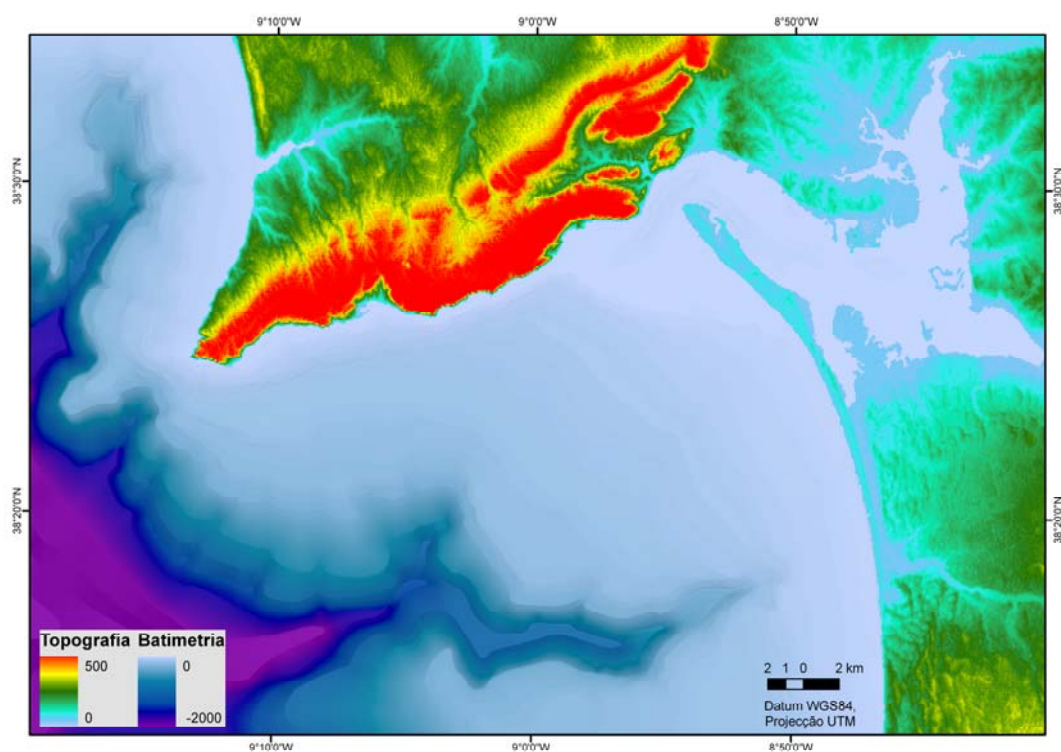


Evolução do estuário do Sado e da plataforma
continental entre Sesimbra e o canhão de Setúbal
nos últimos ~50 000 anos

Pedro Brito



Trabalho submetido a concurso ao prémio Científico Sesimbra
Dezembro 2009

RESUMO

A evolução recente do estuário do Sado e plataforma continental contígua é reconstituída através de dados de mapas históricos, sonar de varrimento lateral e sísmica de alta resolução.

O estuário do Sado é separado do oceano pela península de Tróia, tem um prisma de maré de $2,1 \times 10^8 \text{ m}^3$ e uma área submersa de $\sim 200 \text{ km}^2$, cujo $\sim 1/4$ corresponde ao seu domínio externo dominado pelo delta de vazante submarino e $\sim 3/4$ à bacia estuarina no domínio interno. Entre 1968 e 1995/2002, tanto a área da bacia estuarina, como os volumes do prisma de maré e do espaço de acomodação sofreram reduções de 6%, 7% e 8%, respectivamente. O domínio interno teve taxas de sedimentação positivas, embora com um decréscimo acentuado a partir de 1979. No estuário externo verificou-se acumulação para o período de 1968-1979, invertendo-se essa tendência para o período 1979-1995/2002. A erosão focalizada essencialmente no lobo frontal do delta deverá ter resultado da redução do prisma de maré, estimando-se uma perda de $150 \times 10^6 \text{ m}^3$ de sedimentos (14%) entre 2002-1930.

Identificaram-se 3 superfícies sísmicas principais S1-S3, individualizando 4 unidades US1-US4. US1 corresponde ao actual delta do estuário, cuja idade máxima estimada é 7,5ka. US2 é uma unidade transgressiva, cuja base se associa ao ravinamento da transgressão Holocénica. US3 tem uma idade estimada de 60-25ka e é interpretada como correspondendo a barreiras costeiras progradantes que ocorrem dos 26m aos 85m de profundidade e são entalhadas por duas plataformas costeiras, definindo uma faixa do fundo do mar marcada por quebras de declive, fundos rochosos e/ou uma fina película de US2. US4 é heterogénea, incluindo sedimentos do Plio-Plistocénico ao Miocénico.

A evolução da plataforma desde os 60ka é reconstituída com base na relação estabelecida entre curvas de variação do NMM publicadas e estruturas interpretadas como paleo-linhas de costa marcadas por quebras de declive aos 35-45m (~60-50ka e ~13ka), 65-75m (~55-25ka), 80m (~35-25ka e ~11ka) e 95-100m (~16ka).

RESUMO ALARGADO

1 Objectivos gerais

Tendo como objectivo genérico contribuir para o entendimento dos processos que regem a evolução da zona costeira e em particular de ambientes estuarinos no contexto da subida do nível médio do mar que se perspectiva como consequência das alterações climáticas globais; pretendeu-se com este trabalho reconstituir a evolução recente do estuário do Sado, enquadrando-a no contexto da evolução da plataforma continental contígua durante a transgressão (subida relativa do nível médio do mar) que se seguiu ao último máximo glaciário.

Nesse sentido, realizou-se um estudo em que se pretendeu compatibilizar análises da evolução do estuário e da plataforma continental, a que se associam duas escalas distintas tanto do ponto de vista espacial como temporal. O estudo da evolução do estuário foi feito, considerando uma escala com uma variação temporal decadal, enquadrando os domínios interno e externo do estuário e considerando uma variabilidade espacial de ordem decamétrica no plano horizontal a métrica no plano vertical. O estudo da evolução da plataforma foi feito considerando uma escala temporal milenar, enquadrado o estuário no sector da plataforma compreendido entre Sesimbra e o canhão de Setúbal, considerando uma resolução espacial que variou entre uma escala de ordem quilométrica a métrica no plano horizontal e métrica a

decimétrica no plano vertical. As duas escalas consideradas nesta análise sobrepõem-se, tanto do ponto de vista espacial como temporal, na área correspondente ao domínio externo do estuário onde se situa o seu delta de vazante submarino.

A análise da evolução morfológica recente do estuário do Sado baseou-se na comparação de mapas históricos referentes aos últimos 70 anos. Esta análise, constituiu o ponto de partida para a avaliação da variabilidade espacial e temporal da morfologia estuarina, e teve os seguintes objectivos específicos:

- Descrever a actual morfologia estuarina, identificando as principais unidades morfo-sedimentares;
- Avaliar a variabilidade espacial e temporal das principais unidades morfo-sedimentares descritas, identificando as suas possíveis tendências evolutivas e respectivos mecanismos forçadores

A análise do troço da plataforma continental entre Sesimbra e o canhão de Setúbal baseou-se na análise de dados geofísicos adquiridos para o efeito, onde se incluem dados batimétricos, de sonar de varrimento lateral e de sísmica de reflexão de alta resolução. A partir da interpretação destes dados pretendeu-se reconstituir a evolução recente da plataforma ao largo do estuário do Sado tendo em conta os seguintes objectivos específicos:

- Identificar paleo-linhas de costa e outras morfo-estruturas associadas formadas desde o último máximo glaciário;
- Reconstituir a morfologia da superfície pré-transgressiva da área da plataforma que foi submersa durante a transgressão que se sucedeu ao UMG e/ou da correspondente superfície de ravinamento marinho;

- Caracterizar a estrutura e geometria dos corpos sedimentares transgressivos;
- Identificar estruturas indiciadoras da possível existência de uma 2ª barra do estuário localizada a sul da actual.

2 Evolução do sistema costeiro e plataforma continental entre Sesimbra e o canhão de Setúbal nos últimos 60ka

As unidades sísmicas US1 a US3 correspondem à série sedimentar enquadrada pelo actual fundo do mar e pela mais antiga das principais superfícies sísmicas definidas (S3). De acordo com as idades estimadas para as unidades sísmicas interpretadas, a serie sedimentar que compreende US1 a US3 pode abarcar um período correspondente aos últimos 60ka. Tendo em conta as principais conclusões a que se chegou através da interpretação da sísmica de alta resolução, propõe-se um possível modelo para a evolução da linha de costa neste sector da plataforma durante os últimos 60ka.

Para além dos dados de sísmica de reflexão, contribuem também para o referido modelo 1) a análise morfológica feita para o sector da plataforma estudado, 2) a interpretação dos dados de sonar de varrimento lateral e 3) a análise comparativa de mapas históricos.

Da análise comparativa de mapas históricos dos últimos 70 anos, resultou uma perspectiva do que se crê terem sido as principais alterações morfológicas sofridas pela bacia estuarina do rio Sado e pelo respectivo delta de vazante. Tendo em conta as principais conclusões a que se chegou através da interpretação dos resultados obtidos pela análise comparativa de mapas, é possível detalhar o modelo evolutivo proposto

para a plataforma complementando-o com a informação referente as alterações ocorridas nos últimos 70 anos na área do delta e da bacia estuarina.

As duas abordagens utilizadas para reconstituir a evolução da plataforma, com base na sísmica e nos mapas históricos são muito distintas. Essas diferenças resultam, não só das características intrínsecas de cada uma das metodologias aplicadas, como também da grande diferença na escala temporal considerada pelos dois tipos de análise e pela área geográfica envolvida. Contudo, apesar dessas diferenças, existem pontos comuns e de complementaridade que interessa explorar. O delta de vazante do estuário constitui a área onde a complementaridade das duas abordagens utilizadas é mais evidente.

O modelo proposto para a evolução do sector da plataforma estudado é inferido fundamentalmente a partir das estruturas que se interpretaram como marcadores de paleo-linhas de costa, cuja idade foi estimada por correlação com curvas de variação do NMM publicadas. As 4 principais estruturas identificadas pelas letras a-d, que se interpretam como possíveis marcadores de paleo-linhas de costa e as suas respectivas idades estimadas são na figura seguinte.

Admite-se que as 3 primeiras estruturas associadas a paleo-linhas de costa, referidas como “a”, “b” e “c”, tenham funcionado sequencialmente como linha de costa durante o EIM-3. Algumas destas estruturas poderão eventualmente ter sido herdadas de ciclos anteriores. É nomeadamente, o caso da estrutura “c” que poderá já ter funcionado como paleo-linha de costa entre o final do EIM-4 e o início do EIM-3. Após o EIM-3 ter-se-á seguido o UMG, de cuja linha de costa correlativa não se detectaram evidências nos dados de sísmica de reflexão. Admite-se, no entanto, que essa linha de costa se possa relacionar com uma área mais aplanada identificada aos

140m de profundidade entre o cabo Espichel e Sesimbra, com base nos dados da batimetria INGMAR. Durante a transgressão que se seguiu ao UMG ocorreu uma breve estabilização do nível do mar aos 16ka B.P (Dias et al., 2000) com a qual se relaciona a estrutura “d”. Segue-se a possível reactivação das estruturas “a” e “b” durante o Dryas Recente e finalmente o estabelecimento da actual linha de costa entre os 5-7,5ka.

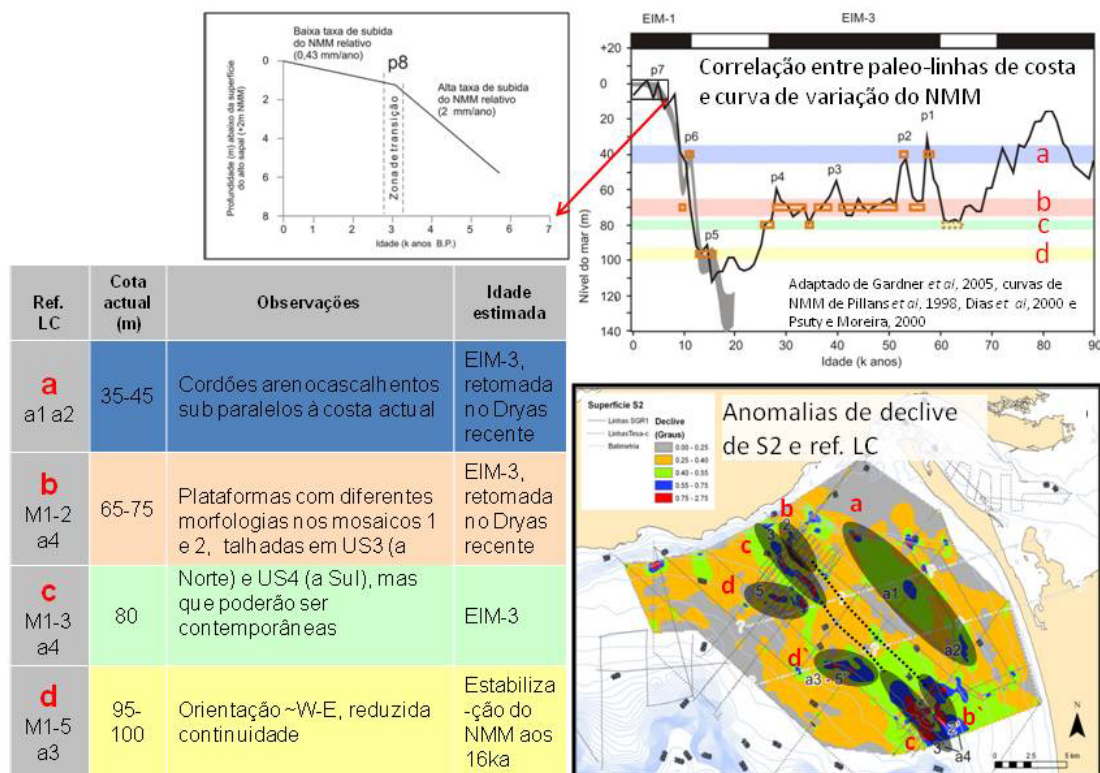


Figura 1 – Curvas de variação do nível do mar adoptadas para enquadrar temporalmente as estruturas interpretadas que se relacionam com a evolução do sector estudado da plataforma continental. A- Curvas de variação do nível do mar nos últimos 90000 anos a preto e nos últimos 20000 anos a cinzento-escuro, baseadas respectivamente nos dados de Pillans *et al* (1998, com limites de EIM adaptados de Martinson et al, 1987 em Gardner et al., 2005) e Dias *et al* (2000); assinalando os principais picos das curvas por p1 a p7, as barras horizontais coloridas assinalam os intervalos de profundidades (com um intervalo mínimo de $\pm 2,5$ m) associados às paleo-linhas de costa referidas por “a”, “b”, “c” e “d”; as caixas horizontais a laranja representam os períodos de tempo em que as paleo-linhas de costa poderão ter estado activas. A curva de variação do nível médio do mar relativa aos últimos 5500 anos (em cima à esquerda) foi proposta por Psuty e Moreira (2000) especificamente para a área do estuário do Sado.

2.1 Escala milenar, com ênfase nos últimos 60 ka

De uma forma geral pode concluir-se que a evolução recente da plataforma é caracterizada por uma baixa disponibilidade sedimentar (*sediment starved shelf*), que está patente 1) na reduzida espessura máxima de US2 (~9m); 2) na preservação de corpos sedimentares mais externos de US3 associados a quebras de declive; 3) à elevada inclinação média de S2 (~0,4°); e por fim 4) à sua semelhança morfológica com o actual fundo do mar. Destaca-se ainda que os principais depocentros de US2 tendem a localizar-se para SE dos depocentros de US3.

Apresentam-se de seguida os principais passos do modelo que se propõe para a evolução do troço da plataforma continental ao largo do estuário do Sado nos últimos 60ka.

Para cada período temporal considerado faz-se uma breve síntese das variações do NMM estimadas, seguindo-se então, as referências aos eventos ou estruturas interpretadas que se relacionam com o período em referência.

1 – 60ka aos 25ka, EIM-3

Período correspondente ao EIM-3, caracterizado por um NMM relativamente estável com uma ligeira tendência regressiva (dos -60m aos -80m) marcada por variações do NMM de entre as quais se destacam 4 picos transgressivos (p1 a p4, Figura 1) a que se associam variações do NMM entre aproximadamente -30 a -65 m, -40 a -70 m, -55 a -80 m e -60 a -80 m, respectivamente, do mais antigo para o mais recente.

Associa-se a este período regressivo a deposição de barreiras costeiras e deltas progradantes, correspondendo US3 aos vestígios dessas estruturas preservados essencialmente em duas depressões que constituem vales drenantes para SW e que

eventualmente terão um controle tectónico. Aos picos transgressivos (p1 a p4, Figura 1) associa-se a formação de superfícies erosivas (ravinamento marinho) que nos dados de sísmica de reflexão são marcadas por horizontes guia que limitam lobos progradantes de US3. Associam-se ainda a esses eventos transgressivos os vestígios das linhas de costa correspondentes.

Às elevações do NMM correspondentes aos dois primeiros picos transgressivos (p1 e p2) associa-se o funcionamento da linha de costa “a” que é marcada actualmente pelos cordões areno-cascalhentos. No período de tempo que decorreu entre esses dois picos transgressivos o NMM estabilizou brevemente a uma cota próxima dos -70m. Durante esse breve período poder-se-á ter iniciado o entalhe da plataforma correspondente a paleo-linha de costa “b”. Após o segundo pico transgressivo (p2), a linha de costa “b” costará ter-se-á mantido activa durante um longo período (até ao final do EIM-3) em que o nível do mar se mantém próximo da cota -70m. Este longo período é marcado por dois picos transgressivos (p3 e p4), associando-se aos baixos NMM que sucederam a esses picos a activação da paleo-linha de costa “c”, cuja formação inicial poderá ter sido encetada no início do EIM-3.

2 – 25ka aos 18ka, UGM

Período correspondente ao último máximo glaciário em que o nível do mar deverá ter atingido um nível mínimo entre os -120m a -140m (Dias et al., 2000).

Nos dados de sísmica de reflexão não se detectaram evidências de estruturas sedimentares associáveis a este período. Contudo, do ponto de vista morfológico poderá eventualmente associar-se a estabilização do NMM durante o UMG a uma zona mais aplanada da plataforma continental localizada à cota -140 entre o cabo

Espichel e Sesimbra que é particularmente notória no modelo morfológico constituído pela batimetria Ingmar.

3 – 18ka aos 16ka, pós UGM (tardiglacial)

Período correspondente ao primeiro impulso de subida do NMM após o último máximo glaciário e que deverá ter correspondido a uma variação do NMM dos -120 a -140 até aos -100m (p5) devendo o NMM ter estabilizado a essa cota por um curto período.

Associa-se a este período o entalhe da plataforma que corresponde à estrutura “d”, cujo limite interno é materializado por uma quebra de declive com uma orientação NE-SW que à data deverá ter funcionado como linha de costa. Os depocentros mais externos de US2 que fossilizam esta plataforma poderão ter começado a depositar-se no final deste período, prosseguido provavelmente a sua deposição no período seguinte.

4 – 16ka aos 10ka, (até ao Dryas Recente)

Dos 16ka ao 13ka dá-se uma rápida subida do NMM até aos -40m (p6), seguindo-se uma ligeira regressão até aos -60m que se associa ao Dryas Recente (12,7-11,5ka idade calibrada ou ~11-10ka idade não calibrada).

Como consequência do pico transgressivo (p6) correspondente ao início do Dryas Recente e ao pico regressivo que lhe sucedeu, associa-se a retoma das paleo-linhas de costa “a” e “b” respectivamente, podendo portanto à data ter sido retrabalhados os depósitos areno-cascalhentos da paleo-linha de costa “a” e retocada a plataforma costeira associada à paleo-linha de costa “b”.

5 – 10ka aos 7,5 a 5ka, (até à máxima inundação dos estuários)

Após o Dryas Recente o NMM volta a subir rapidamente até aos cerca de 7,5-5ka (p7), data em que ocorre uma desaceleração na taxa de subida do NMM e se atinge a máxima inundação dos estuários.

A forma o, na sua posi o actual, do delta de vazante do estuário relaciona-se com a desacelera o na taxa de subida do NMM que terá ocorrido entre os 7,5-5ka. Nesta data, dever-se-  ter atingido a máxima inunda o do vale da bacia do baixo Sado, formando-se possivelmente uma estrutura do tipo ria, com uma liga o desimpedida ao mar.

6 – 7,5-5ka a 3ka (redu o da taxa de subida do NMM)

A taxa de subida do NMM após os 7,5-5ka ter-se-  reduzido passando para valores na ordem dos 2mm/ano (Psuty and Moreira, 2000) que se ter o mantido até cerca dos 3ka.

Na sequência do crescimento do delta do Sado iniciado aos 7,5-5ka, ter-se-  desenvolvido a península de Tróia, que   data deveria corresponder a uma ou varias pequenas ilhas. O desenvolvimento desta barreira costeira, que irá constituir a península de Tróia, vai progressivamente restringindo a liga o entre o mar e o vale do Sado recentemente inundado. Promovendo essa restri o, por sua vez, a transi o de um ambiente do tipo ria para um ambiente t pico de um estuário de barreira.

A descontinuidade que constitui a base da subunidade sísmica US1b do delta do Sado relaciona-se com o referido evento aos 3ka.

7 – 3ka   actualidade (NMM actual)

Aproximadamente há 3ka (p8) ocorre um ponto de inflexão na rela o entre a taxa de sedimenta o efectiva e a taxa de varia o do nível do mar (ou cria o de

espaço de acomodação) no sentido de incrementar a relevância da primeira em detrimento da segunda. Segundo Psuty e Moreira (2000) essa inflexão terá resultado de uma nova redução da taxa de subida do NMM, que se terá estabilizado até a actualidade em cerca de 0,4mm/ano. De acordo com essa taxa o NMM há 3ka estaria a apenas -1,3m relativamente ao actual.

As subunidades US1b e US1a do delta de vazante ter-se-ão formado durante este período, que se associa a uma rápida progradação do lobo frontal do delta. Esta rápida progradação deverá ter sido promovida por 2 factores. A referida inflexão na relação entre as taxas de sedimentação e variação do NMM, por um lado e por outro lado, a crescente restrição da ligação entre o estuário e o mar. Essa restrição, poderá ter estabelecido uma relação de *feedback* positivo com o crescimento do delta, que se terá iniciado a partir dos 7,5-5ka. A relação de *feedback* estabelece-se na medida em que o desenvolvimento do delta e da barreira costeira subárea, vai restringindo a ligação entre o estuário e o mar, fazendo assim com que essa ligação se vá centrando na área da actual barra. Pelo que, esta barra, passa a ser responsável pelo escoamento de uma maior percentagem do prisma de maré, passando assim também a ter correntes mais fortes e consequentemente uma maior capacidade de transportar sedimentos que irão contribuir para o crescimento do delta. Este processo terá culminado já após o estabelecimento dos povoados romanos na área, com o fechos da(a) barra(s) que existiria(m) a Sul da actual.

Após a formação da península de Tróia, este sistema costeiro terá prosseguido a sua evolução no sentido de encontrar um equilíbrio entre os seus 3 elementos principais, a saber: 1) bacia estuarina (ou domínio interno do estuário), 2) barreira

costeira arenosa, constituída pela península de Tróia e 3) delta de vazante do estuário (ou domínio externo do estuário).

2.2 Escala decadal, com ênfase nos últimos ~70 anos

O período de tempo abarcado pela descrição que se segue enquadra-se na fase terminal do último passo (ponto 7) considerado pelo modelo à escala milenar. Esta análise centra-se na evolução morfológica recente do sistema costeiro formado pela bacia estuarina e o delta de vazante do estuário do Sado. Considera-se que a análise feita da plataforma continental não permite retirar ilações significativas sobre a sua evolução a uma escala decadal. Como tal, far-se-á apenas uma breve referência a características actuais da plataforma que se inferiram.

De acordo com os dados do marégrafo de Cascais nos últimos cerca de 100 anos o NMM subiu à taxa média de 1,5mm/ano. Destacando-se o período do final do Século XIX até 1920 pela ocorrência de uma descida do NMM à taxa média de - 0,5mm/ano; seguindo-se a este período uma nova subida do NMM que se manteve até à actualidade a uma taxa média de 1,7mm/ano (Dias and Taborda, 1988).

Segundo os resultados obtidos neste trabalho, tanto o volume do prisma de maré como o do espaço de acomodação decresceram consistentemente. Sugerindo portanto estes resultados que as taxas de sedimentação positivas e a redução de área do estuário são suficientemente elevadas para se sobrepor ao efeito de subida do nível do mar, provocando uma redução do prisma de maré e do espaço de acomodação no estuário.

Prisma de maré e espaço de acomodação

De acordo com as estimativas feitas para os períodos entre 1968 e 1995/2002, tanto o volume do prisma de maré como o do espaço de acomodação decresceram

consistentemente, tendo os seus volumes sido reduzidos em cerca de 7% e 8%, respectivamente. Esta tendência decrescente do prisma de maré ter-se-á iniciado pelo menos a partir de 1930, estimando-se que a área da secção da barra do estuário terá sofrido uma redução em cerca de 11%, desde essa data até 2002.

A redução do prisma de maré resultou de dois factores, a colmatagem sedimentar de uma fracção do volume intermareal inundável e da intervenção do Homem. A influência do Homem na redução do volume do prisma de maré faz-se sentir por duas vias. Por ocupação de terrenos que são assim subtraídos ao domínio intermareal e por fixação das margens, impedindo a sua migração para se reajustarem às variações ambientais.

Linha de costa estuarina

Na maior parte do domínio interno do estuário a zona costeira está muito artificializada, existindo grandes troços em que a linha de costa foi fixada pelo homem, particularmente na costa norte. Desta forma as alterações na posição da linha de costa estão muito condicionadas pela actividade humana, nomeadamente pela construção de aterros e diques ou pelo abandono de estruturas já existentes. Embora com alguns retrocessos e avanços, a evolução tem sido claramente no sentido da perda de área estuarina, estimando-se que de 1968 a 1995/2002 a redução da área estuarina com cota inferior ao nível médio do mar, seja na ordem de 0,2% ao ano, avultando numa redução total de cerca de 6%.

Domínio interno

No estuário interno a tendência geral desde 1968 a 1995/2002 é no sentido da acumulação de sedimentos, detectando-se no entanto um decréscimo acentuado nas taxas de sedimentação a partir de 1979. De acordo com a redução do espaço de

acomodação calculada para o período 1968 a 1995/2002, a taxa de sedimentação equivalente estimada para todo o domínio interno abaixo da preia-mar de águas vivas é da ordem de 11mm/ano.

Domínio externo

No estuário externo verificou-se uma tendência geral de acumulação para o período de 1968-1979, invertendo-se essa tendência para o período 1979-1995/2002, em que a erosão fundamentalmente localizada no lobo frontal do delta passa a ser dominante.

Estima-se que de 1930 a 2002 o delta de vazante do estuário tenha perdido cerca de $150 \times 10^6 \text{ m}^3$ de sedimentos, o que corresponde a 14% do seu volume inicial. Esta redução de volume implicou uma diminuição tanto em comprimento como em largura, tendo-se no entanto mantido tanto o seu parâmetro de forma como a sua espessura máxima de sedimentos.

Avaliou-se a contribuição dada por três factores para a redução do volume do delta, estimando-se que o somatório das contribuições dadas pela progradação da linha de costa de Tróia e pela variação do ângulo do jacto de vazante é inferior a 1%, concluindo-se portanto que os restantes 13% da variação de volume do delta devam ser imputados à redução do prisma de maré.

Plataforma continental

De uma forma geral, integrando a informação resultante da interpretação de formas de fundo dos levantamentos de sonar lateral e da carta de sedimentos SED5 publicada pelo Instituto Hidrográfico, pode concluir-se que a evolução recente da plataforma é caracterizada por uma baixa disponibilidade sedimentar (*sediment*

starved shelf). Entre os 60-100m de profundidade a plataforma caracteriza-se por três zonas que se dispõem ao longo de faixas aproximadamente paralelas à costa de Tróia. A zona mais interna é caracterizada por um fundo com sedimentos de uma granulometria mais grosseira que se enquadram essencialmente na classe das areias e cascalhos. Segue-se uma segunda faixa que corresponde a uma zona de transição que se caracteriza por uma morfologia mais acidentada e uma baixa ou nula deposição sedimentar (ambiente de não deposição e/ou erosão), cujos fundos se caracterizam por áreas de afloramento rochoso ou áreas com uma delgada película de sedimentos arenosos transgressivos. Por fim, na zona mais externa domina um ambiente de deposição, caracterizando-se o fundo por uma cobertura de sedimentos mais finos.

As evidências de actividade antrópica detectadas neste troço da plataforma centram-se na área menos profunda ao largo da actual barra do estuário. Essas evidências consistem em estruturas identificadas no fundo do mar que se interpretaram como marcas de arraste feitas por artes de pesca e/ou âncoras e em aterros submarinos formados pela submersão de materiais rejeitados. Estes aterros, face a grande área por que se distribuem, constituem claramente a impressão mais significativa do impacto humano que se detectou na plataforma.