

REPRESENTATIVIDADE DE LINHAS DE COSTA PARA AVALIAÇÃO DE TENDÊNCIAS EVOLUTIVAS A LONGO PRAZO. MODELAÇÃO NUMÉRICA DE UM CASO DE ESTUDO.

Oliveira, J.N.C. ^{1,2}

¹ Departamento de Hidráulica e Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal. joliveira@lnec.pt.

² CERIS, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa, Portugal. joao.c.oliveira@tecnico.ulisboa.pt.

RESUMO

A realização de intervenções na zona costeira requer o estudo prévio do seu impacto na morfodinâmica adjacente, a diferentes escalas temporais. A necessidade de prever comportamentos e tendências a longo prazo foi facilitada pelo desenvolvimento de modelos numéricos baseados na simplificação dos principais processos físicos costeiros, para o cálculo de sucessivas posições instantâneas da linha de costa, sinóticas com o forçamento hidrodinâmico, ao longo do período de previsão.

Este estudo, baseado na aplicação de um modelo numérico de evolução de linha de costa, teve como objetivo analisar a representatividade de linhas de costa instantâneas, normalmente utilizadas na avaliação de tendências evolutivas a longo prazo, como a ocorrência de erosão, expor a fragilidade deste parâmetro de avaliação num sistema com forçamento multidirecional, e propor um método de análise baseado em duas linhas complementares: a linha média de anos marítimos completos e a linha das posições mais recuadas nos respetivos anos. Concluiu-se que as linhas de costa instantâneas não são as linhas mais representativas das tendências de evolução a longo prazo, sendo o método proposto mais adequado para este efeito.

1 INTRODUÇÃO

O litoral português suporta uma diversidade de atividades imprescindíveis que tiram partido do seu valor natural, económico e cultural. No entanto, verificam-se muitos casos onde a crescente ocupação litoral é incompatível com a dinâmica natural. A degradação destes sistemas costeiros, nomeadamente devido a problemas relacionados com a erosão costeira, que se prevê aumentar devido à subida do nível médio do mar, deve ser resolvida no âmbito de estratégias de intervenção integradas. A abordagem aos problemas de erosão costeira deve por isso ter em conta o tipo e intensidade da ocupação litoral e as causas próximas e remotas da erosão, a diferentes escalas temporais.

A erosão costeira é um processo natural de longo prazo resultante da interação entre os sedimentos existentes ao longo da costa e a massa de água costeira, através da ação conjugada de fatores de forçamento oceanográfico (*i.e.*, ondas, correntes e marés), verificando-se sempre que a taxa de remoção de sedimentos excede a de deposição. Este balanço negativo de sedimentos resulta na migração da linha de costa na direção do continente, com o estreitamento da faixa de praia. No entanto, na maioria dos casos, tal como no local de estudo, este fenómeno não se processa de forma absolutamente continuada, nem a ritmo constante: existem anos em que se registam grandes recuos da linha de costa, e existem outros em que o recuo é muito pequeno ou se verifica acreção.

Nos locais de maior densidade populacional, o recurso à implantação de estruturas de proteção costeira, como esporões, defesas longitudinais aderentes e quebramares destacados, adequadas para salvaguardar propriedades, edificações, património em risco e populações aí existentes, juntamente com a adoção de outras medidas, tais como reforço sedimentar de praias (alimentação artificial), tem demonstrado ser a solução mais eficaz de proteção. Este tipo de soluções requer, no entanto, um melhor conhecimento da dinâmica sedimentar na sua

envolvente para que possam ser mitigados alguns dos inconvenientes que lhe estão associados, como é o caso do recuo da linha de costa a sotamar de estruturas transversais.

A sul da embocadura do rio Mondego, a evolução da linha de costa foi fortemente influenciada pelas intervenções antrópicas efetuadas desde meados do século passado (Oliveira e Brito, 2015), das quais se destacam: a construção dos molhes da embocadura (1961-1965); a extração de areia na praia da Figueira da Foz (1973-1996); intervenções de regularização fluvial e portuária (diversas datas); a alimentação artificial pontual 50 m a sul do enraizamento do molhe sul (1973-1975); a construção da defesa longitudinal aderente da Cova (1975); a construção do esporão da Leirosa (1978), do esporão da Costa de Lavos (1979) e do campo de cinco esporões da Gala-Cova (1979); o prolongamento do molhe norte da embocadura em cerca de 400 m (2008-2010); e sucessivas operações de dragagem na embocadura para acesso ao porto, com deposição dos sedimentos dragados na zona da Gala-Cova (2014-2016).

A regeneração do litoral, processo complexo e demorado, não é possível sem a correta compreensão da dinâmica costeira para fundamentar modelos de ordenamento do território mais sustentados e validar políticas de intervenção e gestão do espaço e do risco na zona costeira (Santos *et al.*, 2014). A modelação numérica da hidrodinâmica (ondas, correntes, nível do mar), do transporte sedimentar e da morfologia do fundo do mar é a principal ferramenta para compreender a dinâmica sedimentar e evolução morfológica da complexa “zona de rebentação das ondas – face de praia – sistema dunar”, e assim, melhorar a eficiência de esquemas de proteção costeira e prever a evolução morfológica da costa. Entre estas ferramentas destacam-se as que permitem prever as sucessivas posições instantâneas da linha de costa a longo prazo, parâmetro controverso, que se pretende analisar e discutir neste estudo.

Com base em modelação numérica, Oliveira (2016 e 2016b) avaliou o efeito do prolongamento do molhe norte da embocadura do rio Mondego na evolução do trecho entre as embocaduras dos rios Mondego e Lis, numa extensão de aproximadamente 30 km. A previsão da evolução nos 12 anos subsequentes à conclusão do prolongamento, baseada na utilização de linhas de costa instantâneas, evidenciou um recuo generalizado da linha de costa, acentuado a sotamar dos esporões existentes. No entanto, é a incerteza associada à utilização de linhas de costa instantâneas como índice de erosão costeira que levou à realização do presente estudo.

A quantificação da erosão costeira é usualmente determinada em função das taxas de recuo da linha de costa que se calculam recorrendo a linhas de costa instantâneas, quer provenientes de observações (fotografias aéreas ou levantamentos topo-batimétricos), quer obtidas através de modelos numéricos de previsão.

Como enumerado por Dias *et al.* (1994), na análise dos valores obtidos para as taxas de erosão acima mencionadas, tem de ser tido em atenção que estas dependem de: i) período analisado: caso a LC inicial reflita um período com erosão costeira anormal, como após a ocorrência de grandes temporais, ou com acreção excecional, como períodos de grandes calmarias ou anos sucessivos sem temporais significativos, as taxas médias estimadas para o período analisado estão provavelmente subvalorizadas ou sobrevalorizadas em relação às taxas médias reais de recuo anual, respetivamente; ii) época do ano: devido à normal ciclicidade anual que se verifica com erosão na época invernal e acumulação na época estival; iii) método de obtenção: referências diferentes, como base da arriba, crista da arriba, praia seca/praias molhadas, linha da maré-cheia, linha do zero hidrográfico, linha ao nível médio do mar, etc., e bases diferentes, como fotografias aéreas, mapas, marcas no terreno, modelação numérica, etc.; iv) extensão do período analisado: períodos longos fornecem resultados com menor dispersão mas menos significativos e de interpretação mais difícil, não exprimindo eventuais comportamentos opostos nem o ritmo de evolução da LC; v) escala: fontes de maior pormenor fornecem resultados mais fiáveis; vi) pormenor da análise: a variação média do litoral é normalmente quantificada de forma discreta e não contínua, sendo a análise tanto mais fiável quanto maior for a densidade dos pontos ou perfis considerados; e vii) extensão e variabilidade do troço costeiro analisado: quanto mais extenso ou maior variabilidade existir, menos fiáveis se tornam as taxas médias de variação.

Este estudo tem como objetivos avaliar a metodologia baseada na representatividade de linhas de costa instantâneas utilizadas como parâmetro de base na previsão de tendências evolutivas a longo prazo, como a ocorrência de erosão, e propor um método de análise baseado nas linhas médias de anos marítimos completos complementadas com as linhas dos recuos extremos anuais.

2 DADOS E MÉTODO

2.1 Caso de estudo

A zona de estudo trata-se do trecho litoral localizado a sul da Figueira da Foz, estendendo-se até à foz do rio Lis, na Praia da Vieira. A sua análise é de grande importância para as populações residentes nas frentes litorais da Gala-Cova, Costa de Lavos, Leirosa e Pedrogão, sendo apontada como uma zona crítica por Santos *et al.* (2014) e dado o facto de ainda estar sujeita ao défice sedimentar induzido pelo prolongamento do molhe norte da embocadura do rio Mondego em 2010 (Oliveira, 2016).

A dinâmica costeira na zona de estudo apresentada na seção seguinte, nomeadamente a agitação marítima e o potencial de transporte sedimentar por ela induzido, foi caracterizada por Oliveira *et al.* (2016, 2016a) no período de 1952 a 2010.

2.1.1 Dinâmica costeira

A análise de uma série temporal de parâmetros de onda (*hindcast*), obtidos com base na aplicação de um modelo espectral de geração e propagação de ondas marítimas ao Nordeste do Oceano Atlântico (Dodet *et al.*, 2010), com uma resolução espacial de 0.5° e um passo temporal de 6 horas, validados para a zona e período em estudo, identificou um regime de agitação marítima bastante energético com grande variabilidade interanual e sazonal, considerando a sazonalidade com base nas estações marítimas de inverno (outubro a março) e verão (abril a setembro). Este regime caracteriza-se por uma altura significativa média de 2.15 m, com 40% de ocorrência de Hs superior a 2 m, período de pico médio de 11.6 s, direção média incidente de 299.5°N e obliquidades extremas 290/311°N no inverno/verão (janeiro/agosto).

Esta longa série de dados, em conjunto com a série temporal do nível do mar, resultante da composição da maré astronómica com a componente meteorológica, e dados geomorfológicos locais, como o perfil transversal de praia representativo da zona de estudo baseado na caracterização morfológica de Oliveira e Brito (2015) para o trecho litoral entre as embocaduras dos rios Mondego e Lis, e o diâmetro mediano representativo, $d_{50}=0.30$ mm, foi utilizada pelos autores para o cálculo do potencial de transporte longitudinal através do modelo numérico baseado em processos *LITDRIFT* (DHI, 2014). Os resultados revelaram valores anuais bastante variáveis, de 580-1 500 $\times 10^3$ m³/ano, com deriva para sul em 78% dos anos, de média 600 $\times 10^3$ m³/ano, e identificaram a distribuição transversal do transporte longitudinal na zona ativa, com extensão média de 2 km.

2.1.2 Modelação numérica da evolução da linha de costa

As linhas de costa sinóticas que serviram de base à avaliação da metodologia proposta na secção seguinte, foram obtidas por Oliveira (2016, 2016b) através do desenvolvimento de um modelo conceptual de dinâmica sedimentar da zona de estudo, no qual se aplicou o modelo numérico de evolução de linha de costa, *LITLINE*, parte integrante do sistema de modelos numéricos determinísticos *LITPACK* (DHI, 2014), que tem por base um modelo bidimensional no plano vertical (2D-V) para cálculo do transporte sedimentar na componente longitudinal, e um modelo numérico intra-onda *Quasi-3D* que descreve os processos de transporte não estacionários ao longo do ciclo da onda.

Quando se recorre a modelação numérica para prever a evolução morfológica de um trecho de costa, é fundamental proceder à caracterização prévia dos comportamentos e fenómenos inerentes à dinâmica litoral da zona de estudo no âmbito da correta calibração e validação do modelo com dados conhecidos. O modelo foi calibrado para o período 1996-2001 e verificado para o período 2001-2008, com base em linhas de costa observadas, extraídas de modelos digitais de terreno construídos a partir de levantamentos topográficos do INAG (Instituto da Água, assim designado na altura), para os anos 1996 e 2001 (julho), e de levantamentos topo-

hidrográficos da DGT (Direção Geral do Território), para os anos de 2008 e 2011 (Oliveira, 2014), e em dados de agitação marítima sinóticos. Como orientação média da linha de costa (LC) da unidade fisiográfica em estudo considerou-se a orientação do alinhamento médio da isolinha do NMM em 2011, 19.6°N, coincidente com a direção da linha de base (*baseline*) adotada como referencial longitudinal no modelo, com um passo espacial de 10 m.

O período de previsão iniciou-se em 2008, de forma a coincidir com o início dos trabalhos de prolongamento do molhe norte, e estendeu-se até 2022 (Oliveira, 2016), tendo por base o pressuposto de que o processo de acumulação na praia da Figueira da Foz devido ao prolongamento do molhe estabilizará em, aproximadamente, 12 anos após a conclusão das obras exteriores do porto, à semelhança do que se verificou aquando da sua construção em 1965 (Teixeira, 2006). Foi considerado para este período o clima de agitação marítima verificado nos anos anteriores à conclusão do prolongamento juntamente com um nível do mar resultante de previsões de maré astronómica.

Para a análise dos resultados de previsão obtidos, Oliveira (2016) recorreu à partição do trecho litoral em estudo em cinco sub-trechos (Figura 1), condicionados pelas estruturas transversais existentes, construídas ou naturais: 1) do molhe sul da embocadura do rio Mondego ao último esporão do campo de esporões da Gala-Cova (EGC); 2) do último esporão do campo de EGC ao esporão da Costa de Lavos (ECL); 3) do ECL ao esporão da Leirosa (EL); 4) do EL ao promontório de Pedrogão; e 5) do promontório de Pedrogão ao molhe norte da embocadura do rio Lis. A tendência de evolução da LC é reproduzida pelo modelo com maior fiabilidade nos sub-trechos 3, 4 e 5, conforme explicado com maior detalhe por Oliveira (2016).

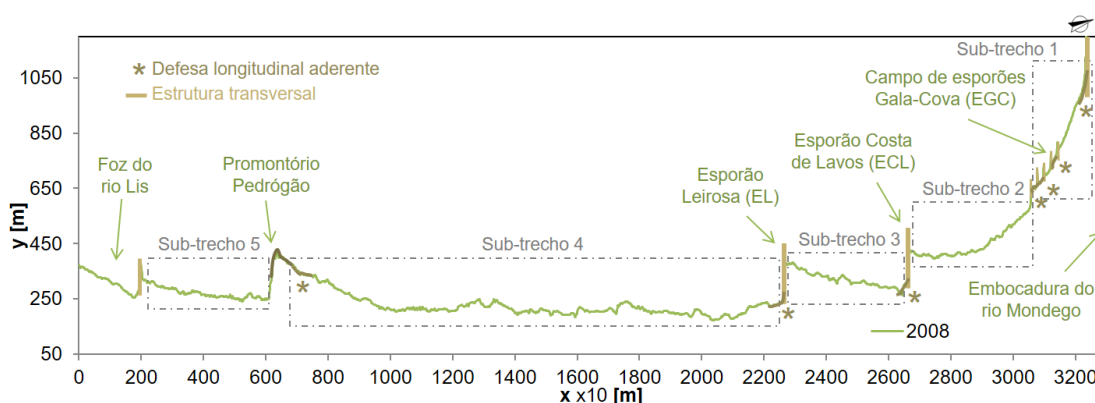


Figura 1 – Sub-trechos da zona de estudo, com a linha de costa medida em julho de 2008 (Oliveira, 2016).

2.2 Metodologia proposta para análise da evolução da linha de costa

A metodologia para análise da evolução da LC sugerida no presente estudo baseia-se na análise da evolução das linhas médias (LM) da série temporal de LC de cada ano marítimo completo, entendido como o período anual desde outubro do ano anterior até setembro do ano em questão. Este período, doravante denominado por ano marítimo, engloba duas estações marítimas contíguas: inverno marítimo, de outubro a março, seguido de verão marítimo, de abril a setembro, conservando a transição inverno-verão marítimo, entendida como a transição mais suave (de recuperação) em termos de evolução do perfil transversal de praia e, consequentemente, da linha de costa.

Apesar de todas as condicionantes mencionadas, as taxas médias de variação da LC, obtidas através de duas únicas LC instantâneas (as LC inicial e final no período em análise), método doravante aqui designado como “LC instantâneas”, são o índice mais utilizado para diagnosticar e determinar as tendências evolutivas do litoral, e avaliar o impacto de fatores perturbadores da dinâmica sedimentar costeira (Dias *et al.*, 1994). A metodologia baseada em LM aqui proposta, utilizando a média anual da série temporal (com frequência de 6 horas) das posições instantâneas da LC (obtidas com recurso a modelos numéricos de LC devidamente

calibrados e validados) para o cálculo de taxas médias de evolução em substituição do método das LC instantâneas, acrescenta precisão e valor prático a este tipo de análise na medida em que exclui muitas das incertezas apontadas por Dias *et al.* (1994) em estudos de tendências evolutivas de longo prazo.

Existe ainda outro fator bastante relevante quando se efetuam análises e previsões de evolução da LC que não é tido em conta quando apenas se avaliam taxas médias de variação da LC, quer pela utilização de LC instantâneas quer pela utilização de LM. Sugere-se então, como análise complementar ao método de análise das LM, a análise dos máximos recuos anuais, consistindo na obtenção da linha que representa as posições anuais mais recuadas previstas para cada ponto da linha de costa do trecho em estudo. Esta informação, cuja fiabilidade será tanto maior quanto maior for a densidade de pontos utilizados para descrever a LC e quanto menor for o passo de cálculo de resolução dos processos hidro-morfológicos, permite o estudo de comportamentos de erosão localizada e extrema, possibilitando a melhoria da eficiência de soluções de proteção costeira aplicadas a estes locais de recuos extremos, denominados *hotspots* de erosão.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados numéricos referentes às posições das linhas de costa (LC) a 1 de julho e 15 de abril de cada ano do período em previsão (2010-2022), assim como a posição anual da linha média (LM) de cada ano marítimo e as linhas dos máximos recuos anuais (LMax) no mesmo período, foram obtidos para a zona de estudo. As taxas de avanços e recuos anuais relativos às posições indicadas foram calculadas para toda a extensão da zona de estudo (ZE), em cada sub-trecho e localmente, a barlamar e sotamar (terminologia com referência na deriva predominante dirigida para sul) das estruturas transversais. Nos sub-trechos 1, 2 e 5, pelos motivos referidos na metodologia, os resultados devem ser analisados com reserva.

O potencial de transporte sedimentar na zona de estudo calculado através do modelo numérico *LITDRIFT*, para cada ano marítimo do período de previsão, confirma a tendência da deriva litoral predominante para sul na costa oeste portuguesa, verificando-se anos de exceção, como o terceiro ano de previsão, bastante energético, com um potencial total de mobilização de 1 300 mil m³ de sedimentos e potencial de transporte resultante de 200 mil m³ para norte, tendência também verificada, mas com menor intensidade, nos quinto e último anos de previsão.

3.1 Linhas médias de anos marítimos

Os resultados de previsão obtidos a partir das LM indicam um comportamento anual bastante variável entre erosão e acreção em toda a zona de estudo. No entanto, a intensidade dos recuos previstos é mais elevada do que dos avanços, verificando-se assim um comportamento tendencialmente erosivo a longo prazo.

Devido ao facto dos sub-trechos relevantes serem delimitados por estruturas transversais, verifica-se, em geral, uma rotação da LC com eixo fixo num ponto de inflexão da tendência evolutiva aproximadamente central ao sub-trecho, em que dominam tendências de recuo na zona norte e avanços na zona sul, devido à predominância da deriva litoral para sul. Contrariamente ao comportamento da zona central, mais estável quanto maior a distância entre as estruturas que delimitam o sub-trecho, perante um modelo que tem em conta a multidirecionalidade do forçamento, o comportamento na zona adjacente às estruturas é bastante variável e condicionado pela direção resultante do transporte sedimentar. Em geral, para o mesmo período anual, o comportamento de acreção e erosão verificado é oposto a barlamar e sotamar destas estruturas, sendo na zona adjacente à Costa de Lavos e à Leirosa onde se preveem as taxas de variação médias e extremas mais elevadas.

3.2 Linhas médias de anos marítimos versus linhas de costa instantâneas

As taxas de erosão e acreção calculadas são mais elevadas durante a primeira metade do período de previsão, consequência direta da grande acumulação inicial de sedimentos junto ao prolongamento do molhe norte da embocadura do rio Mondego. Estas taxas, quando calculadas através de LC instantâneas, resultam em valores superiores aos obtidos através de LM em praticamente todo o período de previsão e em todos os sub-trechos. Em particular no

referido período inicial, as taxas baseadas em LC instantâneas têm frequentemente o dobro da intensidade das taxas baseadas em LM. Esta discrepância de intensidade é evidente em 2014-2015 para a LC de 1 de julho, em 2018-2019 para a LC de 15 de abril, e em 2013-2014 para ambas as LC.

Em geral, as LM apresentam um traçado mais suave que as LC instantâneas. Da comparação das taxas anuais baseadas na LM e na LC de 1 de julho, verifica-se que em 2013-2015 a taxa baseada na LC instantânea é, em média (para os vários sub-trechos), 2,5 vezes superior à baseada na LM, e particularmente superior no sub-trecho 4 (o triplo). Em 2016-2017, a taxa baseada na LC de 1 de julho é cerca de 80% da taxa baseada na LM, sendo, no entanto, esta última inferior à taxa baseada na LC de 15 de abril. Estes resultados díspares entre as LC de 15 de abril e de 1 de julho, confirmam que as LC instantâneas não são indicativas de recuos ou avanços anuais representativos de uma tendência evolutiva, pois revelam taxas com intensidade bastante distinta consoante o dia considerado para a sua obtenção e, por vezes, tendência oposta à da taxa baseada na LM.

As diferenças entre as taxas de variação médias baseadas nas duas LC instantâneas consideradas e pelas LM são menores na zona de Pedrógão, atingindo, no entanto, mais do dobro a norte do promontório entre 2013 e 2016. Em redor da Leirosa encontram-se as maiores diferenças, muito significativas até 2017, ao passo que com base nas LC de 15 de abril as diferenças são bastante significativas até 2014 e de 2017 em diante. Na Costa de Lavos as diferenças são bastante evidentes para os mesmos períodos que na Leirosa. Conclui-se que as LC de 1 de julho representam melhor a evolução média nos anos de 2017-2021, porque se trata de um período de potencial de transporte resultante exclusivamente para sul, ao passo que as LC de 15 de abril representam melhor o comportamento do período de 2014-2017, anos de potencial de transporte resultante variável.

Sendo a posição de uma LC instantânea, medida ou numérica, o resultado direto das condições hidro-morfológicas que antecederam a sua observação (e.g. agitação marítima, nível do mar, posição anterior), a comparação de duas LC instantâneas, mesmo que medidas no mesmo dia de anos distintos, não reflete a evolução ocorrida entre essas duas situações, inclusivamente eventuais excecionalidades nos comportamentos esperados, quer em termos absolutos quer em termos de tendências sazonais.

3.3 Linhas de máximos recuos

A linha de máximos recuos anuais (LMax), não se tratando de uma LC real, representa, em cada ponto, a posição mais recuada das LC previstas ao longo do ano marítimo. Durante todo o período de previsão, as LMax apresentam-se sempre mais recuadas que as LC instantâneas analisadas. A independência entre as tendências demonstradas por ambas dever-se-à à multidireccionalidade do forçamento. Assim como se verifica com as LM, não existe uma LC instantânea que especifique a localização dos recuos máximos como as LMax e permita assim prever e minimizar danos causados por eventos mais graves.

A forma como a LMax evolui ao longo do período de previsão é variável e nem sempre a sua evolução é consistente com a evolução da LM. No entanto, a sotamar do EL, prevê-se uma permanente tendência de recuo da LMax, apenas contrariada no terceiro ano de previsão devido ao excepcional transporte resultante para norte. Estes resultados realçam a crescente vulnerabilidade à erosão localizada a que está sujeita a zona a sul da Leirosa e podem motivar intervenções planeadas com vista a minimizar os danos causados por temporais extremos.

3.4 Análise local - Leirosa

As zonas circundantes à Costa de Lavos e à Leirosa destacam-se do comportamento generalizado da zona de estudo na medida em que se preveem variações morfológicas bastante elevadas junto ao esporão da Costa de Lavos (ECL) e ao esporão da Leirosa (EL). Preveem-se LM mais recuadas a barlar e mais avançadas a sotamar do que as LC instantâneas obtidas, nos anos de 2009, 2011, 2012 e 2020. Adicionalmente para as LC de 1 de julho, este comportamento verifica-se também nos anos de 2014, 2016, 2019 e 2021. Os resultados das secções anteriores permitiram identificar a Leirosa como a povoação costeira de maior risco da zona em estudo. A obtenção de consecutivos recuos anuais nesta zona ao longo de todo o período de previsão, com exceção dos anos 2012-2013 e 2014-2015, motiva

também esta análise detalhada às tendências distintas de evolução da LC que os diferentes métodos em estudo apresentam entre os anos de 2013 e 2015, numa extensão de 500 metros a barlar e sotamar do EL.

No período 2012-2013 preveem-se taxas de erosão/acrecção médias até 44/28 m e 34/38 m a barlar/sotamar dos esporões da Leirosa e da Costa de Lavos, respetivamente. Este comportamento resulta do facto de se prever em 2013 uma anormal predominância de potencial de transporte sedimentar dirigido para norte. Os valores das taxas baseadas na LM variam nos períodos de 2013-2014 e 2014-2015 apresentam-se no Quadro 1, sendo o ano de 2015 novamente um ano invulgar de potencial de transporte resultante para norte, de menor intensidade. Como se pode observar no referido quadro, as taxas baseadas na LC de 1 julho preveem uma elevada acreção a norte do esporão da Leirosa que não representa o comportamento médio em 2013-2014, e as taxas baseadas na LC de 15 de abril, preveem avanços da linha de costa de magnitude intermédia entre as taxas baseadas na LM e na LC de 1 julho.

Quadro 1 – Variação da posição das LC instantâneas e LM entre 2013-2014 e 2014-2015, numa extensão de 500 m adjacente ao esporão da Leirosa.

Data das linhas utilizadas	Período	A norte do esporão da Leirosa (500 m)			A sul do esporão da Leirosa (500 m)		
		Avanço máximo	Variação média	Recuo máximo	Avanço máximo	Variação média	Recuo máximo
01/jul	2013-2014	38.6	18.9	0.0	0.0	-19.7	-28.1
15/abr	2013-2014	34.9	17.5	0.0	0.0	-16.8	-23.5
LM	2013-2014	0.0	-5.3	-11.6	4.8	1.3	-5.5
01/jul	2014-2015	0.0	-27.6	-60.6	20.4	14.1	0.0
15/abr	2014-2015	0.0	-20.8	-40.7	12.9	6.7	0.0
LM	2014-2015	0.0	-16.7	-27.7	6.9	4.6	0.0

Em 2014 foi retomada a direção da deriva para sul, com uma menor capacidade de mobilização dos sedimentos (metade do potencial total do ano anterior), mantendo-se no sub-trecho 3 o mesmo comportamento previsto no ano anterior. No entanto, a barlar do ECL e a sotamar do EL, prevê-se uma lenta inversão desta tendência, com pontos de inflexão locais demonstrados pela análise das LM. Estas variações locais são visíveis a norte do EL nas Figuras 2 e 3 para os períodos 2013-2014 e 2014-2015, respetivamente, e a sul do EL nas Figuras 4 e 5 para os períodos 2013-2014 e 2014-2015, respetivamente. Como se pode observar na Figura 4, esta lenta inversão da tendência a sotamar do EL não é demonstrada pelas LC instantâneas pois não têm em conta o período anual completo durante o qual ocorreu a progressiva inversão da tendência de transporte.

No período de 2013-2014, como apresentado no Quadro 1 e visível nas Figuras 2 e 4, as tendências médias de evolução demonstradas pelas taxas baseadas nas LM foram opostas às das LC instantâneas. A barlar do EL (Figura 2), ambas as LC de 1 de julho e de 15 de abril demonstram avanço da LC, quando a LM claramente determina uma tendência erosiva que aumenta com o afastamento à estrutura. A sotamar (Figura 4), o recuo imediatamente a sul do esporão é consistente utilizando ambos os métodos, mas o ponto de inflexão referido acima verifica-se apenas no traçado da LM. Neste período, as posições mais recuadas que a LC toma são bastante afastadas das posições indicadas pelas LC instantâneas e LM, especialmente a sotamar do EL (Figura 4).

No período de 2014-2015, como apresentado no Quadro 1 e visível nas Figuras 3 e 5, a tendência de erosão a barlar e acreção a sotamar do EL coincide recorrendo a ambos os métodos de análise. No entanto, a magnitude dos avanços e recuos é bastante díspar entre eles, sendo os valores mais extremos obtidos pelas LC de 1 de julho, e os valores mais reduzidos obtidos pelas LM.

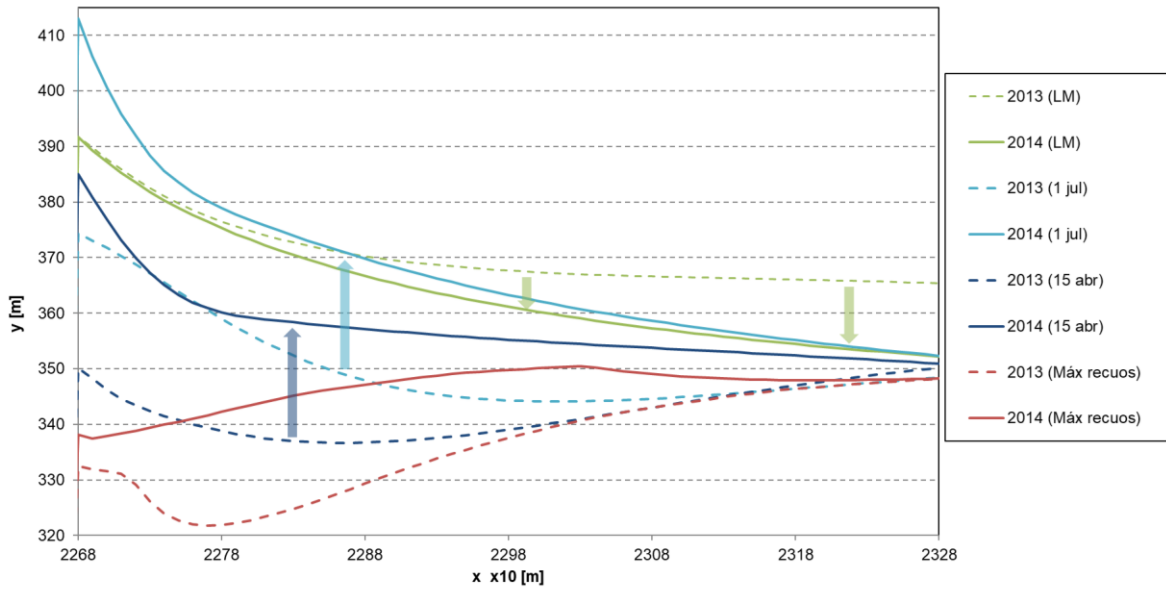


Figura 2 – Posição prevista para as linhas de costa a 1 de julho e 15 de abril, e linhas médias e de máximos recuos para 2013 e 2014, numa extensão de 500 m a norte do esporão da Leirosa.

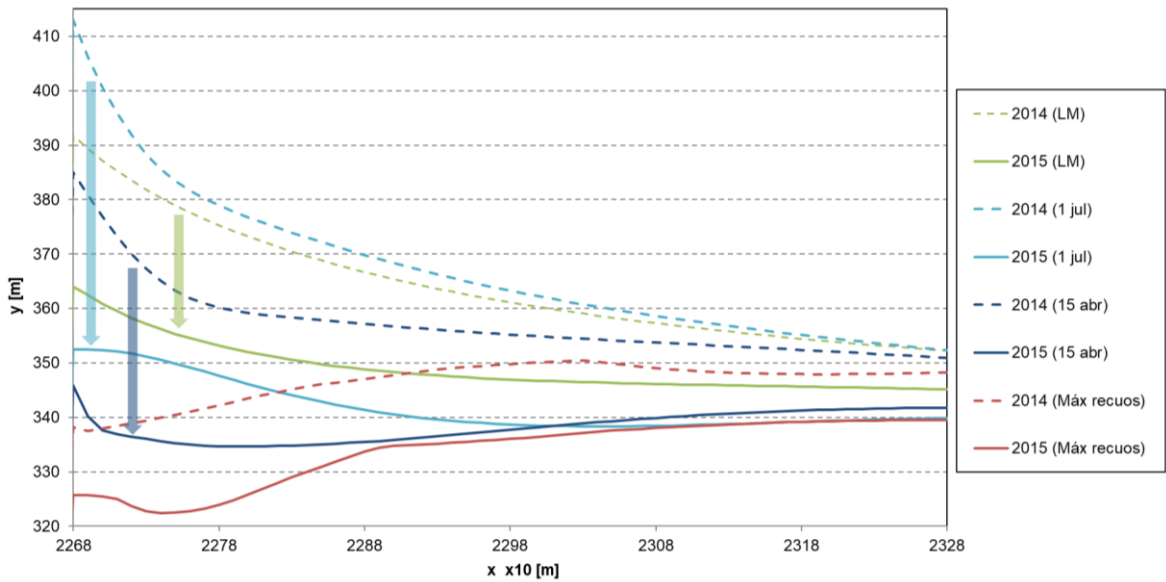


Figura 3 – Posição prevista para as linhas de costa a 1 de julho e 15 de abril, e linhas médias e de máximos recuos para 2014 e 2015, numa extensão de 500 m a norte do esporão da Leirosa.

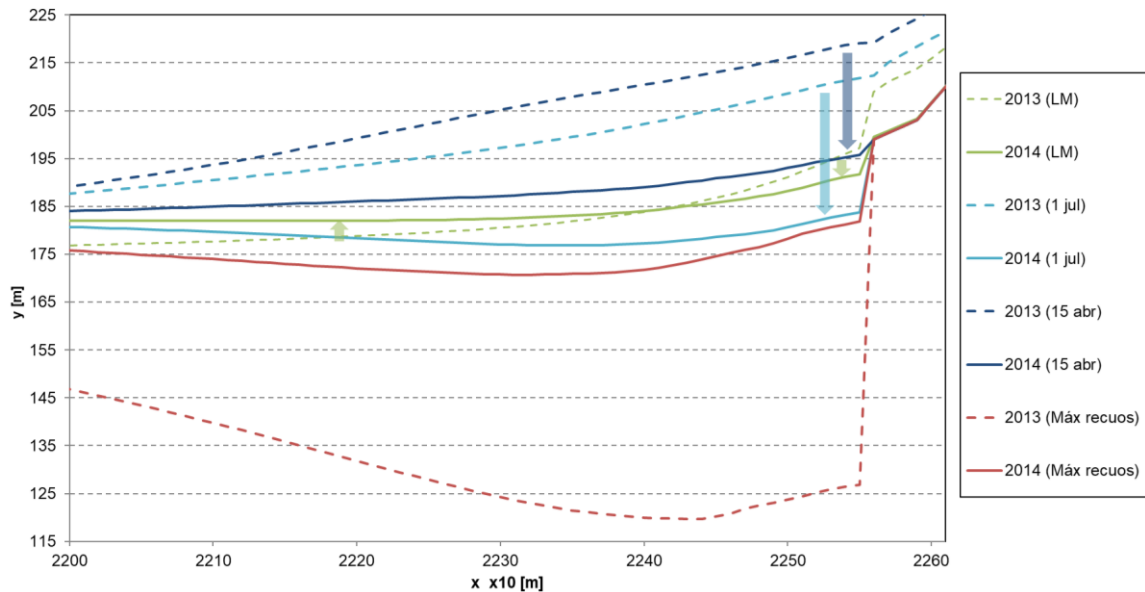


Figura 4 – Posição prevista para as linhas de costa a 1 de julho e 15 de abril, e linhas médias e de máximos recuos em 2013 e 2014, numa extensão de 500 m a sul do esporão da Leirosa.

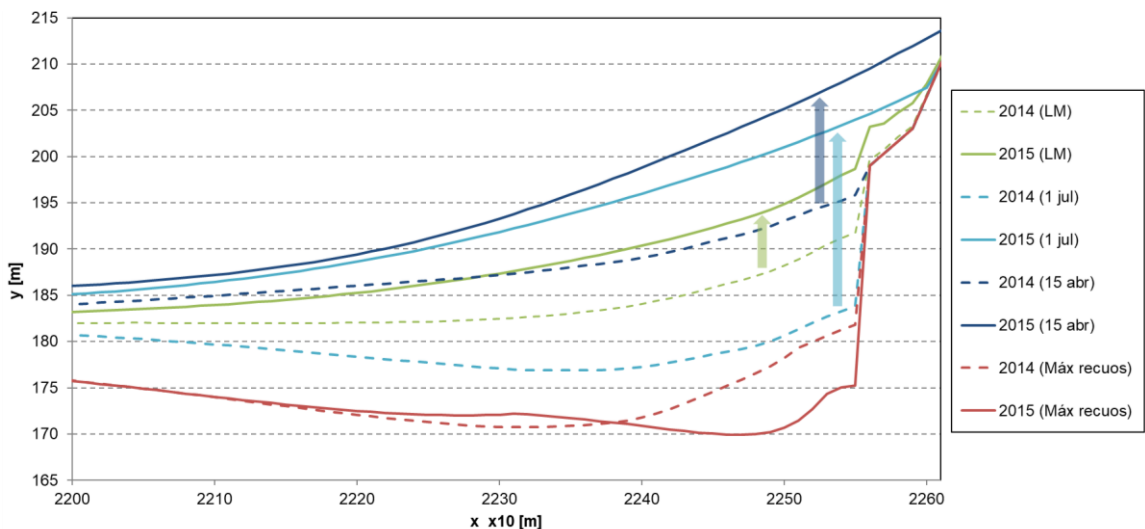


Figura 5 – Posição prevista para as linhas de costa a 1 de julho e 15 de abril, e linhas médias e de máximos recuos para 2014 e 2015, numa extensão de 500 m a sul do esporão da Leirosa.

Além das diferenças locais na representatividade dos métodos em análise acima apresentadas, nos extremos do trecho 3 e a sul do Pedrógão, as taxas baseadas nas LC instantâneas no período 2013-2014 demonstram tendências opostas às baseadas na LM. A barlar e sotamar das referidas estruturas, no período de 2018-2019, enquanto a taxa baseada na LC de 1 de julho demonstrou alguma tendência evolutiva oposta à da LM, evidente em torno da Leirosa e a sul de Pedrógão, as taxas baseadas nas LC de 15 de abril demonstraram consistentemente taxas opostas às baseadas nas LM em redor das três estruturas neste período e também no ano anterior.

Comparando a evolução das linhas de costa previstas para 1 de julho de 2014 e 2015, seria esperado que o comportamento erosivo a norte de Pedrógão fosse bastante acentuado, com sucessivos recuos da LC, sem se verificar qualquer avanço. No entanto, pela análise das posições das linhas de costa previstas para 15 de abril do referido período, esperar-se-ia um ligeiro avanço na linha de costa nesta zona. A evolução das LM de 2014 para 2015 revela que, de facto, neste período foram previstos avanços da linha de costa, o que demonstra que houve uma variabilidade no comportamento erosão-acreção que não demonstrado pela análise das LC, indicativas de uma intensa tendência de erosão neste período.

A comparação entre a evolução demonstrada pelas LM e pelas LC instantâneas de julho e de abril, demonstra as diferenças ao nível da magnitude das taxas de variação obtidas pelos dois métodos e identifica a existência de tendências de evolução opostas. Conclui-se que, apesar de os dois métodos revelarem uma maioria de tendências similares, as LC instantâneas não são tão representativas do comportamento médio como as LM, que fornecem informação acerca das tendências reais de erosão, independentes das variações de curto prazo. As LMax fornecem informação adicional acerca dos recuos mais graves e locais de risco que nenhuma das linhas referidas anteriormente contém, o que permite adaptar as estruturas de defesa existentes a comportamentos extremos, sejam elas defesas estruturais ou naturais (dunas).

4 CONCLUSÕES

Neste estudo recorreu-se à aplicação de um modelo numérico de evolução da linha de costa ao trecho costeiro entre as embocaduras dos rios Mondego e Lis para analisar a representatividade de linhas de costa na avaliação de tendências evolutivas a longo prazo.

Propôs-se um método de análise baseado nas linhas médias de anos marítimos completos complementadas com as linhas dos recuos extremos anuais, que se comparou com a metodologia frequentemente aplicada, baseada em linhas de costa instantâneas, a fim de avaliar a sua representatividade.

Os resultados demonstram que o método proposto é mais adequado a estudos de erosão pois obvia algumas das fragilidades inerentes ao uso de linhas de costa instantâneas em sistemas com forçamento multidirecional. Ao contrário das linhas médias, que representam um comportamento generalizado, as linhas de costa instantâneas representam o efeito dos agentes forçadores no curto espaço de tempo que antecede a sua recolha, resultando por vezes em tendências opostas à tendência evolutiva média, como se constatou a norte da Leirosa no período 2013-2014.

Conclui-se que as taxas baseadas nas linhas médias representam o índice de erosão costeira mais adequado, pois a variabilidade da direção do transporte sedimentar influencia fortemente as taxas médias de erosão baseadas nas linhas de costa instantâneas, sobrestimando-as em relação às taxas médias representativas da tendência evolutiva geral.

Os resultados demonstram ainda que são as linhas dos máximos recuos anuais que fornecem informação determinante acerca de locais em risco de recuos extremos, habilitando o método de análise proposto à avaliação do fenómeno erosivo a nível local.

Recomenda-se a utilização do método proposto, baseado em linhas médias de anos marítimos e linhas de máximos recuos anuais, em estudos cujo objetivo seja compreender as tendências de evolução da linha de costa a longo prazo e identificar *hotspots* de erosão. Este método apresenta um elevado valor prático como ferramenta de auxílio à implementação de medidas de mitigação da erosão costeira, problema cada vez mais atual que ameaça várias povoações na costa oeste portuguesa.

AGRADECIMENTOS

O autor deste estudo é financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), através da bolsa com a referência PD/BD/128508/2017.

O autor agradece a orientação de Filipa S.B.F. Oliveira e António A. Trigo-Teixeira.

REFERÊNCIAS

- DHI (2014). *LITPACK - An integrated modelling system for littoral processes and coastline kinetics, Short introduction and tutorial*, Copenhaga, Dinamarca, 64 p.
- Dias, J.A., Ferreira, O. e Pereira, A.R. (1994). Estudo sintético de diagnóstico da geomorfologia e da dinâmica sedimentar dos troços costeiros entre Espinho e Nazaré, edição eletrónica (2005): w3.ualg.pt/~jdias/JAD/ebooks.
- Dodet, G., Bertin, X. e Taborda, R. (2010). *Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades*, *Ocean Modelling*, Vol. 31, pp 120-131.
- Oliveira, F.S.B.F. (2014). Caracterização morfológica do trecho litoral entre as embocaduras dos rios Mondego e Lis, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, DHA/NEC, Lisboa.

- Oliveira, F.S.B.F. e Brito, F.A. (2015). Evolução da morfologia costeira a sul da embocadura do rio Mondego, de 1975 a 2011, *VIII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*, Universidade de Aveiro, Aveiro, CD-ROM, 15 p.
- Oliveira, J.N.C. (2016). Modelação do impacte do prolongamento do molhe norte da embocadura do rio Mondego nas praias adjacentes a sul, *Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil*, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Oliveira, J.N.C., Oliveira, F.S.B.F. e Teixeira, A.A.T. (2016a). Agitação marítima e potencial de transporte sedimentar longitudinal a sul da embocadura do rio Mondego. Actas das 4^{as} *Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Instituto Hidrográfico, Lisboa, pp 241-244.
- Oliveira, J.N.C., Oliveira, F.S.B.F. e Teixeira, A.A.T. (2016b). Evolução da linha de costa a sul da embocadura do rio Mondego: modelação do impacte do prolongamento do molhe norte. Actas das 4^{as} *Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Instituto Hidrográfico, Lisboa, pp 245-248.
- Santos, F.D., Lopes, A.M., Moniz, G., Ramos, L. e Taborda, R. (2014). Gestão da Zona Costeira – O Desafio da Mudança, Grupo de Trabalho do Litoral, 242 p.
- Teixeira, A.A.T. (2006). Evolução da Linha Litoral a Sul do Porto da Figueira da Foz – estudos em modelo matemático. Instituto Superior Técnico, CEHIDRO - Grupo de Costas e Portos, Lisboa, 25 p.