

MODELAÇÃO CRONOLÓGICA DE SEQUÊNCIAS SEDIMENTARES DO ESTUÁRIO DA RIBEIRA DE BENSFRIM COM RECURSO À ESTATÍSTICA BAYESIANA

PAULO J. CESÁRIO PORTELA¹

JOSÉ M. MATOS MARTINS¹

ANTÓNIO M. MONGE SOARES¹

ANA RAMOS-PEREIRA²

JOÃO ARAÚJO-GOMES³

ANDRÉ TORRES³

RESUMO – O estuário da Ribeira de Bensafrim, no Barlavento algarvio, foi um dos sistemas flúviomarinhos utilizado para avaliar a evolução de ambientes costeiros ao longo dos últimos 5000 anos. Datou-se pelo radiocarbono a matéria orgânica sedimentar presente nos testemunhos verticais colhidos neste estuário. Tendo em conta o registo estratigráfico associado aos dados cronológicos obtidos, foi utilizada uma abordagem estatística bayesiana, fazendo uso do *software* de calibração OxCal, para obter um enquadramento geocronológico robusto para a sequência sedimentar. A análise efetuada, baseada na construção de um modelo de deposição para a sequência sedimentar, permitiu identificar a presença de *outliers*, bem como estabelecer um enquadramento geocronológico para os últimos 5000 anos no Barlavento algarvio. Para além deste enquadramento, verifica-se que o modelo geocronológico idealizado, associado à caracterização sedimentológica de um dos testemunhos, aponta para a presença de eventos de alta energia, englobando, eventualmente, o *tsunami* que se seguiu ao terramoto de Lisboa de 1755.

Palavras-chave: Radiocarbono; estatística bayesiana; estuário da Ribeira de Bensafrim; sedimentos; tsunamis de 1755.

Recebido: janeiro 2019. Aceite:

¹ Centro de Ciências e Tecnologias Nucleares (C2TN), Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Estrada Nacional 10 (km 139,7), 2695-066, Bobadela, Portugal. E-mail: paulo.portela@ctn.tecnico.ulisboa.pt; jmartins@ctn.tecnico.ulisboa.pt; amsoares@ctn.tecnico.ulisboa.pt

² Professora Catedrática e Investigadora Efetiva do Centro de Estudos Geográficos, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal. E-mail: anarp@campus.ul.pt

³ Centro de Estudos Geográficos, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal. E-mail: jpgomes@gmail.com; andre.roch.torres@gmail.com

ABSTRACT – AGE MODELLING OF SEDIMENTARY SEQUENCES USING A BAYESIAN APPROACH – THE BENSFRIM ESTUARY SEDIMENTARY INFILLING SEQUENCE AS A CASE STUDY. The Bensafirim estuary, located in Southern Portugal (Algarve coast), was selected to assess the evolution of the fluvial-marine interaction along the Portuguese coast during the last 5000 years. Sedimentary sequences were collected in this estuary and radiocarbon dated, providing the necessary chronological framework to establish a reliable palaeo-environmental reconstruction. A Bayesian approach was employed in an attempt to overcome some difficulties related with the chronological data, which was performed using the OxCal calibration software, which allows the incorporation of stratigraphic information and an outlier analysis of the dataset. The analysis enabled the identification of outliers and the assessment of a reliable deposition model for the sedimentary sequence, establishing a robust chronological framework for the last 5000 years in this region of the Portuguese coast. Also, this model associated with *sedimentological characterization* points to the presence of high-energy events, including eventually the tsunami that followed the Lisbon earthquake of 1755.

Keywords: Radiocarbon; Bayesian statistics; Bensafirim estuary; sediments; Lisbon tsunami 1755.

RÉSUMÉ – MODÉLISATION CHRONOLOGIQUE SÉDIMENTAIRE À L'AIDE DE LA STATISTIQUE BAYÉSIENNE – UNE ÉTUDE DE CAS: LA SÉQUENCE DE REMPLISSAGE DE L'ESTUAIRE DE RIBEIRA DE BENSFRIM. L'estuaire de la Ribeira de Bensafirim, en Algarve auprès de Lagos, a été utilisé comme un exemple de système fluvio-marin pour évaluer l'évolution des environnements côtiers au cours des 5 000 dernières années. La matière organique sédimentaire présente dans les échantillons verticaux collectés dans cet estuaire a été datée au radiocarbone. Compte tenu de l'enregistrement stratigraphique associé aux données chronologiques obtenues, une approche statistique bayésienne a été utilisée avec le logiciel de calibrage OxCal, pour obtenir un cadre géochronologique robuste pour la séquence sédimentaire. L'analyse, basée sur la construction d'un modèle de dépôt pour la séquence sédimentaire, a permis d'identifier la présence de valeurs aberrantes (*outliers*), ainsi que d'établir un cadre géochronologique pour les 5000 dernières années sur l'Ouest de la côte méridional. Par ailleurs à ce cadre, le modèle géochronologique idéalisé, associé à la caractérisation sédimentologique, montre plusieurs événements de haute énergie responsable par l'ensablement de l'estuaire, y compris éventuellement le tsunami qui a suivi le tremblement de terre de 1755 à Lisbonne.

Mots clés: Radiocarbone; statistique bayésienne; estuaire de Bensafirim; *sédiments*; tsunami de 1755.

RESUMEN – MODELACIÓN CRONOLÓGICA DE SECUENCIAS SEDIMENTALES DEL ESTUARIO DE LA RIBERA DE BENSFRIM CON BASE EN LA ESTADÍSTICA BAYESIANA El estuario de la Ribera Bensafirim, situado al oeste de Algarve, fue uno de los sistemas fluviales y marinos utilizado para evaluar la evolución de ambientes costeros en los últimos 5000 años. A través del método de radiocarbono, se dató la materia orgánica sedimentaria presente en los núcleos verticales recogidos en este estuario. Considerando el registro estratigráfico asociado con los datos cronológicos obtenidos, se utilizó un enfoque estadístico bayesiano, utilizando el *software* de calibración OxCal, para obtener un marco geocronológico robusto para la secuencia sedimentaria. El análisis, basado en la construc-

ción de un modelo de deposición para la secuencia sedimentaria, permitió identificar la presencia de valores atípicos (*outliers*), así como establecer un marco geocronológico para los últimos 5000 años en el Barlavento algarvio. Más allá de este marco, se verifica que el modelo geocronológico idealizado, asociado con la caracterización sedimentológica de uno de los núcleos, apunta a la presencia de eventos de alta energía, posiblemente abarcando el tsunami luego del terremoto de Lisboa de 1755.

Palabras clave: Radiocarbono; estadísticas bayesianas; estuario de Ribeira de Bensafrim; sedimentos; tsunami de 1755.

Na parte vestibular dos vales portugueses (...) seria necessário precisar melhor as modalidades e o ritmo da colmatagem sofrida pelos diversos estuários, distinguindo a sedimentação fluvial da marinha e da propriamente estuarina e, datando, na medida do possível, os episódios principais.

S. Daveau (1987. p.101)

I. INTRODUÇÃO

Um enquadramento cronológico fiável é essencial para a construção de modelos paleo-ambientais e paleoclimáticos baseados em análises multi-proxy de registos sedimentares. Devido ao limite de idade (ca. 50 000 anos) e à variedade de amostras susceptíveis de serem datadas pelo radiocarbono (^{14}C), este é um dos métodos mais utilizados para a construção de esqueletos cronológicos onde ancorar a variabilidade dos diversos parâmetros identificados no registo sedimentar. Em ambientes estuarinos, onde a interação flúvio-marinha é mais intensa, a remobilização de material orgânico afeta frequentemente as datas de ^{14}C , o que dificulta a construção de um enquadramento cronológico robusto. A estatística bayesiana oferece as ferramentas necessárias para interpretar com fiabilidade conjuntos de datas, permitindo identificar inversões estratigráficas e possíveis *outliers*.

Uma vez que, entre nós, a estatística bayesiana tem sido muito pouco utilizada neste domínio, julgamos útil que o objetivo deste trabalho seja o de exemplificar este tipo de análise com um estudo de caso, o do enchimento sedimentar do estuário da Ribeira de Bensafrim, para o qual foram obtidos dois conjuntos de datas de ^{14}C , correspondentes a duas sondagens, BF3 (Portela, 2013) e LagosConv (Araújo-Gomes, 2010), efetuadas nesse estuário.

II. O ESTUÁRIO DA RIBEIRA DE BENSFRIM E A RECOLHA DA INFORMAÇÃO

No âmbito da investigação da evolução de sistemas estuarinos nos últimos 5 000 anos, selecionaram-se diversos sistemas, entre os quais o estuário da Ribeira de Bensafrim,

com o objetivo de individualizar o balanço dos elementos forçadores, sejam de natureza climática, marinha ou antrópica (Ramos-Pereira *et al.*, 2011). A Ribeira de Bensafrim é um pequeno curso de água com 16,2km de comprimento e a sua bacia alongada tem uma área de 85,1km² (fig. 1). Desenvolve-se em duas unidades morfoestruturais, de litologias variadas: turbiditos paleozóicos a norte, na serra algarvia, e complexos detríticos e carbonatados mesozóicos e cenozóicos no troço médio e jusante. Também do ponto de vista geomorfológico se distingue: um vale muito encaixado na serra, que se alarga quando atravessa a depressão marginal desenvolvida no Grés de Silves, à saída no Maciço Antigo (Maciço Hespérico). A influência litológica é marcante na morfologia e, em especial, na largura do fundo do vale, que apenas se estreita quando corta as formações calcárias. O estuário desta ribeira tem, assim, uma forma em funil, cuja foz original tinha a largura de 550m, mas está hoje completamente artificializado e o canal de saída do rio tem apenas 62m de largura (fig.1).

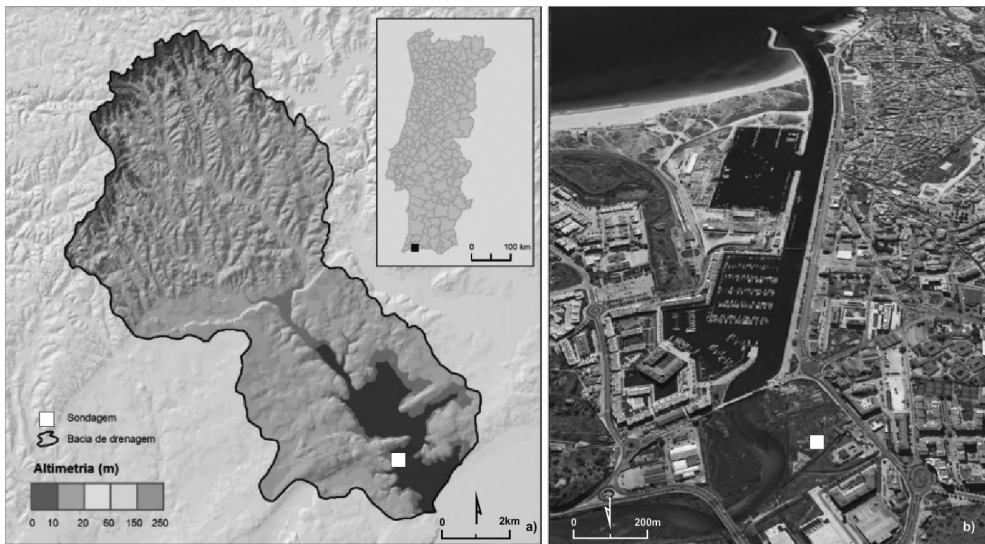


Fig. 1 – Bacia de drenagem da Ribeira de Bensafrim e vista aérea do estuário e da cidade de Lagos. O quadrado branco indica o local de amostragem.

Fig. 1 – The Bensafrim drainage basin and aerial view of estuary and the town of Lagos. The white square stands for the coring site.

1. As sondagens e o tratamento dos sedimentos

Para alcançar os objetivos propostos foram realizadas diversas sondagens na planície aluvial do vale da Ribeira de Bensafrim, sendo aqui utilizadas apenas duas. Estas foram realizadas na área do estuário não artificializado, cerca de 1900m a montante da foz (fig. 1). A localização destas duas sondagens, ambas na margem direita, não foi arbitrária, mas

sim exatamente em frente da foz atual e original da ribeira, de forma que o enchimento sedimentar pudesse registar não só os eventos terrestres, mas também os marinhos, especialmente os mais energéticos, designadamente galgamentos oceânicos ou ondas de tsunamis, cujos efeitos na cidade de Lagos estão amplamente documentados nos documentos históricos e arqueológicos.

A sondagem LagosConv, exploratória, foi realizada 220m a montante da ponte velha que liga Lagos à Meia Praia, com um trado manual *Edelman*, atingido uma profundidade de 1,95m e com a boca da sondagem a 37° 06' 45,30" N e 08° 40' 43,87" W (Araújo-Gomes, 2010). A outra sondagem, a BF3, dista 20cm da LagosConv (boca da sondagem a 37° 06' 45,50" N e 08° 40' 43,86" W) e foi realizada com um amostrador contínuo (*Shelby*, com 80mm de diâmetro interior) com *linner* em PVC transparente, para recolha de amostras intactas, tendo alcançado a profundidade de 5,68m (sondagem realizada por uma empresa especializada). A boca de ambas as sondagens estava a 1,29m acima do nível médio do mar (Datum de Cascais).

Na sondagem BF3 e apesar de todas as precauções, nomeadamente o *linner* de PVC transparente capaz de proteger as paredes e impedindo a queda de sedimento, não foi possível obter a amostragem completa de todo o sedimento devido à presença de um aquíclodo. Os sedimentos desta sondagem foram subamostrados com 1-2cm de intervalo, a fim de permitir determinar pequenas variações na sua composição fundamental. Foram obtidas 249 amostras para análise sedimentológica.

Na sondagem LagosConv a amostragem dos sedimentos foi feita por unidades litoestratigráficas e, para cada uma delas, selecionadas as amostras para datação por radiocarbono (Araújo-Gomes, 2010).

O tratamento das amostras, após prévia destruição da matéria orgânica, seguiu o protocolo estabelecido no quadro do projeto, que incluiu a) secagem das amostras a 40°C, em estufa, b) pesagem e tratamento com peróxido de hidrogénio, c) lavagem e secagem para determinação da percentagem de matéria orgânica, d) crivagem e atenuação de Raios X (*Sedigraph*) para obtenção dos dados da análise dimensional. O método de crivagem foi utilizado quando a dimensão do sedimento predominante era superior a 0,063mm e o *Sedigraph* para os restantes. Este tratamento foi realizado no laboratório do departamento de Geologia da Universidade do Minho.

Os parâmetros estatísticos para a caracterização elementar dos sedimentos, quer de uma, quer de outra sondagem, foram obtidos através do *software* SEDPC (Henriques, 1998; 2003; 2004). Utilizou-se o método de Folk e Ward para o cálculo da média ($Mz(\phi)$), desvio padrão ($\sigma(\phi)$), assimetria ($Skew(\phi)$) e kurtose ($Kurt(\phi)$) para descrever a distribuição do tamanho de grão.

2. O enchimento sedimentar do estuário

O testemunho da sondagem BF3, representado na figura 2, evidencia os três sub-conjuntos (tarolos) que foi possível amostrar e que ilustram não só a homogeneidade da quase totalidade da sondagem, mas também a diversidade do conjunto superior.

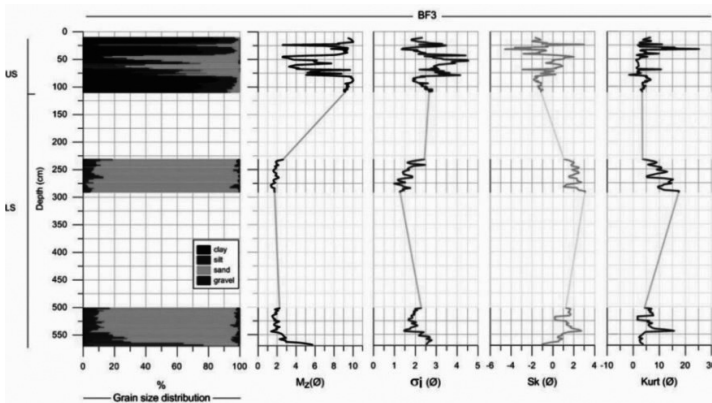


Fig. 2 – Resultados da análise granulométrica (da gravilha, à direita na coluna, da argila, à esquerda) e parâmetros estatísticos da distribuição do tamanho de grão para o testemunho BF3.

LS – secção inferior; US – secção superior.

Fig. 2 – Results of size analysis (from gravel, on the right, to clay, on the left) and statistical distribution parameters of grain size for core BF3. LS – lower section; US – upper section.

Este testemunho BF3 apresenta, assim, 2 secções distintas: i) a secção inferior (LS), desde 558cm até 109cm, que comporta dois pacotes sedimentares, é monótona e dominada por areia fina, pouco calibrada, com assimetria e kurtose variáveis, onde os siltes e argilas não ultrapassam 5%, (com exceção da camada inferior); ii) a secção superior (US), de 109cm ao topo da sondagem, divide-se em três sub-secções. A subsecção inferior, de 109cm a 81cm, é uma camada argilosa (argila sempre superior a 80%), com silte (entre 13 e 22%) e areia (abaixo de 8%). A subsecção intermédia, entre 81cm e 43cm, é arenosa (60 a 80%) com conteúdo variável em argila, silte e areias finas. A subsecção superior, acima da anterior e até ao topo da sondagem, é semelhante à subsecção inferior, com exceção de uma intrusão arenosa entre 27 e 22cm, com um máximo aos 24cm, onde a areia atinge 90%.

Os sedimentos da sondagem BF3 representam, por conseguinte, dois ambientes sedimentares distintos: LS possui características de um ambiente mais energético, enquanto US a de um ambiente mais protegido, interrompido episodicamente por eventos de elevada energia.

A análise do core LagosConv, muito próximo de BF3 (a cerca de 20cm), mostrou variações idênticas (Araújo-Gomes, 2010; Ramos-Pereira *et al.*, 2010), pelo que nos dispensamos de também a apresentar aqui.

3. As datações de radiocarbono

Além da análise sedimentológica atrás referida resumidamente, as amostras do testemunho BF3 foram também sujeitas a uma análise elementar e isotópica (Portela, 2013), cujos resultados não serão tomados em conta neste trabalho, uma vez que não representam qualquer mais-valia para a elaboração do modelo bayesiano que irá ser proposto.

Além destas análises, algumas amostras de BF3 foram também, como já atrás mencionado, datadas pelo radiocarbono (quadro I). De igual modo, algumas amostras do testemunho LagosConv foram objecto de datação pelo mesmo método, apresentando-se os resultados no quadro II.

Quadro I – Datas de radiocarbono obtidas a partir de amostras do testemunho BF3.

Table I – Radiocarbon dates from core BF3 samples.

Ref. Laboratório	Amostra #	Prof. (cm)	Espessura (cm)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	^{14}C age (BP)
Beta-355636	1,14	31	2	-24,4	490 ± 30
Beta-355637	1,32	56	2	-23,3	1750 ± 30
Beta-355691	2,1	60	3	-20,9	3220 ± 30
Beta-355692	2,9	72	1	-25,0	1440 ± 30
Beta-355693	4,3	180	3	-20,7	2810 ± 30
Beta-355638	6,33	568	3	-22,3	6680 ± 40

Quadro II – Datas de radiocarbono obtidas a partir de amostras do testemunho LagosConv.

Table II – Radiocarbon dates from core LagosConv samples.

Ref. Laboratório	Amostra #	Prof. Média (cm)	Espessura da Amostra (cm)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	^{14}C age (yr BP)
Beta-282768	B11-13	95	2	-22,2	2780±40
Beta-282769	B16-18	102	2	-21,3	2700±40
Beta-282770	B22-33	110	11	-18,8	2880±40
Beta-282771	B34-44	125	10	-19,3	3000±40
Beta-282772	C1-26	160	25	-20,5	3330±40
Beta-282773	C30-40	174	10	-20,5	3360±40
Beta-282774	C41-48	186	7	-19,0	3610±40

De maneira a definir as fronteiras das variações identificadas no ambiente sedimentar estuarino, bem como dos episódios de alta energia detetados, foram testadas diferentes aproximações com um modelo bayesiano, aproximações essas que se apresentam e se discutem a seguir.

III. O MODELO BAYESIANO

1. A Estatística Bayesiana. Algumas noções

Com base nos dados cronológicos obtidos dos sedimentos procurou-se construir um modelo estatístico, que levasse em conta a sequência estratigráfica, fazendo uso de uma análise bayesiana, o que iria permitir a construção de modelos de deposição sedimentar, a identificação de eventuais inversões estratigráficas e *outliers* e, conseqüentemente, a criação de um enquadramento cronológico robusto.

A Estatística Bayesiana, na qual a modelação de datas de ^{14}C utilizada se baseia, é descrita em detalhe em vários artigos (Buck *et al.*, 1991; 1992; Bronk Ramsey, & Allen, 1995, por exemplo), assim como os modelos matemáticos usados pelo programa OxCal, o *software* que se utilizou para a modelação estatística e calibração das datas convencionais de radiocarbono (Bronk Ramsey, 2001; 2008; 2009). A Estatística Bayesiana baseia-se no teorema de Bayes (1763), sendo os cálculos estatísticos baseados na Markov Chain Monte Carlo (MCMC), incorporada no *software* OxCal utilizado. A sua aplicação à calibração de datas de radiocarbono permite a redução da incerteza associada ao processo de conversão das datas convencionais de radiocarbono em datas de calendário solar, devido à incorporação de informações relacionadas com constrangimentos variados, designadamente relações estratigráficas entre as amostras ou, mais especificamente, no nosso caso, a profundidade das amostras datadas. Uma vez que se proceda à incorporação dessas informações no modelo, obtém-se uma distribuição de incerteza posterior para cada data e, conseqüentemente, novos limites para o intervalo de tempo da data calibrada (Bronk Ramsey, 2001; 2008, 2009).

Deve ser realçado que a Estatística Bayesiana pode ser aplicada a qualquer método de datação, isto é, permite incorporar informação cronológica com origem noutros métodos de datação absoluta para além do radiocarbono (OSL, TL ou datação histórica, por exemplo) na arquitetura de um modelo simples ou complexo (Bronk Ramsey, 2001; 2008; 2009; Rhodes *et al.*, 2003).

A modelação bayesiana é usada para construir, entre outros, modelos cronológicos baseados em sequências sedimentares. Nesta modelação, os dados cronológicos são associados à sequência estratigráfica e, conseqüentemente, à profundidade. A tais modelos bayesianos dá-se o nome de *modelos de deposição* (Bronk Ramsey, 2008), dos quais o modelo de deposição P_Sequence é largamente utilizado (Lienkaemper & Bronk Ramsey, 2009). Este tipo de modelo permite levar em conta a aleatoriedade do processo de sedimentação ao longo do tempo, integrando os vários constrangimentos que afetam a sedimentação. Um fator adicional (fator k) é, normalmente, introduzido na arquitetura de um modelo P_Sequence. Este fator k define-se como o número de eventos por unidade de comprimento. Valores elevados de k refletem pequenas variações das taxas de sedimentação, enquanto valores baixos refletem flutuações maiores neste parâmetro. Quando a informação cronológica é reduzida, a taxa de deposição pode ser obtida usando um k elevado, o que permitirá que os índices de concordância com o modelo (individuais e global) sejam iguais ou superiores a 60%. Esta percentagem encontra-se definida, pela modelação bayesiana, como o critério estatístico acima do qual se considera que as datas individuais estão em concordância com o modelo proposto. O mesmo limite (60%) é utilizado na análise global do modelo. Inclui a análise estatística dos constrangimentos impostos ao modelo de deposição ou, por outras palavras, a ordem e a posição (profundidade) das datas absolutas obtidas para a sequência sedimentar, bem como a interpolação usada (k) (Bronk Ramsey, 2008).

A utilização de um índice de concordância individual (A) e outro de concordância global do modelo (Amodel) permite verificar até que ponto o modelo conceptual definido pelo utilizador está de acordo com os dados (datações absolutas, estratigrafia),

dando uma indicação do grau de confiança do modelo. A sua utilização é de grande importância e quando não é levada em consideração provoca, em muitos casos, discordância entre os modelos cronológicos e de deposição criados e os dados experimentais obtidos (Bronk Ramsey, 2012). Todas as datas de ^{14}C cuja concordância individual (A) seja inferior a 60%, isto é, que não respeitem o critério imposto, podem ser rejeitadas e um novo modelo deverá ser construído. Este tipo de modelos de deposição permite determinar taxas de sedimentação (DR) para qualquer secção da sondagem sedimentar, com um intervalo de confiança de 1σ ou de 2σ . Adicionalmente, pode também ser calculada a data calibrada para qualquer profundidade, da qual não tivesse sido datada qualquer amostra.

2. O tipo de modelo proposto

Optou-se por um modelo $P_Sequence$, uma vez que este, como referido atrás, permite a incorporação da natureza aleatória do processo sedimentar ao longo do tempo, num dado local, resultando num modelo estatístico que leva em conta uma multiplicidade de condições que possam provocar alterações sedimentares (Bronk Ramsey, 2008; 2009).

Neste tipo de modelo bayesiano é necessária a utilização de fronteiras para estabelecer um modelo cronológico correto. Dada a ausência de informação cronológica (de radiocarbono) para o topo da sondagem, a fronteira inicial para o modelo, considerou-se que a fronteira inicial (para o modelo) corresponderia ao ano de amostragem, 2009. A fronteira final para o modelo foi definida como se situando 1cm abaixo da profundidade da última amostra datada (corresponderia, por conseguinte, a 569cm).

Relativamente ao processo sedimentar, ele foi condicionado por um fator adicional (k) introduzido na arquitetura do modelo $P_Sequence$. Utilizou-se $k = 0,4$, de que resulta uma interpolação de 2,5cm. Este valor representa o valor máximo de k que pode ser introduzido no modelo de maneira a obter índices de concordância superiores a 60% para os dados cronológicos utilizados.

Além disto, a modelação bayesiana proposta seria realizada com o programa de calibração OxCal 4.2.3 (Bronk Ramsey, 2008; 2013), fazendo uso da curva de calibração IntCal13 (Reimer *et al.*, 2013).

3. A construção do modelo. Discussão

Numa primeira aproximação, considerou-se que todos os dados do testemunho BF3 eram válidos para a sequência sedimentar, tendo sido, por isso, utilizadas todas as seis datas de radiocarbono de BF3 (quadro I), obtidas por AMS a partir da matéria orgânica presente nas amostras sedimentares datadas.

Como resultado dessa modelação, obteve-se uma distribuição NULA, com concordâncias individuais e global muito pobres ($A < 60,0\%$), provocadas pela inversão observada na figura 3.

A data de radiocarbono 3220 + 30 BP (Beta-355691), um *outlier* óbvio, foi por isso eliminada do modelo. Os resultados de uma segunda modelação, não tomando em consideração a data atrás referida, são apresentados no quadro III. Obtiveram-se ainda algumas concordâncias individuais baixas, designadamente as correspondentes às datas 1750 ± 30 BP (Beta-3556637) e 1440 ± 30 BP (Beta-355692), com índices próximos de zero, o que sugere, como necessária, a eliminação de, pelo menos, uma delas.

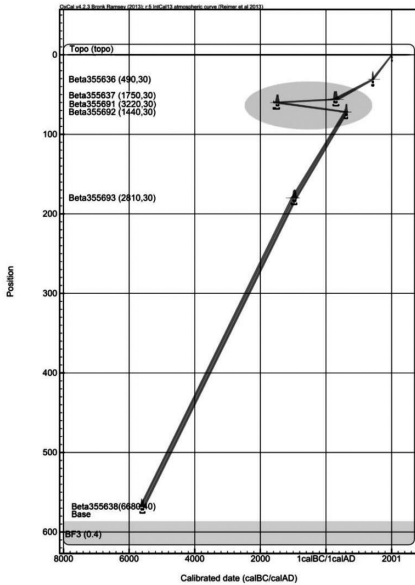


Fig. 3 – Representação gráfica da idade dos sedimentos do core BF3 em função da profundidade, de acordo com o modelo bayesiano construído apenas com as datas de radiocarbono obtidas a partir de amostras desse testemunho. A elipse assinala um evidente *outlier* (inversão de idades).

Fig. 3 – Age versus depth plot for core BF3 according the Bayesian model using only radiocarbon dates from BF3 samples. The elipsis marks the age reversal.

Quadro III – Resultados obtidos com o modelo bayesiano para o testemunho BF3 após eliminação da data Beta-355691 (3220 ± 30 BP)*.

Table III – Results obtained from the Bayesian modelling for core BF3 after elimination of Beta-355691 (3220 ± 30 BP).

Name	Unmodelled (BC/AD)			Modelled (BC/AD)			A _{model} : 0,0
	from	to	%	from	to	%	A _{overall} : 0,0
topo (2009,2)	2005	2013	95,4			95,4	
Topo	2005	2013	95,4	2004	2013	95,4	100
Beta 355636 (490,30)	1404	1450	95,4	1400	1451	95,4	96,8
Beta 355637 (1750,30)	222	385	95,4	496	530	95,4	
	Warning! Poor Agreement – A=0,0%						
Beta 355692 (1440,30)	566	655	95,4	427	481	95,4	0,1
	Warning! Poor Agreement – A=0,1%						
Beta 355693 (2810,30)	-1050	-895	95,4	-1046	-859	95,4	101,1
Beta 355638 (6680,40)	-5666	-5527	95,4	-5668	-5529	95,4	99,1
Base				-5726	-5540	95,4	

*Quadro obtido a partir do OxCal v.4.2.3

Uma vez que não existem evidências estratigráficas ou sedimentológicas que indiquem claramente qual destas datas não é adequada a integrar a sequência cronológica, realizou-se uma terceira modelação utilizando, apenas, uma delas, de cada vez. Os resultados apresentam-se nos quadros IV e V.

Quadro IV – Resultados obtidos com o modelo bayesiano para o testemunho BF3 aceitando como válida a data Beta-355637 (1750 ± 30 BP)*.

Table IV – Results obtained from the Bayesian modelling for core BF3 using Beta-355637.

Name	Unmodelled (BC/AD)			Modelled (BC/AD)			A_{model} : 85,7
	from	to	%	from	to	%	$A_{overall}$: 85,7
topo (2009,2)	2005	2013	95,4			95,4	A
Topo	2005	2013	95,4	2004	2013	95,4	100
Beta 355636 (490,30)	1404	1450	95,4	1332	1451	95,4	96,1
Beta 355637 (1750,30)	222	385	95,4	268	395	95,4	74,2
Beta 355693 (2810,30)	-1050	-895	95,4	-1047	-901	95,4	100
Beta 355638 (6680,40)	-5666	-5527	95,4	-5669	-5529	95,4	99,3
Base				-5729	-5541	95,4	

*Quadro obtido a partir do OxCal v.4.2.3

Quadro V – Resultados obtidos com o modelo bayesiano para o testemunho BF3 aceitando como válida a data Beta-355692 (1440 ± 30 BP)*.

Table V – Results obtained from the Bayesian modelling for core BF3 using Beta-355692.

Name	Unmodelled (BC/AD)			Modelled (BC/AD)			A_{model} : 101
	from	to	%	from	to	%	$A_{overall}$: 101,1
topo (2009,2)	2005	2013	95,4			95,4	A
Topo	2005	2013	95,4	2004	2013	95,4	100
Beta 355636 (490,30)	1404	1450	95,4	1404	1450	95,4	99,6
Beta 355692 (1440,30)	566	655	95,4	573	655	95,4	103,2
Beta 355693 (2810,30)	-1050	-895	95,4	-1031	-851	95,4	100,2
Beta 355638 (6680,40)	-5666	-5527	95,4	-5669	-5529	95,4	99,3
Base				-5729	-5541	95,4	

*Quadro obtido a partir do OxCal v.4.2.3

De acordo com estes resultados, a incorporação da data 1440 + 30 BP (Beta-355692) no modelo permite obter uma concordância individual maior (A=103,2%) quando comparada com a concordância individual obtida com a data 1750 + 30 BP (Beta-3556637) (A=74,2%). A concordância global (A_{model}) é, também, mais elevada com a data 1440 + 30 BP, o que sugere que esta é a mais adequada a integrar o modelo cronológico para a sequência. Note-se, por outro lado, que a data considerada para o topo da sondagem, o ano de 2009, foi validada pelo modelo, obtendo-se um índice de concordância de 100%.

Dada a proximidade espacial das duas sondagens (BF3 e LagosConv), bem como a semelhança, já referida, dos dois testemunhos sedimentares obtidos, julgámos válido incorporar os dados cronológicos da sondagem LagosConv (quadro II) no modelo bayesiano, de modo a obter um modelo mais robusto, dada a maior quantidade de informação que seria utilizada na sua construção.

Com uma primeira modelação deste conjunto de dados, o resultado foi novamente uma distribuição NULA, dada a inversão cronológica que se pode observar na figura 4A, resultante do valor da data Beta-355693 (2810 + 30 BP), o qual se pode considerar também um *outlier* neste modelo. Então um novo modelo foi construído, eliminando a data em causa. Os resultados obtidos com esta nova modelação encontram-se no quadro VI.

Embora a data 2780 ± 40 (Beta-282768) apresente um índice de concordância relativamente baixo ($A=59,8\%$), este é, no entanto, muito próximo do critério estatístico de aceitabilidade ($A=60\%$), pelo que julgámos que seria de manter esta data no modelo obtendo-se, assim, a figura 4B, com um $A_{\text{model}} > 60\%$ (note-se que, como se referiu atrás, se utilizou um fator k igual a 0,4).

Quadro VI – Resultados obtidos com o modelo bayesiano para o testemunho BF3 fazendo uso das datas de radiocarbono obtidas com as amostras de BF3 e LagosConv*.

Table VI – Results obtained from the Bayesian modelling combining the radiocarbon dates from core BF3 and Lagos Conv.

Name	Unmodelled (BC/AD)			Modelled (BC/AD)			A_{model} : 60,9
	from	to	%	from	to	%	A_{overall} : 65,3
topo (2009,2)	2005	2013	95,4				
Topo	2005	2013	95,4	2004	2013	95,4	100,2
Beta 355636 (490,30)	1404	1450	95,4	1404	1450	95,4	99,4
Beta 355692 (1440,30)	566	655	95,4	559	651	95,4	91,7
Beta 282768 (2780,40)	-1017	-830	95,4	-896	-808	95,4	59,8
				Warning! Poor Agreement – $A=59,8\%$			
Beta 282769 (2700,40)	-921	-801	95,4	-974	-846	95,4	74
Beta 282770 (2880,40)	-1207	-931	95,4	-1109	-937	95,4	105,5
Beta 282771 (3000,40)	-1391	-1114	95,4	-1295	-1119	95,4	108,5
Beta 282772 (3330,40)	-1731	-1511	95,4	-1662	-1510	95,4	103,6
Beta 282773 (3360,40)	-1746	-1531	95,4	-1867	-1625	95,4	76,9
Beta 282774 (3610,40)	-2131	-1881	95,4	-2008	-1772	95,4	68,3
Beta 355638 (6680,40)	-5666	-5527	95,4	-5704	-5538	95,4	96,9
Base				-5734	-5554	95,4	

*Quadro obtido a partir do OxCal v.4.2.3

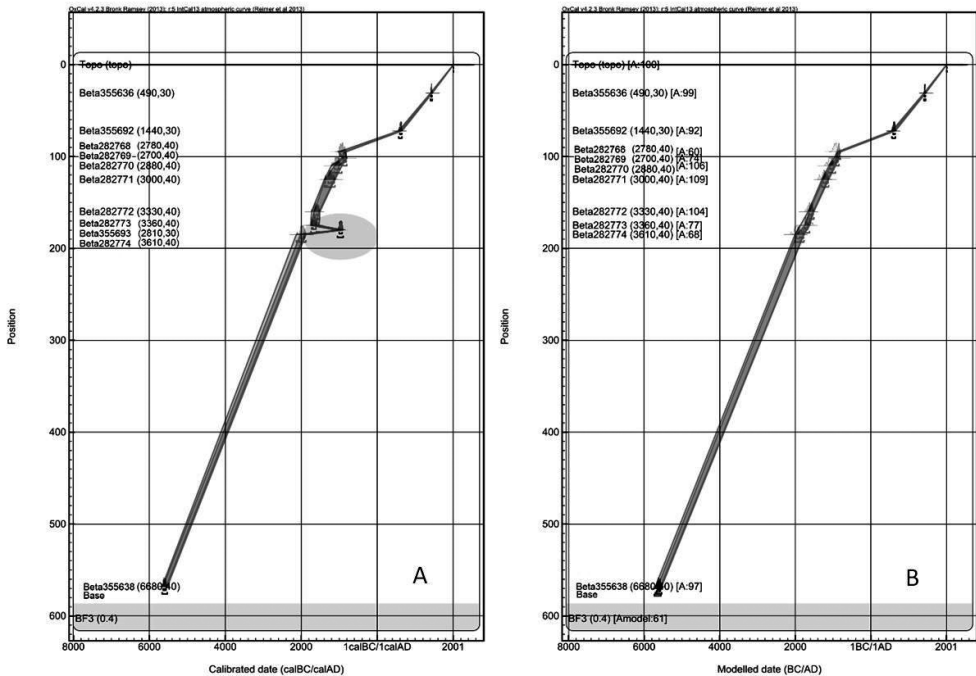


Fig. 4 – A) Representação gráfica da idade dos sedimentos do testemunho BF3 em função da profundidade, de acordo com o modelo bayesiano construído com as datas de radiocarbono obtidas a partir de amostras desse testemunho e do testemunho LagosConv (o círculo assinala um outlier). B) A mesma representação gráfica após a eliminação do outlier.

Fig. 4 – A) Plot of age versus depth for core BF3 according to the Bayesian model using radiocarbon dates from BF3 and LagosConv samples (the circle marks the age reversal). B) Plot of age versus depth for core BF3 after elimination of the outlier.

O modelo estatístico elaborado para a sequência sedimentar da Ribeira de Bensafrim pode, contudo, ser melhorado e tornado mais complexo, se o fator k tomar o valor 0,3 e nele incorporarmos outras funções, tais como a possibilidade de determinação de taxas de sedimentação ou a determinação da data específica para uma qualquer profundidade da sequência sedimentar. Na figura 5 apresenta-se o algoritmo utilizado para estes cálculos e no quadro VII as taxas de sedimentação (DR) assim determinadas para a sondagem BF3, bem como as datas (em anos de calendário) para diversas profundidades, designadamente as correspondentes aos limites das secções e subsecções identificadas em BF3 pela análise sedimentar efectuada e já atrás referidas (fig. 2).

Os resultados das taxas de sedimentação (DR1 a DR5 – topo do quadro VII) são apresentados em cm.ano^{-1} para intervalos de confiança de 2σ (95,4%). Assim, admitindo uma compactação negligenciável do sedimento, a taxa de sedimentação para a secção inferior (LS), isto é, entre 558cm e 109cm, é de cerca de $1,0\text{mm ano}^{-1}$, parecendo diminuir muito ligeiramente a partir da base, não ultrapassando, no entanto, $0,9\text{mm ano}^{-1}$. Entre

72cm de profundidade e o topo da sondagem, a taxa de sedimentação é de cerca de 0,5mm ano⁻¹. Sondagens efectuadas em outros dois estuários da costa algarvia, os dos estuários conjuntos dos rios Gilão e Almargem e Beliche/Guadiana, permitiram determinar uma taxa de sedimentação, para um intervalo de tempo entre 7500 cal BP e o presente, de 0,9mm/ano⁻¹ (Boski *et al.*, 2008), enquanto noutro estudo, relacionado com o segundo estuário referido, a taxa de sedimentação determinada foi de 1,2mm ano⁻¹ (Delgado *et al.*, 2012). Os valores da taxa de sedimentação calculados para o estuário da ribeira de Bensafrim são, por conseguinte, idênticos ou muito similares aos determinados para aqueles outros estuários da costa algarvia (quadro VII).

Plot()	(...)
{	z=110;
P_Sequence("Dep_Model", 0.3)	};
{	R_Date("Beta282769", 2700, 40)
Boundary("Base")	{
{	z=102;
z=570;	};
};	R_Date("Beta282768", 2780, 40)
R_Date("Beta355638", 6680, 40)	{
{	z=95;
z=568;	};
};	Date("81")
Date("504")	{
{	z=81;
z=504;	};
};	R_Date("Beta355692", 1440, 30)
Date("271")	{
{	z=72;
z=271;	};
};	Date("43")
Date("230")	{
{	z=43;
z=230;	};
};	R_Date("Beta355636", 490, 30)
R_Date("Beta282774", 3610, 40)	{
{	z=31;
z=186;	};
};	Date("22(Tsunami)")
R_Date("Beta282773", 3360, 40)	{
{	z=22;
z=174;	};
};	Boundary("Topo")
R_Date("Beta282772", 3330, 40)	{
{	z=0;
z=160;	C_Date("topo", 2010, 5);
};	};
R_Date("Beta282771", 3000, 40)	};
{	DR5_Base_95=505/(Beta282768-Base);
z=125;	DR4_Base_186=114/(Beta282774-Base);
};	DR3_186_95=91/(Beta282768-Beta282774);
R_Date("Beta282770", 2880, 40)	DR2_95_72=23/(Beta355692-Beta282768);
{	DR1_72_Topo=72/(Topo-Beta355692);
{	};
(...)	};

Fig. 5 – Algoritmo utilizado na construção final do modelo bayesiano para o testemunho BF3 e que permite a obtenção dos resultados constantes do quadro VII e figura 6.

Fig. 5 – Algorithm used in the final Bayesian model for core BF3 which allows to obtain the results presented in table VII and figure 6.

No quadro VII apresentam-se, também, as datas calibradas para diversas profundidades, com representação gráfica na figura 6, designadamente para as correspondentes aos limites das secções e subsecções identificadas no testemunho sedimentar BF3, além da referente ao limite superior (22cm) do evento de elevada energia, cujo máximo de teor em areia se observa a 24cm de profundidade. O intervalo de tempo obtido, com o modelo, em anos de calendário (para 2 σ) engloba o ano de 1755, o que indicia que esse evento poderia corresponder ao *tsunami* que se seguiu ao terramoto de Lisboa, se outros indicadores também apontassem para essa correspondência. Por outro lado, utilizando o mesmo modelo bayesiano, se propuséssemos a data de 1755 (± 10) para a profundidade de 24cm, obtínhamos um índice de concordância (A) de 99,7% para esta data, o que

fortalece a correlação indicada. Deverá notar-se que este evento tem sido identificado noutros estuários da costa do Algarve, embora usando abordagens diferentes (Kortekaas & Dawson, 2007; Font *et al.*, 2010, 2013).

Quadro VII – Resultados obtidos com o modelo bayesiano para o core BF3, incluindo a determinação de taxas de sedimentação, bem como de datas calibradas para diversas profundidades, designadamente para aquela a partir da qual foi identificado um evento de elevada energia, provavelmente correspondente ao *tsunami* que se seguiu ao terramoto de Lisboa de 1755*.

Table VII – Results obtained from the Bayesian modelling for core BF3, including the calculation of the deposition rates, as well as the radiocarbon calibrated dates for various depths, namely for that one corresponding to a high energy event, eventually the tsunami that followed the Lisbon earthquake of 1755.

Name	Unmodelled (BC/AD)			Modelled (BC/AD)			$A_{model}: 71,8$
	from	to	%	from	to	%	$A_{overall}: 75,2$
DR1: 72 cm to Topo	0,050	0,053	95,4	0,050	0,053	95,4	99,8
DR2: 95 cm to 72 cm	0,014	0,016	95,4	0,015	0,016	95,4	99,9
DR3: 186 cm to 95 cm	0,074	0,101	95,4	0,077	0,098	95,4	99,9
DR4: Base to 186 cm				0,092	0,107	95,4	99,8
DR5: Base to 95 cm				0,091	0,102	95,4	99,9
topo	2000	2020	95,4				
Topo	2000	2020	95,4	1999	2020	95,4	100
22 (Tsunami)				1449	1763	95,4	
Beta 355636	1404	1450	95,4	1404	1450	95,4	99,3
43				981	1375	95,4	
Beta 355692	566	655	95,4	561	653	95,4	94,1
81				-454	504	95,4	
Beta 282768	-1017	-830	95,4	-906	-810	95,4	64,9
Beta 282769	-921	-801	95,4	-975	-841	95,4	75,2
Beta 282770	-1207	-931	95,4	-1115	-934	95,4	105,3
Beta 282771	-1391	-1114	95,4	-1305	-1116	95,4	108,3
Beta 282772	-1731	-1511	95,4	-1666	-1510	95,4	104,3
Beta 282773	-1746	-1531	95,4	-1772	-1617	95,4	87,5
Beta 282774	-2131	-1881	95,4	-2025	-1776	95,4	83,7
230				-2590	-2105	95,4	
271				-3046	-2443	95,4	
504				-5251	-4726	95,4	
Beta 355638	-5666	-5527	95,4	-5702	-5534	95,4	98,1
Base				-6354	-5772	95,4	

*Quadro obtido a partir do OxCal v.4.2.3

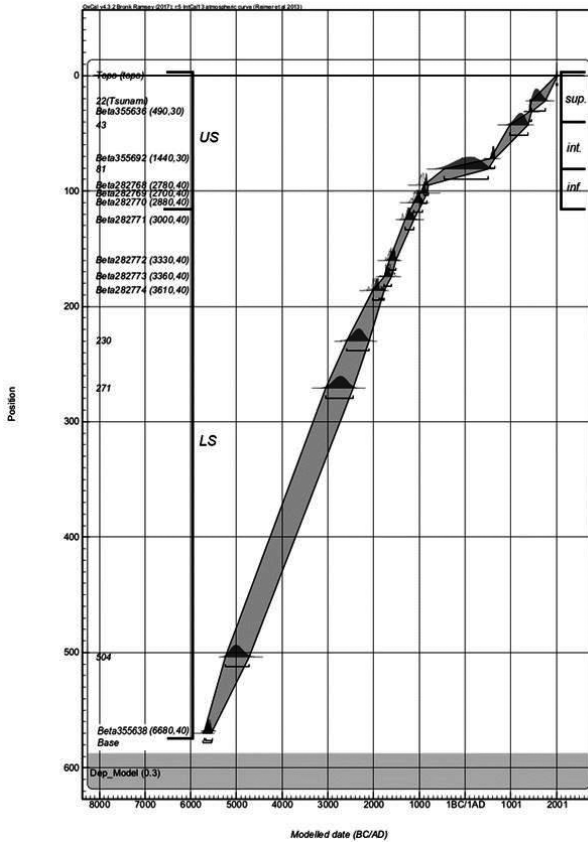


Fig. 6 - Representação gráfica final da idade dos sedimentos do core BF3 em função da profundidade.

Fig. 6 - Final plot of age versus depth for core BF3.

IV. CONCLUSÕES

A análise bayesiana aplicada aos dados obtidos na sequência sedimentar colhida no estuário da Ribeira de Bensafrim provou ser uma ferramenta valiosa no estabelecimento de modelos de deposição, facilitando a criação de um enquadramento cronológico robusto para uma posterior reconstrução paleoambiental e paleoclimática fiável desta região costeira.

A subida do nível médio do mar durante o Holocénico Médio e Superior induziu o enchimento sedimentar dos estuários, com alterações no regime de sedimentação e, conseqüentemente, do tipo de sedimentos e das taxas de deposição. As variações sedimentares registadas no estuário em causa representam uma evidência deste facto, mostrando diferentes ambientes energéticos.

A primeira fase de sedimentação (LS), essencialmente constituída por sedimentos arenosos, ocorreu em ambiente de estuário aberto, uma ria em assoreamento como foi designada em Ramos-Pereira *et al.* (2010) e Araújo-Gomes (2010), com taxas de deposição

ção de *c.* de 1mm/ano⁻¹, que duraram de 8000 a 3000 cal BP (6000 a 1000 cal BC). Estes valores são concordantes com os obtidos para outros estuários localizados na costa do Algarve.

A segunda fase (US) corresponde a uma maior variação das condições de sedimentação, com taxas de sedimentação menores do que na primeira fase. Essa situação é consistente com um estuário protegido, provavelmente parcialmente fechado por um cordão ou barra arenosa, como existia ainda em meados do século XX, com diversos episódios de *overwash*, sendo um bem definido a 24cm. Este evento poderá corresponder ao *tsunami* que se seguiu ao terramoto de Lisboa de 1755, se outros indicadores também apontarem nessa direcção. A ser aceitável, essa correspondência seria totalmente compatível com o modelo bayesiano que se construiu.

AGRADECIMENTOS

Esta investigação foi financiada pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia através do projecto PTDC/CTEGIX/ 104035/2008 – FMI 5000: *Environmental changes: Fluvio-marine interactions over the last 5000 yrs.*

P. Portela agradece a BIC do mesmo projecto e J. Martins a bolsa PhD SFRH/BD/45528/2008, financiada pela mesma instituição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araújo-Gomes, J. (2010). *Estuário da Ribeira de Bensafirim: Leitura Geo-arqueossimológica* [Ribeira de Bensafirim Estuary: Geo-archaeological Reading]. (Dissertação de Mestrado). Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Bayes, T. R. (1763). An essay towards solving a problem in the doctrine of chances. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 53, 370-418.
- Boski, T., Camacho, S., Moura, D., Fletcher, W., Wilamowski, A., Veiga-Pires, C... Santana, P. (2008). Chronology of the sedimentary processes during the postglacial sea level rise in two estuaries of the Algarve coast, Southern Portugal. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 77, 230-244.
- Bronk Ramsey, C. (2013). *Oxcal 4.2.3*. Interface build: 78, Updated: 9/10/2013.
- Bronk Ramsey, C. (2012). *Oxcal 4.1 Manual*. Web interface build number: 69. Retrieved from http://c14.arch.ox.ac.uk/oxcalhelp/hlp_contents.html
- Bronk Ramsey, C. (2001). Development of the radiocarbon calibration program OxCal. *Radiocarbon*, 43(2A), 355-363.
- Bronk Ramsey, C. (2009). Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon*, 51(1), 337-360.
- Bronk Ramsey, C. (2008). Deposition models for chronological records. *Quaternary Science Reviews*, 27(1-2), 42-60.
- Bronk Ramsey, C., & Allen, M. J. (1995). Analysis of the radiocarbon dates and their archaeological significance. In R. M. J. Cleal, K. E. Walker & R. Montague (Eds.), *Stonehenge in its landscape: twentieth century excavations* (pp. 526-535). London: English Heritage
- Buck, C. E., Kenworthy, J. B., Litton, C. D., & Smith, A. F. M. (1991). Combining Archaeological and Radiocarbon Information – a Bayesian-Approach to Calibration. *Antiquity*, 65(249), 808-821.
- Buck, C. E., Litton, C. D., & Smith, A. F. M. (1992). Calibration of Radiocarbon Results Pertaining to Related Archaeological Events. *Journal of Archaeological Science*, 19(5), 497-512.

- Daveau, S. (1987). Comentários e actualizações [Comments and updates]. In O. Ribeiro, H. Lautensach & S. Daveau (Eds.), *Geografia de Portugal. Vol. 1. A posição Geográfica e o Território* [Geography of Portugal. Vol. 1. Geographic Position and Territory] (pp. 83-117). Lisboa: Edições João Sá da Costa, 83-117.
- Delgado, J., Boski, T., Nieto, J. M., Pereira, L., Moura, D., Gomes, A... García-Tenorio, R. (2012). Sea-level rise and anthropogenic activities recorded in the late Pleistocene/Holocene sedimentary infill of the Guadiana Estuary (SW Iberia). *Quaternary Science Reviews*, 33, 121-141.
- Font, E., Nascimento, C., Omira, R., Baptista, M. A., & Silva, P. F. (2010). Identification of tsunami-induced deposits using numerical modeling and rock magnetism techniques: A study case of the 1755 Lisbon tsunami Algarve, Portugal. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 182(3-4), 187-198.
- Font, E., Veiga-Pires, C., Pozo, M., Nave, S., Costas, S., Ruiz Muñoz, F... Rodríguez-Vidal, J. (2013). Benchmarks and sediment source(s) of the 1755 Lisbon tsunami deposit at Boca do Rio Estuary. *Marine Geology*, 343(1), 1-14.
- Henriques, R. (1998). *Propostas Metodológicas para a Monitorizaçãodas Zonas Costeiras – Aspectos Sedimentológicos* [Methodological Proposals for Coastal Zone Monitoring – Sedimentological Aspects]. (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Porto.
- Henriques, R. (2004). SEDMAC/SEDPC: An application to support particle size analysis of unconsolidated sediments. *32nd International Geological Congress*, Florence-Italy, abs. 154-6, p. 726.
- Henriques, R. (2003). SEDMAC/SEDPC: programa informático de apoio à análise dimensional de populações detriticas [SEDMAC / SEDPC: computer program to support dimensional analysis of detrital populations]. *Ciências da Terra*, 5 (special issue), VI Congresso Nacional de Geologia, Lisbon, 40.
- Lienkaemper, J. J., & Bronk Ramsey, C. (2009). OxCal: Versatile Tool for Developing Paleoearthquake Chronologies – A Primer. *Seismological Research Letters*, 80, 431-434.
- Kortekaas, S., & Dawson, A. G. (2007). Distinguishing tsunami and storm deposits: An example from Martinhal, SW Portugal. *Sedimentary Geology*, 200, 208-221.
- Portela, P. J. C. (2013). *Análise Elementar e Isotópica de Sedimentos Estuarinos do Rio Alcabrichel (Torres Vedras) e da Ribeira de Bensafrim (Lagos)* [Elemental and Isotopic Analysis of Estuarine Sediments of the Alcabrichel River (Torres Vedras) and the Ribeira de Bensafrim (Lagos)]. (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Ramos-Pereira, A., Araújo-Gomes, J., Trindade, J., & Ramos, C. (2010). Da ria à marina de Lagos. A evolução de um ambiente estuarino no Holocénico superior [From the ria to the Marina de Lagos. The evolution of an upper Holocene estuarine environment]. *Actas do V Congresso Nacional de Geomorfologia*, Associação Portuguesa de Geomorfólogos, Porto, 49-52.
- Ramos-Pereira, A., Ramos, C., Trindade, J., Araújo-Gomes, J., Rocha, J., Granja, H... Martins, J. M. (2011). FMI 5000: um projecto sobre mudanças ambientais holocénicas [FMI 5000: a project on holocene environmental changes]. *Finisterra – Revista Portuguesa de Geografia*, XLVI(91), 99-106.
- Reimer, P. J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J. W., Blackwell, P. G., Bronk Ramsey, C... van der Plicht, J. (2013). IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0-50,000 Years cal BP. *Radiocarbon*, 55(4), 1869-1887.
- Rhodes, E. J., Bronk Ramsey, C., Outram, Z., Batt, C., Willis, L... Bond, J. (2003). Bayesian method applied to the interpretation of multiple OSL dates: high precision sediment ages from Old Scatness Broch excavations, Shetland Isles. *Quaternary Science Reviews*, 22, 1231-1244.