



IPMA

Instituto Português
do Mar e da Atmosfera

RELATÓRIOS CIENTÍFICOS E TÉCNICOS

SÉRIE DIGITAL

**VALIDAÇÃO DE PRODUTOS DE SATÉLITE DE
TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO OCEANO
(SST)**

Maria Pires Cadima

2020

26



RELATÓRIOS CIENTÍFICOS E TÉCNICOS DO IPMA – SÉRIE DIGITAL

Destinam-se a promover uma divulgação rápida de resultados de carácter científico e técnico, resultantes da actividade de investigação e do desenvolvimento e inovação tecnológica nas áreas de investigação do mar e da atmosfera. Esta publicação é aberta à comunidade científica e aos utentes, podendo os trabalhos serem escritos em Português, Francês ou Inglês.

Edição

IPMA

Rua C - Aeroporto de Lisboa

1749-007 LISBOA

Portugal

Corpo Editorial

Francisco Ruano – Coordenador

Aida Campos

Irineu Batista

Lourdes Bogalho

Mário Mil-Homens

Rogélia Martins

Teresa Drago

Edição Digital

Conceição Almeida

As instruções aos autores estão disponíveis no sítio web do IPMA

<http://ipma.pt>

ou podem ser solicitadas aos membros do Corpo Editorial desta publicação

Capa

Conceição Almeida

ISSN

2183-2900

Todos os direitos reservados

Validação de Produtos de Satélite de Temperatura da Superfície do Oceano (SST)

Maria Pires Cadima

Instituto Português do Mar e da Atmosfera, Av. Alfredo Magalhães Ramalho, 6, 1495-165
Lisboa, Portugal

Recebido em: 2019-12-09

Aceite em: 2020-02-13

RESUMO

A temperatura da superfície do oceano (SST) é uma das variáveis fundamentais em Oceanografia. Validaram-se dados da SST de cinco diferentes produtos de satélite de nível 4, através da sua comparação com medições *in situ* de duas campanhas oceanográficas realizadas no Verão/2017 e no Inverno/2019, ao largo da costa de Portugal Continental. Estabeleceram-se critérios espaço-temporais para possibilitar as comparações entre as SST de satélite e medições *in situ*. Para cada registo *in situ*, extraiu-se o pixel mais próximo no espaço, da imagem de satélite mais próxima no tempo. Repetiu-se este processo para todos os produtos analisados. De modo a quantificar os resultados, calcularam-se as “anomalias”, definidas como a diferença entre uma SST de satélite e a SST *in situ* correspondente. O desempenho dos produtos foi bastante diferente nas 2 campanhas. No Verão/2017, todos os produtos sobrestimaram as SST *in situ* baixas e subestimaram as SST *in situ* elevadas. Procuraram-se as causas deste aparente enviesamento. Procurou-se relacionar a magnitude das anomalias com a hora da medição *in situ* ou a distância à costa. Observou-se uma tendência para os produtos sobrestimarem as SST *in situ* medidas em locais mais próximos da costa. Por outro lado, na campanha do Inverno/2019, não se observaram anomalias superiores a 1°C em valor absoluto, ou enviesamentos sistemáticos das SST de satélite. Concluiu-se que o produto MUR SST teve o desempenho mais consistente, apresentando os menores enviesamentos na campanha de Verão/2017 e um resultado satisfatório na campanha de Inverno/2019.

Palavras chave: SST, deteção remota, medidas *in situ*, validação dados, costa portuguesa, anomalias

ABSTRACT

Title: Validation of Sea Surface Temperature (SST) from Satellite Products

Sea surface temperature (SST) is one of the most important variables in Oceanography. SST data from five different level 4 satellite products were validated, by comparing them to *in situ* measurements from two oceanographic surveys in the Summer/2017 and Winter/2019, off the coast of Continental Portugal. Spatial and temporal criteria were defined to enable the comparisons between satellite SST and *in situ* measurements. For each *in situ* measurement, the nearest pixel in space was extracted from the satellite image at the nearest moment in time. This process was repeated for the five satellite products. To quantify the results, the differences between a satellite SST and the corresponding *in situ* SST (“anomalies”) were calculated. The performance of the products was quite different in the two surveys. In the Summer/2017, all the products overestimated the low *in situ* SST and underestimated the high ones. The causes of this apparent bias were studied. Possible relations were sought between the magnitude of the anomalies and the measurements’ time of day or distance to the coast. *In situ* SST values nearer to the coast tended to be overestimated. On the other hand, in the Winter/2019 survey, no anomalies over 1°C in absolute value, were found, nor were the satellite SST systematically biased. The MUR SST product had the most consistent performance, with the smallest bias in the Summer/2017 campaign and a satisfactory result in the Winter/2019 survey.

key Words: SST, Remote sensing, *in situ* measurements, data validation, Portuguese coast, Anomalies

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Cadima, M. P., 2019. Validação de Produtos de Satélite de Temperatura da Superfície do Oceano (SST). *Relat. Cient. Tecn. do IPMA*, (<http://ipma.pt>), nºXX, 42p. Anexos

Índice

1.	Introdução	4
2.	Dados	5
2.1.	Dados 5	
2.1.1.	Campanha do Verão de 2017 (Norte, Centro e Lisboa)	5
2.1.2.	Campanha do Inverno de 2019 (costa de Portugal Continental + Baía de Cadiz)	7
2.2.	Dados de satélite	7
2.2.1.	Global Ocean OSTIA Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis	8
2.2.2.	Mediterranean Sea High Resolution and Ultra High Resolution Sea Surface Temperature Analysis	9
2.2.3.	Mediterranean Sea - High Resolution L4 Sea Surface Temperature Reprocessed	9
2.2.4.	MUR SST (Multi-scale Ultra-high Resolution Sea Surface Temperature)	10
2.3.	Distância à costa e batimetria	10
2.4.	Processamento de dados de satélite	10
2.5.	Software/módulos usados	12
3.	Metodologia	13
3.1.	Pré-processamento	13
3.1.1.	Dados in situ da campanha do Verão de 2017 (23 a 31 de Agosto)	13
3.1.2.	Dados in situ da campanha do Inverno de 2019 (25 de Janeiro a 25 de Fevereiro)	14
3.1.3.	Dados de SST de satélite e dados de distância à costa	14
3.2.	Comparação entre dados	16
4.	Resultados	18
4.1.	Campanha Verão/2017	18
4.2.	Campanha Inverno/2019	25
5.	Discussão de resultados / Conclusão	30
6.	Agradecimentos	32
	Créditos adicionais	32
	Referências	32

1. Introdução

Recentemente, os dados de satélite têm vindo a adquirir uma importância maior no estudo dos oceanos. Uma das suas utilizações mais importantes é como *input* em modelos de circulação oceânica e de previsão meteorológica. Muitas vezes as séries temporais de dados *in situ* têm valores em falta, e os dados de satélite podem ser usados para obter uma cobertura maior no espaço e no tempo, com um custo menor (Thakur *et al*, 2018). A elevada resolução temporal (escala sinóptica) e espacial das observações de satélite permite resolver certas escalas da variabilidade oceânica que não seria possível resolver de outro modo (Le Traon, 2018). No entanto os dados de satélite têm a desvantagem de serem afectados por diversos factores específicos da utilização de métodos de detecção remota, que se traduzem numa maior incerteza associada (Castillo e Lima, 2010).

O presente estudo teve como objetivo principal validar dados de satélite da temperatura da superfície do oceano (SST) provenientes de várias fontes, comparando-os com medições *in situ* recolhidas em campanhas oceanográficas realizadas na costa de Portugal Continental. As comparações procuram determinar quais os produtos de satélite que melhor aproximam os dados *in situ*.

Estes produtos classificam-se em vários níveis, definidos pelo EOS (*Earth Observing System*, NASA, EUA). Quanto mais alto for o nível do produto, mais processamento foi realizado nos dados de satélite. O “nível 4” corresponde aos dados com a maior quantidade de processamento entre os existentes atualmente.¹ Todas as imagens de satélite usadas neste trabalho são de nível 4. Estas distinguem-se de imagens de níveis inferiores, por serem uma interpolação numérica de dados de SST provenientes de diferentes sensores e satélites e, por vezes, também de observações *in situ*². Frequentemente, os dados de satélite obtidos com sensores de radiação infravermelha têm valores omissos devido à presença de nuvens, que podem ser persistentes no tempo ou no espaço (Chin *et al*, 2017) e se traduzem em espaços vazios (*gaps*) nas imagens depois do processamento. Em relação às imagens de nível 3, que são mapeadas numa grelha mas não interpoladas, as imagens de nível 4 têm a vantagem de não ter espaços vazios (*gap-free*) (Thakur *et al*, 2018).

O facto de as imagens de nível 4 serem *gap-free* torna estes produtos mais amigáveis para o utilizador, e essa é também uma das motivações para a realização deste estudo. Seria útil compreender melhor quão bem os produtos de nível 4 existentes aproximam os dados *in situ* em diferentes situações. Este estudo procura caracterizar o desempenho geral dos produtos de nível 4 na aproximação da SST *in situ* em regiões costeiras. Não se colocou como objectivo avaliar a importância relativa das incertezas resultantes da interpolação dos produtos e dos erros de observação.

O presente estudo foi realizado no período de Janeiro a Julho de 2019 no Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) no âmbito de um estágio de formação extra-curricular.

¹<https://nsidc.org/the-drift/2013/08/is-it-1b-2-or-3-definitions-of-data-processing-levels/>

²<https://www.ghrsst.org/ghrsst-data-services/products/>

2. Dados

2.1. Dados *in situ*

Os dados *in situ* utilizados neste estudo foram recolhidos em duas campanhas oceanográficas no navio de investigação NI *Noruega*, do IPMA, realizadas no Verão de 2017 e no Inverno de 2019. Além da SST, medida em água bombeada continuamente a 3 m de profundidade com um termosalinómetro SBE21³, registaram-se a posição (latitude/longitude), a salinidade e a data e hora da medição. Os dados de salinidade não foram utilizados neste estudo.

A utilização de dados recolhidos em duas campanhas distintas, uma no Verão e outra no Inverno, justifica-se considerando as diferenças sazonais entre as condições oceanográficas à superfície. No Inverno, em latitudes médias, a acção do vento e o arrefecimento da superfície contribuem para uma menor estratificação na camada superficial do oceano, havendo mistura constante das águas (*camada de mistura*). Em contraste, no Verão, as condições atmosféricas mais calmas e a maior absorção de energia solar à superfície resultam numa maior estratificação/menor mistura de águas nos metros superiores do oceano, formando-se uma *termoclina sazonal*, ou seja, um gradiente marcado de temperatura (Talley *et al*, 2011). Além disto, no Verão, a costa ocidental da Península Ibérica é influenciada por ventos de Norte, que conduzem à ocorrência de afloramento costeiro ou *upwelling* (Relvas *et al*, 2007). A água fria ascende à superfície nas zonas costeiras, substituindo águas mais quentes transportadas para o largo (Talley *et al*, 2011).

2.1.1. Campanha do Verão de 2017 (Norte, Centro e Lisboa)

Realizou-se uma campanha de rastreio acústico dirigida a pequenos peixes pelágicos, *PELAGO17_OCN_Agosto*, financiada pelo IPMA, que cobriu parte da costa oeste de Portugal Continental. Os dados foram recolhidos nos últimos 9 dias do mês de Agosto (23-31 Agosto) de 2017, ao largo do Norte e Centro do país e da região de Lisboa, nos locais assinalados na Figura 2.1. A campanha realizou-se no sentido Norte-Sul.

³<https://www.seabird.com/moving-platform/sbe-21-seacat-thermosalinograph/family?productCategoryId=54627473790>

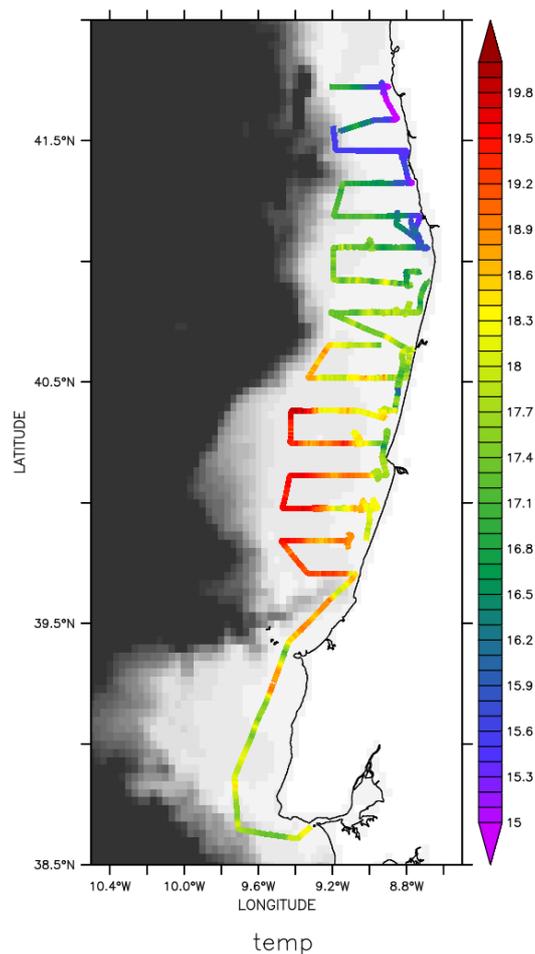


Figura 2.1: Locais das medições e valores da SST obtidos na campanha realizada entre 23 e 31 de agosto de 2017.
Figure 2.1: SST values measured in the oceanographic survey of 23-31 August 2017, with location of measurements.

A informação relativa às variáveis de interesse para o presente estudo foi uma recolha de oportunidade, não sendo o foco principal da campanha. As medições tiveram início às 13h00 UTC do dia 23 de agosto de 2017 e terminaram às 9h00 UTC do dia 31 do mesmo mês, cobrindo a área contida nas latitudes 38.61°N – 41.73°N e longitudes 9.73°W – 8.69°W. O intervalo entre registos consecutivos dos dados foi de 5 segundos, no entanto depois de um processamento inicial (realizado antes deste estudo), o intervalo utilizado para o presente estudo foi de 3 minutos. Nas primeiras cinco noites da campanha, não foi medida a posição para a maioria dos registos nocturnos.

2.1.2. Campanha do Inverno de 2019 (costa de Portugal Continental + Baía de Cadiz)

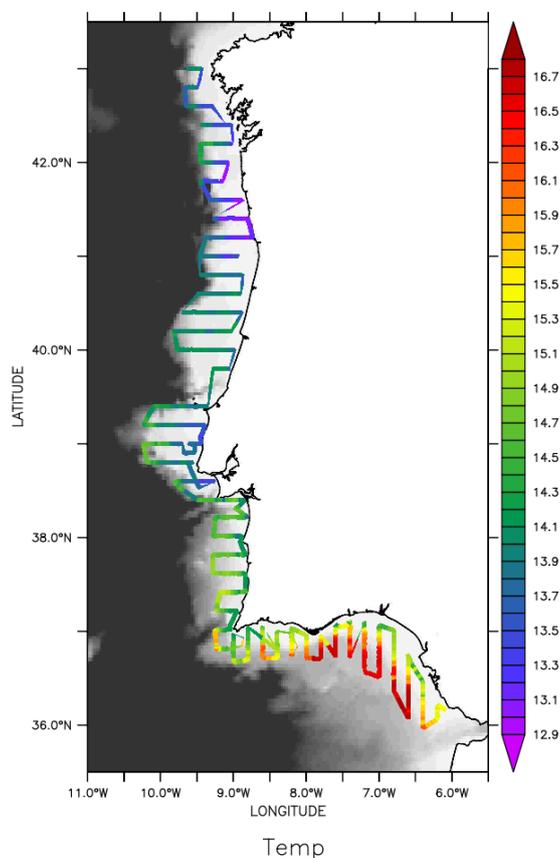


Figura 2.2: Locais das medições e valores da SST in situ obtidos na campanha realizada entre os dias 25/01 e 25/02/2019.

Figure 2.2: SST values measured in the oceanographic survey of 25 January – 25 February 2019, with location of measurements.

Os dados da campanha realizada no Inverno de 2019, designada por PT-DEPM19-HOM e financiada por IPMA-PNAB (Programa Nacional de Amostragem Biológica) foram recolhidos entre 25 de Janeiro e 25 de Fevereiro, cobrindo toda a costa de Portugal Continental, o Oeste da Galiza e a Baía de Cadiz (Cabo Finisterra a Cabo Trafalgar). A campanha realizou-se no sentido Sul-Norte. Em termos geográficos a área cobriu as latitudes 35.97°N – 43.00°N e as longitudes 10.23°W – 6.08°W. A cobertura temporal destes dados foi irregular, tendo havido vários períodos com registos em falta; estes *gaps* tiveram duração variável, desde alguns minutos até cerca de 3 dias, e não seguiram qualquer padrão temporal regular, havendo tanto registos diurnos como nocturnos em falta.

2.2. Dados de satélite

Foram analisados cinco produtos de satélite, cujas características principais são apresentadas na Tabela 2.1. No início do estudo, fez-se a opção de utilizar apenas produtos de nível 4, por serem tipicamente utilizados para caracterizar a componente ambiental em estudos de ecologia. Procuraram-se usar produtos cuja cobertura espacial e temporal fosse adequada às

necessidades do presente estudo. Escolheu-se também analisar produtos com resoluções espaciais diferentes, para testar a importância deste factor na comparação com os dados *in situ*.

Produto	Cobertura temporal	Cobertura espacial	Resolução espacial	Resolução temporal
Global Ocean OSTIA Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis	01/01/2007 – presente	Global	1/20° x 1/20°	1 imagem/dia referenciada às 12h00 UTC
Mediterranean Sea High Resolution and Ultra High Resolution Sea Surface Temperature Analysis	01/01/2016 - presente	Zona do Mar Mediterrâneo (lat. 30.25°N a 46.0°N; long. 18.12°W a 36.25°E)	1/16° x 1/16° (alta resolução); 1/100° x 1/100° (muito alta resolução)	1 imagem/dia referenciada às 00:00 UTC
Mediterranean Sea - High Resolution L4 Sea Surface Temperature Reprocessed	25/08/1981 - 31/12/2018 (em Junho/2019)	Zona do Mar Mediterrâneo (lat. 30.25°N a 46.0°N; long. 18.12°W a 36.25°E)	1/25° x 1/25°	1 imagem/dia referenciada às 00:00 UTC
MUR SST (Multi-scale Ultra-high Resolution Sea Surface Temperature)	01/06/2002 - presente	Global	1/100° x 1/100°	1 imagem/dia referenciada às 09:00 UTC

Tabela 2.1: Características principais dos produtos de satélite de nível 4 analisados neste estudo.

Table 2.1: Main characteristics of the level 4 satellite products analysed in this study.

O produto MUR SST é disponibilizado pelo JPL (Jet Propulsion Laboratory) pertencente à NASA, de forma gratuita⁴. Os restantes 4 produtos são disponibilizados, também gratuitamente, pelo CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service)⁵. Todos os ficheiros estão no formato NetCDF (.nc)⁶. Nas subsecções seguintes apresentam-se os produtos em maior detalhe.

Para os períodos e áreas cobertas pelas campanhas, foram descarregados os dados destes produtos. No caso da campanha do Inverno, as imagens do produto *Mediterranean Sea* reprocessado (ver subsecção 2.2.3) não estavam ainda disponíveis para o ano de 2019.

2.2.1. Global Ocean OSTIA Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis

Este produto (que, no que se segue, será designado por “OSTIA”) é calculado diariamente no Met Office, Reino Unido⁷, a partir de vários tipos de dados, incluindo⁸:

⁴ <https://mur.jpl.nasa.gov/index.php>

⁵ <http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/>

⁶ Mais informação em: https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/docs/netcdf_introduction.html

⁷ <https://www.metoffice.gov.uk/>

⁸ Manual de utilização do produto OSTIA, disponível no site do CMEMS:

<http://resources.marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-SST-PUM-010-001.pdf>

- dados de satélite, sobretudo nas bandas do infravermelho, mas também na banda das micro-ondas. Entre as fontes dos dados encontram-se satélites de órbita polar (NOAA, MetOp-A, Suomi NPP) e satélites geoestacionários (GOES, MSG-3).
- dados *in situ* de navios e bóias (fixas ou à deriva);
- climatologias (1985-2007) baseadas no produto de reanálise OSTIA⁹;
- dados da concentração de gelo e da temperatura da superfície de lagos, onde aplicável.

O produto é disponibilizado em tempo quase real (*near real time* ou NRT).¹⁰

2.2.2. *Mediterranean Sea High Resolution and Ultra High Resolution Sea Surface Temperature Analysis*

Estes dois produtos são processados pelo CNR-ISAC-GOS (*Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima - Gruppo di Oceanografia da Satellite*, Itália)¹¹. Ambos os produtos são calculados com o mesmo algoritmo e a partir dos mesmos dados de *input*, tendo o *output* duas variantes: resolução alta (deste ponto em diante referido como “*Med HR*”, interpolado numa grelha regular de 1/16°) e resolução muito alta (no que se segue, “*Med UHR*”, numa grelha regular de 1/100°). A área coberta por estes produtos abrange o Mar Mediterrâneo e uma pequena parte do Oceano Atlântico que inclui a costa de Portugal Continental inteira. Ambos os produtos são representativos de valores noturnos da SST. As imagens estão disponíveis em tempo quase real, sendo atualizadas duas vezes por dia, às 12h00 e 15h00. Os *inputs* usados no seu cálculo são dados de satélite nas bandas do infravermelho, captados por satélites de órbita polar (NOAA, MetOp-A, Sentinel 3A) e pelo satélite geoestacionário MSG¹².

2.2.3. *Mediterranean Sea - High Resolution L4 Sea Surface Temperature Reprocessed*

Este produto de reanálise (no que se segue, “*Med REP*”) é calculado também no CNR-ISAC-GOS, para a mesma área dos produtos apresentados em 2.2.2. Até ao final de 2014, o reprocessamento foi feito com base no produto de nível 3 *Pathfinder*¹³ da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, EUA). A partir de 2015 a reanálise é feita a partir do produto *Med UHR*¹⁴. Em ambos os casos a resolução espacial do produto reprocessado é a da grelha do *Pathfinder* (1/25° x 1/25°).

⁹ Mais detalhes sobre o produto de reanálise OSTIA podem ser encontrados em:

http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=SST_GLO_SST_L4_REP_OBSERVATIONS_010_011 e nos seus manuais de utilização.

¹⁰ <http://cmems-resources.cls.fr/documents/QUID/CMEMS-OSI-QUID-010-001.pdf>

¹¹ <http://gosweb.artov.isac.cnr.it/>

¹² Manual de utilização dos produtos *Mediterranean Sea* (NRT):

<http://resources.marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-SST-PUM-010-004-006-012-013.pdf>

¹³ Pathfinder: https://data.nodc.noaa.gov/cgi-bin/iso?id=gov.noaa.nodc:AVHRR_Pathfinder-NCEI-L3C-v5.3

¹⁴ Manual de utilização do produto *Mediterranean Sea* reprocessado:

<http://marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-SST-PUM-010-021-022.pdf>

2.2.4. MUR SST (Multi-scale Ultra-high Resolution Sea Surface Temperature)

O produto MUR SST é desenvolvido no *Jet Propulsion Laboratory* (California Institute of Technology, EUA). Os *inputs* usados para o seu cálculo incluem dados de satélite nas bandas do infravermelho (sensores MODIS, AVHRR) e micro-ondas (sensores AMSR e WindSat), e dados *in situ* provenientes de boias e navios. O produto MUR usa apenas dados noturnos, isto é, do intervalo entre o pôr do sol e o nascer do sol para cada local. Para mais informação consultar o site do MUR (nota de rodapé 4) e o artigo de Chin *et al*, 2017.

2.3. Distância à costa e batimetria

Obtiveram-se os dados de batimetria da região compreendida entre as latitudes 34°N - 44°N e longitudes 11°W - 5°W, em formato NetCDF. Estes dados são gratuitos e provêm do GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Oceans*)¹⁵. Os dados de distância à costa da mesma região foram calculados com o comando *grdlandmask* do pacote *Generic Mapping Tools*¹⁶ para uso em Linux, e a rotina de Python *gdal_proximity.py* disponível no site da GDAL (*Geospatial Data Abstraction Library*).¹⁷

2.4. Processamento de dados de satélite

Na medição da SST de satélite utilizam-se as bandas do infravermelho designadas por *TIR*, ou *infravermelho térmico*, com comprimentos de onda de $\approx 3.7 \mu\text{m}$ e da região do espectro próxima de $10 \mu\text{m}$. Recorre-se também à radiação micro-ondas, com menor resolução espacial mas a grande vantagem de não ser afetada pela presença de nuvens.¹⁸ Os sensores a bordo dos satélites, designados por *radiómetros*, medem a *radiância espectral*¹⁹, definida como a potência incidente por área e ângulo sólido (direção) para um dado comprimento de onda²⁰. A função de Planck relaciona a radiância espectral com a temperatura e o comprimento de onda de um corpo negro (objeto que absorve/emite toda a radiação que nele incide), sendo possível aproximar a superfície do oceano por um corpo negro devido à sua emissividade de ≈ 0.99 . Usa-se esta relação para converter os dados de satélite em temperaturas de brilho (*brightness temperatures*), a temperatura que um corpo negro precisaria de ter para produzir a radiância detectada pelo sensor. Estas temperaturas ignoram os efeitos atmosféricos, a maior fonte de ruído nas medições. Consequentemente, devem aplicar-se algoritmos de correção para retirar o efeito da atmosfera sobre a SST.²¹

¹⁵ GEBCO: <https://www.gebco.net/>

¹⁶ Generic Mapping Tools (grdlandmask): <http://gmt.soest.hawaii.edu/doc/5.3.2/grdlandmask.html>

¹⁷ GDAL: <https://gdal.org/programs/index.html>

¹⁸ <http://www2.hawaii.edu/~jmaurer/sst/>

¹⁹ <http://marine.copernicus.eu/wp-content/uploads/2017/10/CMEMS-SEA-SURFACE-TEMP-SATELLITE.pdf>

²⁰ <http://www.dii.unisi.it/~garzelli/documenti/03-SOME%20DEFINITIONS%20IN%20RADIOMETRY.pdf>

²¹ Slides de uma conferência apresentada por Ian Robinson em 2004:
ftp://ftp.artov.rm.cnr.it/incoming/ifa.rm.cnr.it/Emanuele.Bohm/Public/Master_STS/I.Robinson-Part2.pdf

A superfície do oceano tem uma ampla variação na sua temperatura devido à radiação solar e ao efeito das correntes. A Figura 2.3 apresenta um diagrama esquemático da definição de SST na camada superficial do oceano. Designam-se as SST medidas à superfície por *skin SST* que são obtidas depois da aplicação das correções atmosféricas aos dados de satélite. Por outro lado, as medições *in situ* da SST não são feitas à superfície, mas a poucos metros de profundidade, onde o impacto da radiação solar é bastante menor. As temperaturas a estas profundidades designam-se *bulk SST*²². Os produtos de nível 4 utilizados neste estudo procuram estimar a *bulk SST*, ou a *foundation SST*, definida como a temperatura livre de quaisquer efeitos provocados pelo aquecimento diurno (Chin *et al*, 2017).

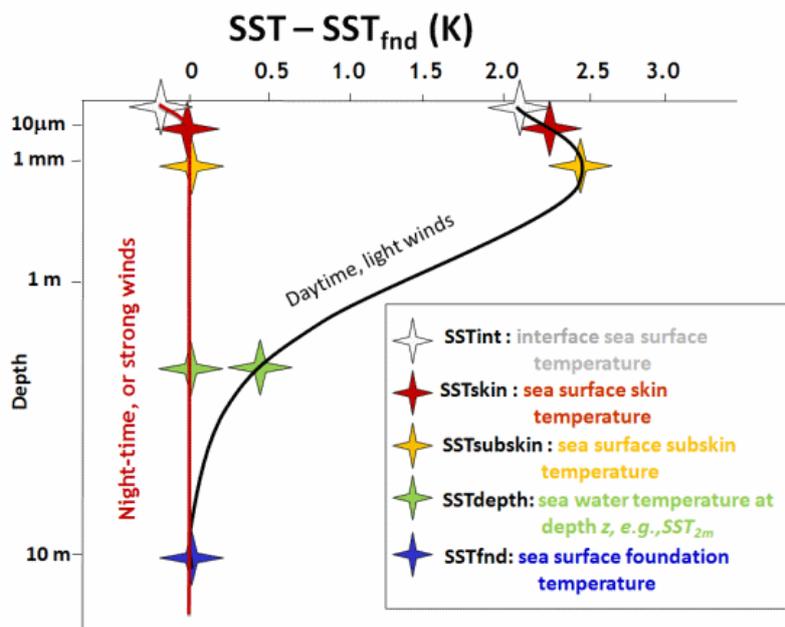


Figura 2.3: Distinção entre diferentes SST segundo o esquema do GHRSSST.
 Figure 2.3: Distinction between different types of SST, following the GHRSSST convention.
 Fonte/Source: <https://www.ghrsst.org/ghrsst-data-services/products/>

As imagens de nível 4 combinam dados de satélite de vários sensores e instantes no tempo. Os manuais de utilização dos produtos e o artigo de Chin *et al* (2017) sobre o *MUR* referem algumas correções realizadas antes de as imagens poderem ser combinadas, a fim de evitar vieses na análise. Os algoritmos de todos os produtos corrigem os vieses das várias fontes. Para tal podem utilizar informação disponível com os dados, como por exemplo estimativas dos erros sistemático e aleatório de cada pixel (designadas como *SSES – Single Sensor Error Statistics* nos dados do GHRSSST²³), ou podem estimar um viés através de métodos estatísticos,

²² <http://www.u.arizona.edu/~brunke/research/skin.html>

²³ Group for High Resolution Sea Surface Temperature: <https://www.ghrsst.org/>

por exemplo fazendo correspondências entre os dados de satélite e dados de referência (que se supõem desviesados).

Normalmente aplicam-se os algoritmos de conversão de *skin SST* para *bulk* ou *foundation SST* durante o nível 3 do processamento dos produtos, quando se juntam imagens de diferentes satélites, ou do mesmo satélite mas de diferentes regiões geográficas ou instantes temporais, de modo a garantir que não existam heterogeneidades no campo da SST (GHRSSST Science Team, 2010).

Para criar as imagens de nível 4 dos produtos OSTIA e *Mediterranean Sea*, foram usados métodos baseados na “interpolação ótima” (IO). O objetivo da IO é determinar um campo de uma variável, neste caso a SST, com base em observações distribuídas de forma arbitrária no espaço e tempo. A variabilidade do campo da SST depende de processos com diferentes escalas espaço-temporais que interagem entre si. Na IO, estimam-se os valores da SST em todos os pontos de uma grelha, a partir das observações de *input* (que tanto podem ser dados de satélite como medições) e de uma aproximação inicial, também chamada *background*, realizada com base no resultado (designado por *análise*) do dia anterior e numa climatologia de referência adequada para a época do ano. A análise será tanto melhor quanto mais informação se incluir no algoritmo. Além das observações e do *background*, são incluídas equações que governam os processos físicos em questão (Barth *et al*, 2008). O esquema de IO utilizado para criar o produto OSTIA foi alterado a 28/11/2017. Encontra-se informação mais detalhada sobre os métodos de interpolação destes produtos nos seus manuais (ver notas de rodapé 8, 12 e 14).

O produto MUR SST usa um método de interpolação diferente, chamado MRVA (*Multi-Resolution Variational Analysis*), que se baseia no método dos mínimos quadrados ponderados. De acordo com Chin *et al* (2017), no método MRVA, os *inputs* são transformados numa soma de várias parcelas, cada uma com uma escala espaço-temporal diferente. A interpolação é realizada para cada parcela de forma independente. Consoante a sua resolução, certos dados de *input* podem ser usados em algumas parcelas e não noutras. Por exemplo, os dados *in situ* provenientes de bóias, que são os dados com menor resolução espacial entre os *inputs* do produto MUR, não são usados para resolver escalas espaciais inferiores à mesoescala. Mais informação encontra-se no artigo de Chin *et al* (2017).

2.5. Software /módulos usados

Os dados dos produtos de satélite extraíram-se recorrendo ao software R (R Core Team, 2018) e aos módulos adicionais *ncdf4* (Pierce, 2019), *ncdf.tools* (Buttler, 2015) e *RNetCDF* (Michna e Woods, 2019). Usou-se também o módulo *lubridate* (Grolemund e Wickham, 2011)²⁴ para realizar operações com datas/horas (ver secção *Metodologia*).

Para desenhar as imagens de satélite recorreu-se aos módulos *fields* (Nychka *et al.*, 2017), *mapdata* (Brownrigg, 2018) e *viridis* (Garnier, 2018).

²⁴ Artigo disponível em: <https://www.jstatsoft.org/article/view/v040i03>

Para a visualização de outros gráficos usou-se o módulo *ggplot2* (Wickham, 2016)²⁵. Para a análise estatística recorreu-se ao módulo *modelr* (Wickham, 2018). Para localizar as anomalias no mapa recorreu-se aos módulos *sf* (Pebesma, 2018), *mapview* (Appelhans *et al.*, 2019) e *colorspace* (Zeileis *et al.*, 2019).

3. Metodologia

3.1. Pré-processamento

Os dados *in situ* de ambas as campanhas, inicialmente em formato CSV, foram importados para o *software* R para serem visualizados. As datas foram convertidas em formato *POSIXct* e o seu fuso horário definido como UTC.

3.1.1. Dados *in situ* da campanha do Verão de 2017 (23 a 31 de Agosto)

A Figura 3.1 apresenta a evolução diária da SST *in situ* para os 9 dias desta campanha.

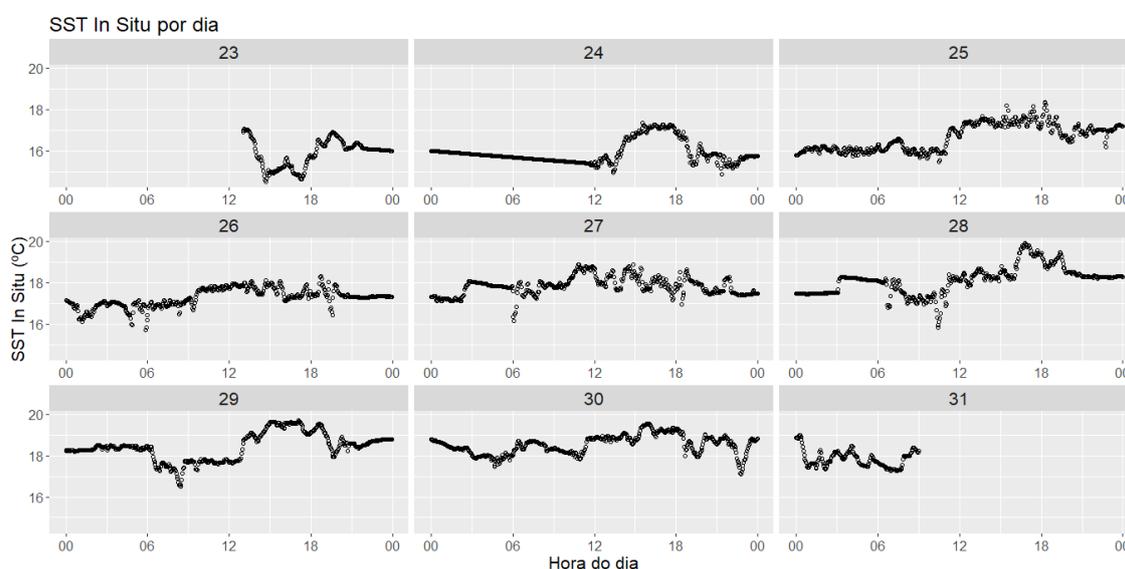


Figura 3.1: Evolução diária da SST *in situ* entre os dias 23-31 de agosto de 2017 (medições campanha Verão/2017).
Figure 3.1: Daily evolution of the *in situ* SST, 23 to 31 August 2017 (measurements from the Summer/2017 oceanographic survey).

Nota-se uma tendência geral de aumento da SST ao longo dos 9 dias, que é explicada pelo facto do navio se ter deslocado de norte para sul. A SST *in situ* varia também em longitude, sendo em geral mais elevada para as medições mais distantes da costa, o que reflecte a ocorrência de afloramento costeiro durante o período desta campanha (ver secção 2.1); por exemplo, no dia 23/08, durante o primeiro transecto do navio verifica-se uma diminuição de temperatura entre o início da série temporal e cerca das 14h30, que ocorre em simultâneo com uma aproximação à costa. No dia 24/08 antes do meio-dia, nota-se um padrão linear na SST, sem as flutuações que habitualmente a caracterizam. A forma deste gráfico deve-se ao facto do termosalinómetro possuir uma bomba que necessita de ser acionada manualmente. Se este procedimento não for feito, a medição da SST *in situ* não é atualizada. Duzentos e sete

²⁵ Wickham H (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. ISBN 978-3-319-24277-4, <https://ggplot2.tidyverse.org>

registos da noite de 23-24 de Agosto, que não eram válidos, não foram utilizados. Nas quatro noites seguintes existem também vários registos que não foram utilizados por falta de informação relativa à posição do navio. Consequentemente, a maioria das medições válidas desta campanha correspondem ao período diurno.

3.1.2. *Dados in situ da campanha do Inverno de 2019 (25 de Janeiro a 25 de Fevereiro)*

Na Figura 3.2 apresenta-se a série temporal das SST *in situ* da campanha do Inverno de 2019. Nota-se a existência de quatro períodos de duração superior a 1 dia com dados em falta. A SST tem uma tendência decrescente ao longo do período de 1 mês, explicada pelo facto de o navio se estar a deslocar para norte. Acresce que as SST mínimas anuais ocorrem habitualmente no hemisfério Norte entre o final de Fevereiro e o início de Março (Talley *et al*, 2011). Entre o início da campanha e o dia 04/02 (inclusive) as medições foram realizadas na costa Sul, tendo os transectos sido feitos em latitude; no restante da campanha, o navio percorreu a costa Oeste e os transectos foram realizados em longitude. Na costa Sul verifica-se, de modo geral, um aumento da SST *in situ* com a distância à costa. Em certos pontos da costa Oeste também se observam SST um pouco mais baixas perto da costa, em particular para a região entre os cabos Carvoeiro e Espichel (Figura 2.2), embora na costa Sul o gradiente de temperatura costa-largo seja mais intenso.

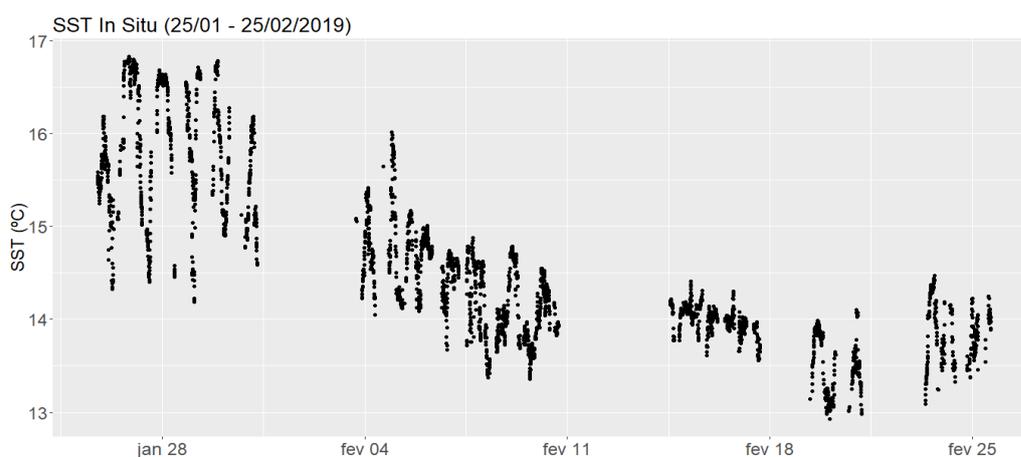


Figura 3.2: Evolução diária da SST *in situ* para o período da campanha do Inverno 2019.
Figura 3.2: Daily evolution of the *in situ* SST during the Winter/2019 oceanographic survey.

3.1.3. *Dados de SST de satélite e dados de distância à costa*

Extraíram-se os dados de satélite dos ficheiros NetCDF. No caso do produto MUR SST usaram-se as funções *open.nc*, *var.get.nc* e *att.get.nc* do módulo **RNetCDF**. Para os outros produtos de SST e os dados de distância à costa recorreu-se às funções *nc_open* e *ncvar_get* do módulo **ncdf4**. As datas/horas das imagens foram convertidas para formato POSIXct (usado no R para datas e horas) usando a função *convertDateNcdf2R* do módulo **ncdf.tools**.

Na Figura 3.3 apresentam-se como exemplo imagens do produto MUR, referentes às 09:00 UTC de 24 de Agosto de 2017 (campanha do Verão) e às 09:00 UTC de 25 de Janeiro de 2019 (campanha do Inverno). Outros exemplos de imagens de satélite, referentes aos diferentes produtos e a ambas as campanhas, estão disponíveis nos anexos 1 a 3.

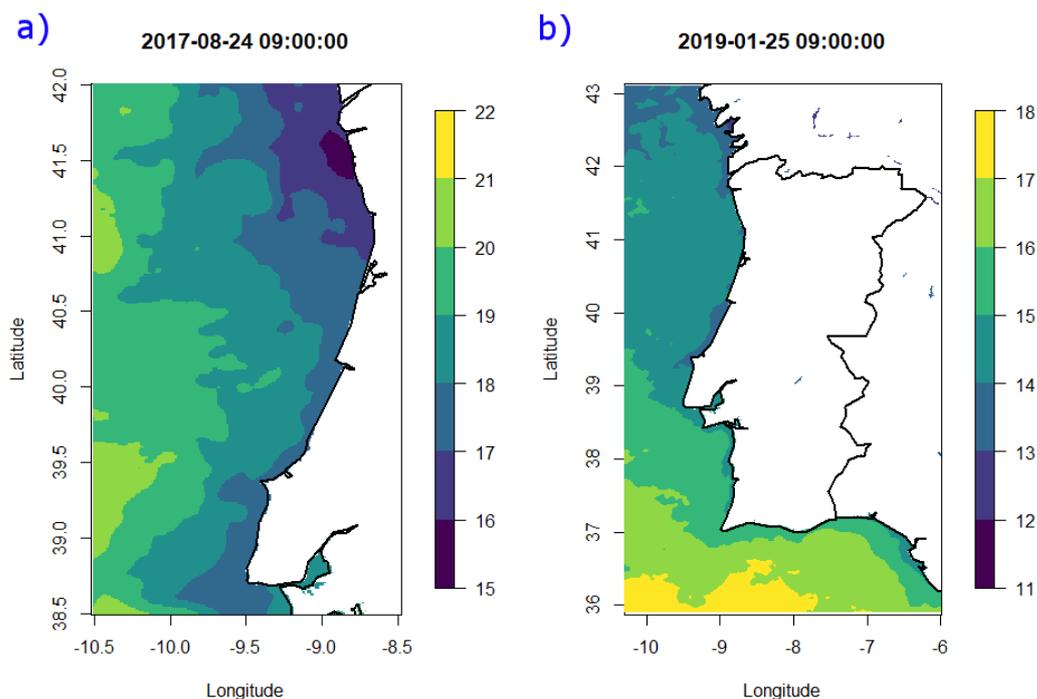


Figura 3.3: SST de satélite do produto MUR para: (a) a região da campanha do Verão de 2017 (24/08/2017, 09h00 UTC), (b) a região da campanha do Inverno de 2019 (25/01/2019, 09h00 UTC). Note-se a diferença nas escalas dos mapas e da SST.

Figure 3.3: Satellite SST values (MUR product) for: (a) the region covered by the Summer/2017 survey (24/08/2017, 09h00 UTC), (b) the region covered by the Winter/2019 survey (25/01/2019, 09h00 UTC). Notice the difference between the maps' scales.

Durante a campanha do Verão/2017 observou-se, tanto na imagem de satélite (Figura 3.3 a) como nos dados *in situ*, um gradiente de temperatura este-oeste, com SST mais baixas perto da costa. É visível a assinatura do *upwelling* costeiro em todas as imagens de satélite do período da 1ª campanha. Durante este período, a SST de satélite foi geralmente mais elevada entre 26/08 e 30/08, em relação aos dias restantes (ver anexo 3). No Inverno (Figura 3.3 b), em contraste, o gradiente de temperatura norte-sul domina sobre o gradiente este-oeste. Essa tendência é coerente com a que é observada nos dados *in situ* da 2ª campanha, em que o gradiente de temperatura costa-largo foi mais intenso na costa Sul em relação à costa Oeste.

A partir dos dados de distância à costa e batimetria (Figura 3.4) identificaram-se os pixéis (na grelha destes dados) mais próximos dos locais das medições *in situ* de ambas as campanhas, e obtiveram-se as distâncias à costa e profundidades máximas nestes locais. Na Figura 3.5 visualiza-se a profundidade em função da distância à costa, para ambas as campanhas. A grande maioria das medições foram realizadas na plataforma continental. Na campanha do Inverno/2019 (Figura 3.5 b), existiram mais registos medidos nos limites da plataforma continental ou mesmo na vertente em relação ao Verão/2017 (Figura 3.5 a).

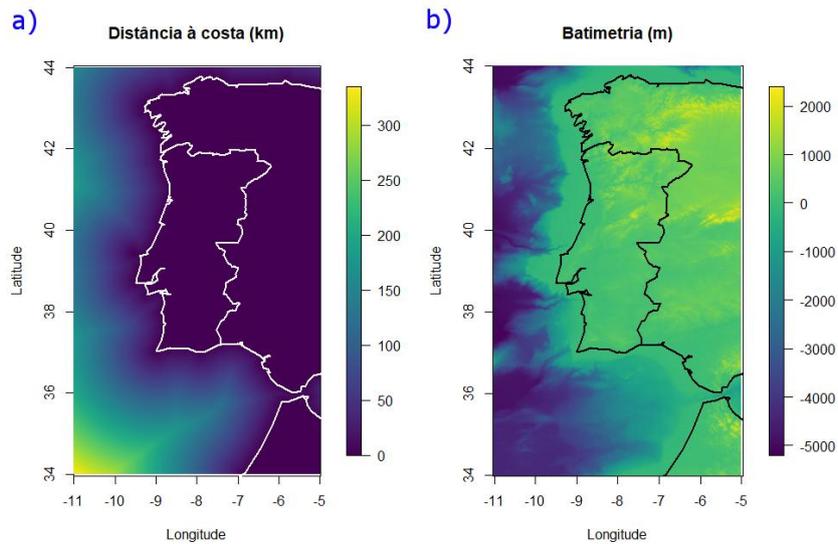


Figura 3.4: Mapas de distância à costa (em km) e batimetria/topografia (em m) na região de estudo.
 Figure 3.4: Distance to the coast (in km) and bathymetry/topography (in m) for the studied region.

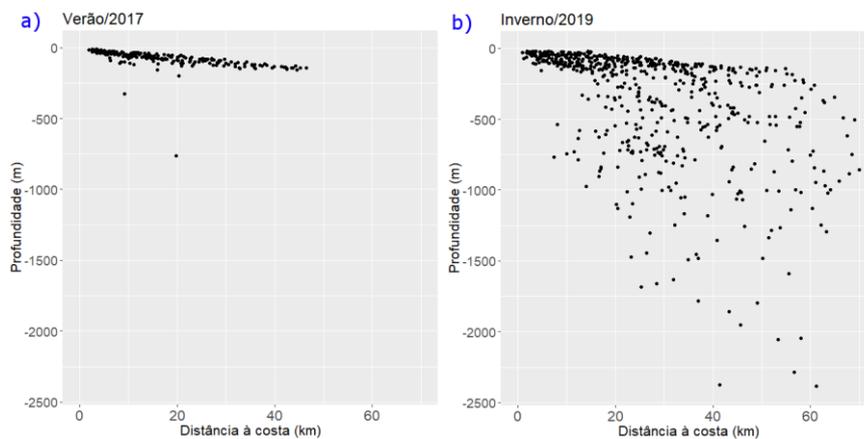


Figura 3.5: Profundidade máxima do local em função da distância à costa, nos pixels mais próximos das posições *in situ* (latitude/longitude), para as campanhas: (a) Verão/2017, (b) Inverno/2019.
 Figure 3.5: Maximum depth as a function of distance to the coast, at the nearest pixel to the *in situ* position (latitude/longitude), for the two surveys: (a) Summer 2017; (b) Winter 2019.

3.2. Comparação entre dados *in situ* e dados de satélite

Uma primeira dificuldade na comparação entre SST *in situ* e SST de satélite resulta do facto de, em geral, não existir correspondência temporal exata entre ambos os conjuntos de dados. O número de imagens de satélite por dia é limitado (1 por produto). De modo a aproveitar os dados disponíveis o melhor possível, devem-se estabelecer critérios de correspondência no tempo e espaço para as comparações que é aceitável realizar.

Para estabelecer um critério, estimou-se o tempo que o navio necessitava para percorrer uma distância aproximada ao comprimento de um pixel numa imagem de satélite. Usou-se a velocidade típica de cruzeiro nas campanhas, de cerca de 10 nós. Um nó equivale a 1 milha náutica por hora (=60 min), logo à velocidade de ≈ 10 nós é percorrida uma milha náutica em ≈ 6 minutos. A maioria dos produtos utilizados neste estudo têm grelhas com pixels de comprimento $1/25^\circ$ a $1/20^\circ$. Se se considerar que a distância equivalente a um grau é a de 1°

de latitude ≈ 111.111 km, isto resulta num tempo de cerca de 15-20 min. para percorrer o pixel, se a velocidade do navio for constante a 10 nós. Supondo uma velocidade ligeiramente inferior, de 8 nós, o pixel seria percorrido em cerca de 18 a 23 min. Todas as medições *in situ* num intervalo de tempo com aproximadamente essa duração devem estar próximas do mesmo pixel, e portanto têm a mesma SST de satélite. Assim, calcularam-se as medianas da SST, latitude e longitude dos dados *in situ*, em intervalos de 30 minutos. Este procedimento teve como objectivo evitar repetição espaço-temporal dos valores da SST utilizados para as comparações.

Para o cálculo das medianas criou-se uma rotina de código em R que aceita os registos *in situ* como input, e coloca-os em intervalos (abertos à esquerda) com uma duração fixa, escolhida pelo utilizador. A rotina permite também calcular, para cada intervalo, a mediana de uma variável *in situ* escolhida pelo utilizador, associando-lhe uma data que é a data central do intervalo. As datas centrais são calculadas tomando a data/hora do primeiro e último registos; a partir delas, cria-se uma sequência de datas, tendo em conta a duração dos intervalos. O *output* da rotina é uma tabela de 3 colunas com as datas centrais, as medianas da variável escolhida e o número de observações em cada intervalo.

Foi desenvolvida outra rotina que, introduzindo como *inputs* os registos *in situ* medianos e os dados de satélite de um produto, procura para cada registo o pixel mais próximo da posição *in situ* e a imagem de satélite mais próxima no tempo. Assim, retiraram-se os pixels e as SST de satélite associadas aos registos *in situ* para todos os produtos disponíveis. Nos produtos disponíveis no site do *Copernicus* as imagens (ficheiros .nc) de todos os dias foram descarregadas em conjunto e as SST foram extraídas para um *array* 3D com dimensões latitude, longitude e tempo. Para estes produtos a rotina calcula as diferenças entre a longitude de um registo e o vetor das longitudes da grelha do satélite (uma das dimensões do *array*). A função *which.min* do R devolve o índice que corresponde à longitude mais próxima da longitude *in situ* (diferença mínima). A rotina encontra, da mesma forma, os índices da latitude e da data mais próximas do registo, visto que as outras duas dimensões do *array* 3D correspondem às latitudes da grelha do satélite e às datas/horas das imagens descarregadas. Encontrados os três índices no *array*, é possível extrair a SST de satélite para esse registo. O código desta rotina teve de ser ligeiramente alterado para o produto MUR SST, porque os seus dados estavam organizados de forma diferente dos outros produtos. Para o MUR, as imagens de cada dia foram descarregadas em separado e os dados tiveram de ser colocados numa tabela (*data frame* em R) que contém, em diferentes colunas, as latitudes e longitudes da grelha do produto, e os valores da SST em cada pixel para os diferentes dias. Criou-se ainda um vetor auxiliar para a rotina identificar a data mais próxima de cada registo *in situ*.

Guardaram-se em tabelas de correspondência as SST de satélite, as posições dos pixels e as distâncias à costa. Calcularam-se as anomalias para todos os produtos, definidas como a diferença entre a SST de satélite (SST_{sat}) e a SST *in situ* (SST_{insitu}). Visualizaram-se os diagramas de dispersão das SST_{sat} de cada produto contra as SST_{insitu} e ajustou-se-lhes um modelo linear simples e uma curva de regressão local.

Finalmente, utilizaram-se as funções *st_as_sf* do módulo **sf** e *mapview* do módulo **mapview** de modo a visualizar no mapa algumas anomalias particularmente altas, obtidas na campanha do Verão/2017. A figura resultante é apresentada no Anexo 8.

4. Resultados

4.1. Campanha Verão/2017

Apresentam-se na Figura 4.1 as anomalias na SST de satélite em função da SST *in situ* para os 5 produtos analisados. As medições da posição (latitude/longitude) não estavam disponíveis para 117 registos da SST *in situ*, impossibilitando deste modo a sua comparação com as SST de satélite. As comparações foram possíveis para 260 pares de SST_{insitu}/SST_{sat}. Além disso, para o produto *Med HR* (Figura 4.1 b) não foi possível obter as SST_{sat} correspondentes a 9 registos *in situ*, dado que os pixéis mais próximos das suas posições estavam em locais não resolvidos pela grelha do satélite.

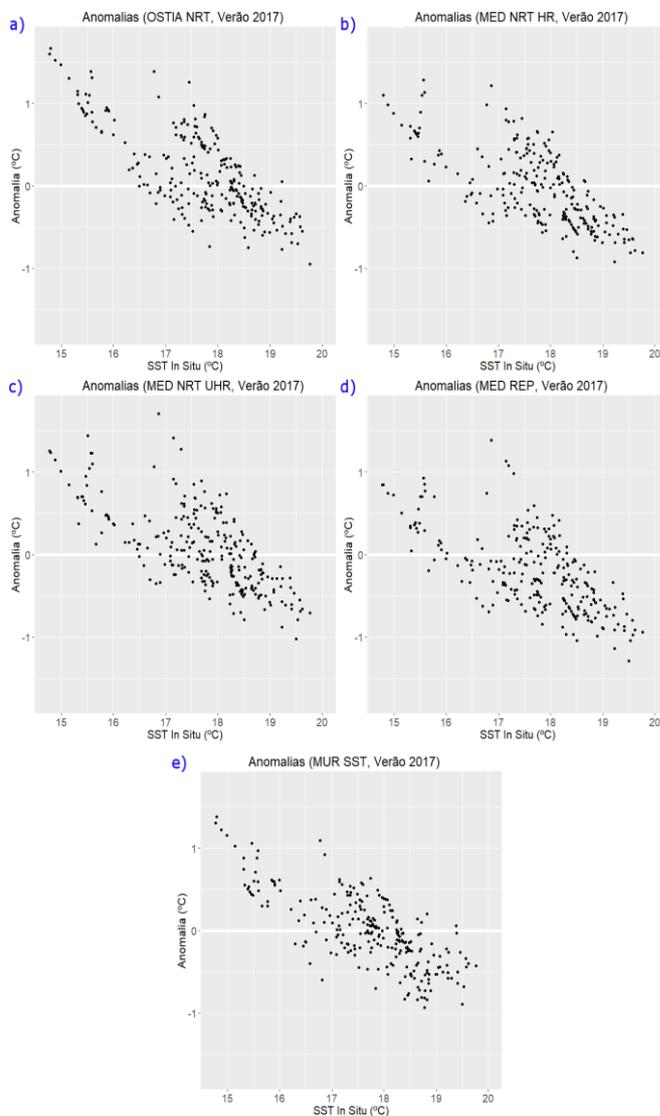


Figura 4.1: Anomalias (SST sat. - SST *in situ*) para os 5 produtos, em função da SST *in situ* (campanha Verão/2017).
Figure 4.1: Anomalies (SST sat. - SST *in situ*) for all 5 products, plotted as a function of *in situ* SST (Summer/2017 survey). Produtos/Products: (a) OSTIA; (b) Med HR; (c) Med UHR; (d) Med REP; (e) MUR.

As anomalias nos valores de SST de satélite variaram entre -1.02°C e $+1.71^{\circ}\text{C}$. Observa-se uma tendência decrescente com a SST nas anomalias para todos os produtos, especialmente marcada no caso do produto *OSTIA* (Figura 4.1 a). O resultado indica que, para esta campanha, as SST_{sat} sobrestimaram as SST *in situ* mais baixas e subestimaram as mais elevadas, de modo geral. O produto *Med REP* (Figura 4.1 d) tem uma menor sobrestimação das SST baixas, mas uma maior subestimação das SST altas. Comparando as suas anomalias com as do produto *Med UHR* (Figura 4.1 c), verifica-se que, de modo geral, as SST de satélite parecem ter diminuído com o reprocessamento.

Criou-se um indicador simples para melhor quantificar as diferenças nas anomalias entre os diferentes produtos. Calculou-se a soma algébrica das anomalias e a soma das anomalias em valor absoluto (Tabela 4.1):

Tabela 4.1: Soma algébrica das anomalias e soma em valor absoluto para a campanha do Verão/2017.

Table 4.1: Algebraic sum and absolute-value sum of the anomalies, for the Summer/2017 oceanographic survey.

Produto	Σ Anomalias	Σ abs(Anomalias)
OSTIA NRT	35.45	105.33
Med NRT HR	-8.64	96.41
Med NRT UHR	18.14	100.20
Med REP	-56.64	115.50
MUR SST	-2.21	89.29

Os valores das somas para os produtos *Mediterranean Sea* são coerentes com o resultado anterior de que as SST de satélite parecem ter diminuído com o reprocessamento. De facto, as SST do produto *Med REP* subestimam de modo geral os valores *in situ*. As somas para os produtos *Med* têm de ser comparadas com cuidado. Recorde-se que houve 9 pontos com valores em falta do produto *Med HR*, o que pode explicar o facto de este produto ter a menor soma absoluta das anomalias entre os 3 produtos *Med*, apesar de ter menor resolução relativamente ao produto *Med UHR*. De acordo com este indicador o produto *OSTIA* tem, de modo geral, as anomalias mais positivas. O produto *MUR SST* tem tanto a menor soma absoluta das anomalias, como a soma algébrica mais próxima de zero.

Tendo em conta o padrão detectado nas anomalias, procurou-se melhor compreender as suas causas. Na Figura 4.2 apresenta-se o diagrama de dispersão SST_{sat} vs. SST_{insitu} , a recta bissectriz ($y = x$) e a curva de regressão local (*loess* com $span=0.65$) para cada um dos cinco produtos.

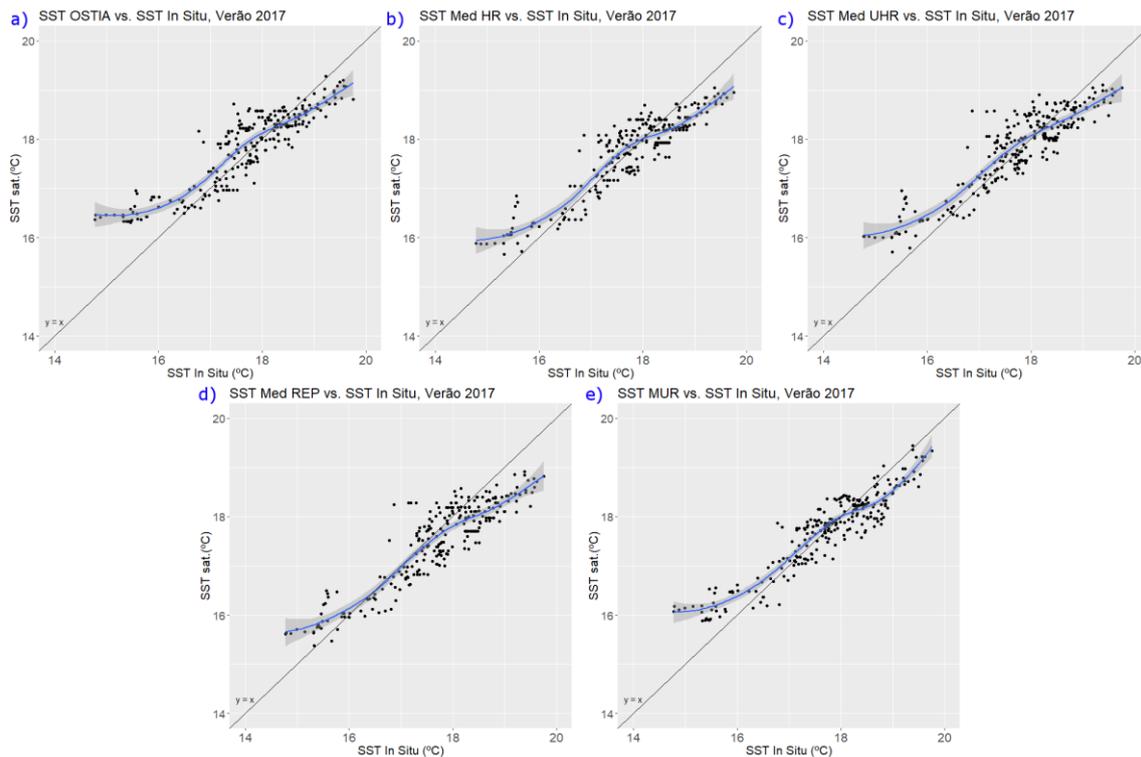


Figura 4.2: Dados SST de satélite dos cinco produtos em função da SST *in situ* para a campanha do Verão/2017. A linha a preto representa a recta bissectriz e a linha a azul a curva de regressão local (com intervalo de confiança 95% indicados pelas áreas a cinzento).

Figure 4.2: Satellite SST for the five products, as a function of *in situ* SST, for the Summer/2017 survey. The black line is the $y=x$ line and the blue line is the local regression (loess) curve (with 95% confidence intervals in grey.)

Produtos/Products: (a) OSTIA, (b) Med HR, (c) Med UHR, (d) Med REP, (e) MUR.

Idealmente, os pontos deveriam estar distribuídos de forma linear e a recta ajustada deveria coincidir com a bissectriz. Não é isto que se verificou, apresentando a nuvem de pontos evidentes curvaturas, sobretudo para SST *in situ* inferiores a 17°C (Figura 4.2). Verificou-se uma sobrestimação das SST baixas nos cinco produtos analisados, embora mais evidente no produto OSTIA (Figura 4.2). De qualquer modo, ajustou-se um modelo linear simples (da forma $y = \alpha x + \beta$), no qual a variável dependente (y) foi tomada como sendo a SST de cada produto de satélite, e a variável independente (x) a SST *in situ*. A Tabela 4.2 apresenta os resultados das regressões lineares para os 5 produtos; na Figura 4.3 visualiza-se a recta de regressão para o produto OSTIA. No anexo 4 encontram-se as figuras relativas aos restantes produtos e no anexo 5 os gráficos dos resíduos do ajuste do modelo linear.

Tabela 4.2: Resultados das regressões lineares simples entre as SST de satélite (y) e as SST in situ (x) da campanha Agosto/2017. R.S.E = erro padrão residual.

Table 4.2: Results of the simple linear regressions between the satellite SSTs (y) and the in situ SSTs (x), for the Summer/2017 survey. R.S.E = residual standard error.

Produto	Nº pts.	R ²	R.S.E	Declive	Erro padrão do declive	Ordenada origem	Erro padrão da ordenada orig.
OSTIA NRT	260	0.81	0.33	0.639	0.019	6.542	0.339
Med NRT HR	251	0.83	0.33	0.692	0.020	5.443	0.352
Med NRT UHR	260	0.82	0.35	0.687	0.020	5.612	0.358
Med REP	260	0.81	0.37	0.707	0.021	4.977	0.376
MUR SST	260	0.87	0.29	0.697	0.017	5.361	0.299

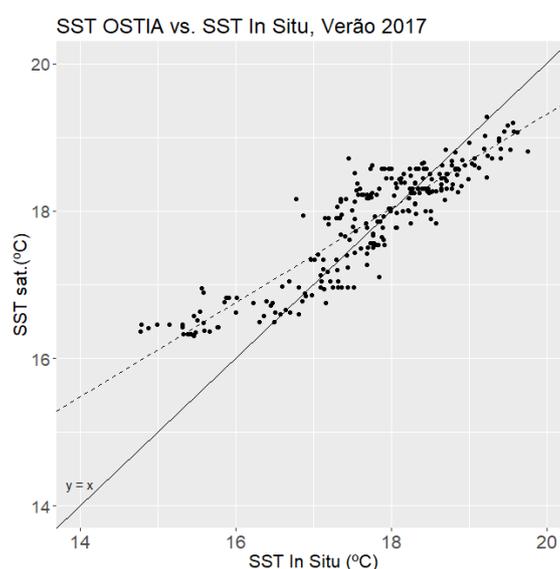


Figura 4.3: Regressão linear simples das SST do produto OSTIA sobre as SST in situ, para a campanha do Verão de 2017. A linha a tracejado representa a recta de regressão e a linha contínua é a bissetriz $y = x$.

Figure 4.3: Simple linear regression of OSTIA SSTs on in situ SSTs, for the Summer/2017 survey. The dashed line is the regression line, and the solid line is the $y = x$ line.

A sobrestimação das SST baixas faz com que os declives das rectas de regressão sejam inferiores a 1 (Tabela 4.2), apresentando um desvio significativo em relação ao declive da bissetriz. Analisou-se se o tempo era um factor de influência nas anomalias. Para cada produto foi calculada a diferença temporal (em valor absoluto) entre as datas/horas da SST *in situ* e da SST_{sat}. A diferença máxima possível entre ambas as medições num mesmo ponto é de 12 h. Primeiro, retiveram-se apenas os registos com uma diferença máxima de 6 h entre medições (“filtro de 6 h”), e em seguida, aplicou-se um filtro equivalente de 3 h. Na Figura 4.4 apresentam-se as correspondências filtradas entre as SST_{sat} (OSTIA) e SST *in situ*.

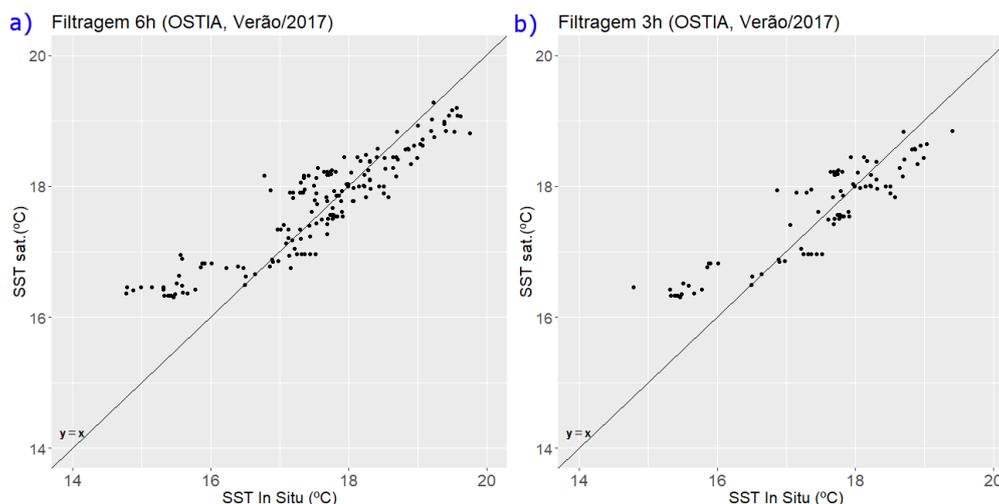


Figura 4.4: Nuvens de pontos das correspondências entre a SST do produto OSTIA e a SST *in situ* (Verão/2017), com uma diferença temporal máxima de (a) 6 horas; (b) 3 horas. A bissetriz $y=x$ é assinalada no gráfico.
 Figure 4.4: Scatterplots of the match-ups between the satellite SSTs of the OSTIA product and the *in situ* SSTs, for the Summer/2017 survey, with a maximum time difference of: (a) 6 hours; (b) 3 hours. The $y=x$ line is plotted.

No produto OSTIA, a maioria dos pontos com grandes anomalias (os mais distantes da bissetriz $y = x$) não foram filtrados. O produto MUR originou um resultado semelhante com ambos os filtros. Nos produtos *Mediterranean Sea* restaram poucas correspondências depois da aplicação dos filtros (92 pontos para o filtro de 6h e 37 pontos para o filtro de 3h), o que se deveu ao facto de estas imagens estarem referenciadas às 0h, enquanto que a maioria das medições *in situ* válidas na campanha do Verão/2017 são diurnas. Em qualquer dos casos, a qualidade dos ajustamentos lineares não melhorou com as filtrações (ver anexos 6 e 7).

Utilizou-se também a diferença temporal em valor absoluto para categorizar os registos em intervalos (abertos à esquerda): 0-3 h, 3-6 h, 6-9 h e 9-12 h.

No produto OSTIA (Figura 4.5 a) cujas imagens estão referenciadas ao meio-dia, existe uma maior gama de anomalias para os registos com diferenças temporais < 6 h, isto é, para medições *in situ* entre as 6 h-18 h. Para os produtos *Med HR* e *Med UHR* (Figura 4.5 b, c), referenciados à meia-noite, as anomalias são em geral menores para os pontos mais próximos das 0 h, que correspondem a medições *in situ* entre as 21 h-3 h. No produto *Med REP* (Figura 4.5 d), a gama de anomalias para os registos noturnos também é menor, embora as SST *in situ* estejam subestimadas na maior parte dos casos. Para o produto *MUR* (Figura 4.5 e), referenciado às 9 h, as SST das correspondências com menos de 3 h de intervalo (medições *in situ* entre as 6 h-12 h) estão em geral sobrestimadas, e acontece o contrário na categoria das maiores diferenças temporais (medições *in situ* entre as 18 h-00 h). De modo geral, parece haver uma tendência para as SST serem sobrestimadas e as anomalias terem maior variabilidade durante o período diurno.

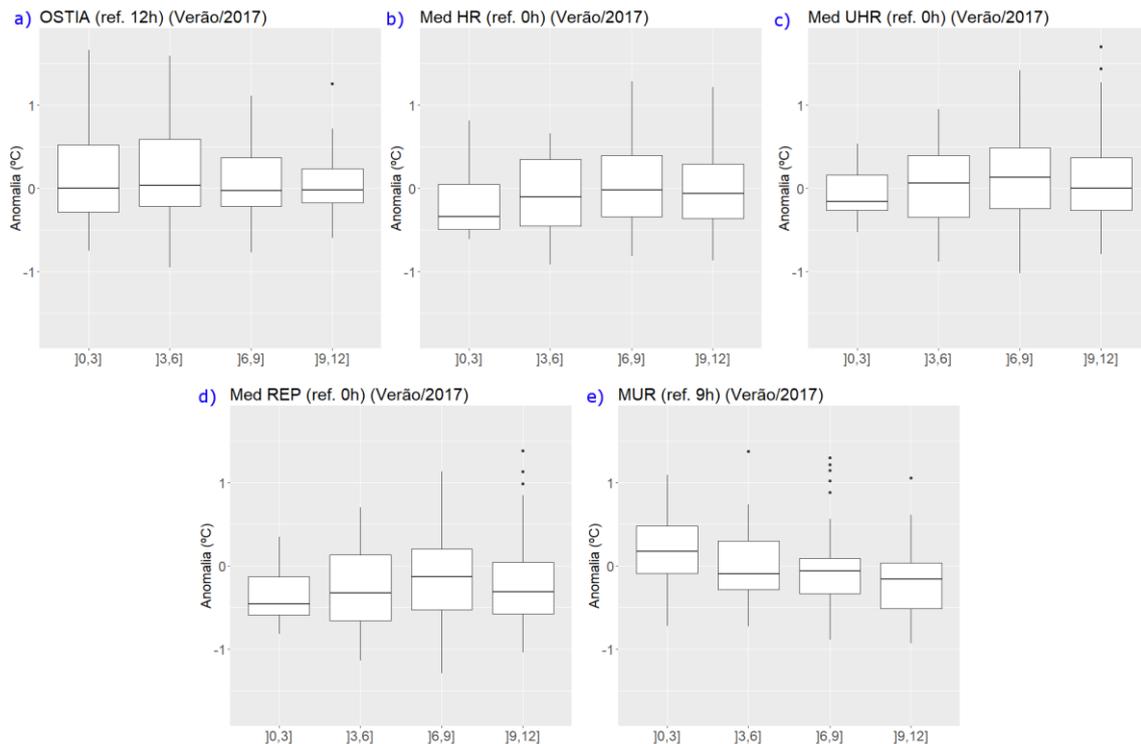


Figura 4.5: Caixa-com-bigodes das anomalias ($SST_{sat.} - SST_{in\ situ}$) dos 5 produtos, para a campanha do Verão/2017, categorizados pela diferença temporal (em valor absoluto) entre a hora da medição *in situ* e a hora de referência da imagem de onde foi extraída a SST de satélite correspondente.

Figure 4.5: Boxplots of the anomalies ($SST_{sat.} - SST_{in\ situ}$) of the 5 products, for the Summer/2017 survey, categorized by absolute difference between the *in situ* SST's time of measurement and the reference time of the corresponding satellite SST, in hours. Produtos/Products: (a) OSTIA, (b) Med HR, (c) Med UHR, (d) Med REP, (e) MUR.

Tentou ainda adicionar-se a diferença temporal em valor absoluto como variável explicativa na regressão linear entre SST de satélite e $SST_{in\ situ}$ realizada com todos os pontos. Os ganhos em relação à regressão linear simples não foram significativos para os três produtos *Mediterranean Sea*. Para os produtos OSTIA e MUR, apesar da variável ser considerada significativa de acordo com o teste do p -value, as diferenças em relação ao modelo simples foram marginais, com ganhos no coeficiente de correlação inferiores a 1%.

Procuraram-se outras relações explicativas para as anomalias observadas para os produtos de SST de satélite relativamente às observações *in situ*. Analisaram-se estas anomalias em função da localização das observações - distância à costa (Figura 4.6).

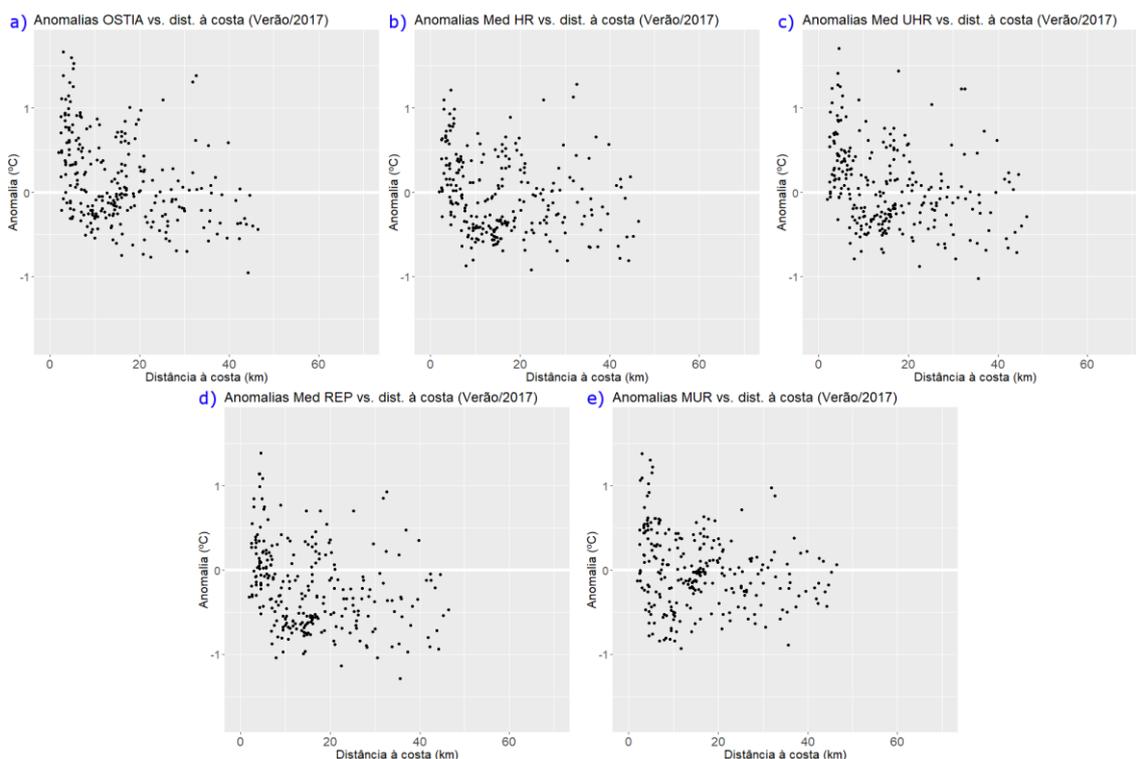


Figura 4.6: Anomalias (SST sat. – SST *in situ*) dos 5 produtos em função da distância à costa na campanha Verão/2017.

Figure 4.6: Anomalies (SST sat. – SST *in situ*) for all 5 products, as a function of distance to the coast, for the Summer/2017 survey. Produtos/Products: (a) OSTIA, (b) Med HR, (c) Med UHR, (d) Med REP, (e) MUR.

As anomalias mais altas estão associadas a registos mais próximos da costa, sendo esta relação mais expressiva no caso do produto *OSTIA* (Figura 4.6 a). Tal facto pode ser explicado por os processos oceanográficos nas regiões costeiras terem escalas espaço-temporais menores (LeTraon, 2018)²⁶, sendo portanto mais difíceis de resolver com precisão pelos satélites. No entanto é também necessário ter em conta que esta aparente tendência pode ser apenas um reflexo da tendência observada anteriormente para a sobrestimação de pontos com SST baixas (Figs. 4.1 e 4.2), juntamente com o facto de no Verão as SST *in situ* mais baixas localizarem-se, em geral, perto da costa devido ao *upwelling* costeiro.

Apresenta-se no anexo 8 um exemplo do mapeamento das anomalias para o produto *OSTIA*. Ao largo de Viana do Castelo, as anomalias nos locais assinalados a vermelho foram grandes e positivas (> 0.8 °C). Para os restantes produtos o resultado neste local foi sempre semelhante; para o produto Med HR, no entanto, não se conseguiu obter a SST_{sat} em alguns destes locais. Noutras zonas também se observaram anomalias consistentemente altas (próximas da costa, em geral < 15 km), como num ponto perto do Cabo Carvoeiro e numa pequena área a ≈ 20 km a sul-sudoeste de Aveiro.

Visualizaram-se ainda as anomalias em função da hora (0-23) do registo *in situ* correspondente e da distância à costa (Figura 4.7). Observam-se vários pontos a < 10 km de distância da costa com medições *in situ* realizadas no período da manhã (7 h - 10 h), bem como alguns pontos

²⁶ Disponível para leitura em <http://fsu.digital.flvc.org/islandora/object/fsu%3A602138> (site da biblioteca da Florida State University, EUA).

mais afastados da costa (distância > 30 km) medidos durante a tarde (15h – 16h). Anteriormente notou-se que os pontos mais próximos da costa têm tendência a ter anomalias maiores e mais positivas. As anomalias que se parecem desviar do “padrão” diurno na Figura 4.7 (entre as 13h – 21h, com valores > 1°C), correspondem a locais mais próximos da costa. No anexo 9 apresentam-se os gráficos para os outros produtos analisados.

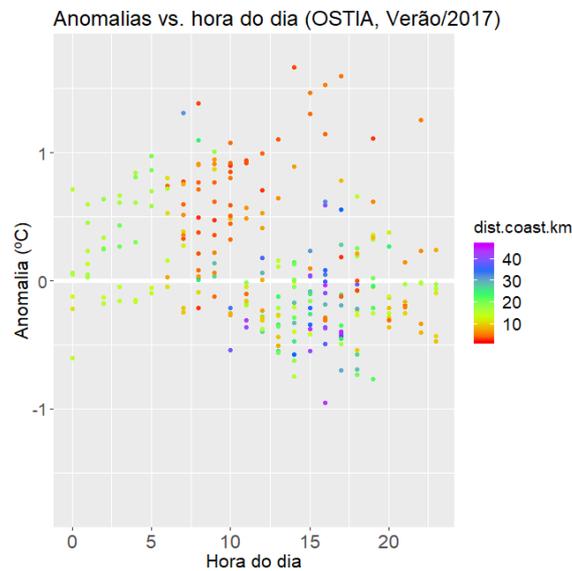


Figura 4.7: Gráficos das anomalias em função da hora (0-23) dos registos (Verão/2017) e distância à costa, para o produto OSTIA.

Figure 4.7: Plots of the OSTIA anomalies as a function of the time of day (0-23 hours) of the in situ measurements (Summer/2017 survey) and distance to the coast.

4.2. Campanha Inverno/2019

Na Figura 4.8 apresentam-se as anomalias em função das SST *in situ* da campanha do Inverno de 2019. Em contraste com a primeira campanha (ver Figura 4.1), não se verificam tendências sistemáticas de sobre- ou subestimação das SST pelos produtos de satélite. As magnitudes das anomalias são geralmente menores nesta campanha, muito raramente ultrapassando 1°C em valor absoluto. O intervalo de variação das anomalias, com valores entre -0.94°C e +1.29°C, é também menor que na campanha do Verão/2017. Se forem apenas selecionados os pontos correspondentes à área geográfica coberta pela campanha de Verão, as anomalias têm uma variação menor, entre -0.80°C e +0.43°C.

Repetiu-se ainda o cálculo das somas algébrica e em valor absoluto das anomalias. Os resultados apresentam-se na Tabela 4.3.

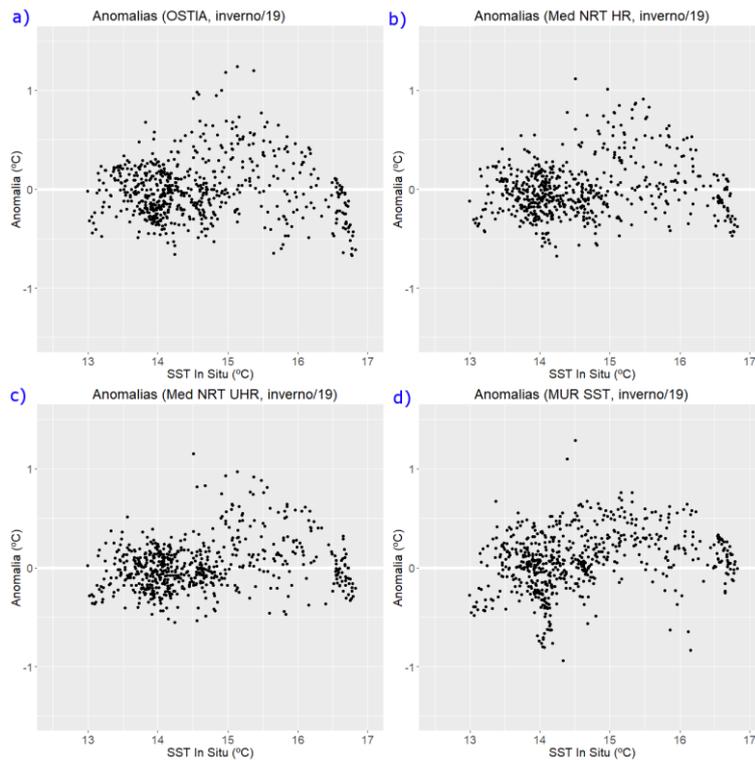


Figura 4.8: Anomalias (SST sat. - SST in situ) para os 4 produtos analisados, em função da SST in situ (campanha Inverno/2019).

Figure 4.8: Anomalies (SST sat. - SST in situ) for the 4 analysed products, as a function of in situ SST (Winter/2019 survey).

Produtos/Products: (a) OSTIA; (b) Med HR; (c) Med UHR; (d) MUR

Tabela 4.3: Soma algébrica das anomalias e soma em valor absoluto para a campanha do Inverno/2019.

Table 4.3: Algebraic sum and absolute-value sum of the anomalies, for the Winter/2019 oceanographic survey.

Produto	Σ Anomalias	Σ abs(Anomalias)
OSTIA NRT	-4.27	144.03
Med NRT HR	-8.04	127.24
Med NRT UHR	11.56	116.69
MUR SST	46.54	150.74

Os valores das somas não são comparáveis aos obtidos na campanha de Verão, dadas as diferenças entre as duas campanhas no número de pontos e na área geográfica coberta. Note-se ainda que existiram 11 pontos com valores da SST de satélite em falta para o produto *Med HR*. As somas absolutas das anomalias são relativamente semelhantes entre os produtos, tal como na campanha do Verão/2017. No entanto, no Inverno/2019, o produto *MUR* teve a maior soma absoluta das anomalias e também a soma algébrica mais distante de zero. Vale ainda a pena realçar que, tanto a anomalia máxima (+1.29°C) como mínima (-0.94°C) observadas nesta campanha referem-se ao produto *MUR*.

Tal como anteriormente, visualizou-se com a função *geom_smooth* se seria apropriado ajustar aos pontos uma regressão linear simples. As SST_{sat} de todos os produtos, quando visualizadas em função da SST *in situ*, têm gráficos de pontos com um padrão semelhante ao da Figura 4.9 a). Em relação à campanha de Verão, a nuvem de pontos tem uma curvatura menos evidente,

bem como uma dispersão menor em torno da bissetriz. A Figura 4.9 mostra todos os pontos da campanha do Inverno/2019, mas esta observação mantém-se mesmo se forem seleccionados apenas os pontos contidos na área geográfica da campanha do Verão/2017.

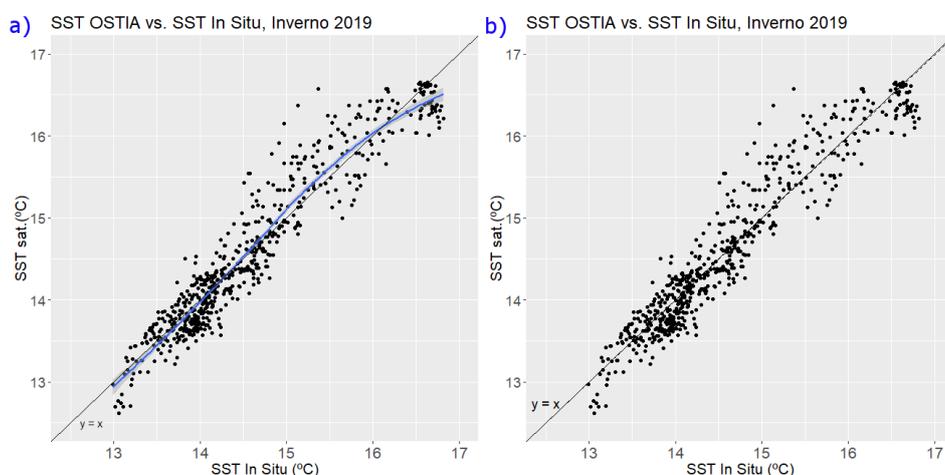


Figura 4.9: SST do produto OSTIA (eixo vertical) contra as SST in situ (eixo horizontal) da campanha do Inverno/2019, com: (a) a aplicação de `geom_smooth()` com o parâmetro “span” = 1 (curva azul); (b) recta de regressão linear (a tracejado).

Figure 4.9: OSTIA SSTs (vertical axis) plotted against the in situ SSTs of the Winter/2019 survey (horizontal axis), with: (a) `geom_smooth()` function with “span” = 1 (blue curve); (b) linear regression (dashed line).

Com base neste resultado, repetiu-se o ajustamento linear simples realizado na secção anterior, agora para a campanha de Inverno. Nele foram incluídos todos os pontos, independentemente da área geográfica. Um resumo dos resultados apresenta-se na Tabela 4.4. Na Figura 4.9 b), visualiza-se o ajustamento para o produto OSTIA, no qual a recta de regressão, a tracejado, está muito próxima da bissetriz (declive: $\alpha \approx 0.997$ e ordenada na origem: $\beta \approx 0.039$).

Tabela 4.4: Resultados das regressões lineares simples entre as SST de satélite (y) e as SST in situ (x) da campanha de Inverno/2019. R.S.E = erro padrão residual.

Table 4.4: Results of the simple linear regressions between the satellite SSTs (y) and the in situ SSTs (x) measured in the Winter/2019 survey. R.S.E = residual standard error.

Produto	Nº pts.	R ²	R.S.E	Declive	Erro padrão do declive	Ordenada origem	Erro padrão da ordenada orig.
OSTIA NRT	633	0.91	0.30	0.997	0.012	0.039	0.182
Med NRT HR	622	0.93	0.27	1.032	0.011	-0.477	0.168
Med NRT UHR	633	0.94	0.24	1.053	0.010	-0.758	0.150
MUR SST	633	0.93	0.29	1.085	0.012	-1.172	0.177

Os ajustamentos lineares às correspondências da campanha do Inverno/2019 obtiveram bons resultados, sendo o coeficiente de determinação (R²) superior a 0.90 para os quatro produtos analisados. As rectas de regressão foram sempre próximas da bissetriz (com declives ≈ 1 e ordenadas na origem ≈ 0), embora apenas para o produto OSTIA os parâmetros aproximaram de modo significativo estes valores. Quanto à distância à costa e a sua influência nestes

pontos, tendem a observar-se anomalias maiores em locais próximos da costa nos produtos *OSTIA* (Figura 4.10 a), *Med HR* e *Med UHR*, mas a relação entre ambas as variáveis é menos evidente em relação à campanha do Verão/2017 (Figura 4.10).

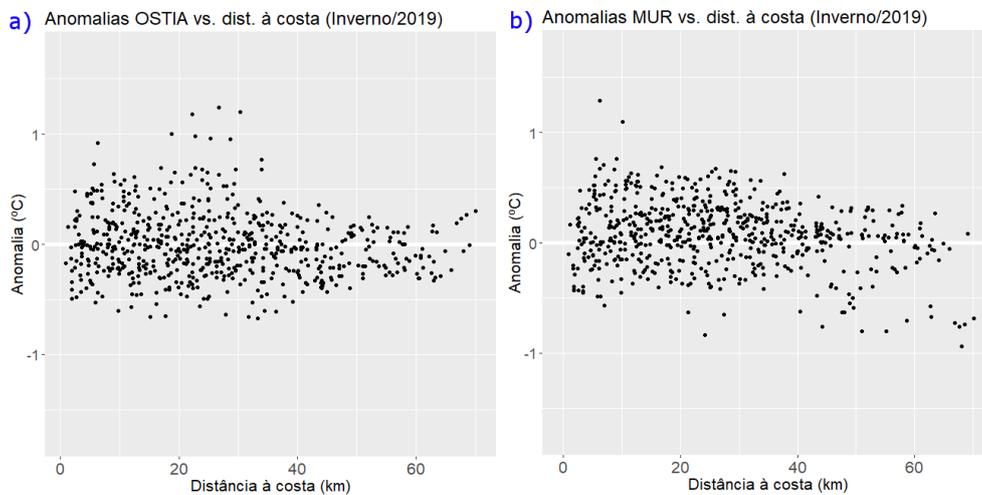


Figura 4.10: Anomalias da SST dos produtos: (a) *OSTIA* e (b) *MUR* em função da distância à costa (campanha Inverno/2019).

Figure 4.10: SST Anomalies of the (a) *OSTIA* and (b) *MUR* products, as a function of the distance to the coast (Winter/2019 survey).

De modo análogo à 1ª campanha, dividiram-se os pontos em categorias baseadas na diferença temporal absoluta entre as medições de satélite e *in situ*, e fizeram-se gráficos de caixa-com-bigodes das anomalias para cada produto (Figura 4.11). A variabilidade das anomalias é em geral baixa e parece estar, de modo geral, pouco relacionada com a diferença temporal entre medições.

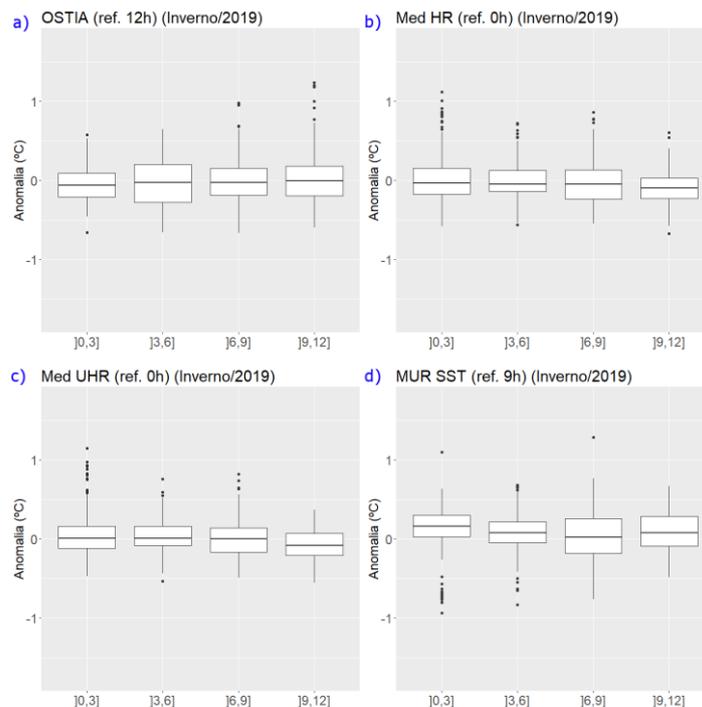


Figura 4.11: Caixa-com-bigodes das anomalias da campanha Inverno/2019, por diferença horária absoluta entre medições *in situ* e satélite, para os produtos analisados.

Figure 4.11 : Boxplots of Winter/2019 survey anomalies, by absolute time difference between in situ and satellite measurements (in hours), for the analysed products. Produtos/Products: a) OSTIA; b) Med HR; c) Med UHR; d) MUR.

Repetiu-se a análise realizada na 1ª campanha que relaciona as anomalias com a hora da medição *in situ*, e este exercício é apresentado na Figura 4.12:

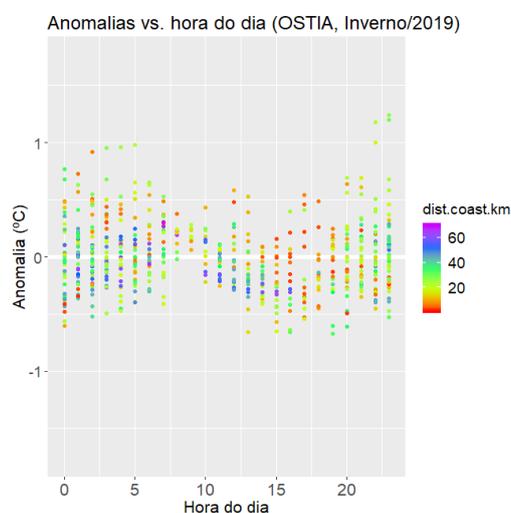


Figura 4.12: Gráficos das anomalias em função da hora (0-23) dos registos (Inverno/2019) e distância à costa, para o produto OSTIA.

Figure 4.12: Plot of the OSTIA anomalies as a function of the hour (0-23) of the in situ measurements (Winter/2019 survey) and distance to the coast.

Na Figura 4.12 (produto OSTIA), parece visualizar-se alguma variabilidade das anomalias com a hora do dia, que aparenta ter pouca relação com a distância à costa. Deve ter-se em conta que apenas a hora da medição *in situ* varia; a SST_{sat} de um dado dia é retirada de 1 ou 2 imagens e depende sobretudo do local da medição. Tendo isto em conta, a variabilidade diurna das anomalias poderá estar relacionada com um eventual ciclo diurno nas SSTs *in situ* ou com diferenças espaciais. De modo geral, o ciclo diurno da SST nas latitudes médias apresenta um mínimo durante o período da manhã e um máximo à tarde; no entanto a variabilidade diurna da SST tende a ser baixa no Inverno em relação ao Verão (Morak-Bozzo *et al*, 2016).

Para os restantes produtos (Anexo 12), parece haver maior dispersão nos valores das anomalias durante a noite. No produto MUR notam-se alguns pontos mais distantes da costa que se desviam da suposta “tendência diurna” observada, com anomalias negativas.

5. Discussão de resultados / Conclusão

Comparando os resultados de ambas as campanhas, conclui-se que os diferentes produtos tiveram, em geral, maiores desvios relativamente às SST *in situ* medidas na campanha do Verão/2017, entre -1.02°C e $+1.71^{\circ}\text{C}$. Em comparação, para a campanha de Inverno, as anomalias apresentaram valores entre -0.94°C e $+1.29^{\circ}\text{C}$, apesar do facto de esta campanha ter coberto uma área geográfica maior e mais diversa do ponto de vista oceanográfico. Este resultado pode ter várias explicações. Como descrito na subsecção 2.4, o que os satélites efectivamente medem são radiâncias, sendo estas posteriormente convertidas em SST. Este processo leva à existência de incertezas nas SST de satélite. Kennedy (2014) afirma que, como os sensores são sensíveis à radiação na superfície, a amplitude diurna das SST de satélite é

maior, em relação às medições *in situ* feitas a alguns metros de profundidade. O aquecimento diurno da superfície do oceano pode então ser uma fonte de erro, em particular no Verão quando a radiação incidente é maior.

Foram observadas anomalias maiores e positivas, da ordem de +1°C, nos pontos mais próximos da costa (10 km). Este facto pode dever-se à proximidade à costa, mas também a outros factores. A topografia influencia a hidrodinâmica das regiões costeiras Ibéricas (Aristegui *et al*, 2006). Nestas regiões existem vários processos que promovem uma grande variabilidade a escalas menores, incluindo filamentos de águas mais frias associados ao afloramento costeiro (*upwelling*), vórtices e correntes costeiras. As características topográficas da costa e a batimetria têm habitualmente um papel importante na formação destas estruturas (Mason *et al*, 2006). Os filamentos tendem a estar associados a regiões localizadas ao largo de cabos, no entanto a sua formação não pode ser explicada por um único mecanismo (Relvas *et al*, 2007). Como a região costeira é bastante mais complexa em termos de variabilidade espacial e temporal que o oceano aberto, alguns fenómenos podem não ser adequadamente resolvidos pelas imagens de satélite; além disto, as correções realizadas no processamento dos produtos podem não ter os efeitos desejados perto da costa (Smit *et al*, 2013). Thakur *et al* (2018) realçam que os dados de deteção remota de variáveis oceanográficas como a SST são geralmente satisfatórios para o oceano aberto e escalas espaço-temporais grandes (i.e. fenómenos regionais que se desenvolvem ao longo de semanas/meses). No entanto, segundo os mesmos autores, as resoluções espaciais dos produtos de SST (≥ 1 km por pixel) não têm suficiente precisão para resolver certas características das zonas costeiras.

É ainda de realçar que o método de interpolação do produto OSTIA foi alterado em Novembro de 2017, depois da realização da campanha de Verão. Não é possível determinar se tal teve influência no desempenho deste produto. No entanto, é pouco provável que tenha sido um fator de peso, dado as sobrestimações na primeira campanha terem sido observadas em todos os produtos.

Conclui-se que, para a campanha de Verão, o produto MUR foi o que melhor aproximou as SST *in situ* apresentando anomalias entre -0.93°C e +1.38°C, tendo o maior coeficiente de determinação ($R^2 = 0.87$) e o menor erro padrão residual (R.S.E ≈ 0.29) entre os 5 produtos analisados. No Inverno, os 4 produtos tiveram resultados satisfatórios e semelhantes entre si. De modo geral o produto MUR parece ter o desempenho mais consistente. Note-se no entanto que este produto, no Inverno, subestimou ligeiramente a SST em alguns locais. De qualquer modo, o seu resultado nessa campanha foi globalmente bom.

Dado que a SST obtida por satélite é amplamente usada nos estudos de variação climática (Baptista *et al.*, 2018) e um dos factores ambientais usados em estudos da variação da distribuição, abundância e ecologia dos recursos marinhos (Tanner *et al.*, 2019), o presente estudo evidencia a importância de realizar análises comparativas na costa portuguesa para outros anos, em particular na época de Verão em que se observaram maiores anomalias positivas. É também recomendado que no futuro se analisem os impactos dos métodos de interpolação usados nos produtos de nível 4, por exemplo comparando os seus resultados

simultaneamente com dados *in situ* e resultados de produtos de nível 3, para que de algum modo seja possível separar as componentes de observação e de interpolação.

Acresce o facto de os resultados aqui obtidos estarem em linha com os resultados de um estudo realizado por Oliveira *et al.* (2018) na região costeira do Algarve, em Lagos. Os autores analisaram a evolução da temperatura medida a 3 m de profundidade entre Junho/2014 e Outubro/2017, concluindo que os desvios entre a SST *in situ* e as SST de vários produtos foram sistematicamente baixos no Inverno; no entanto, estes desvios foram consideráveis no Verão, atingindo 2-3°C por períodos até 10 dias. Os autores concluíram que os produtos de satélite analisados no seu estudo não conseguiram resolver completamente a variação relacionada com flutuações rápidas da SST no tempo (da ordem de uma semana) causadas por fenómenos locais, nomeadamente correntes costeiras que transportam para a costa Sul águas frias cuja presença à superfície se deve ao *upwelling* costeiro observado na costa Oeste.

Os resultados obtidos no presente estudo mostram que a ocorrência de baixos valores da SST observada por Oliveira *et al.* na zona de Lagos durante o Verão, que não foi revelada nos produtos de nível 4 baseados em dados de satélite, também se observa na costa norte de Portugal Continental. As maiores anomalias observadas no Verão em relação ao Inverno podem dever-se à presença de arrefecimentos localizados da SST associados ao *upwelling* costeiro, um fenómeno sazonal associado ao Verão. Outro factor que possivelmente contribuiu para as diferenças observadas é a maior radiação incidente no Verão, que pode levar a uma sobrestimação sistemática das SST de satélite nessa época do ano; e ainda o facto de a maioria das medições na campanha do Verão/2017 terem sido diurnas.

Estes resultados mostram a importância de criar e manter um sistema de observação costeira para a monitorização e validação de produtos derivados de dados de satélite, assim como dos modelos numéricos que atualmente já produzem estimativas dos campos hidrológicos de forma operacional.

6. Agradecimentos

Aos investigadores do IPMA Paulo B. Oliveira e Manuela Azevedo pela proposta do tema de estágio e pela orientação e colaboração prestadas durante a realização do estudo. Aos participantes nas duas campanhas de investigação analisadas, PELAGO17_OCN_Agosto (IPMA) e PT-DEPM19-HOM (IPMA/PNAB), pela recolha dos dados que possibilitaram o presente estudo.

Créditos adicionais

Este estudo foi realizado utilizando informação do Serviço Marítimo Copernicus (União Europeia). / This study has been conducted using E.U. Copernicus Marine Service Information.

Os dados do produto MUR SST foram obtidos no arquivo PO.DAAC (NASA, EUA). / The Group for High Resolution Sea Surface Temperature (GHRSSST) Multi-scale Ultra-high Resolution (MUR) SST data were obtained from the NASA EOSDIS Physical Oceanography Distributed

Active Archive Center (PO.DAAC) at the Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA (<http://dx.doi.org/10.5067/GHGMR-4FJ01>).

Os dados *in situ* de ambas as campanhas foram recolhidos no âmbito do Programa Nacional de Amostragem Biológica (PNAB), financiado pelas entidades Mar2020, Portugal2020 e FEAMP (Fundo Europeu dos Assuntos Marítimos e das Pescas).

O *software* R e todos os módulos usados no processamento dos dados foram disponibilizados pelo CRAN – *Comprehensive R Archive Network*: <https://cran.r-project.org/>

Referências

ARÍSTEGUI, J.; ÁLVAREZ-SALGADO, X.A.; BARTON, E.D.; FIGUEIRAS, F.G.; HERNÁNDEZ-LEÓN, S.; ROY, C.; SANTOS, A.M.P. (2006). Oceanography and fisheries of the Canary Current/Iberian region of the eastern North Atlantic. In: A.R. ROBINSON; K.H. BRINK (Ed.), *The sea: the global coastal ocean. Interdisciplinary regional studies and syntheses*, Vol. 14, Parte B, cap. 23. Harvard University Press. Cambridge, Massachusetts, EUA. ISBN: 0-674-01527-4.

APPELHANS, T., DETSCH, F., REUDENBACH, C., WOELLAUER, S. (2019). *mapview: Interactive Viewing of Spatial Data in R*. R package version 2.7.0. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=mapview>.

BAPTISTA, V.; SILVA, P.L.; RELVAS, P.; TEODÓSIO, M.A.; LEITÃO, F. (2018). Sea surface temperature variability along the Portuguese coast since 1950. *International Journal of Climatology*, 38: pp. 1145-1160. DOI: [10.1002/joc.5231](https://doi.org/10.1002/joc.5231).

BARTH, A.; AZCÁRATE, A.A.; JOASSIN, P.; BECKERS, J.-M.; TROUPIN, C. (2008). *Introduction to Optimal Interpolation and Variational Analysis*. URL: http://modb.oce.ulg.ac.be/wiki/upload/diva_intro.pdf

BROWNRIGG, R. (2018). *mapdata: Extra Map Databases*. R package version 2.3.0. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=mapdata> based on original S code by Richard A. Becker and Allan R. Wilks.

BRUNKE, M.A. (2014). *Bulk vs. Skin Surface Temperature*. URL: <http://www.u.arizona.edu/~brunke/research/skin.html>

BUTTLAR, J.V. (2015). *ncdf.tools: Easier 'NetCDF' File Handling*. R package version 0.7.1.295. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=ncdf.tools>

CASTILLO, K.D.; LIMA, F.P. (2010). Comparison of *in situ* and satellite-derived (MODIS-Aqua/Terra) methods for assessing temperatures on coral reefs. *Limnology and Oceanography: Methods*, 8, pp. 107-117. DOI: 10.4319/lom.2010.8.107. URL: https://www.researchgate.net/publication/228338755_Comparison_of_in_situ_and_satellite-derived_MODIS-AquaTerra_methods_for_assessing_temperatures_on_coral_reefs

CHIN, T.M.; VAZQUEZ-CUERVO, J.; ARMSTRONG, E.M. (2017). A multi-scale high-resolution analysis of global sea surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 200, pp. 154-169. DOI: 10.1016/j.rse.2017.07.029. URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425717303462>

COPERNICUS MARINE ENVIRONMENT MONITORING SERVICE (2019). *Product User Manual For OSTIA Near Real Time Level 4 SST Products over the global ocean*. URL: <http://resources.marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-SST-PUM-010-001.pdf>

COPERNICUS MARINE ENVIRONMENT MONITORING SERVICE (2018). *Product User Manual For SST products over the Mediterranean and Black Seas*. URL:

<http://resources.marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-SST-PUM-010-004-006-012-013.pdf>

COPERNICUS MARINE ENVIRONMENT MONITORING SERVICE (2018). *Product User Manual For Reprocessed Level 4 SST products over the Mediterranean and Black Seas*. URL:

<http://resources.marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-SST-PUM-010-021-022.pdf>

COPERNICUS MARINE ENVIRONMENT MONITORING SERVICE (2016). *CMEMS Sea Surface Temperature Satellite Products*. URL: <http://marine.copernicus.eu/wp-content/uploads/2017/10/CMEMS-SEA-SURFACE-TEMP-SATELLITE.pdf>

GARNIER, S. (2018). *viridis: Default Color Maps from 'matplotlib'*. R package version 0.5.1. <https://CRAN.R-project.org/package=viridis>.

GARZELLI, A. (n.d.). *Definitions in Radiometry*. URL:

<http://www.dii.unisi.it/~garzelli/documenti/03-SOME%20DEFINITIONS%20IN%20RADIOMETRY.pdf>

GEBCO COMPILATION GROUP (2019). *GEBCO 2019 Grid*. DOI: 10.5285/836f016a-33be-6ddc-e053-6c86abc0788e.

GHRSSST - GROUP FOR HIGH RESOLUTION SEA SURFACE TEMPERATURE (n.d.). *Products*. URL: <https://www.ghrsst.org/ghrsst-data-services/products/>.

GHRSSST Science Team (2010). *The Recommended GHRSSST Data Specification (GDS) 2.0*, 4ª revisão. GHRSSST International Project Office. 123 pp. URL: <https://www.ghrsst.org/wp-content/uploads/2016/10/GDS20r5.pdf>

GROLEMUND, G.; WICKHAM, H. (2011). Dates and Times Made Easy with lubridate. *Journal of Statistical Software*, 40, nº3, pp. 1-25. DOI: 10.18637/jss.v040.i03. URL: <http://www.jstatsoft.org/v40/i03>.

KENNEDY, J. J. (2014). A review of uncertainty in *in situ* measurements and data sets of sea surface temperature. *Reviews of Geophysics*, 52, pp. 1–32. DOI: 10.1002/2013RG000434.

LE TRAON, P.-Y. (2018). Satellites and operational oceanography. In: E. CHASSIGNET; A. PASCUAL; J. TINTORÉ; J. VERRON (Ed.), *New Frontiers in Operational Oceanography*, Cap. 7, pp. 161-190. DOI: 10.17125/gov2018.ch07.

- MASON, E.; COOMBS, S.; OLIVEIRA, P. B. (2006). *An overview of the literature concerning the oceanography of the eastern North Atlantic region*. Relatório Científico-Técnico, IPIMAR. URL: <http://www.ipma.pt/resources.www/docs/publicacoes.site/docweb/2006/Reln33final.pdf>
- MAURER, J.; WICK, G.A. (2002). *Infrared and microwave remote sensing of sea surface temperature (SST)*. URL: <http://www2.hawaii.edu/~jmaurer/sst/>
- MICHNA, P.; WOODS, M. (2019). RNetCDF: Interface to NetCDF Datasets. R package version 2.0-3. <https://CRAN.R-project.org/package=RNetCDF>
- MORAK-BOZZO, S.; MERCHANT, C.J.; KENT, E.C.; BERRY, D.I.; CARELLA, G. (2016). *Climatological diurnal variability in sea surface temperature characterized from drifting buoy data*. Geoscience Data Journal (Royal Meteorological Society). DOI: 10.1002/gdj3.35. URL: https://www.researchgate.net/publication/304452918_Climatological_diurnal_variability_in_sea_surface_temperature_characterized_from_drifting_buoy_data
- NATIONAL SNOW AND ICE DATA CENTER (2013). *Is it 1B, 2, or 3? Definitions of data processing levels*. URL: <https://nsidc.org/the-drift/2013/08/is-it-1b-2-or-3-definitions-of-data-processing-levels/>
- NYCHKA, D.; FURRER, R.; PAIGE, J.; SAIN, S. (2017). *fields: Tools for spatial data*. doi: 10.5065/D6W957CT (URL: <http://doi.org/10.5065/D6W957CT>), R package version 9.8-6, URL: <https://github.com/NCAR/Fields>.
- OLIVEIRA, P.B.; SANTOS, M.; MOITA, T.; AMORIM, A. (2018). Assessment of sea surface temperature estimates near the coast off SW Portugal. In: Instituto Hidrográfico (Ed.), *Actas das 5^{as} Jornadas de Engenharia Hidrográfica* (Lisboa, Junho de 2018), pp. 151-154. URL: https://www.hidrografico.pt/recursos/files/jornadas_EH/JEH2018/Actas_5JEH.pdf
- PEBESMA, E. (2018). Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data. *The R Journal* 10 (1), pp. 439-446, <https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009>
- PIERCE, D. (2019). *ncdf4: Interface to Unidata netCDF (Version 4 or Earlier) Format Data Files*. R package version 1.16.1. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=ncdf4>
- PRINOS, P. (2019). *Modelling coastal hydrodynamics*. URL: http://www.coastalwiki.org/wiki/Modelling_coastal_hydrodynamics
- R CORE TEAM (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Viena, Áustria. URL: <https://www.R-project.org/>
- RELVAS, P.; BARTON, E.D.; DUBERT, J.; OLIVEIRA, P.B.; PELIZ, A.; DA SILVA, J.C.B.; SANTOS, A.M.P. (2007). Physical oceanography of the western Iberia ecosystem: Latest views and challenges. *Progress in Oceanography*, 74 (2-3), pp. 149-173. DOI: [10.1016/j.pocean.2007.04.021](https://doi.org/10.1016/j.pocean.2007.04.021). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S007966110700095X>.
- ROBINSON, I. (2004). *Measuring the Ocean from Space, 2: Opportunities and limitations of sampling from satellites*. URL:

ftp://ftp.artov.rm.cnr.it/incoming/ifa.rm.cnr.it/Emanuele.Bohm/Public/Master_STS/I.Robinson-Part2.pdf

SMIT, A.J.; ROBERTS, M.; ANDERSON, R.J.; DUFOIS, F.; DUDLEY, S.F.J.; BORNMAN, T.G.; OLBERS, J.; BOLTON, J.J. (2013). A Coastal Seawater Temperature Dataset for Biogeographical Studies: Large Biases between *In Situ* and Remotely-Sensed Data Sets around the Coast of South Africa. PLoS ONE, 8, nº 12. DOI: 10.1371/journal.pone.0081944

TALLEY, L.D., PICKARD, G.L., EMERY, W.J.; SWIFT, J.H. (2011). *Descriptive Physical Oceanography: An Introduction*. 6ª edição. Elsevier. Londres, Reino Unido. ISBN: 978-0-7506-4552-2.

TANNER, S.E.; VIEIRA, A.R.; VASCONCELOS, R.P.; DORES, S.; AZEVEDO, M.; CABRAL, H.N.; MORRONGIELLO, J.R. (2019). Regional climate, primary productivity and fish biomass drive growth variation and population resilience in a small pelagic fish. *Ecological Indicators*, 103, pp. 530-541. DOI: [10.1016/j.ecolind.2019.04.056](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.04.056).

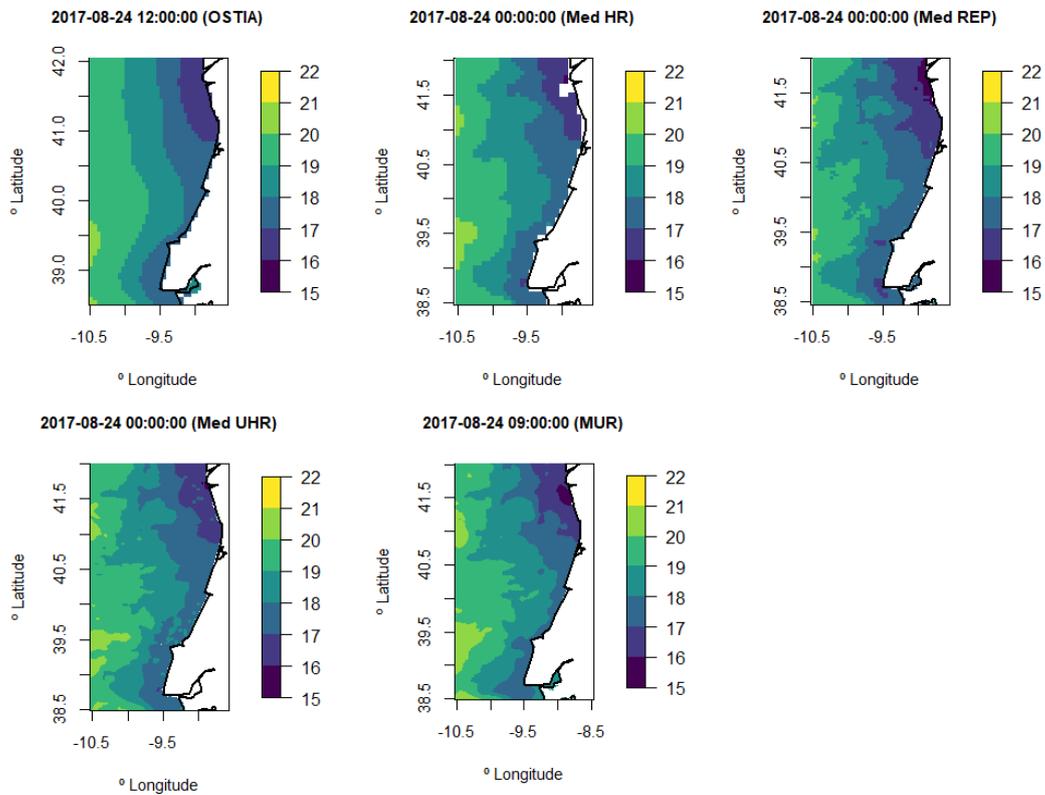
THAKUR, K.; VANDERSTICHEL, R.; BARRELL, J.; STRYHN, H.; PATANASATIENKUL, T.; REVIE, C.W. (2018). Comparison of Remotely-Sensed Sea Surface Temperature and Salinity Products With in Situ Measurements From British Columbia, Canada. *Frontiers in Marine Science*, 5, art. nº 121. DOI: 10.3389/fmars.2018.00121. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2018.00121/full>

WICKHAM, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag, Nova Iorque, EUA. ISBN: 978-3-319-24277-4.

WICKHAM, H. (2018). *modelr: Modelling Functions that Work with the Pipe*. R package version 0.1.2. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=modelr>

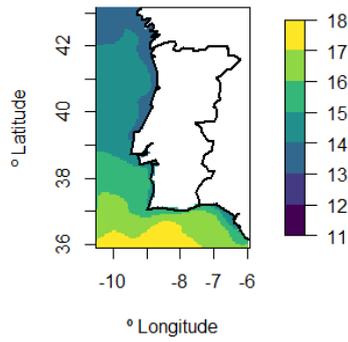
ZEILEIS, A.; FISHER, J.C.; HORNIK, K.; IHAKA, R.; MCWHITE, C.D.; MURRELL, P.; STAUFFER, R.; WILKE, C.O. (2019). *colorspace: A Toolbox for Manipulating and Assessing Colors and Palettes*. Technical Report 1903.06490, arXiv.org E-Print Archive. URL: <http://arxiv.org/abs/1903.06490>

Anexos

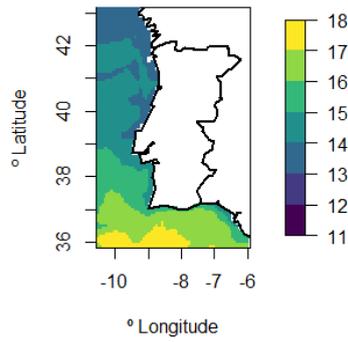


Anexo 1: Mapas da SST (representada pela escala a cores) dos 5 produtos de satélite para o dia 24/08/2017.

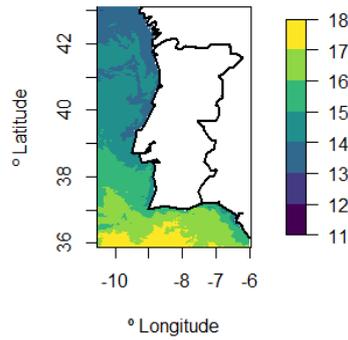
2019-01-26 12:00:00 (OSTIA)



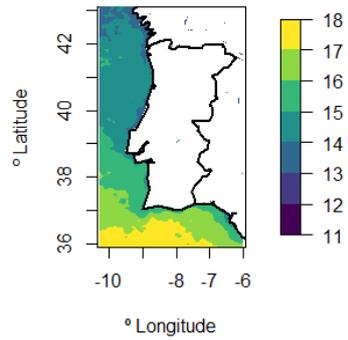
2019-01-26 00:00:00 (Med HR)



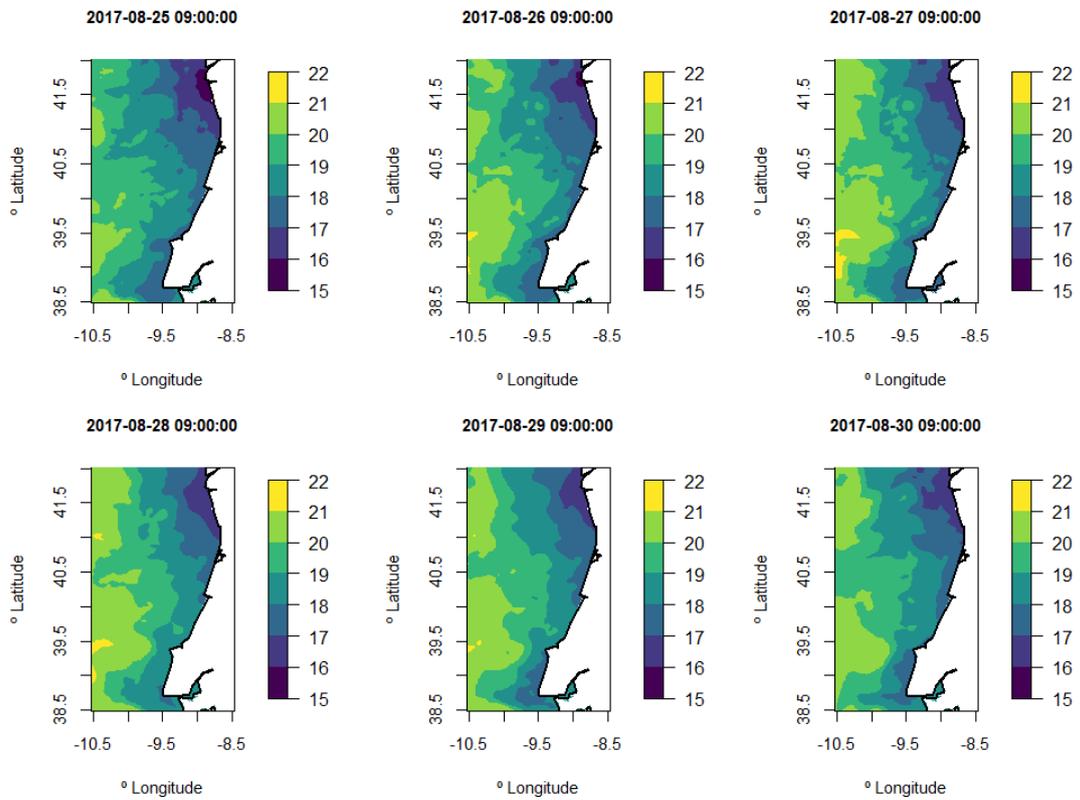
2019-01-26 00:00:00 (Med UHR)



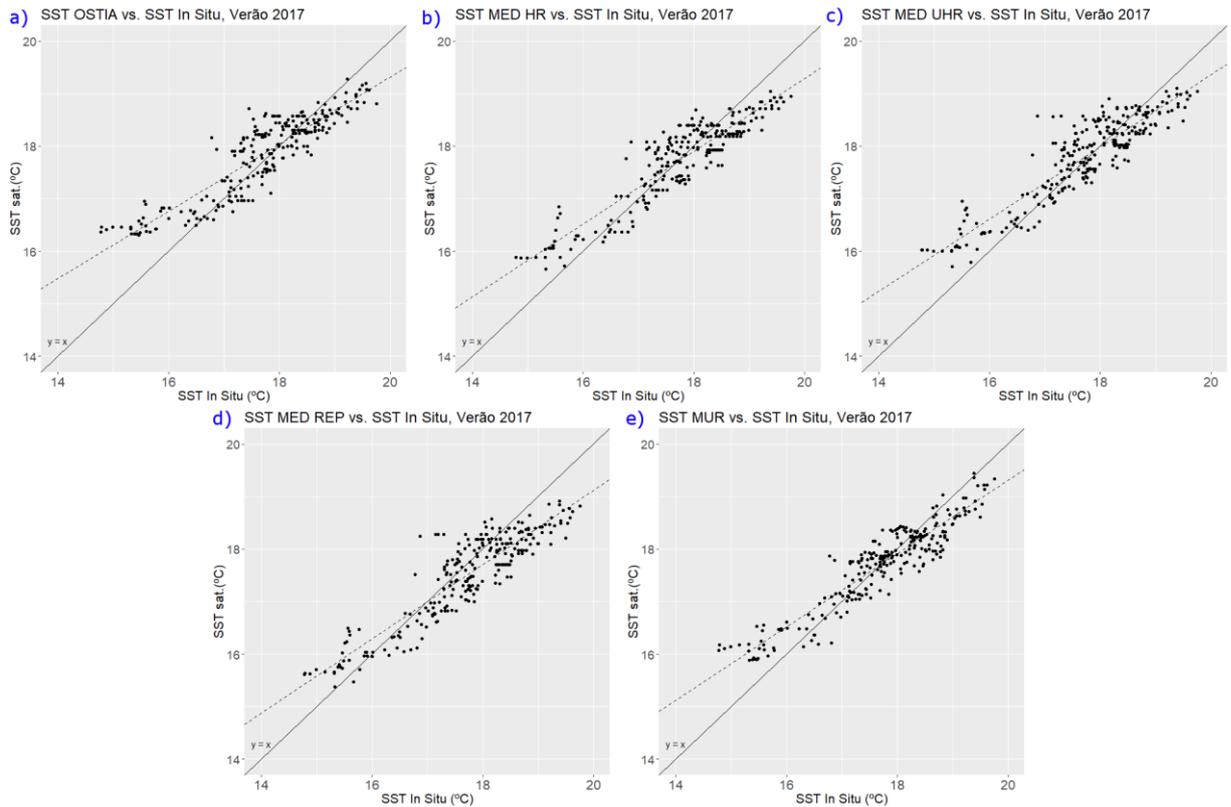
2019-01-26 09:00:00 (MUR)



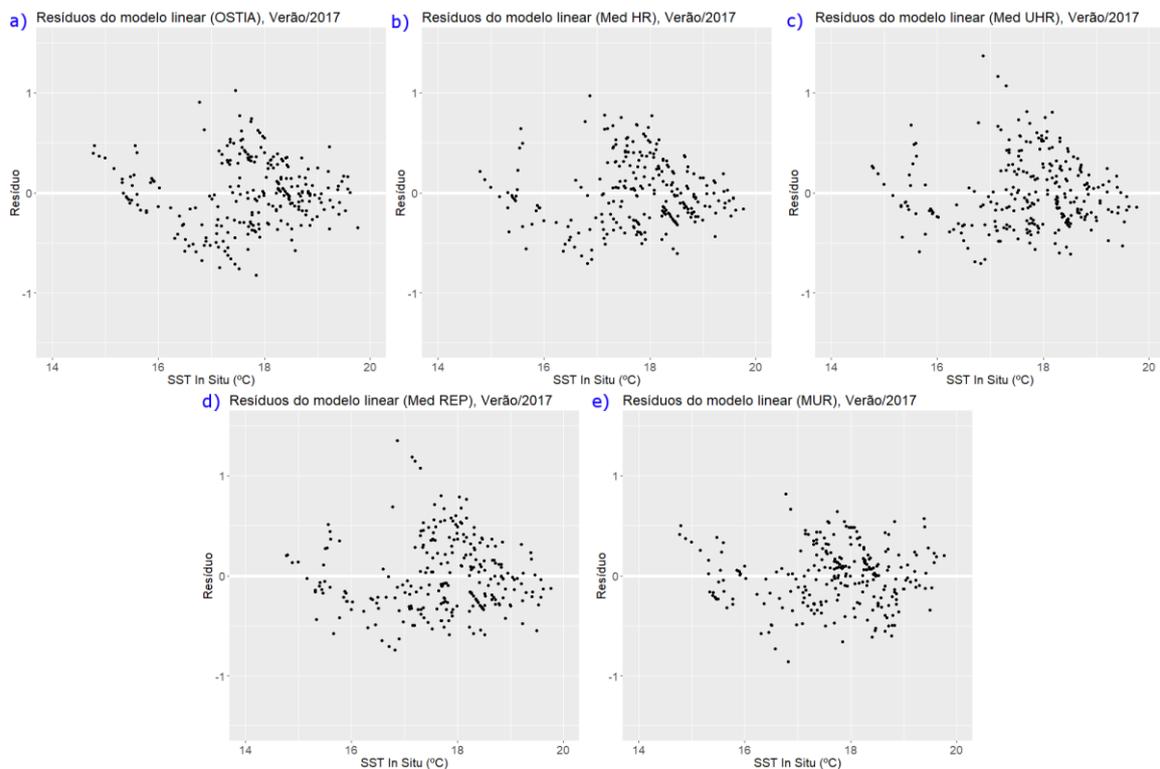
Anexo 2: Mapas da SST (representada pela escala a cores) dos 4 produtos de satélite para o dia 26/01/2019.



Anexo 3: Imagens do produto MUR SST para 6 dias da campanha de Verão (25 a 30/08/2017, o período com as SST mais elevadas).



Anexo 4: Modelos lineares ajustados às SST de satélite vs. SST in situ (campanha Verão/2017) para os produtos: (a) OSTIA, (b) Med HR, (c) Med UHR, (d) Med REP, (e) MUR. As rectas de regressão são mostradas a tracejado e a bissetriz $y=x$ é a recta contínua.



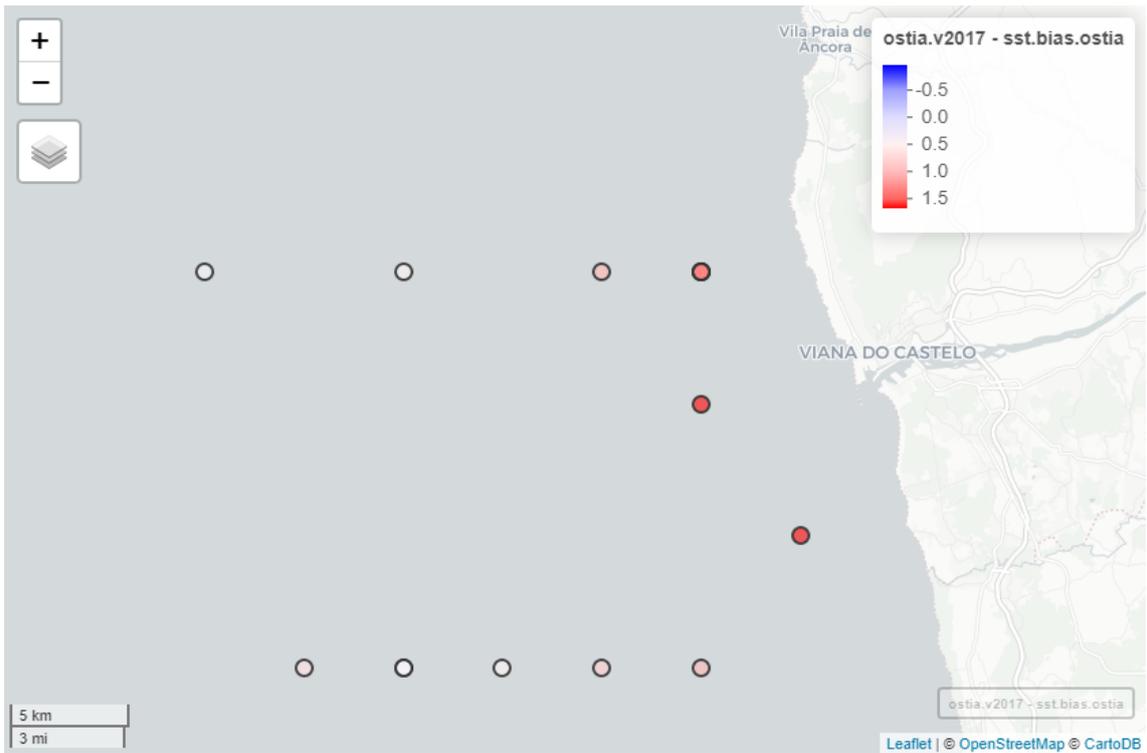
Anexo 5: Resíduos (desvios de cada ponto em relação às rectas de regressão) para os mesmos modelos e produtos do anexo 4. No seu cálculo usaram-se as funções “add_residuals” e “gather_residuals” do módulo “modelr” do R.

Anexo 6: Resultados das regressões lineares simples entre as SST de satélite (y) e a SST in situ (x) da campanha Agosto/2017, depois da aplicação do filtro de 6h.

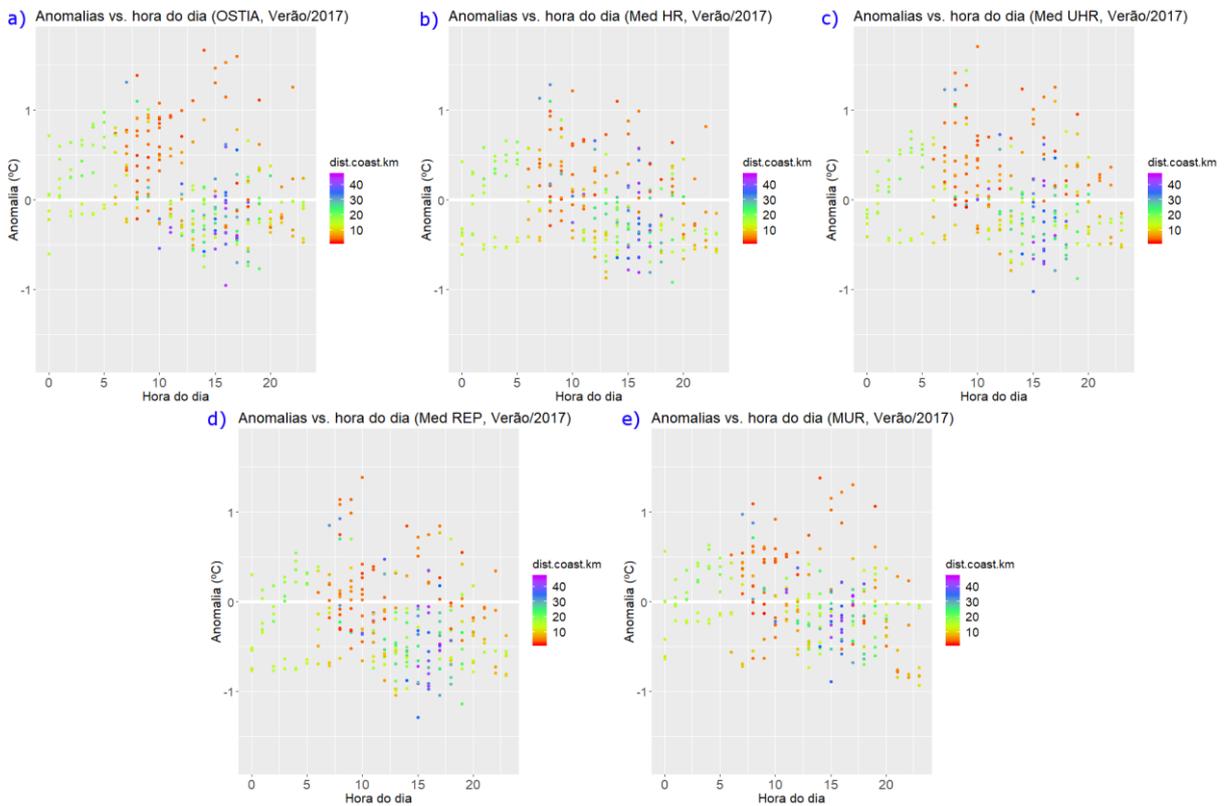
Produto	Nº pts.	R ²	R.S.E	Declive	Erro padrão do declive	Ordenada origem	Erro padrão da ordenada orig.
OSTIA NRT	168	0.84	0.32	0.611	0.021	6.988	0.371
Med NRT HR	89	0.70	0.34	0.680	0.048	5.658	0.860
Med NRT UHR	92	0.75	0.33	0.711	0.043	5.197	0.772
Med REP	92	0.74	0.35	0.732	0.046	4.526	0.835
MUR SST	138	0.86	0.28	0.699	0.024	5.360	0.421

Anexo 7: Resultados das regressões lineares simples entre as SST de satélite (y) e a SST in situ (x) da campanha Agosto/2017, depois da aplicação do filtro de 3h.

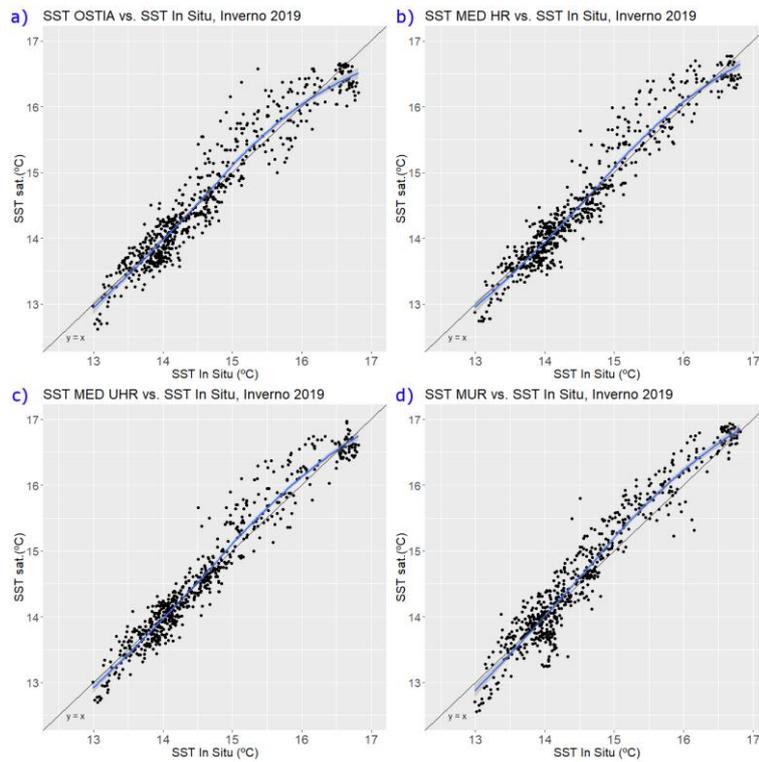
Produto	Nº pts.	R ²	R.S.E	Declive	Erro padrão do declive	Ordenada origem	Erro padrão da ordenada orig.
OSTIA NRT	86	0.82	0.32	0.615	0.031	6.866	0.546
Med NRT HR	37	0.31	0.21	0.322	0.080	12.209	1.471
Med NRT UHR	37	0.55	0.21	0.527	0.080	8.569	1.472
Med REP	37	0.45	0.24	0.483	0.090	9.077	1.654
MUR SST	74	0.87	0.27	0.689	0.032	5.556	0.551



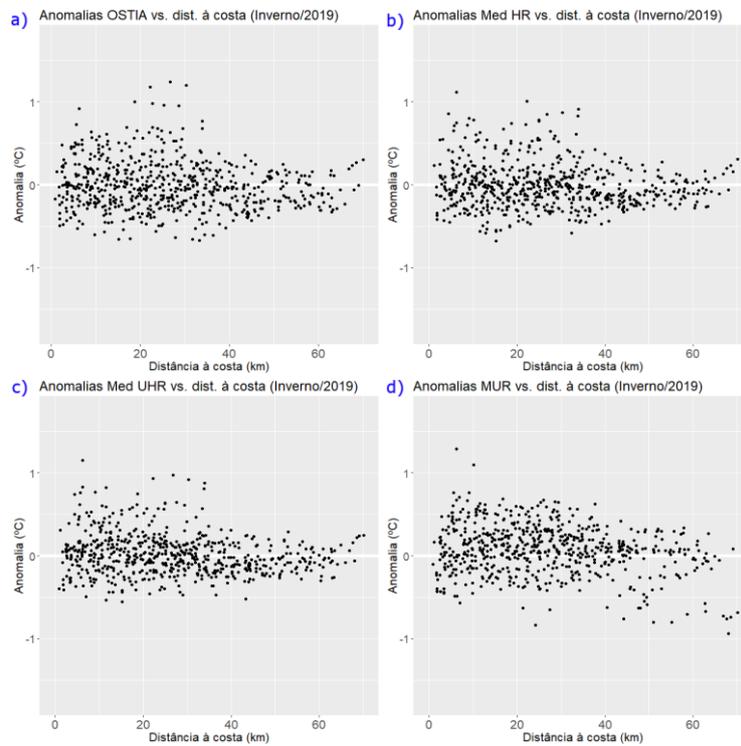
Anexo 8: Visualização no mapa de algumas anomalias (produto OSTIA). Para o desenhar, recorreu-se aos módulos "sf", "mapview" e "colorspace".



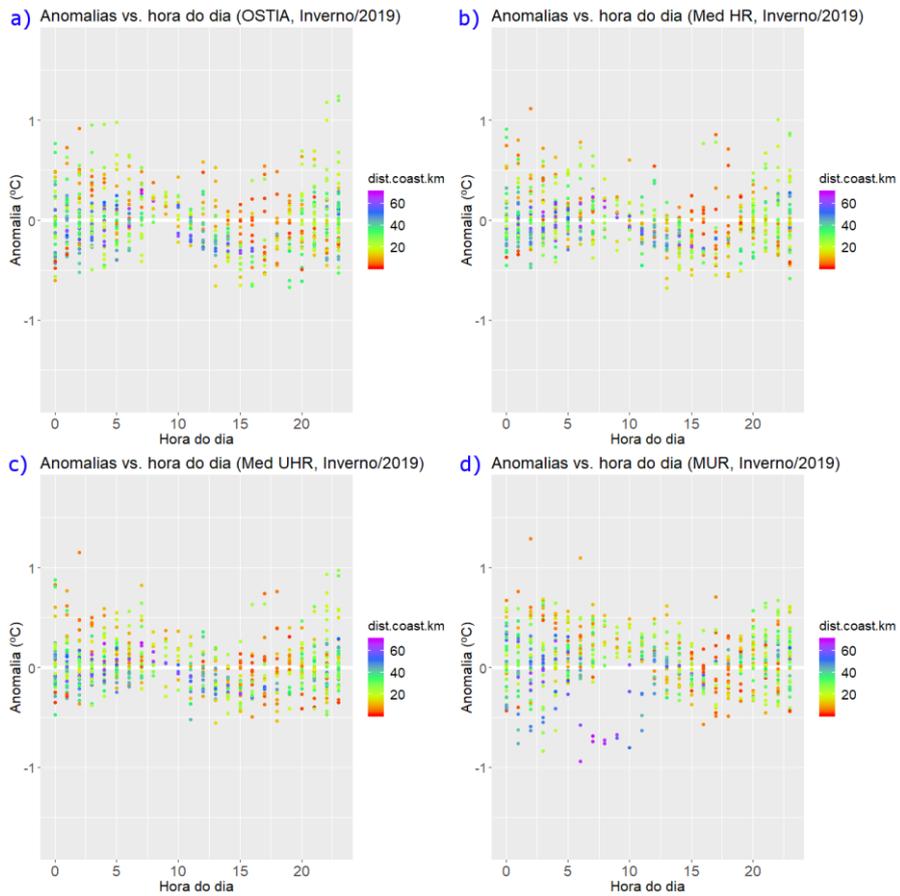
Anexo 9: Gráficos das anomalias em função da hora (0-23) dos registos (Verão/2017), para os mesmos produtos que anteriormente. As cores correspondem a valores de distância à costa.



Anexo 10: Nuvens de pontos da SST de satélite* (eixo vertical) contra a SST in situ (eixo horizontal) referentes à campanha do Inverno/2019. *Produtos: (a) OSTIA, (b) Med HR, (c) Med UHR, (d) MUR. De forma análoga ao anexo nº1, foi aplicada a função `geom_smooth()` com o parâmetro "span" = 1.



Anexo 11: Anomalias vs. distância à costa, para a campanha do Inverno de 2017, para os produtos: (a) OSTIA, (b) Med HR, (c) Med UHR, (d) MUR.



Anexo 12: Gráficos das anomalias em função da hora (0-23) dos registos (Inverno/2019), para os mesmos produtos que anteriormente. As cores correspondem a valores de distância à costa.

