1.

Quadro 1. Tabela da ANOVA para a regressão.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Média quadrática	F	ρ
Regressão	p-1	SQ_R	$\frac{MQ_R}{p-1}$	$F = \frac{MQ_R}{MQ_E}$	(*)
Erro ou Resíduo	n-p	SQ_E	$\frac{MQ_E}{n-p}$		
Total	n-1	SQ_T			

A tabela ANOVA resume os resultados do cálculo de uma análise da variância daí o seu nome (ANOVA- ANalysis Of VAriance).

Teste F para a regressão

O valor observado do teste F permite apenas concluir que algumas variáveis explicativas são realmente importantes, mas não determina quais.

Se $F > F_{p-1, n-p}(\alpha)$, rejeita-se a hipótese nula (H_0), caso contrário, aceita-se a hipótese. Neste caso, conclui-se, ao nível de confiança de $(1-\alpha) \times 100\%$, que o modelo é significativo, isto é, que pelo menos um x_j ($j=1, \dots, p-1$) contribui significativamente para explicar a variação de Y. Não se pode esquecer de usar o valor ρ .

Regra do ρ -value (*)

Se $\rho < \alpha$, rejeita H_0 para o nível de significância $\alpha\%$.

Coefficiente de determinação (R^2)

Define-se R^2 por:

$$R^2 = \frac{SQ_R}{SQ_T} = 1 - \frac{SQ_E}{SQ_T} \quad [19]$$

que mede a redução da variabilidade total de Y associada com o uso do conjunto de variáveis X_1, \dots, X_{p-1} tal como na regressão linear simples, temos $0 \leq R^2 \leq 1$.

Assim, $R^2=0$ se todas as estimativas $b_k=0$ ($k=1, \dots, p-1$) e $R^2=1$, quando todas as observações Y coincidem exactamente com a superfície de regressão ajustada, isto é, quando $Y_i = \hat{Y}_i$, para todo i.

Como R^2 aumenta com a adição de variáveis explanatórias, sugere-se utilizar o coeficiente de determinação ajustado (corrigido) para os graus de liberdade. O coeficiente de determinação ajustado é dado por:

$$R^2_{\alpha} = 1 - \frac{\frac{SQ_E}{n-p}}{\frac{SQ_T}{n-1}} = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p} \right) \frac{SQ_E}{SQ_T} \quad [20]$$

Por norma, um alto valor de R^2 implica que o modelo ajustado se presta para fazer inferências precisas:

- $R^2 * 100 =$ percentagem de variância explicada pelo modelo;
- $\geq 75\%$, modelo robusto para estimação;

- $\geq 85\%$, modelo pode ser utilizado para previsão (se houver relação de causalidade).

3. Resultados e Análise

3.1. Optimização do cálculo das áreas

O objectivo desta secção está relacionado com o cálculo do valor da área (em m^2) de todos os dados disponíveis da restinga (obtidos por técnicas DGPS).

Os dados cedidos relativos aos levantamentos existentes da restinga já tinham sido convertidos do sistema de coordenadas WGS84 para o sistema Hayford-Gauss Datum 73.

O cálculo das áreas foi efectuado através do MATLAB®. Os ficheiros com os dados existentes continham os valores x e y, em metros, dos pontos medidos que definem os contornos da restinga.

Após a aplicação de métodos de interpolação linear e do método de cálculo de áreas de polígonos irregulares conseguiu-se descrever de forma correcta os contornos da restinga e a área calculada, como pode ser observado no exemplo apresentado na figura 4.

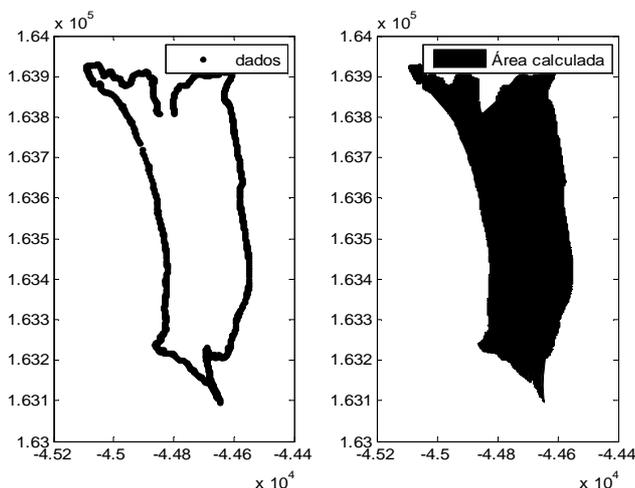


Figura 4. Aplicação da terceira etapa no cálculo de área (exemplo do levantamento de Dezembro de 2006).

A partir dos dados calculados para a área através de softwares gráficos, ArcGis® e Surfer®, procedeu-se à comparação com os dados obtidos pelo MATLAB, através dos métodos numéricos descritos nas secções anteriores.

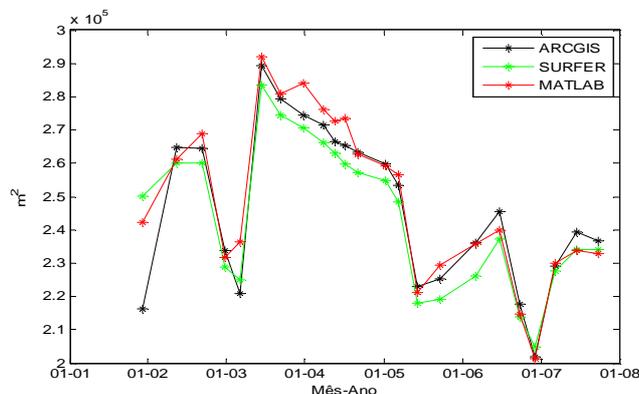


Figura 5. Comparação das áreas (em m^2) obtidos por diferentes abordagens.

Os dados não são muito divergentes entre si sendo que os valores mais fiáveis e escolhidos para representar a área do Cabedelo foram os obtidos pelo MATLAB®, conforme descrito nas secções anteriores e justificado pela maior precisão do método usado.

3.2. Análise da série temporal

Após a escolha dos dados a utilizar, referentes aos valores da área do Cabedelo, procedeu-se à construção da série temporal que melhor os represente.

Para a construção da série temporal é necessário ter conhecimento de qual o valor tomado num determinado instante de tempo.

O primeiro problema encontrado nos dados foi a não periodicidade dos intervalos entre cada levantamento. Para a identificação dos valores desconhecidos recorreu-se a métodos de interpolação numérica.

Através da interpolação, os dados pontuais foram convertidos em variáveis contínuas por funções interpoladoras. É inevitável que a construção da função interpoladora seja sempre uma aproximação e consequentemente leve a um erro de aproximação. Esse erro, por vezes, conduz a não aceitar a interpolação numérica e daí a recorrer-se a outro método. Como foi referido anteriormente, as funções interpoladoras mais usuais são os polinómios e as splines. Estas últimas, geralmente, são mais adequadas e têm um erro associado menor. A partir dos dados foram implementadas várias splines no MATLAB®, com o objectivo de otimizar este processo.

Inicialmente, foram implementadas a spline de alisamento (*Smoothing Spline*) e a Aproximação dos Mínimos Quadrados (*Least-Squares Approximation*).

Apesar da spline de alisamento se revelar mais ajustada aos pontos que a aproximação pelo método dos mínimos quadrados, ambas são desadequadas pois não se ajustam ao acompanhamento dos dados.

Seguidamente, foram implementadas as spline interpolantes, as quais fazem a interpolação dos dados criando polinómios entre os pontos. O grau dos polinómios é determinado pela ordem indicada na implementação da spline.

Neste tipo de interpolação, o ajuste da função interpoladora é perfeito, com um erro quadrático médio nulo.

No entanto, a spline linear tem picos em cada nó de interpolação devido ao facto desta apresentar a primeira derivada descontínua nos nós e a spline quadrática apresenta uma alternância da curvatura entre alguns nós devido ao facto derivadas contínuas apenas até ordem 1.

Com o intuito de suavizar os picos verificados e até suavizar a troca abrupta de curvatura nos nós foi implementada também a spline cúbica (*Cubic Spline*).

Na figura 6 é mostrada a interpolação mensal, ou seja em vez dos 23 dados iniciais, passou-se a ter uma série com 72 dados, correspondentes ao período compreendido entre Dezembro de 2001 e Dezembro de 2007.

A spline cúbica apresentou um erro quadrático médio nulo, daí que esta tenha sido a spline escolhida. Desta forma foi construída a série temporal referente à área da restinga.

A área assume valores mais elevados no Verão e mais baixos no Inverno. Isto significa que na época do Verão se verifica uma sedimentação do Cabedelo, ficando este com uma dimensão maior.

Desde o final de 2001 até 2007, a restinga apresentou o seu valor máximo em Junho de 2003. Em oposição, o mês que apresentou um valor mais baixo foi Novembro de 2006.

O Cabedelo, ao longo dos meses do período de monitorização, sofreu uma grande diminuição, facto apoiado pela representação gráfica da tendência linear (figura 6).

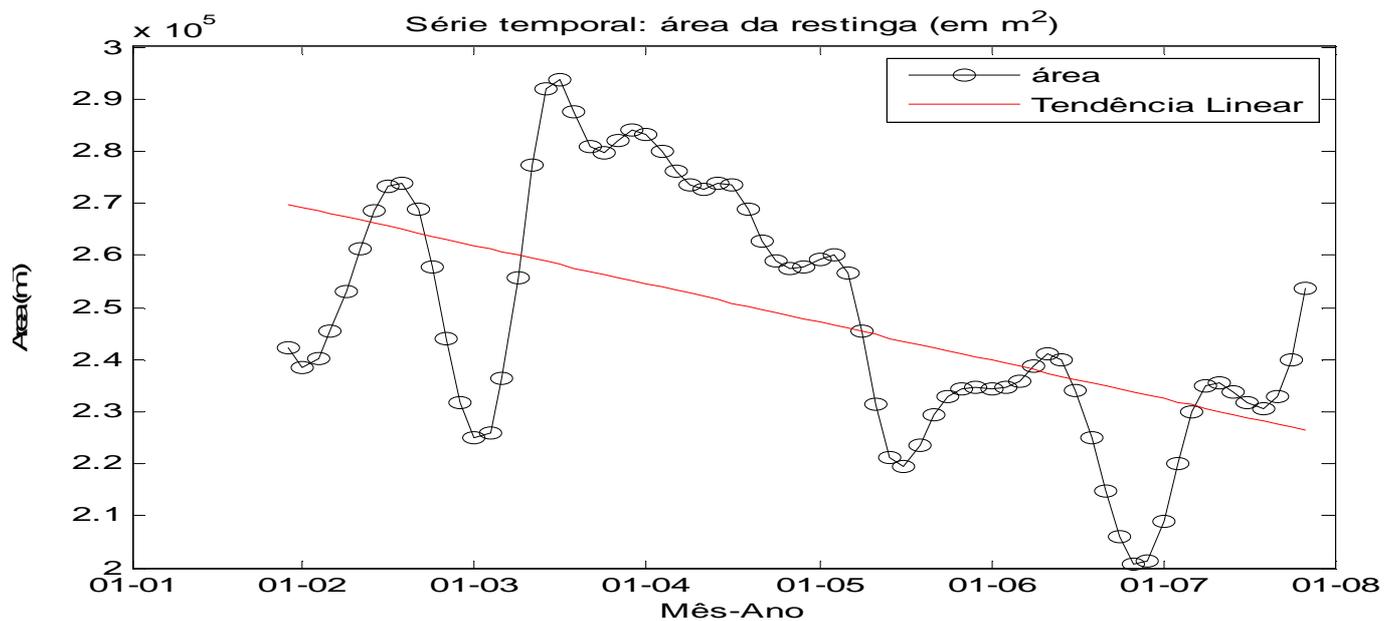


Figura 6. Série temporal da área da restinga (em m²), calculada a partir da spline cúbica.

A partir dos dados da série temporal anteriormente construída, foi implementado o modelo de decomposição clássica aditivo.

A sazonalidade e a tendência são componentes não observáveis, tendo que ser estimadas a partir da informação contida na série temporal.

A sua estimação foi efectuada, em MATLAB®, de acordo com o exposto na secção 2.3 e o resultado obtido encontra-se apresentado graficamente na figura 7, onde está representada a série temporal, linha a vermelho e as componentes: m_t (a verde); s_t (a azul) e Y_t (a preto).

A série temporal referente à área da restinga é uma série não estacionária com tendência e sazonalidade, como comprovou o método de decomposição clássica.

Portanto, os requisitos para a aplicabilidade da previsão pelo método de Holt-Winters estão satisfeitos. Para a realização da previsão, a série foi subdividida em duas partes.

A primeira refere-se ao período anterior ao início da construção dos molhes, de Dezembro de 2001 a Março de 2003. A segunda parte refere-se ao período após o início da construção dos molhes (figura 8).

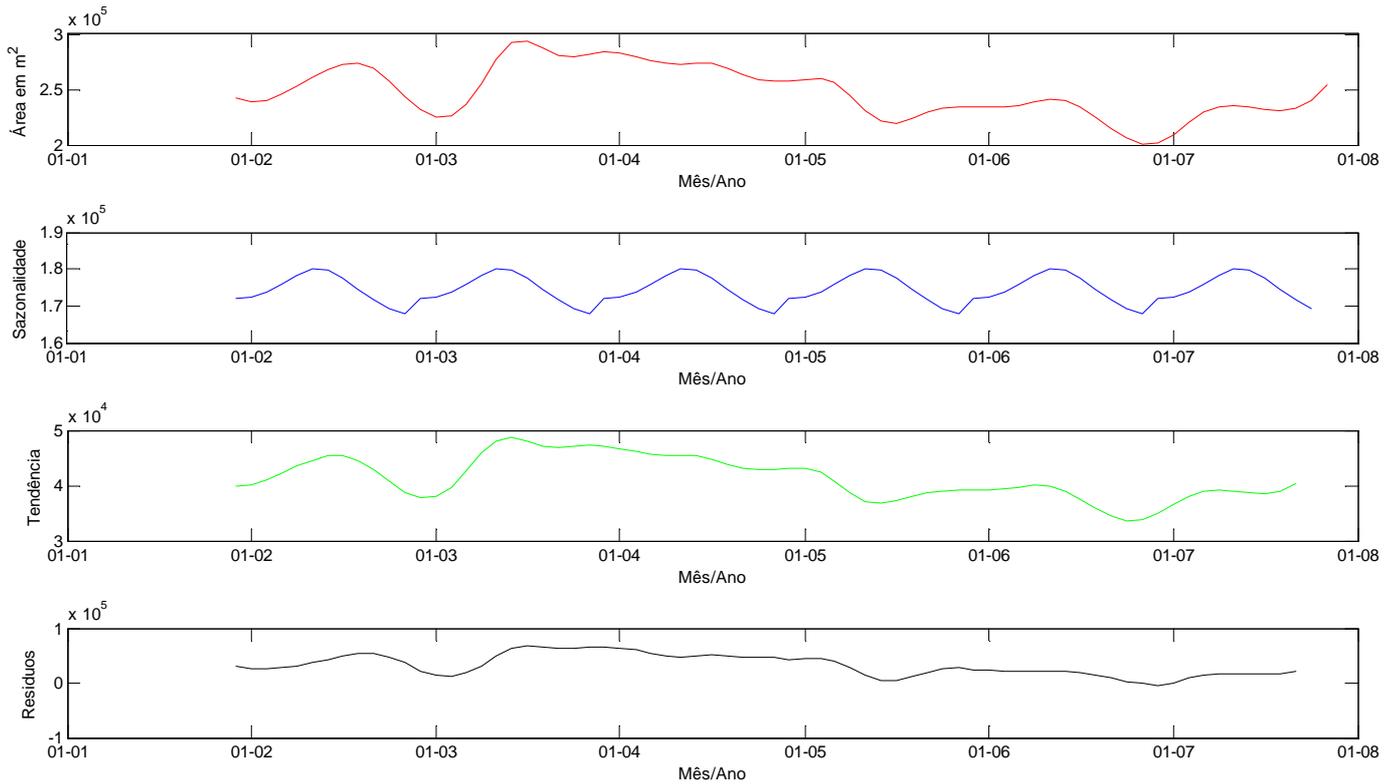


Figura 7. Componentes da estimação da série temporal pelo método da decomposição clássica.

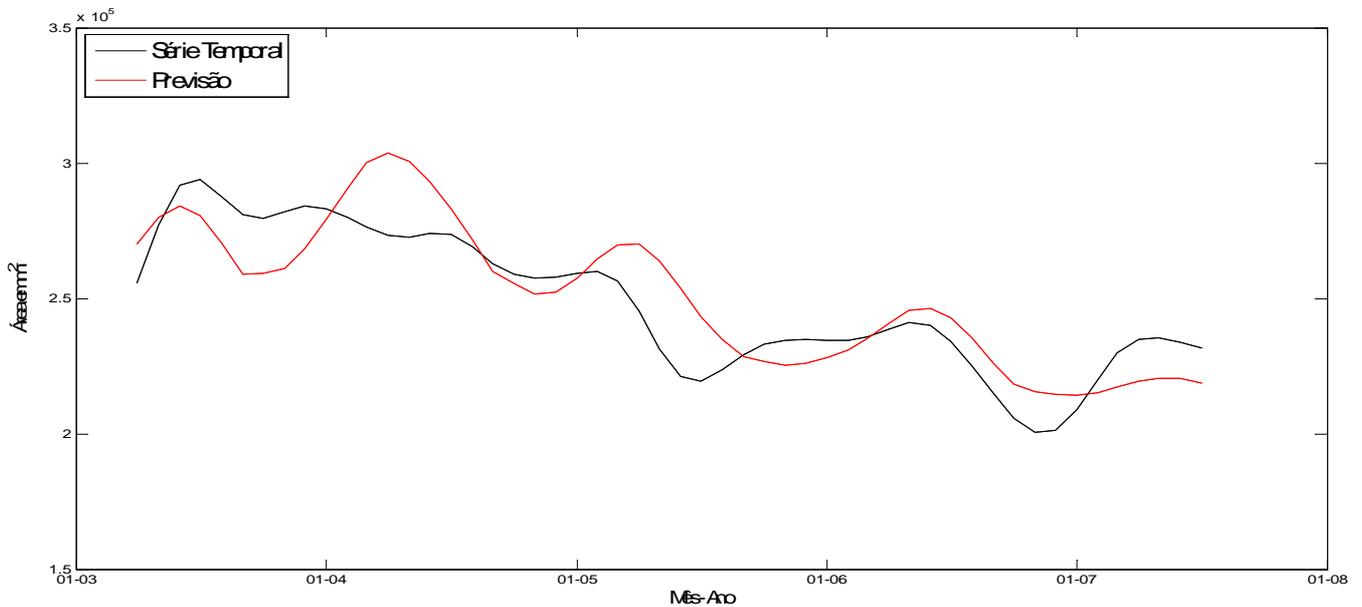


Figura 8. Previsão pelo método de Holt-Winters.

Os valores das constantes de alisamento foram escolhidos de forma a minimizar o erro quadrático médio: $\alpha = 0.2$, $\beta = 0.02$, $\gamma = 0.4$. A previsão referente ao segundo período de tempo demonstrou, em média, valores ligeiramente acima dos valores reais. No entanto, de forma geral, esta previsão encontra-se próxima da série temporal.

Após a previsão, determinaram-se os erros associados. O erro quadrático médio (MSE) obtido foi $3.4047e+008$. O erro médio percentual absoluto (MAPE) foi de 0.0060.

3.3. Estimação de um modelo empírico da configuração da restinga

Nesta secção descreve-se a incorporação de dados referentes aos caudais fluviais, altura das marés e agitação marítima, com o objectivo de estimar a relação entre estes e a dimensão da restinga de forma a ser possível determinar a influência destes na sua área. Esta relação será estimada por métodos de regressão.

Os caudais usados no estudo foram os caudais efluentes médios diários (m^3/s). Dos vinte e três dias dos levantamentos resultantes da monitorização da restinga não existiam valores dos caudais efluentes médios diários para dois deles (25 de Setembro de 2006 e 15 de Junho de 2007). Estes valores foram obtidos através de interpolação linear dos dados existentes adjacentes.

A figura 9 apresenta a variação dos caudais efluentes referente ao período de recolha dos dados analisados.

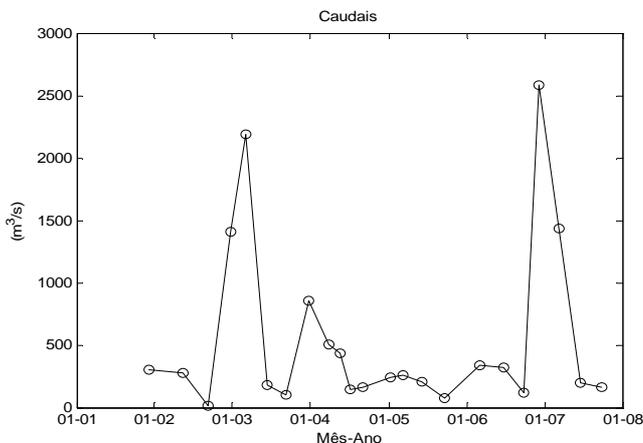


Figura 9. Caudais efluentes médios diários (m^3/s).

Pela observação da figura 9, nota-se que os caudais são mais elevados nos meses de Inverno e em contrapartida, menores nos meses de Verão, como já seria de esperar.

Nos dias considerados no estudo, o dia 6 de Dezembro de 2006 apresentou o valor máximo. Este facto pode ser explicado devido à cheia ocorrida no mês de Novembro de 2006 no Porto.

Em períodos de seca, a barragem descarrega valores muito baixos ou não efectua descargas. Os valores mais baixos foram de $10,5 m^3/s$ em 07-09-2002 e $76,78 m^3/s$ em 19-09-2005.

Para a identificação do impacto dos caudais na configuração da restinga, recorreu-se a modelos de regressão.

O objectivo é verificar se existe uma função f que represente a relação entre os caudais efluentes e a área, da forma: $\text{Área} = f(\text{caudais})$.

Usando a nomenclatura, A corresponde ao vector referente à área e C o vector referente aos caudais, dos vários, modelos lineares e não lineares testados, o que se apresentou mais adequado foi o modelo exponencial estimado. A equação resultante, tendo em conta os dados após a remoção de outliers, foi igual a,

$$A = 269073 e^{0,0001C} \quad [21]$$

O valor do coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,6157.

Foi efectuada também uma análise da influência dos caudais na área da restinga considerando apenas os dados antes e após o início da construção dos molhes.

Antes da construção dos molhes, isto é, para dados até Março de 2003, a regressão através do modelo exponencial foi o melhor método para relacionar a área da restinga e os caudais efluentes.

O modelo exponencial estimado para estes dados foi:

$$A = 27941 e^{0,00009C} \quad [22]$$

O coeficiente de determinação deste modelo foi de $R^2 = 0,7235$, ou seja, 72,35% da variabilidade total dos dados é explicada pelo modelo de regressão dado pela equação [22], sobrando 27,65% de variabilidade por explicar.

Após o início da construção dos molhes, mais uma vez, o modelo que melhor descreveu a relação entre a área da restinga foi o modelo exponencial, dado pela equação:

$$A = 260538 e^{0,0001C} \quad [23]$$

O coeficiente de determinação obtido pelo modelo descrito pela equação [23] foi de 0,6526. O valor de R^2 aumentou com a separação dos dados pelos períodos de antes e depois do início da construção dos molhes.

Portanto, esta análise revelou-se melhor que a da inclusão de todos os valores.

Os modelos aqui apresentados revelaram-se altamente significativos (com 95% de confiança) e conseguiram explicar a maioria da variabilidade dos dados ($R^2 > 50\%$). No entanto, não se revelaram fiáveis para efectuar previsões pois o R^2 foi inferior a 85%.

Os valores da agitação marítima considerados foram os seguintes parâmetros: altura de onda significativa; período de onda; direcção da onda.

Os dados considerados destes parâmetros foram obtidos pela Bóia Ondógrafo de Leixões. Das 23 datas dos levantamentos, apenas foram consideradas 19 uma vez que não foi possível conseguir dados dos parâmetros supracitados para 4 das datas. Não foi também possível conseguir informação para as três datas de 2007.

Não existem dados no período compreendido entre 16 de Janeiro a 3 de Março de 2006, possivelmente, devido a uma avaria na bóia ou no seu receptor e portanto o levantamento do dia 2 de Março de 2006 também não foi considerado.

Os dados da agitação marítima considerados foram determinados através da relação dos valores médios relativamente ao dia do levantamento, ao dia anterior e à última semana (incluindo o próprio dia). Esta obtenção foi efectuada através de regressão linear múltipla.

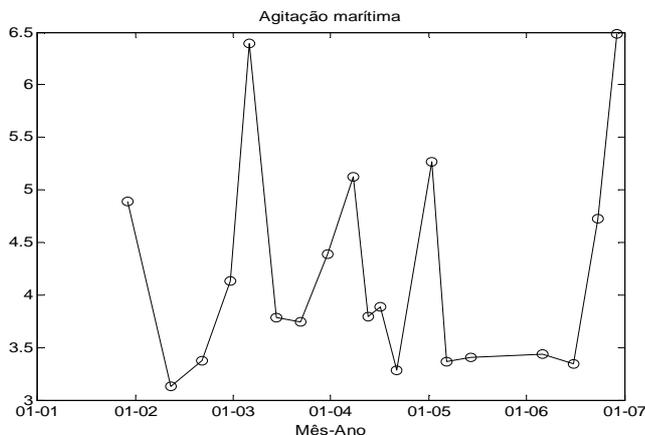


Figura 10. Representação da variabilidade da agitação marítima.

Tal como nos dados anteriormente estudados (caudais efluentes) pela observação do gráfico de dispersão entre a agitação marítima e a área não foi possível identificar qual o modelo de regressão a utilizar.

Para se tentar explicar a variação da área do Cabedelo em função da agitação marítima, com mais robustez, foram aplicados os modelos exponencial, logarítmica, polinomial e potencial.

Para os dados considerados, o modelo polinomial foi o que se revelou mais satisfatório.

Para o modelo polinomial de grau 2, a equação obtida foi:

$$A = -10583AG^2 + 86717AG + 96311 \quad [24]$$

O coeficiente de determinação, R^2 , foi de 0,7313.

Para o modelo polinomial de grau 3, a equação obtida foi:

$$A = 5909,5AG^3 - 95186AG^2 + 477037AG - 484847 \quad [25]$$

O coeficiente de determinação, R^2 , foi de 0,7693, portanto este modelo consegue explicar, aproximadamente, 77% da variabilidade da área em função da agitação marítima.

Para o modelo polinomial de grau 4, a equação obtida foi:

$$A = -8960,7AG^4 + 173111AG^3 - 1e06AG^2 + 4E + 06AG - 4e06 \quad [26]$$

O coeficiente de determinação, R^2 , foi de 0,7985. Este modelo, dado pela equação [26], tal como o anterior, dado pela equação [25], revelou-se robusto ($R^2 > 75\%$).

Separando os dados pela data de início da construção dos molhes do estuário do rio Douro, os modelos obtidos para determinar a relação entre a área da restinga e a agitação marítima revelaram-se ainda mais adequados, inferindo-se que o comportamento de evolução da restinga foi alterado com esta construção.

Antes do início da construção dos molhes, o modelo polinomial de grau 2 obtido, para descrever a relação entre os dados referidos, é dado por:

$$A = -13439AG^2 + 118909AG + 23720 \quad [27]$$

O coeficiente de determinação, R^2 , foi de 0,9221, o que significa que apenas 7,79% da variabilidade dos dados não é explicada pelo modelo de estimação descrito pela equação [27]. Pode-se concluir que o início da construção dos molhes alterou a dinâmica do local.

Após o início da construção dos molhes, a relação da área em função da agitação marítima foi descrita pelo modelo polinomial de grau 2 da seguinte forma:

$$A = -18519AG^2 + 166294AG - 99433 \quad [28]$$

O coeficiente de determinação, R^2 , obtido foi de 0,7444.

Para estimar um modelo que explique a relação da área da restinga em função dos caudais efluentes e da agitação marítima, ou seja, determinar a função f para Área = f (caudais, agitação marítima), começou-se por utilizar o modelo de regressão linear múltiplo, com a seguinte forma:

$$A = \beta_0 + \beta_1 C + \beta_2 AG + \varepsilon_i \quad [29]$$

em que A representa o vector referente aos dados da área, C o vector referente aos dados dos caudais efluentes e AG o vector referente aos dados da agitação marítima.

A correlação entre a área e os caudais é de -0,4579 e a correlação entre a área e a agitação marítima é de -0,3595, ambas negativas.

Após a eliminação dos outliers, a equação obtida pelo método de regressão linear múltiplo foi a seguinte:

$$A = 257020 - 30 C - 3180 AG \quad [30]$$

Para verificar qual o regressor que mais contribui para a explicação da variação da variável resposta foi construída a equação de regressão standardizada,

$$A' = \beta'_1 C + \beta'_2 AG \quad [31]$$

onde os coeficientes β'_j se obtêm a partir da igualdade:

$$\beta'_j = \beta_j \frac{S_{x_j}}{S_A} \quad [32]$$

em que x_1 representa o vector C e x_2 o vector AG .

Foram calculados os seguintes valores: $S_A = 503538,84$, $S_C = 539,71$ e $S_{AG} = 0,87$ e $\beta'_1 = -0,032$ e $\beta'_2 = -0,005$. Como $|\beta'_1| > |\beta'_2|$ pode-se concluir que os caudais têm uma maior contribuição na explicação da variação da área do que a agitação marítima.

O coeficiente de correlação obtido foi de 0,6707, significando que 67,07% da variabilidade total é explicada pelo modelo descrito pela equação [30] e 32,93% da variabilidade não é explicada.

As tentativas anteriormente efectuadas para explicar a relação da área em função dos caudais e a relação da área em função da agitação marítima revelaram-se mais adequadas quando se utilizavam modelos de regressão não linear. Assim sendo, foram experimentados estes modelos.

O modelo que se revelou mais adequado foi o modelo exponencial. A equação que descreve este modelo é a seguinte:

$$A = 257150 e^{-0,0001C + 0,0124 AG} \quad [33]$$

O coeficiente de determinação obtido foi de 0,6479, valor inferior ao modelo de regressão linear, equação [33].

Assim sendo foi o modelo escolhido para explicar a variabilidade da área da restinga em função dos caudais e da agitação marítima. À semelhança dos estudos anteriormente realizados para cada um dos parâmetros, caudais e agitação marítima, foi estimado o modelo antes e após o início da construção dos molhes.

O modelo de regressão linear múltipla obtido, referente aos dados antes do início da construção dos molhes, corresponde à seguinte equação:

$$A = 279970 - 20C - 1460AG \quad [34]$$

Uma vez que o R^2 obtido é baixo (0.4084), procedeu-se à detecção de outliers, eliminando o valor correspondente ao que apresentou o maior resíduo, 25417 m², sendo a média dos resíduos igual a 14561 m².

A regressão linear múltipla foi descrita por:

$$A = 210080 - 50C + 2149AG \quad [35]$$

O coeficiente de determinação aumentou para 0,7785, portanto o modelo da equação [34] conseguiu explicar, aproximadamente, 78% da variabilidade dos dados.

Para avaliar a significância deste modelo procedeu-se à construção da tabela da ANOVA da regressão. Pela observação desta verificou-se que $F_0 = 17,5771$. A hipótese nula foi rejeitada para $\alpha = 0,05$ pois $F_0 > F_t = F_{1,5}(0,05) = 3,5154$, ou seja, conclui-se com 95% de confiança que a área da restinga está linearmente relacionada (pela equação de regressão linear) com os caudais efluentes e agitação marítima.

Para os dados referentes ao período após o início da construção dos molhes, após a remoção de quatro outliers, o modelo de regressão linear múltipla foi dado pela seguinte forma:

$$A = 244320 - 30C + 7080 \quad [36]$$

O coeficiente de determinação foi de 0,7742.

Pela tabela da ANOVA da regressão construída, verificou-se que $F_0 = 20,5695$. A hipótese nula foi rejeitada para $\alpha = 0,05$ pois $F_0 > F_t = F_{1,6}(0,05) = 3,4282$, ou seja, conclui-se com 95% de confiança que a área da restinga está linearmente relacionada (pela equação de regressão linear) com os caudais efluentes.

3.4. Evolução morfológica da linha de costa

Nesta secção será estudado a evolução sedimentar da linha de costa do Cabedelo a partir de várias posições históricas referente ao período em estudo.

Para a análise desta variação recorreu-se à utilização da aplicação DSAS - *Digital Shoreline Analysis System*, uma extensão do software ArcGis®. O DSAS calcula estatisticamente a taxa de variação da linha de costa para uma série temporal de dados. Também pode ser útil para calcular a distância dos contornos face a uma posição claramente identificada. A nomenclatura deste utilitário é baseada na utilização de um ambiente costeiro.

Para cada ano do período de levantamentos, 2001 a 2007, foi construída uma *shoreline* constituída por vectores devidamente identificados no tempo, tantos quantos os levantamentos correspondentes ao ano.

Verificou-se que a linha de costa com exposição a Sul é estável ao longo dos meses.

No sentido Este, a linha da costa é muito homogénea descrevendo uma variação pouco significativa, com a excepção da parte superior da restinga (a parte Norte). Por isso, optou-se por criar uma *baseline* que pretende reflectir a variação das fronteiras a Oeste e a Norte.

A *baseline* é a referência espacial para o cálculo da variação e distância das *shorelines*. Neste trabalho foi desenhada esta linha *onshore*, ou seja, localmente dentro da restinga.

Os transeptos (*transects*) são as linhas colocadas estrategicamente para avaliar a distância entre a linha de referência (*baseline*) e as linhas de costa (*shorelines*).

Os transeptos foram definidos com um comprimento de 450 m, espaçados por 30 m e perpendiculares relativamente à *baseline*. Definiu-se que o ponto de intersecção entre o transepto e a linha de costa a considerar é o mais próximo da *baseline*.

A figura 11 mostra as linhas da costa referentes aos anos 2002 e 2003 com a *baseline* e os transeptos criados para o cálculo da variação das fronteiras.

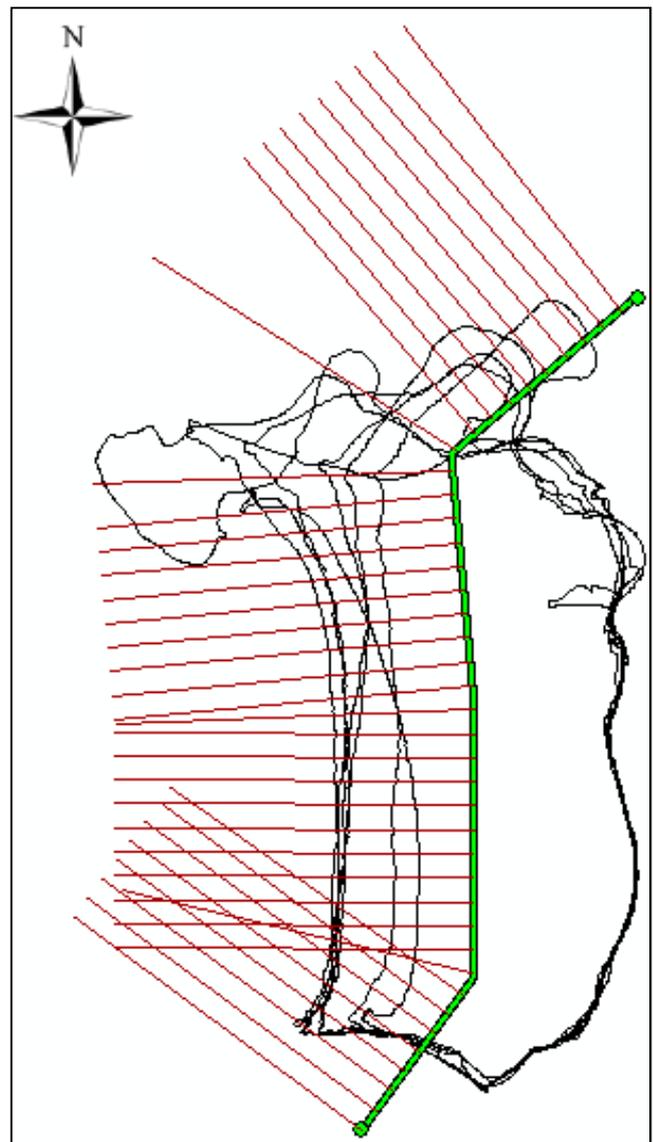


Figura 11. Representação gráfica da *baseline* (linha a verde) e dos transeptos (linhas a vermelho).

Esta parametrização definiu 40 transeptos. O número 1 corresponde ao transepto mais a Sul e o último, número 40, corresponde à posição mais a Norte. Os molhes localizam-se, aproximadamente, a partir do transepto número 23. A partir do número 31, a Norte, a *baseline* foi desenhada com declive positivo.

A aplicação DSAS cria tabelas de dados, as quais podem ser exportadas para Excel e onde se pode proceder ao tratamento dos resultados.

Como foi referido anteriormente, nos meses de Inverno a área da restinga é menor, pelo que a linha de costa encontra-se mais recuada que a média anual. No ano de 2001 apenas existem dados de Dezembro. Assim, a análise da evolução da linha de costa foi realizada desde 2002 a 2007.

Inicialmente, foi efectuada a análise média anual a partir das médias anuais de cada ano relativamente ao ano inicial (2002).

Na área dos transeptos, esta análise revelou que há erosão da linha de costa com a excepção da zona correspondente à localização dos molhes. A evolução média anual da linha de costa é de -11,6 m, ou seja, um balanço negativo.

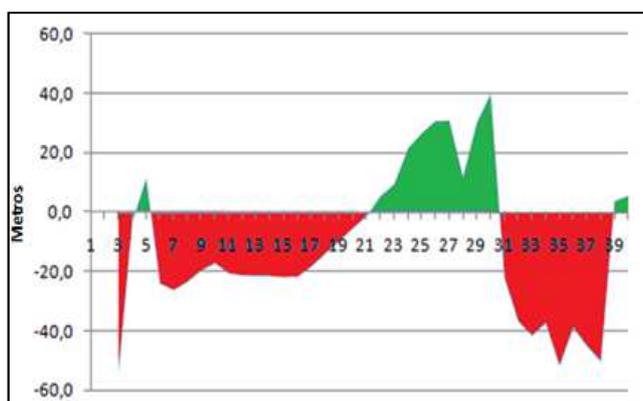


Figura 12. Evolução média da linha de costa (de 2002 a 2007).

A zona a vermelho representa a erosão da linha da costa. A acreção está representada a verde.

O recuo da linha de costa no sentido Oeste pode ser explicado pelas correntes de difracção locais associadas à dinâmica marítima e também pela acção do quebramar Sul. Já antes da construção dos molhes a agitação sofria uma inversão local, invertendo o seu sentido, passando de Sul para Norte, situação que se manteve com a construção dos molhes, acentuando as correntes de difracção em torno do molhe Sul.

Esse movimento geral representado na figura 13, para além de provocar tendencialmente o estreitamento da restinga a Sul, favorece o abastecimento de sedimentos junto aos molhes.

A erosão do lado Norte pode ser justificada pela existência de supostas dragagens, pois não existem dados oficiais da sua ocorrência. No entanto, pela análise da variação da linha de costa há vários indícios que suportam esta suposição.

Um dos indícios que mais sobressai é que poucos meses após o início da construção dos molhes se verificou um decréscimo acentuado nesta zona Norte.

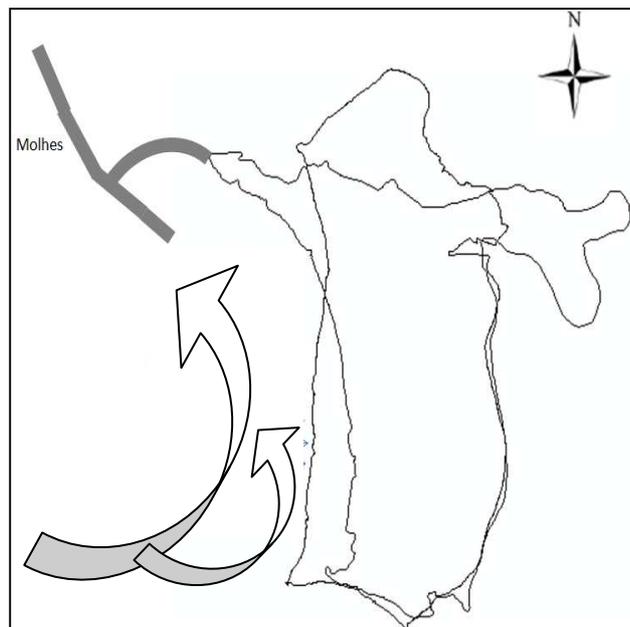


Figura 13. Representação esquemática do impacto do movimento da agitação marítima no lado Oeste do Cabedelo.

4. Conclusões

Com este trabalho pretendeu-se obter um conhecimento mais preciso sobre a forma como a restinga do rio Douro evoluiu desde o final do ano de 2001 até 2007, tentando saber como esta responde aos ciclos naturais de evolução e à influência das actividades humanas.

Os objectivos propostos foram alcançados com sucesso apesar das dificuldades sentidas, devido ao facto deste trabalho ter como base dados reais limitados.

O cálculo da área da restinga revelou-se um desafio complexo devido ao tipo de formatação, à desigualdade e à multiplicidade das características dos dados.

Contudo, pode-se concluir que o método de optimização do cálculo de áreas construído no MATLAB®, em comparação com o ArcGIS® e o Surfer®, se revelou mais preciso e mais adaptado às especificidades de cada levantamento. Ficou demonstrado que ao longo do período de estudo, a área da restinga teve uma tendência decrescente.

A análise da série temporal pelo método de decomposição clássica foi extremamente útil para identificar características relevantes, tais como a sazonalidade anual.

A partir deste método foi efectuada uma previsão (pelo método de Holt-Winters), a qual, de forma geral, se aproxima da série temporal, comprovando assim a adequação da decomposição anteriormente realizada.

Para tentar relacionar a área com factores como caudal, altura da maré e agitação marítima foram aplicados alguns modelos empíricos.

Esta tentativa obteve resultados melhores com a diferenciação dos dados em dois períodos distintos, antes e após o início da construção dos molhes da foz do rio Douro. Através dos métodos de regressão utilizados pode-se confirmar que o caudal fluvial e a agitação marítima influenciam a configuração exterior da restinga.

O modelo de estimação mais adequado para descrever a relação da área da restinga em função dos caudais efluentes foi o modelo exponencial, com um coeficiente de determinação de 0,62, conseguindo portanto explicar 62% da variabilidade dos dados.

Através do mesmo tipo de modelo, foi construída uma equação com um valor do coeficiente de determinação de 0,72, considerando os valores referentes ao período antes do início da construção dos molhes e de 0,65 após o início da construção.

O modelo de estimação mais adequado para descrever a relação entre a agitação marítima e a área foi o modelo polinomial de grau 3. Este modelo revelou-se robusto pois o coeficiente de determinação obtido foi, aproximadamente, igual a 0,77. Foi estimado um modelo polinomial de grau 2 o qual consegue explicar 92,22% da variabilidade dos dados da área em função dos dados da agitação marítima referentes ao período antes do início da construção dos molhes.

A estimação da área em função dos caudais efluentes e da agitação marítima foi representada por um modelo de regressão linear múltipla, com um coeficiente de determinação de 0,67. Através da standardização do modelo de regressão determinado, conclui-se que o regressor que mais contribui para explicar a variabilidade da área é o caudal efluente.

Considerando os dados antes do início da construção dos molhes obteve-se uma equação de regressão linear múltipla com um valor do coeficiente de determinação de 0,78 e considerando os dados após do início da construção dos molhes, esse valor foi de 0,77.

Note-se que estas conclusões têm por base os dados existentes que correspondem a um período atípico devido a uma acção antrópica significativa. Portanto, não se pode afirmar que os modelos determinados seriam aplicáveis num período diferente do considerado.

A análise através do ArcGis® da evolução da linha de costa revelou-se de grande utilidade para a identificação dos pontos de erosão e sedimentação do Cabedelo e para a verificação do impacto da construção dos molhes.

Através desta análise conclui-se que a erosão da linha de costa ocorreu, essencialmente, no lado Oeste e Norte da restinga enquanto que a acreção de sedimentos ocorreu na zona onde se localiza o molhe Sul da foz do rio Douro.

Antes da construção dos molhes, a acreção do Cabedelo era evidente, o que poderá significar que a configuração do Cabedelo estava a aumentar. No entanto, após o início dessa construção esta tendência inverteu-se, tornando-se a erosão predominante.

Neste período, houve uma diminuição drástica da restinga, onde o recuo da linha chegou a ultrapassar os 100 m num ano. A partir de 2005, o desaparecimento da zona arenosa do lado Norte tornou-se bastante visível. No ano de 2007 verificou-se uma acreção da linha de costa.

Este facto poderá indicar que um dos objectivos da construção do molhe Sul, a preservação do Cabedelo, começou a surtir efeito.

Pelos estudos efectuados, tanto em relação à estimação de modelos empíricos da configuração externa do Cabedelo como às análises da evolução da linha de costa, pode-se concluir que a construção do molhe Sul alterou a tendência e a dinâmica local.

Referências

- Baptista, P.; Bastos, L.; Cunha, T.; Bernardes, C.; Dias, J. A. (2008). Aplicação de metodologias de monitorização GPS em litorais arenosos: Geração de modelos de elevação do terreno. *Revista da Gestão Costeira Integrada* 8(1), pp. 9-23.
- Baptista, P. (2006). O Sistema de Posicionamento Global Aplicado ao Estudo de Litorais Arenosos. Tese de Doutoramento. Universidade de Aveiro.
- Barros-Coelho, E. A.; Simões, P. A.; Achcar, J.A.; Martinez, E.Z.; Shimano, A.C. (2008). Methods of Estimation in Multiple Linear Regression: Application to Clinical Data. *Revista Colombiana de Estadística*, vol. 31, no. 1, pp. 111 a 129.
- Box, G. E. P., and Jenkins, G. M., (1976). *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Holden Day. San Francisco, 598 pp.
- Brockwell, P. J.; Davis, R.A. (1996 1st ed; 2002 2nd ed). *Introduction to time series analysis*. Springer Texts in Statistics.
- Fernandes, L. (2008). Aplicação dos Sistemas de Informação Geográfica na compreensão da morfodinâmica da restinga na foz do Rio Douro. Dissertação. Departamento de Geografia, FLUP.
- Howell, D. (1999). *Statistical Methods for the Behavioral Sciences*. 3rd edition.
- Instituto Português e dos Transportes Marítimos. - Relatório de Conformidade Ambiental do Projecto de Execução (RECAPE) das Obras de Melhoria da Barra do Douro. Lisboa.
- Jesus, M. E. R. V. (2003). Morfodinâmica do Cabedelo da foz do Rio Douro: Perspectiva histórica e monitorização por GPS para o conhecimento da sua evolução actual. Aplicabilidade pedagógica numa vertente CTSA. Tese de Doutoramento. Departamento de Geologia, FCUP.
- Makridakis, S.; Wheelwright, S.; Hyndman, R. (1998). *Forecasting: Methods and Applications*. John Wiley.
- Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações. (20 de Março de 2009). Inauguração dos Molhes do Douro. Porto.
- Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. (30 de Abril 2001). Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Douro. Porto.
- Peixeiro, L.; Silva, A. (1999). Melhoria da Acessibilidade e das Condições de Segurança na Barra do Douro. Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Associação Internacional de Navegação, Porto.

- Santos, M. I. R. (2002). Construção de Metamodelos de Regressão Não Linear para Simulação de Acontecimentos Discretos. Tese de Doutoramento. Unversidade Técnica de Lisboa, Dezembro.
- Shumway, R.; Stoffer, D. (2000). Time series analysis and its applications. Springer Texts in Statistics.
- Short, A. D. (1999). Beach and Shoreface Morphodynamics. Chichester, UK: Jonh Wiley ans Sons, pp.379.
- Teodoro, A.C.; Gonçalves, H.; Veloso-Gomes, F.; Gonçalves, J. A. (January 2009). Modeling of the Douro River Plume Size, Obtained Through Image Segmentation of MERIS Data. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 6, no. 1, pp. 87-91.
- Thieler, E.R.; Himmelstoss, E.A.; Zichichi, J.L., and Ergul, Ayhan (2008). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0- An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report -1278.
- WWW: *Sistema Nacional de Informação*. Disponível: <http://snirh.pt/> [Março 2009].