

# Física dos Oceanos: da escala global à escala da sardinha

Paulo Relvas<sup>1</sup>, A. Miguel Piecho-Santos<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> CCMAR/Universidade do Algarve, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Gambelas, Faro, Portugal (prelvas@ualg.pt)

<sup>2</sup> IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera, Algés, Portugal; (amsantos@ipma.pt)

## Introdução

As circulações oceânicas ocorrem numa variedade de escalas espaciais desde os milhares de quilómetros nas grandes correntes globais, até aos movimentos com escala inferior ao centímetro nas ondas capilares. As escalas temporais de variabilidade vão desde as décadas de anos, nas variações climáticas, até aos segundos, numa relação aproximadamente linear com a escala espacial. Os principais fatores forçadores que governam as circulações oceânicas diferem conforme a escala dos movimentos que estamos a estudar. Todos os movimentos têm como fonte primária de energia a radiação solar e, no caso da maré, a interação gravitacional. A transferência de energia da larga escala para as escalas menores ocorre por processos turbulentos, que em grande medida condicionam o funcionamento dos ecossistemas marinhos. São os processos físicos que governam o funcionamento biológico dos sistemas marinhos. Neste artigo, descrevemos as grandes circulações do oceano global e abordamos a sua degradação em escalas menores. O conhecimento da dinâmica destas escalas, no domínio da mesoescala, é determinante para perceber e prever a sobrevivência, transporte, e desenvolvimento das comunidades planctónicas, que estão na base da abundância ou não dos pequenos peixes pelágicos, como é o caso da sardinha.

## O grande trilho da circulação global do Oceano – a circulação termohalina

O nosso Planeta tem como fonte primária de energia a radiação solar. Devido à forma aproximadamente esférica da Terra, a distribuição da radiação solar que atinge a superfície não é uniforme e varia no tempo devido à inclinação do seu eixo de rotação relativamente ao plano de translação (plano da eclíptica). Apesar da variabilidade devido às estações do ano, as regiões intertropicais são sempre mais aquecidas do que as regiões polares, onde a energia solar é espalhada por áreas maiores e os raios solares incidem de forma oblí-

qua (Fig. 1). Temos assim uma fonte quente na região equatorial e fontes frias nas altas latitudes. Estas condições colocam em funcionamento uma enorme máquina térmica planetária, onde o trabalho resultante é o transporte do excesso de energia das regiões de baixas latitudes para as altas latitudes realizado pela atmosfera e pelos oceanos através das respetivas circulações gerais.

O Oceano realiza este transporte através da circulação termohalina<sup>1</sup> à escala global. Uma representação minimalista dessa circulação é dada pelo grande trilho da circulação global do Oceano (Fig. 2), uma tradução livre da designação original em inglês *global ocean conveyor belt* [1, 2]. No Atlântico Norte, perto da Gronelândia, o oceano arrefece devido às temperaturas árticas. A salinidade também aumenta devido à formação do gelo. A água torna-se assim mais densa e afunda. À superfície, a água move-se para substituir a água que mergulha, criando uma extensão para norte da corrente do Golfo. A água profunda com esta origem move-se para sul, atravessa o Equador e continua até circular para leste contornando a Antártida. Devido às baixas temperaturas, nesta região volta a haver algum afundamento de água e a circulação termohalina é reforçada. Dois ramos separam-se da circulação circumpolar antártica e fluem para norte, um no oceano Índico, outro no Oceano Pacífico. À medida que escoam para norte, estes dois ramos aquecem, tornam-se menos densos, e afloram à superfície. Retornam então para sul e sudoeste, continuando o seu caminho de volta através das camadas superiores do oceano. Eventualmente regressam ao Atlântico Sul e fluem para norte, agora à superfície, alimentando a Corrente do Golfo que escoam novamente para perto da Gronelândia, fechando assim o ciclo. A circulação termohalina profunda ocorre com correntes muito lentas, com velocidades na ordem de 1 cm/s ou inferiores. Por isso, estima-se que uma partícula de água percorra este ciclo em cerca de 1000 anos.

<sup>1</sup> Circulação **termohalina** é toda a circulação no oceano induzida por diferenças de densidade da água do mar. Tem esta designação porque a densidade, a uma dada profundidade, é função da temperatura (*termo*) e da salinidade (*halina*).

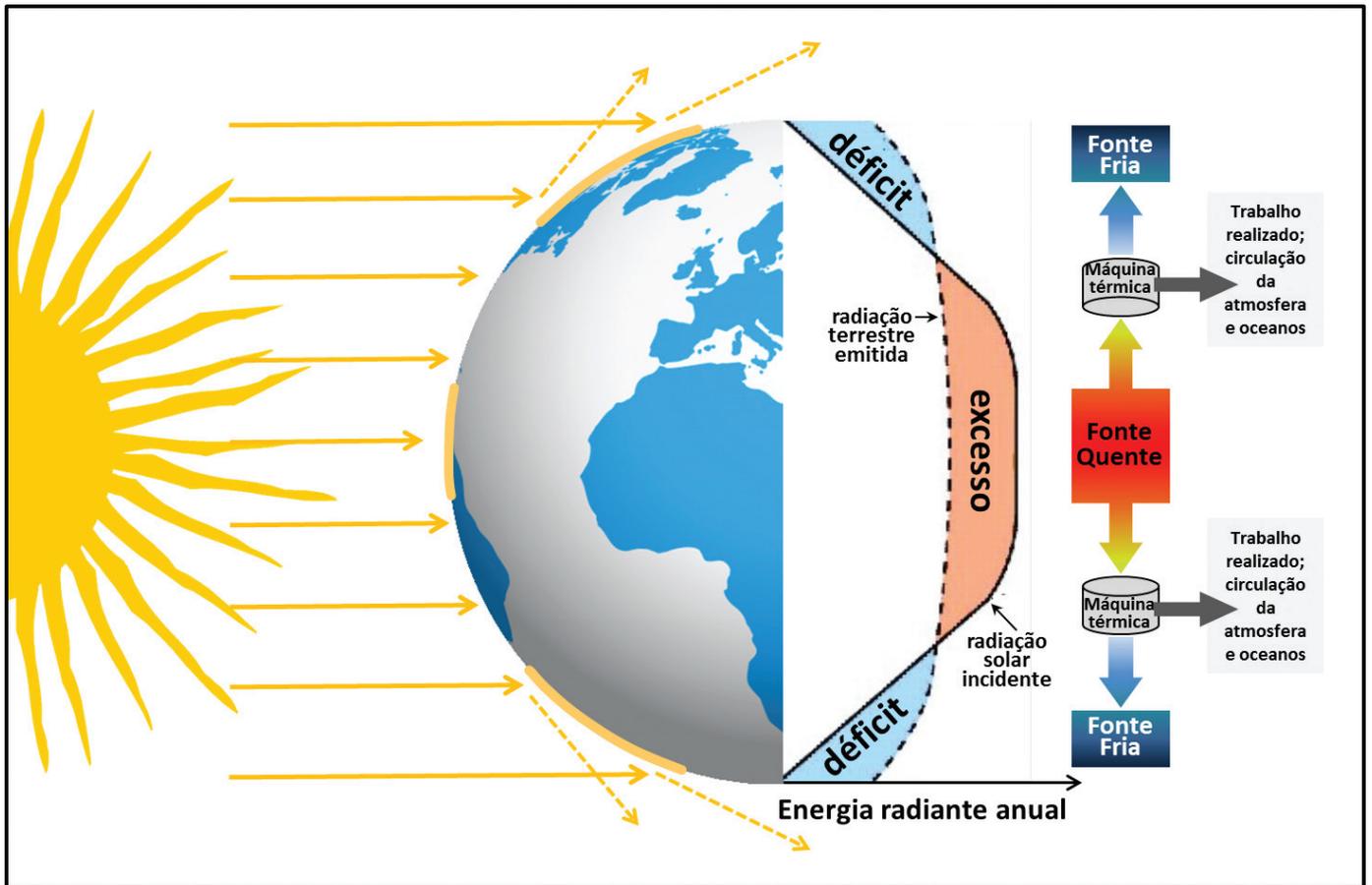


Figura 1 - O aquecimento diferente entre as altas latitudes e as regiões intertropicais coloca em funcionamento uma enorme máquina térmica, onde as fontes frias são as regiões polares e a fonte quente as regiões equatoriais. O trabalho realizado é a circulação geral da atmosfera e do oceano.

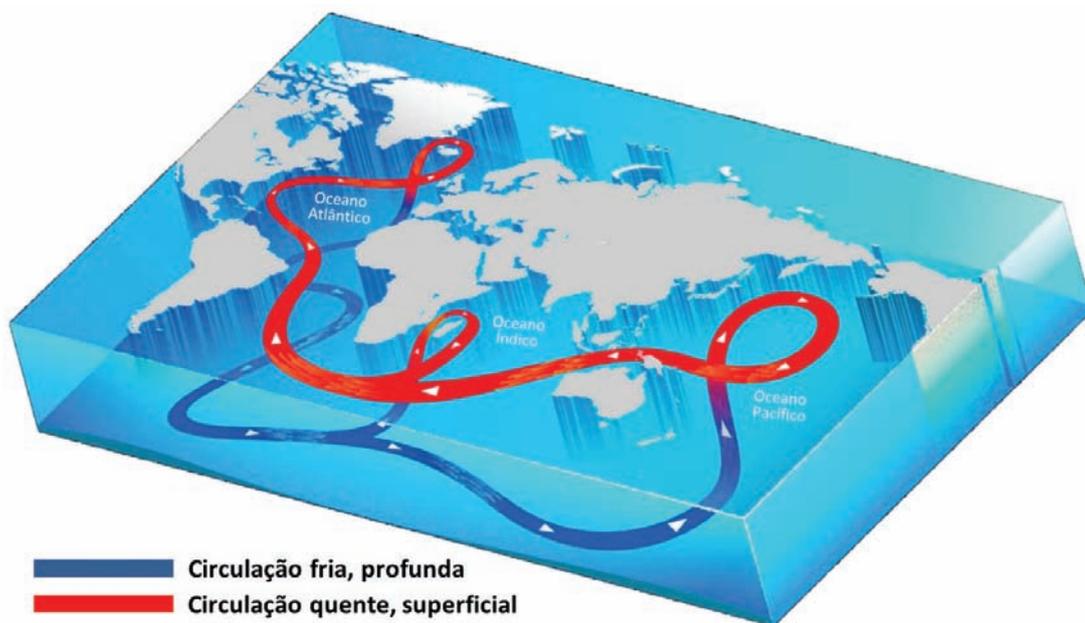


Figura 2 - Representação esquemática do principal caminho da circulação termohalina à escala do oceano global (*global ocean conveyor belt*).

O grande trilho da circulação global do Oceano pretende representar a circulação meridional com retorno (*meridional overturning circulation* no original em inglês) de forma esquemática. A realidade é bem mais complexa do que esta versão muito simples da circulação termohalina global mostra. Por isso, ela tem vindo a ser atualizada e

por vezes até contestada, pois esquece muitas conexões entre oceanos que vamos conhecendo [3]. Contudo, se olhada com espírito crítico e consciente das suas limitações, continua a ser uma representação válida do maior transporte oceânico que liga todos os oceanos da Terra.



Com estas novas ferramentas percebeu-se que as correntes oceânicas não são enormes escoamentos regulares a atravessar os oceanos. São, isso sim, uma sucessão de meandros contorcidos, pequenas correntes e contracorrentes, filamentos e vórtices de várias escalas. Assim, as correntes de larga escala da circulação global são dominadas por estruturas transientes na ordem de algumas dezenas a poucas centenas de quilómetros de escala espacial, ou seja, estruturas de mesoescala. Na Fig. 4, podemos ver a estrutura de correntes geostróficas de mesoescala associada à corrente do Golfo, inferida a partir de satélites altímetros. Estas estruturas constituem a variabilidade do estado do tempo do oceano, por semelhança com o estado do tempo atmosférico. Quando se investigam essas estruturas, verifica-se que elas se desdobram noutras estruturas similares de escala mais pequena. Passamos então para a submesoescala. Descendo na escala espacial, voltamos a ter estruturas com escalas ainda mais pequenas a integrar as anteriores, numa cascata de energia de Kolmogorov [6] [7]. Por isso, os campos de grandezas oceanográficas têm sido por vezes descritos recorrendo a modelos de fractais [8].

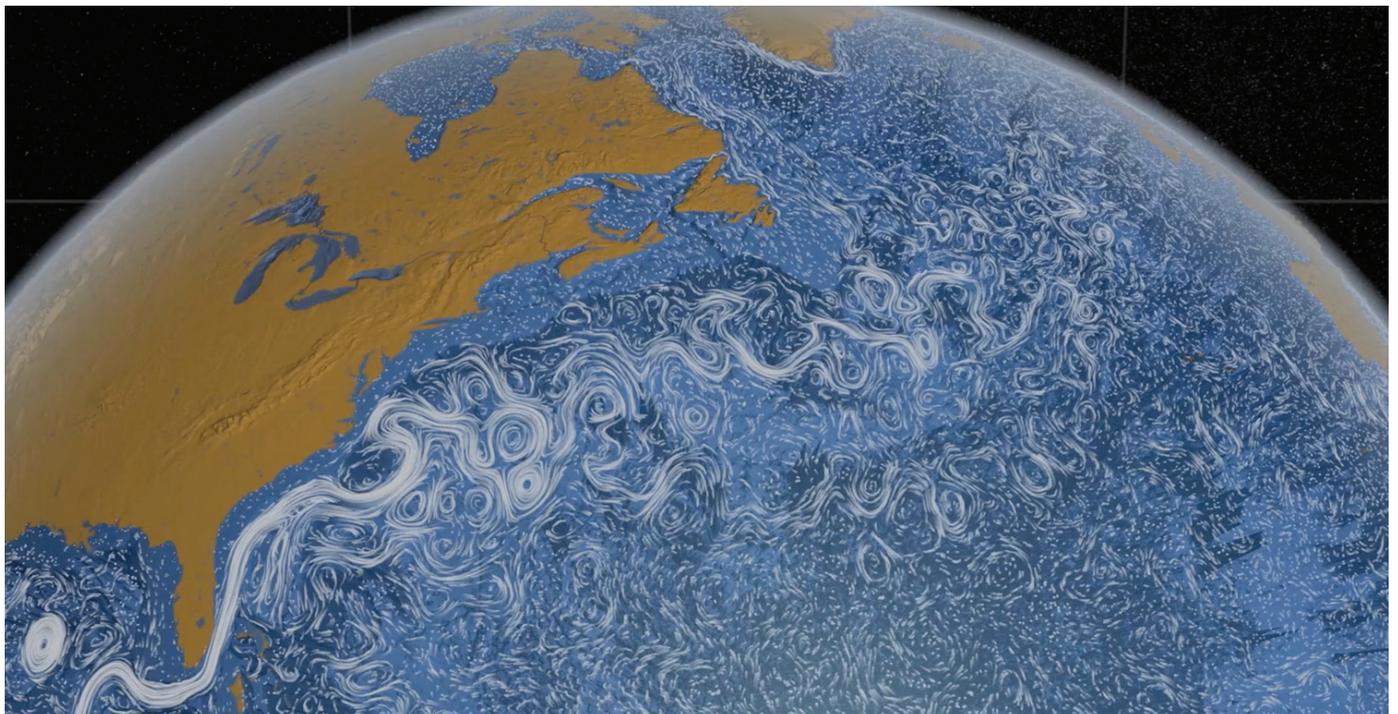


Figura 4 - A corrente do Golfo a escoar ao longo da costa leste dos EUA em direção ao Atlântico Norte, representada pelas suas linhas de corrente inferidas a partir de altímetros instalados em satélites (créditos: NASA's Goddard Space Flight Center).

As estruturas que falámos no parágrafo anterior representam a turbulência no oceano, nas suas diversas escalas. O oceano não responde de forma linear às ações forçadoras. Contudo, não existe uma teoria geral para a turbulência e, por isso, somos incapazes de resolver o comportamento não-linear do oceano. As equações de Navier-Stokes, que traduzem a di-

nâmica de um fluido em movimento, não têm solução analítica.

Podemos ilustrar a situação que ocorre no oceano com o fumo que sai de uma vela acesa (Fig. 5). O regime começa por ser laminar, até que se dá a passagem para o regime turbulento, sem nenhuma interação exterior. Verifica-se que é impossível prever com exatidão o comportamento do escoamento turbulento ou a velocidade a que se dá a transição do regime laminar para turbulento. A turbulência está por toda a parte, mas é um dos conceitos mais difíceis para os físicos entenderem. É considerado o mais antigo problema não resolvido da Física! Na ausência de uma teoria da turbulência, as soluções para o oceano (e também para a atmosfera) são encontradas através da parametrização dos processos físicos. Com base numa rede de observações, procuram-se soluções aproximadas e coeficientes turbulentos que traduzam o processo físico. Quanto mais densa for a rede de observação, melhor será a parametrização dos processos e melhores serão os

modelos numéricos hidrodinâmicos que pretendem representar o comportamento do oceano.

### Realidade ou mito?

Conta-se que Werner Heisenberg, no seu leito de morte, terá dito:

Agora que me vou encontrar com Deus, vou fazer-lhe duas perguntas: Porque razão é a mecânica quântica tão complexa? Como se explica a turbulência? Acredito vivamente que ele terá uma resposta para a primeira...

Esta afirmação é também atribuída por vezes ao matemático britânico Horace Lamb.

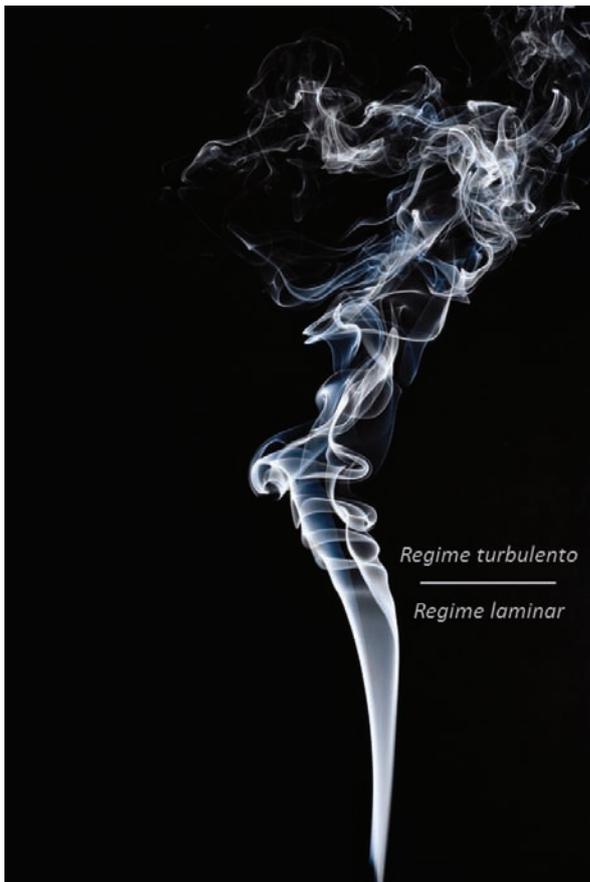


Figura 5 - Transição do regime laminar para o regime turbulento

### A importância da mesoescala no ecossistema – o caso da sardinha

Grande parte do funcionamento dos ecossistemas está ligada a escalas espaciais de mesoescala com escalas temporais na ordem da dezena de dias. São as escalas da macroturbulência oceânica, as quais têm uma variabilidade que não conseguimos reproduzir em modelos analíticos e, por isso, não conseguimos prever com exatidão, mas apenas de forma aproximada através de modelos numéricos parametrizados. São exatamente estas escalas espaciais e temporais que têm maior importância para as comunidades planctônicas<sup>2</sup>. A sua sobrevivência e evolução estão associadas principalmente a processos e estruturas de mesoescala, incluindo frentes, vórtices, lentes flutuantes de água, estratificação, afloramento costeiro e estruturas relacionadas, como meandros e filamentos. O conhecimento do transporte das larvas dos organismos marinhos, dos seus padrões de dispersão espacial, ou a sua retenção em zonas limitadas do oceano, são fundamentais para compreender a dinâmica das populações marinhas e o grau de conectividade entre as diversas populações dos organismos marinhos. Este conhecimen-

to é de grande importância para a conservação e a gestão apropriada dos ecossistemas marinhos. Sabe-se que são as estruturas de mesoescala que determinam esses padrões e a retenção dos estádios larvares dos organismos marinhos, com poucas ou nenhuma capacidade natatórias, em áreas favoráveis à sua sobrevivência e desenvolvimento. A sobrevivência durante os estágios larvar e de juvenil das populações de pequenos peixes pelágicos, tais como as sardinhas, arenques e biqueirões, determina a variabilidade do número de indivíduos que chegam à fase em que passam a constituir um recurso pesqueiro, aquilo que se designa por “recrutamento”. O biólogo norueguês Johan Hjort (1869-1948) foi o primeiro a formalizar, em 1914, a hipótese da existência de uma relação entre a dinâmica das populações de peixe e a variabilidade oceanográfica de mesoescala (“período crítico”). É ele e vários oceanógrafos (e.g., Fridtjof Nansen, Otto Krümmel, Gustaf Ekman e Oscar Nordqvist) que estão na origem da criação do Conselho Internacional para a Exploração do Mar (mais conhecido pela sigla inglesa ICES - *International Council for the Exploration of the Sea*), fundado em 1902. Desde então, têm surgido várias outras hipóteses explicativas da variabilidade do recrutamento, tais como a “tríade oceânica”, formulada pelo oceanógrafo físico Andrew Bakun, em 1996 [9]. Segundo esta última hipótese, existem três processos oceanográficos fundamentais para explicar a variabilidade do recrutamento: (i) processos de enriquecimento de nutrientes (e.g., o afloramento costeiro); (ii) processos de concentração do alimento das larvas (e.g., frentes oceânicas e lentes flutuantes de água) e; (iii) processos de transporte e retenção de larvas para/em zonas favoráveis à sua sobrevivência (e.g. meandros, filamentos, vórtices).

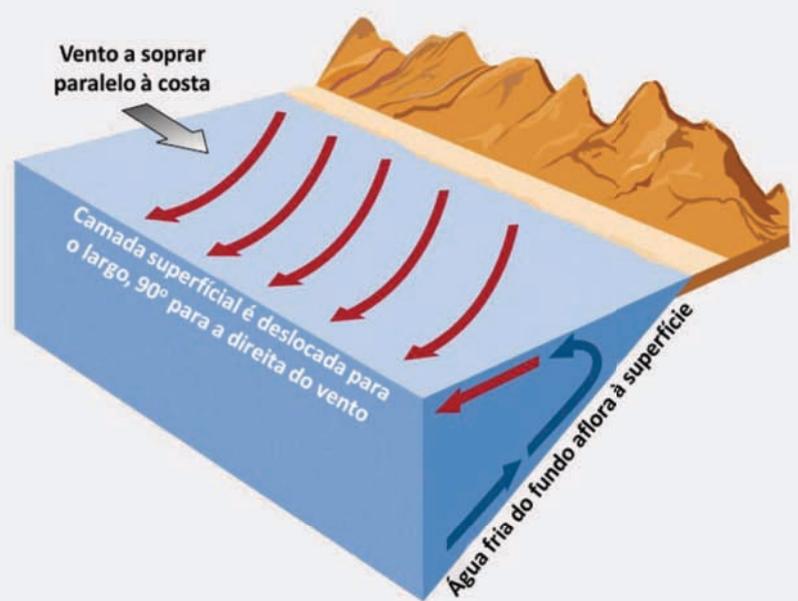
A sardinha europeia (*Sardina pilchardus*) é a pescaria de pequenos peixes pelágicos mais importante do Sistema de Afloramento da Corrente das Canárias, do qual a costa ocidental da Península Ibérica é a sua região mais setentrional. Nesta última região, esta pescaria variava entre 50 % e 30 % do total do peso de pescado desembarcado, mas a partir dos anos 1990, com as medidas de gestão e limitação de capturas, é atualmente apenas 8 % das capturas nacionais, em peso. Desde que há estimativas de recrutamento desta espécie (1978), estes têm tido uma tendência decrescente, estando atualmente nos valores mais baixos observados até agora. Nesta região, a “tríade oceânica” opera do seguinte modo: (i) o principal processo de enriquecimento é o afloramento costeiro, cuja intensidade e persistência ocorrem na primavera e no verão, devido às chamadas “nortadas” e que enriquece a zona eufótica de nutrientes, permitindo o crescimento do fitoplâncton, o qual sustenta a alta produção de zooplâncton observada desde o início da primavera até ao final do outono; (ii) durante o início da primavera, o máximo de clorofila é frequentemente encontrada em uma área de convergência ou retenção formada pela “Corrente Ibérica para o Pólo” (IPC da denominação inglesa *Iberian Poleward Current*),

<sup>2</sup> O termo plâncton vem do grego *plagktón* (errante, vagar, andar sem destino) e refere-se aos organismos pelágicos que são transportadas pelos movimentos da água e não pela sua própria capacidade de nadar. São, em geral, organismos microscópicos, denominados fitoplâncton, no caso das plantas e, zooplâncton, no caso dos animais. O fitoplâncton encontra-se na base da cadeia alimentar marinha. Os ovos e larvas da grande maioria dos peixes marinhos fazem parte do zooplâncton, mais especificamente do ictioplâncton.

### Afloramento costeiro

O afloramento costeiro, ou na terminologia internacional *coastal upwelling*, é um processo físico de mesoescala de interação entre a atmosfera e o oceano. A tensão do vento a atuar na superfície do oceano induz um transporte de massa, não na direção do vento, mas sim  $90^\circ$  para a direita da direção do vento (para a esquerda no hemisfério Sul), em consequência da rotação da Terra (efeito de Coriolis). No caso de um vento com a linha de costa à esquerda (à direita no hemisfério Sul), o transporte nas camadas superficiais do oceano será para a direita (esquerda no hemisfério Sul), ou seja, para o largo.

É o que se passa na costa Oeste da Península Ibérica com o vento a soprar de Norte. A água superficial transportada para longe da costa é substituída por água fria e rica em nutrientes, que aflora à superfície a partir das camadas de fundo. Este processo de *upwelling* já foi descrito num número anterior da Gazeta de Física [10].



que serve como uma barreira, para as trocas entre a costa e o largo das águas afloradas e onde se formam zonas de concentração de alimento na zona de ocorrência das larvas e juvenis de sardinha; (iii) a variabilidade nos processos e estruturas oceanográficas locais, tais como a “Lente Ibérica de Água Menos Salina” (WIBP da denominação inglesa *Western Iberian Buoyant Plume*) e a IPC, introduzem flutuações importantes nos padrões de transporte/retenção das larvas de sardinha, com consequências na sobrevivência das larvas. Alterações nos padrões e intensidade do regime de afloramento costeiro no Sistema de Afloramento da Corrente das Canárias, coincidiram com mudanças na produtividade de várias espécies de pequenos peixes pelágicos, observadas no mesmo período, sugerindo que houve uma resposta do ecossistema a essas alterações ambientais. A diminuição do recrutamento da sardinha na costa ocidental da Península Ibérica, pode ser explicada, pelo menos parcialmente, pela variabilidade das condições físicas oceanográficas de mesoescala.

### Conclusão

Neste texto percorremos o caminho da energia desde a sua chegada ao planeta proveniente do Sol e recebida na camada superior do oceano proveniente do vento, até à sua dissipação no oceano através de processos turbulentos com escalas espaciais e temporais cada vez menores. Estes processos turbulentos são caóticos. Por isso não é possível a sua representação analítica universal. Para os podermos mimetizar em equações que possam ser resolvidas por processos numéricos, temos de os parametrizar, procurando coeficientes que melhor traduzam o seu comportamento em cada escoamento oceânico, ou seja, em cada corrente do oceano. A procura dos melhores parâmetros só

pode ser feita com base em observações. Quanto mais densa for a grelha de observações, melhores serão as estimativas dos coeficientes empíricos. Em consequência, o conjunto das equações resultantes representará melhor o comportamento do oceano e mais realistas serão as simulações realizadas pelos modelos numéricos hidrodinâmicos.

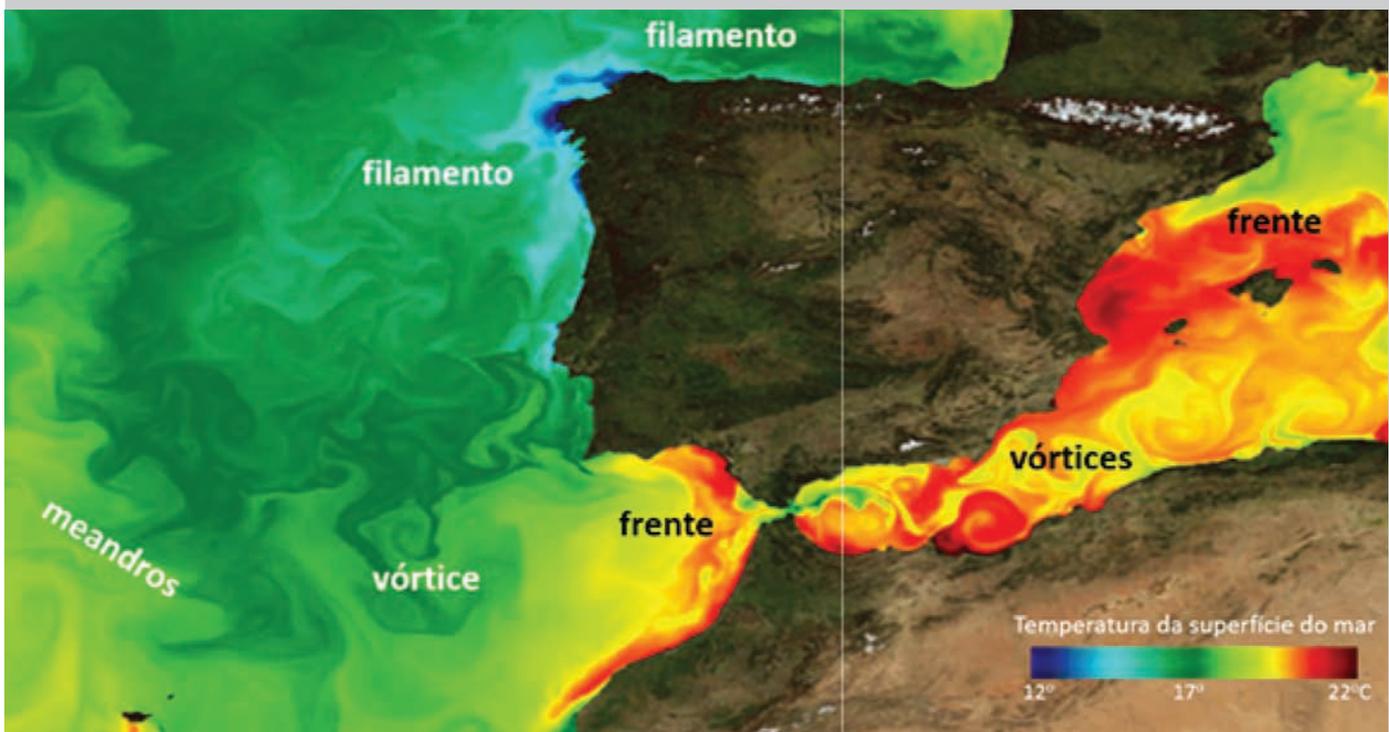
Acontece que a turbulência tem uma influência determinante no funcionamento dos ecossistemas marinhos. Todo o ciclo biológico, quer do fitoplâncton quer do zooplâncton, é fortemente dependente dos processos turbulentos nas suas diversas escalas. É a mesoescala, resultante da macroturbulência oceânica, que determina as zonas e as condições ambientais ótimas para a sobrevivência e desenvolvimento das larvas e dos estados juvenis de várias espécies marinhas, entre as quais a sardinha. Só o conhecimento dos processos físicos de mesoescala e a sua reprodução em modelos numéricos realistas nos permitirá estimar abundâncias de sardinha, entre outras espécies pelágicas. Podemos então concluir que sem conhecermos a Física do Oceano, jamais conseguiremos estimar se vamos ou não ter sardinhas suficientes nas nossas festas dos Santos Populares!

## GLOSSÁRIO

- Correntes geostróficas - correntes oceânicas governadas pelo equilíbrio da força resultante dos gradientes horizontais da pressão hidrostática com a força de Coriolis, resultante da rotação da Terra. Podemos assumir esta aproximação em cerca de 90 % do oceano, sempre que as forças de atrito exterior não sejam relevantes. Estas correntes fluem paralelas às isóbaras deixando as altas pressões à direita do hemisfério norte.
- Lentes flutuantes de água - corpos de água que devido à sua densidade flutuam no oceano envolvente. Como estes corpos são muito pouco espessos relativamente à sua extensão horizontal, designam-se por “lentes”. Um exemplo poderá ser a pluma de água doce de um rio a flutuar no oceano devido à sua menor densidade. Contudo, devido às suas

desenvolver em vórtices, ou seja, em “remoinhos” de mesoescala, que se podem soltar e adquirir identidade própria e viajar no oceano. Filamentos são línguas de água fria proveniente de afloramento costeiro que se propagam para o largo a partir da costa. A figura anexa ilustra estas estruturas através de uma imagem da temperatura da superfície do oceano obtida por satélite.

- Mesoescala - escala espacial de movimentos e estruturas no oceano desde as dezenas até às poucas centenas de quilómetros. São em geral transientes, com escalas temporais na ordem da dezena de dias. Estão abaixo da larga escala das grandes correntes oceânicas (p. ex Corrente do Golfo), mas acima da pequena escala, característica por exemplo dos estuários e lagoas costeiras. Por vezes, no oceano aberto, as estruturas abaixo da mesoescala são chamadas de submesoescala.



características de temperatura e salinidade, podemos ter lentes flutuantes de água em profundidade. A terminologia internacional é *buoyant plumes* ou *buoyant lens*.

- Frentes, vórtices, meandros e filamentos - são estruturas de mesoescala que povoam o oceano. Uma frente oceânica é uma interface onde as propriedades físico-químicas variam de forma abrupta. Esta interface é em geral perturbada, formando meandros, os quais podem-se

- Pelágico - espécies pelágicas são aquelas que habitam e se movem livremente na coluna de água e dependem das características das massas de água, não dependendo dos fundos marinhos.
- Sinótico - uma visão sinótica é a representação simultânea de uma vasta porção do oceano. Pode ser entendido como um “retrato” instantâneo de uma zona do oceano, descrevendo a distribuição de uma propriedade oceanográfica.
- Zona eufótica - camada superficial do oceano que recebe luz solar suficiente para que se realize a fotossíntese.

## Referências

- [1] Broecker, W. S., 1987. The biggest chill, *Natural History Magazine* 97, 74-82.
- [2] Broecker, W. S., 1991. The Great Ocean conveyor, *Oceanography* 4 (2), 79-89.
- [3] Richardson, P. L., 2008. On the history of meridional overturning circulation schematic diagrams, *Progress in Oceanography* 76, 466-486.
- [4] Caesar, L., Rahmstorf, S., Robinson, A. Feulner, G., and Saba, V., 2018. Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation. *Nature* 556, 191-196.
- [5] Jackson, L.C., Kahana, R., Graham, T., Ringer, M. A., Woollings, T., Mecking J. V., and Wood R. A., 2015. Global and European climate impacts of a slowdown of the AMOC in a high resolution GCM. *Clim Dyn* 45, 3299-3316.
- [6] Kolmogorov, A. N., 1941. Local structure of turbulence in an incompressible liquid for very large Reynolds numbers, *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 30, 299-303.
- [7] Andrew C. P., T. M. Özgökmen, D. J. Bogucki, and A. D. Kirwan, Jr., 2017. Evidence of a forward energy cascade and Kolmogorov self-similarity in submesoscale ocean surface drifter observations, *Physics of Fluids* 29, P020701.
- [8] Skákala, J., and T. J. Smyth, 2015. Complex coastal oceanographic fields can be described by universal multifractals, *J. Geophys. Res. Oceans*, 120, 6253-6265.
- [9] Bakun, A., 1996. Patterns in the ocean. California Sea Grant, in cooperation with Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, La Paz, Mexico, 323 pp.
- [10] Relvas, P., 2017. Processos dinâmicos que determinam as correntes no oceano, *Gazeta de Física*, Vol. 40 - Nº 3/4.



Paulo Relvas, é licenciado em Física pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e doutorado em Oceanografia Física pela *School of Ocean Sciences – University of Wales*, Reino Unido. É professor da Universidade do Algarve, regente de disciplinas física do oceano de diversos cursos de graduação e pós-graduação e diretor do mestrado internacional em *Marine and Coastal Systems*. É investigador do CCMAR – Centro de Ciências do Mar do Algarve. As áreas de investigação cobrem sobretudo a física dos processos de mesoescala no oceano e a dinâmicos dos sistemas de afloramento costeiro.



A. Miguel Piecho-Santos, é licenciado em Biologia Marinha e Doutorado em Ciências Geofísicas (Oceanografia) pela Universidade de Lisboa. É investigador do IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera e membro do CCMAR – Centro de Ciências do Mar do Algarve. Tem mais de 30 anos de experiência de investigação na área da oceanografia, tendo coordenado diversos projetos nacionais e internacionais. A sua investigação tem focado as interações físico-biologia no oceano e nos organismos marinhos, com particular atenção na sardinha, impacto das alterações globais no meio marinho e aplicações da deteção remota à oceanografia e às pescas.