



Física do clima

**Homenagem - Centenário do nascimento do
Prof. José Pinto Peixoto**

Índice

1 Editorial

artigo geral

2 A ordem mundial do fogo

Carlos C. Da Camara, José M. C. Pereira, Renata Libonati, Sílvia A. Nunes

artigo geral

8 O Clima da Terra a partir do Espaço: estimativas do Balanço Radiativo

Isabel F. Trigo, Carlos C. DaCamara

artigo geral

14 A influência da Atmosfera nas variações da rotação da Terra

José M Castanheira, Machiel Bos

artigo geral

17 A importância dos Rios Atmosféricos no ramo aéreo do Ciclo Hidrológico

Ricardo M. Trigo, Alexandre M. Ramos

artigo geral

22 O papel da variabilidade climática na evolução da evapotranspiração e vegetação na Península Ibérica no século XXI.

Célia M. Gouveia

artigo geral

26 A Atmosfera como um laboratório de Física: a influência meteorológica nos incêndios rurais

Mário G. Pereira

artigo geral

32 Alterações Climáticas em Portugal: projeções de alta resolução

Rita M. Cardoso, Pedro M.M. Soares, Daniela C.A. Lima

sala de professores

39 Projeto do Clube Escolar “MeteoFreixo”

Sérgio Bastos

sala de professores

41 As ensino das Ciências Geofísicas na Universidade de Lisboa

Susana Custódio, Álvaro Peliz, Luís Matias

homenagem

43 Homenagem a José Pinto Peixoto

- Fernando Carvalho Rodrigues
- Miranda PMA
- Carlos da Camara
- António Rodrigues Tomé
- Carlos Pires
- Miguel Miranda
- Carlos Fiolhais

crónicas

63 Vamos Fazer Ciência, não guerra

Carlos Herdeiro

livros e multimédia

65 Physics of climate

Carlos da Camara

vamos experimentar

66 Porque está a mudar o clima?

Constança Providência, Rita Wolters

43 Notícias

CRÉDITOS

Imagem da capa: Conferencistas do “*Symposium on the theory of climate*”, comemorativo do bicentenário da Academia de Ciências de Lisboa, efetuado de 12 a 14 de outubro de 1981. Da esquerda para a direita: Erik Eliassen (representante da Academia Dinamarquesa de Ciências), G.J. Shutts, Barry Saltzman, Robert E. Dickinson, W. Lawrence Gates, George Ohring, Joseph Smagorinsky (atrás), Syukuro Manabe (frente), Edward N. Lorenz, G.S. Golitsyn, Abraham H. Oort e José P. Peixoto. © Academic Press

Ficha Técnica

Estatuto Editorial

<http://www.spf.pt/gazeta/editorial>

Propriedade | Sede | Redacção | Editor

Sociedade Portuguesa de Física
Av. da República, 45 – 3º Esq.
1050-187 Lisboa
Telefone: 217 993 665

Director

Bernardo Almeida

Editores

Francisco Macedo
Nuno Peres
Olivier Pellegrino

Secretariado

Maria José Couceiro - mjose@spf.pt

Comissão Editorial

José António Paixão - Presidente da SPF
Gonçalo Figueira - Anterior Diretor Editorial
Teresa Peña - Anterior Diretor Editorial
Carlos Fiolhais - Anterior Diretor Editorial
Ana Luísa Silva - Física Atómica e Molecular
Ana Rita Figueira - Física Médica
Augusto Fitas - Grupo História da Física
Carlos Portela - Educação
Carlos Silva - Física dos Plasmas
Constança Providência - Física Nuclear
Joaquim Moreira - Física da Matéria Condensada
José Marques - Física Atómica e Molecular
Luís Matias - Geofísica, Oceanografia e Meteorologia
Manuel Marques - Óptica e Laser, Universidade do
Nuno Castro - Física Partículas
Rui Agostinho - Astronomia e Astrofísica
Sofia Andringa - Física Partículas

Correspondentes

André Pereira - Delegação Norte
Fernando Amaro - Delegação Centro
José Marques - Delegação Sul e Ilhas

Design / Produção Gráfica

FR Absolut Graphic Lda.
frabsolutg@gmail.com

NIPC 501094628

ISSN 0396-3561

Tiragem 1 000 Ex.

Registo ERC 110856

Depósito Legal 51419/91

Publicação Trimestral

As opiniões dos autores não representam necessariamente posições da SPF.

Preço N.º Avulso 5,00 € (inclui I.V.A.)

Assinatura Anual 15,00 € (inclui I.V.A.)

Assinaturas Grátis aos Sócios da SPF.

A Climatologia também é Física

For a long time, at an enormous number of stations all over the world, meteorologists have been collecting data concerning temperature, humidity, rainfall, and wind conditions in a systematic fashion that would have delighted Francis Bacon. But it is a matter of record that this branch of science has not (inductively or in any other way) developed a useful theoretical structure as have physics, chemistry, biology, and geology.

I. Bernard Cohen (1985)

Esta frase do ilustre historiador da ciência I. Bernard Cohen (1914-2003) traduz a ideia que lamentavelmente teima em persistir na mente de cultos, e menos cultos, de que a atividade de meteorologistas e climatologistas se reduz à coleta de informação acerca do estado do tempo no Globo terrestre, chegando a qualidade dos dados recolhidos a ser posta em causa sempre que os resultados das observações revelam sinais de mudanças sistemáticas no clima imputáveis à atividade humana.

O prémio Nobel da Física deste ano, cuja metade foi atribuída aos climatologistas Syukuro Manabe e Klaus Hasselmann, para além de reconhecer o trabalho científico de dois cientistas ímpares, vem fazer justiça à Climatologia ao reconhecê-la como Física aplicada ao Geofluido, colocando-a em pé de igualdade com outras disciplinas como a Mecânica Quântica ou a Cosmologia.

Graças ao Professor José Pinto Peixoto (1922-1996), a Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa teve a oportunidade de beneficiar em primeira mão dos conhecimentos de ponta proporcionados, quer pelo *General Circulation Project* do Massachusetts Institute of Technology (MIT, EUA), dirigido pelo professor Victor P. Starr (1909-1976) e fundador da teoria da Circulação Geral da Atmosfera, quer pelo *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFDL) da Universidade de Princeton (EUA), onde Syukuro Manabe desenvolveu os primeiros modelos tridimensionais da circulação geral da atmosfera e fez estudos de sensibilidade do clima aos forçamentos antropogénicos.

As estreitas ligações entre o Professor Peixoto e os investigadores de topo em Dinâmica do Clima estão bem patentes num livro editado pela Academic Press em 1983, significativamente intitulado *Theory of Climate*. Trata-se da coletânea das atas do simpósio comemorativo dos duzentos anos da Academia das Ciências de Lisboa organizado pelo Professor Peixoto, então presidente da Academia. O simpósio, que decorreu há quatro dezenas de anos, de 12 a 14 de outubro de 1981, reuniu cientistas eminentes na área da Climatologia, sendo de sublinhar a presença de Joseph Smagorinsky (1924-2005), o primeiro diretor do GFDL e de Edward Lorenz (1917-2008), um dos

fundadores da teoria do caos e investigador no General Circulation Project. Merece ser aqui destacada a comunicação intitulada *Carbon Dioxide and Climatic Change* da autoria de Syukuro Manabe, em que se revelam surpreendentemente atuais as conclusões obtidas a partir dos resultados de estudos de sensibilidade CO₂-clima efetuados com os modelos de circulação geral da atmosfera daquela época:

Some of these CO₂-induced changes are listed below:

- (1) *The temperature of the troposphere increases whereas that of the stratosphere decreases.*
- (2) *The annual mean warming of the surface air at high latitudes is two to three times as large as the corresponding warming at low latitudes.*
- (3) *Over the Arctic Ocean and the surrounding regions, the CO₂-induced warming has a large seasonal dependence. It is at a maximum in winter and at a minimum in summer. The warming has little seasonal dependence at low latitudes.*
- (4) *The global mean rates of both precipitation and evaporation increase.*
- (5) *The coverage and thickness of sea ice in the polar regions decrease.*
- (6) *The snowmelt season arrives earlier.*
- (7) *The annual mean rate of runoff increases at high latitudes.*
- (8) *During summer, the zonal mean value of soil moisture in the Northern Hemisphere reduces in two belts of middle and high latitude, respectively.*

Merece também dar aqui destaque ao extenso capítulo de 136 páginas, da autoria de Abraham H. Oort e José P. Peixoto e intitulado *Global Angular Momentum and Energy Balance Requirements from Observations*, o qual é um verdadeiro texto de antecipação ao livro *Physics of Climate* que os dois colegas e amigos publicariam nove anos depois.

Para a comunidade científica portuguesa, a atribuição parcial do prémio Nobel da Física a dois climatologistas abre com chave de ouro o ano em que se comemoram o centenário do nascimento do Professor Peixoto e os trinta anos da publicação de *Physics of Climate*, editado em 1992 pelo *American Institute of Physics*, cujos ensinamentos têm vindo a influenciar gerações sucessivas de climatologistas de todo o mundo.

Boas leituras

Carlos DaCamara, editor convidado

A ordem mundial do fogo

Carlos C. Da Camara¹, José M. C. Pereira², Renata Libonati³, Sílvia A. Nunes¹

¹ Instituto Dom Luiz (IDL), Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa
cdcámara@fc.ul.pt; sanunes@fc.ul.pt

² Centro de Estudos Florestais, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa
jmcperreira@isa.u lisboa.pt

³ Departamento de Meteorologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 21941-916, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
renata.libonati@igeo.ufrj.br

The observations provide the basis for monitoring the climate and are essential to test any theory of climate.

José P. Peixoto and Abraham H. Oort, *Physics of Climate* (1992)

Introdução

O clima é definido como um conjunto de grandezas médias completadas por momentos estatísticos de ordem mais elevada (tais como variâncias, covariâncias, correlações, etc.) que caracterizam a estrutura e o comportamento, ao longo de um dado período de tempo, do sistema climático, em particular dos seus subsistemas atmosfera, hidrosfera, criosfera, litosfera e biosfera. Esta definição, que consta logo da primeira página do livro *Physics of Climate*, da autoria de José Pinto Peixoto e Abraham Oort, publicado em 1992 pelo *American Institute of Physics*, implica que o clima não se refere a eventos meteorológicos individuais, mas a uma coletividade de eventos que tiveram lugar numa dada região e num dado período de tempo. Por isso, o clima não se “vê”, mas apenas nos “apercebemos” dos seus efeitos, os quais se revelam, seja no tipo de vegetação natural, seja no edificado rural tradicional, seja na traça das cidades antigas, seja até nos trajes típicos das populações.

Em particular, os efeitos do clima traduzem-se nos grandes padrões espaço-temporais de atividade exibida pelos fogos de vegetação (Andela et al., 2019), os quais resultam do controlo do clima sobre a produtividade da vegetação e sobre a acumulação de combustível e respetivo teor de humidade, a que se adicionam os efeitos das ações humanas, responsáveis pela maioria das ignições nos ecossistemas que ardem, mas também pela diminuição do tamanho dos fogos decorrente da fragmentação da paisagem e da supressão das ignições (Bowman et al., 2009).

A caracterização dos diferentes regimes de fogo é feita através de um conjunto de parâmetros que descrevem quais os fogos que ocorrem num dado local e numa dada altura, descrição só possível graças à observação da Terra por meio de satélites na medida em que constitui o único meio de obtenção de informação sistemática à escala global e por períodos de tempo suficientemente longos. Para além de fornecer a localização e a data dos focos de calor (*hot spots*), os satélites permitem

ainda estimar a potência radiativa libertada pelo fogo (*fire radiative power*, FRP), a qual é uma medida da taxa a que se está a dar a combustão e, assim, quantificar a biomassa consumida (Wooster et al., 2005).

No presente artigo, iremos mostrar, com base em observações por satélite, que o FRP dos fogos de vegetação, seja à escala global, seja para áreas caracterizadas por um dado regime de fogo, pode ser modelada através de um modelo estatístico universal com 8 parâmetros. A determinação destas distribuições proporciona uma ferramenta muito útil que, não só permite caracterizar o comportamento do fogo numa dada região e estudar os efeitos nesse comportamento devidos às alterações climáticas e às modificações na paisagem e na ocupação do território, como ainda calcular a probabilidade de que determinados fogos de vegetação, em presença de determinadas condições meteorológicas adversas, excedam limiares críticos de FRP que impossibilitem o seu combate (Pinto et al., 2018).

Fogos ativos observados a partir do Espaço

Os satélites atuais de observação da superfície da Terra resultam de uma longa evolução que recua até 1 de abril de 1960, quando foi lançado o TIROS 1 (*Television Infrared Observation Satellite*), o primeiro satélite de observação meteorológica, cuja missão durou 75 dias dos 90 planeados. Tal como o nome do satélite indica, são especialmente úteis para a observação da Terra a janela óptica, que abarca as regiões do visível (*visible*, VIS, entre 0,4 μm e 0,7 μm) e do infravermelho próximo (*near infrared*, NIR, entre 0,7 μm e 1,4 μm) e a janela do infravermelho, que compreende as regiões de pequeno comprimento de onda (*short-wave infrared*, SWIR, entre 1,4 μm e 3 μm), do infravermelho

médio (*middle infrared*, MIR, entre 3 μm e 8 μm) e do infravermelho térmico (*thermal infrared*, TIR, entre 8 μm e 15 μm). Estas janelas cobrem regiões do espectro eletromagnético onde a atmosfera é bastante transparente (isto é, onde se tem valores elevados de fator de transmissão da radiação) permitindo que a energia refletida ou emitida pela superfície alcance o sensor (Figura 1).

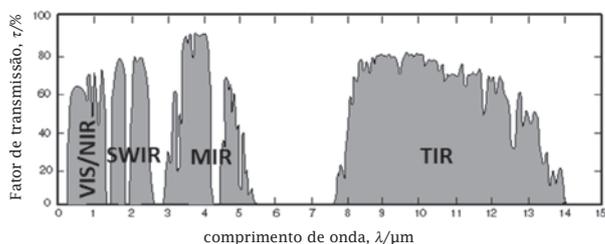


Figura 1 - Janelas atmosféricas (adaptado de *Atmosferaisk_spredning.png* in wikipedia).

Os fogos de vegetação tipicamente alcançam temperaturas no intervalo 500 K – 1200 K pelo que, atendendo à lei dos deslocamentos de Wien, os picos de radiação eletromagnética emitida se localizam no intervalo entre 3 μm e 5 μm (MIR); já as temperaturas típicas da superfície do solo são da ordem de 300 K, pelo que os picos de emissão se situam em torno de 10 μm (TIR). O contraste entre as assinaturas radiativas registadas nos canais do MIR e do TIR permite identificar os *hot spots* que, depois de analisados no contexto da área circundante, são identificados como fogos de vegetação (Amraoui et al., 2010), podendo ainda estimar-se a respetiva FRP libertado (Wooster et al., 2003).

O *Fire Information for Resource Management Sytem* (FIRMS) da NASA disponibiliza um arquivo que contém, entre outra informação, a localização, a data e a hora, a FRP e a fiabilidade da medição dos *hot spots* detetados pelos radiómetros MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) que se encontram a bordo dos satélites Terra e Aqua. Trata-se de satélites com órbita quase polar síncrona solar, tendo-se, no caso do Terra, que a órbita atravessa o equador de norte para sul durante a manhã e, no caso do Aqua, atravessa o equador de sul para norte durante a tarde, sendo a superfície do Globo coberta pelos dois radiómetros a cada um ou dois dias.

O arquivo do FIRMS disponibiliza informação até ao presente desde novembro de 2000 para o Terra e de julho de 2002 para o Aqua, permitindo caracterizar os grandes padrões espaço-temporais dos fogos de vegetação (Figura 2), os quais são determinados pelo tipo de ecossistema, pelas condições meteorológicas (temperatura, humidade do ar, velocidade do vento, precipitação, etc.), pela variabilidade interanual do clima (secas, El Niño/La Niña, etc.) e pelas atividades humanas ligadas a práticas agrícolas e cinegéticas (Dwyer et al., 2000; Le Page et al., 2008).

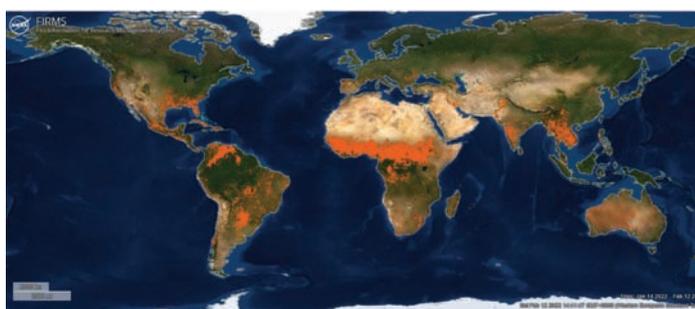


Figura 2 - Fogos ativos (pontos laranja) identificados pelos radiómetros MODIS a bordo dos satélites Terra e Aqua durante o período de 30 dias, de 14 de janeiro a 12 de fevereiro de 2022 (fonte: https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/active_fire/).

Modelos estatísticos de FRP

A informação de base é constituída por 85 412 052 valores de FRP associados a todos os *hot spots* (identificados como fogos de vegetação ativos) registados no arquivo FIRMS durante o período de 19 anos, entre 2002-07-04 e 2002-07-03, sendo a data de início aquela a partir da qual se passa a dispor de observações provenientes dos dois radiómetros MODIS a bordo dos satélites Terra e Aqua. Dado o enorme volume de dados, reduziu-se a dimensão da amostra fazendo uma escolha aleatória de 1 milhão de valores de FRP. Através da técnica gráfica do papel de probabilidade, procurou-se identificar uma distribuição estatística que se ajustasse à amostra, tendo-se verificado que o logaritmo da FRP ($\log_{10}FRP$) segue aproximadamente uma log-normal (Figura 3, painel esquerdo). No entanto, os valores mais extremos da amostra (superiores ao percentil 85 e inferiores ao percentil 5) afastam-se da log-normal, resultado concordante com estudos anteriores que mostram que, para os fogos ativos na região do Mediterrâneo, os valores diários da duração e da energia radiativa libertada, detetados em intervalos de 15 minutos a partir de um satélite geostacionário, apresentam distribuições cujas caudas superiores se podem modelar através de distribuições de Pareto generalizadas (DaCamara et al., 2014; Pinto et al., 2018). Tendo em conta os resultados anteriores, ajustou-se à amostra de $\log_{10}FRP$, uma distribuição cujo corpo central é uma log-normal truncada e cujas caudas são Pareto generalizadas. Trata-se de uma distribuição que é caracterizada por 8 parâmetros, respetivamente os dois valores de transição do corpo central da distribuição para as caudas superior e inferior, os dois parâmetros de localização e de escala da log-normal truncada (corpo central) e os dois pares de parâmetros de forma e de escala das Pareto generalizadas (caudas superior e inferior).

Conforme se pode observar na Figura 3, a qualidade do ajuste obtido é muito elevada, uma vez que a função de distribuição de probabilidade acumulada do modelo ajustado praticamente coincide com a função de distribuição de probabilidade empírica obtida diretamente a partir da amostra (painel central) e a função densidade de probabilidade segue muito de perto o histograma da amostra (painel direito). Uma vez que o comportamento dos fogos de vegetação varia de região para região do Globo consoante as características regionais do clima, o tipo de paisagem e a atividade

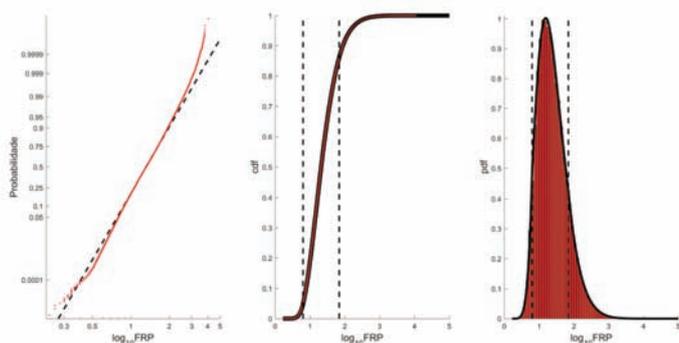


Figura 3 - Distribuição à escala global dos valores de \log_{10} FRP de uma amostra constituída por 1 milhão de fogos ativos. Painel esquerdo: gráfico em papel de probabilidade; painel central: função de distribuição de probabilidade acumulada do modelo ajustado (curva preta a grosso) e função de probabilidade acumulada empírica obtida a partir da amostra (curva vermelha a fino); painel direito: função densidade de probabilidade do modelo ajustado (curva preta a grosso) e histograma da amostra (barras a vermelho). As duas linhas verticais a tracejado nos painéis central e direito delimitam o corpo central da distribuição.

humana, será de esperar que essas variações se reflitam nos modelos estatísticos de \log_{10} FRP para as várias regiões. Num estudo recente (Pereira et al., 2022), baseado numa análise de 15 anos de fogos ativos detetados pelo sensor MODIS, identificam-se três macrorregimes de fogo que são interpretados de acordo com o tipo de clima (classificação de Köppen) e com os padrões ecológicos criados pelas interações continuadas entre ecossistemas e humanos (antromas). Os três macrorregimes (cada um subdividido num regime prototípico e num regime de transição) são os seguintes (Figura 4): o macrorregime dos fogos selvagens (*wild*), ou incêndios, que ocorre predominantemente nas zonas florestadas e de estepe dos climas frios e também nas zonas de vegetação árida e de pastagens dos climas desérticos, caracteriza-se pelo caráter esporádico do fogo e pela curta duração da sua época de ocorrência; o macrorregime dos fogos domados (*tamed*), que predomina nas pastagens e áreas agrícolas de climas tropicais, caracteriza-se pela muito elevada incidência de fogo durante a época seca; finalmente, o macrorregime dos fogos domesticados (*domesticated*), que ocorre tipicamente em áreas agrícolas e nas aldeias dos climas húmidos, temperado quente e tropical, caracteriza-se pela baixa incidência de fogo.

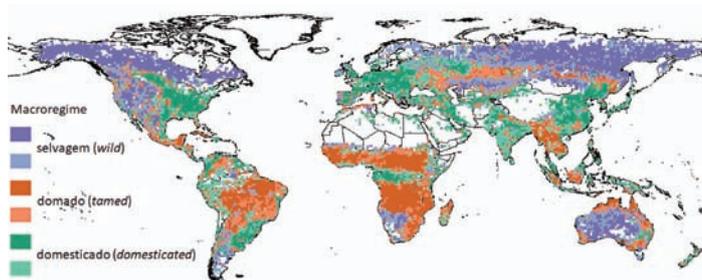


Figura 4 - Distribuição global dos macrorregimes de fogo: selvagem (a violeta), domado (a laranja) e domesticado (a verde). Para cada um dos regimes, as cores escura e clara identificam as subdivisões em regime prototípico e regime de transição. O mapa foi elaborado com base na informação proveniente de Pereira et al. (2022).

A informação de base constituída por 19 anos de fogos ativos provenientes do arquivo FIRMS foi então estratificada de acordo com os três macrorregimes, ficando as classes constituídas por 67 324 278 fogos domados, 9 768 127 fogos domesticados e 8 319 647 fogos selvagens que representam,

respetivamente, 79 %, 11 % e 10 % do total de fogos ativos. Para cada um dos três macrorregimes, repetiu-se o procedimento atrás descrito para o total de fogos ativos, tendo-se obtido os modelos representados na Figura 4, cuja qualidade elevada do ajuste se traduz pela concordância entre as funções de distribuição de probabilidade acumulada dos modelos ajustados e as respetivas funções empíricas obtidas a partir dos dados (painel esquerdo). De notar, também na Figura 4, o deslocamento para a direita das funções de distribuição de probabilidade acumulada (painel esquerdo) e das respetivas funções densidade de probabilidade (painel direito) quando se vai do macrorregime dos fogos domesticados para o dos domados e para o dos selvagens, o que indica uma propensão cada vez maior para terem lugar eventos extremos com grande potência radiativa libertada, propensão essa associada a uma cada vez menor intervenção humana traduzida numa menor fragmentação da paisagem e numa menor supressão das ignições.

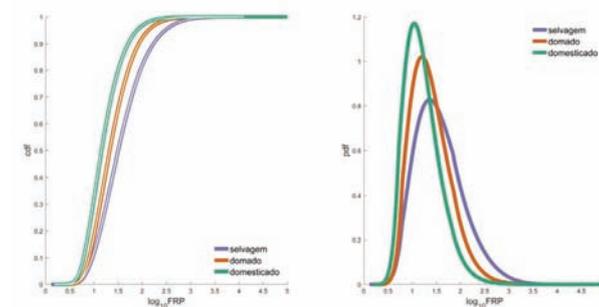


Figura 5 - Distribuição à escala global dos valores de \log_{10} FRP para amostras constituídas por 1 milhão de fogos ativos para os macrorregimes de fogos selvagens, domados e domesticados. Painel central: funções distribuição de probabilidade acumulada dos modelos ajustados (curva coloridas a grosso) e correspondentes funções de probabilidade acumulada empírica obtidas a partir da amostra (curvas brancas a fino); painel direito: funções densidade de probabilidade do modelo ajustado.

Os modelos estatísticos de FRP, do tipo dos apresentados neste estudo, constituem uma ferramenta muito útil na medida em que permitem condensar a informação relativa a um dado regime de fogo, ecossistema ou domínio de interesse num número relativamente baixo de parâmetros, facilitando as comparações, quer entre regiões, quer entre diferentes períodos temporais, seja para o tempo presente ou para cenários do clima futuro. De referir, ainda, que estes modelos permitem calibrar índices meteorológicos de perigo de incêndio, com base nos quais se elaboram cartas com classes de perigo meteorológico que dão suporte operacional aos decisores no âmbito da prevenção e combate aos fogos rurais e florestais (DaCamara et al., 2018).

Considerações finais

A distribuição global dos tipos de clima e os grandes padrões climáticos de variabilidade espaço-temporal, como o El Niño – Oscilação Austral (El Niño – Southern Oscillation, ENSO) e a Oscilação do Atlântico Norte (North Atlantic Oscillation; NAO) são o resultado de uma complexidade de processos

que, em última análise, são regulados pelos grandes princípios da física da conservação da massa, da água, do momento angular e da energia e traduzem a resposta do sistema climático com vista a alcançar o equilíbrio termohidrodinâmico que garanta a continuidade do seu funcionamento em harmonia com os forçamentos radiativos a que se encontra sujeito. A monitorização permanente desses processos é, pois, essencial para que se possa alcançar um conhecimento profundo da sua natureza e formular modelos físico-matemáticos que permitam replicar o clima observado de uma forma cada vez mais realista e, para diferentes cenários da atividade humana, simular as evoluções expectáveis, de uma forma cada vez mais confiável, tendo em especial atenção o impacto que as mudanças antropogénicas do clima possam vir a ter no aumento de ocorrência de episódios extremos em determinadas regiões. Mencione-se, apenas a título de exemplo, os verões excepcionalmente quentes de 2003 e de 2010 que foram afetados por mega-ondas de calor que bateram recordes de 500 anos em metade do continente europeu (Barriopedro et al., 2010), o agravamento no século XXI da intensidade e extensão das secas na Península Ibérica (Liberato et al., 2021) e a seca de 2021 no Brasil, a mais severa dos últimos 20 anos, desde que se dispõe de registos por satélite, tendo as descargas do rio Paraná, responsável por dois quintos da produção de energia hidroelétrica, caído para os níveis mais baixos dos últimos 91 anos (Getirana et al., 2021).

No âmbito da monitorização do clima, a identificação e caracterização dos grandes regimes de fogo e dos fatores que condicionam a variabilidade espaço-temporal da atividade do fogo são especialmente importantes, não só porque os fogos resultam da interação complexa de fatores meteorológicos, paisagísticos e humanos, mas também porque constituem uma fonte de gases com efeito de estufa. Mencione-se, novamente a título de exemplo, o estudo para a bacia mediterrânica relativo ao aumento de probabilidade de grandes incêndios induzidos pelas condições térmicas (Ruffault et al., 2020), o estudo da influência dos tipos de tempo (*weather types*) no regime de fogos em Portugal (DaCamara e Trigo, 2018), os estudos sobre a severidade da estação de fogos na Amazônia (Libonati et al., 2021) e sobre as características dos fogos no Cerrado (Silva et al., 2021) e, finalmente, os estudos sobre a gravidade sem precedentes dos incêndios ocorridos em 2020 no Pantanal (Libonati et al., 2020; 2022).

A observação de fogos ativos a partir do espaço assume, portanto, um papel fundamental, devendo mencionar-se, para além do arquivo FIRMS da NASA utilizado neste estudo, o arquivo de Potência Radiativa de Fogo (*Climate Data Record of Fire Radiative Power*) da LSA SAF (*Satellite Application Facility on Land Surface Analysis*) da EUMETSAT (Trigo et al., 2011) que contém observações efetuadas a

cada 15 minutos pelos satélites geostacionários MSG (*Meteosat Second Generation*), cobrindo para o período 2004-2015 um disco centrado no ponto (0°N, 0°E) que abarca todo o continente africano, a Europa mediterrânica e o bordo leste da América do Sul.

Conforme sublinhado por Peixoto e Oort em *Physics of Climate*, a climatologia tem uma base observacional, pelo que o seu desenvolvimento depende crucialmente da qualidade das medições e dos sistemas de observação. Os progressos na monitorização dos fogos ativos a partir do espaço, graças a um número crescente de satélites portadores de instrumentos com resoluções espaciais, temporais e espectrais cada vez mais finas, irão proporcionar um entendimento cada vez mais profundo das interações complexas entre clima, vegetação e humanos e, assim, contribuir para um aperfeiçoamento dos modelos do clima os quais, por sua vez, contribuirão para que tenhamos uma melhor compreensão dos processos geradores do clima – ou, como acrescentaria o Professor José Pinto Peixoto (1922-1996) que admirava a visão franciscana da ciência, para que melhor apreciemos a obra da Criação.

Referências

- [1] Amraoui M., C. C. DaCamara, J. M. C. Pereira JMC, 2010: *Detection and monitoring of African vegetation fires using MSG-SEVIRI imagery. Remote Sens. Environ.* 114, 1038-1052, doi:10.1016/j.rse.2009.12.019.
- [2] Andela, N., D. C. Morton, L. Giglio, R. Paugam, Y. Chen, S. Hantson, G. R. van der Werf, J. T. Randerson, 2019: *The Global Fire Atlas of individual fire size, duration, speed and direction, Earth Syst. Sci. Data*, 11, 529-552, doi:10.5194/essd-11-529-2019.
- [3] Barriopedro D., E. Fisher, J. Luterbacher, R. M. Trigo, R. García-Herrera, 2010: *The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe, Science*, 322, 220, doi: 10.1126/science.1201224.
- [4] Bowman, D. M. J. S., J. K. Balch, P. Artaxo, W. J. Bond, J. M. Carlson, M. A. Cochrane, C. M. D'Antonio, R. S. Defries, J. C. Doyle, S. P. Harrison, F. H. Johnston, J. E. Keeley, M. A. Krawchuk, C. A. Kull, J. B. Marston, M. A. Moritz, I. C. Prentice, C. I. Roos, A. C. Scott, T. W. Swetnam, G. R. van der Werf, S. J. Pyne, 2009: *Fire in the Earth system, Science*, 324, 481-484, doi:10.1126/science.1163886.
- [5] DaCamara C. C., T. J. Calado, S. L. Ermida, I. F. Trigo, M. Amraoui, K. F. Turkman KF, 2014: *Calibration of the Fire Weather Index over Mediterranean Europe based on fire activity retrieved from MSG satellite imagery, Int. J. Wildland Fire*, 23(7), 945-958, doi: 10.1071/WF13157.
- [6] DaCamara C. C., R. M. Trigo, 2018: *Circulation weather types and their influence on the fire regime in Portugal. In "Advances in Forest Fire Research 2018"* (D. X. Viegas, ed.), pp. 372-380, Imprensa da Universidade de Coimbra, ISBN 978-989-26-16-506, doi: 10.14195/978-989-26-16-506_40.
- [7] DaCamara C. C., R. M. Trigo, M. M. Pinto, S. A. Nunes, I. F. Trigo, C. M. Gouveia, M. Rainha, 2018: *CeaseFire: a website to assist fire managers in Portugal. In "Advances in Forest Fire Research 2018"* (D. X. Viegas, ed.), pp. 941-949, Imprensa da Universidade de Coimbra, ISBN 978-989-26-16-506, doi: 10.14195/978-989-26-16-506_103.

- [8] Dwyer E., J. M. C. Pereira, J.-M. Grégoire, C. C. DaCamara, 2000: *Characterization of the spatio-temporal patterns of global fire activity using satellite imagery for the period April 1992 to March 1993*. *J. Biogeogr.* 27, 57-69, doi: 10.1046/j.1365-2699.2000.00339.x.
- [9] Getirana, A., R. Libonati, M. Cataldi, 2021: *Brazil is in water crisis - it needs a drought plan*, *Nature* 600, 218-220, doi: 10.1038/d41586-021-03625-w.
- [10] Le Page Y., J. M. C. Pereira, R. M. Trigo, C. C. DaCamara, D. Oom, B. Mota, 2008: *Global fire activity patterns (1996-2006) and climatic influence: an analysis using the World Fire Atlas*. *Atmospheric Chem. Phys.* 8, 1911-1924. doi:10.5194/acp-8-1911-2008.
- [11] Liberato, M. L. R., I. Montero, C. Gouveia, A. Russo, A. M. Ramos, R. M. Trigo, 2021: *Rankings of extreme and widespread dry and wet events in the Iberian Peninsula between 1901 and 2016*. *Earth Syst. Dynam.*, 12, 197-210, doi: 10.5194/esd-12-197-2021.
- [12] Libonati R., C. C. DaCamara, L. F. Peres, L. A. Sander de Carvalho, L. C. Garcia, 2020: *Rescue Brazil's burning Pantanal wetlands*, *Nature* 588, 217-219, doi:10.1038/d41586-020-03464-1
- [13] Libonati R., J. M. C. Pereira, C. C. DaCamara, L. F. Peres, D. Oom, J. A. Rodrigues, F. L. M. Santos, R. M. Trigo, C. M. Gouveia, F. Machado-Silva, A. Enrich-Prast, J. M. N. Silva, 2021: *Twenty-first century droughts have not increasingly exacerbated fire season severity in the Brazilian Amazon*, *Sci. Rep.* 11, 4400, doi:10.1038/s41598-021-82158-8
- [14] Libonati R., J. M. C. Pereira, C. C. DaCamara, L. F. Peres, D. Oom, J. A. Rodrigues, F. L. M. Santos, R. M. Trigo, C. M. Gouveia, F. Machado-Silva, A. Enrich-Prast, J. M. N. Silva, 2021: *Twenty-first century droughts have not increasingly exacerbated fire season severity in the Brazilian Amazon*, *Sci. Rep.* 11, 4400, doi:10.1038/s41598-021-82158-8
- [15] Pereira, J. M. C., D. Oom, P. C. Silva, A. Benali, 2022: *Wild, Tamed, and Domesticated: three fire macroregimes for global pyrogeography in the Anthropocene*, *Ecological Applications* (in press).
- [16] Pinto M. M., C. C. DaCamara, I. F. Trigo, R. M. Trigo, K. F. Turkman, 2018: *Fire danger rating over Mediterranean Europe based on fire radiative power derived from Meteosat*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 18, 515-529, doi:10.5194/nhess-18-515-2018.
- [17] Ruffault J., T. Curt, V. Moron, R. M. Trigo, F. Mouillot, N. Koutsias, F. Pimont, N. Martin-StPaul, R. Barbero, J. L. Dupuy, A. Russo, C. Belhadj-Khedher, 2020: *Increased likelihood of heat-induced large wildfires in the Mediterranean Basin*, *Sci. Rep.*, doi: 10.1038/s41598-020-70069-z.
- [18] Silva P. S., J. Nogueira, J. A. Rodrigues, F. L. M. Santos, J. M. C. Pereira, C. C. DaCamara, G. A. Daldegan, A. A. Pereira, L. F. Peres, I. B. Schmidt, R. Libonati, 2021: *Putting fire on the map of Brazilian savanna ecoregions*. *J. Environ. Manage.* 296, 113098, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113098.
- [19] Trigo I F., C.C. DaCamara, P. Viterbo, J.-L. Roujean, F. Olesen, C. Barroso, F. Camacho-de Coca, S. C. Freitas, J. García-Haro, B. Geiger, F. Gellens-Meulenberghs, J. Meliá, L. Pessanha, N. Siljamo, 2011: *The Satellite Application Facility for Land Surface Analysis*, *Int. J. Remote Sens.* 32, 2725-2744, doi: 10.1080/01431161003743199
- [20] Wooster, M. J., B. Zhukov, D. Oertel, 2003: *Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning: Derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products*, *Remote Sens. Environ.*, 86, 83-107, doi: 10.1016/S0034-4257(03)00070-1.
- [21] Wooster, M. J., G. Roberts, G. L. W. Perry, Y. J. Kaufman, 2005: *Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release*, *J. Geophys. Res.*, 110, D24311, doi:10.1029/2005JD006318.

Agradecimentos

Este artigo resultou de investigação efetuada no âmbito do projeto FireCast - previsão de probabilidade de ocorrência de fogo e das suas características com vista a um piroambiente habitável (PCIF/GRF/0204/2017) financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), da *Satellite Application Facility on Land Surface Analysis* (LSA SAF) da EU-METSAT e da plataforma Ceasefire patrocinada pela *The Navigator Company*. Os autores gostariam de agradecer ao Ricardo Trigo a revisão do texto e os comentários construtivos.



Carlos C. DaCamara, completou o Bacharelato em Física (1979) e a Licenciatura em Ciências Geofísicas (1981) na FCUL e doutorou-se em Ciências da Atmosfera (1991) pela Universidade de Missouri-Columbia (EUA). É Professor Associado do Departamento de

Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia (DEGGE) e investigador do Instituto Dom Luiz (IDL) da FCUL. Foi vice-presidente do Instituto de Meteorologia (2003-2004) e membro do “Space Advisory Committee” para o 6º Programa-Quadro de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico da União Europeia. A sua investigação tem incidido sobre um espectro largo de temas que incluem a deteção remota por satélite de fogos ativos e de áreas queimadas, a determinação da temperatura e da emissividade da superfície do solo com base em informação proveniente de satélite, a avaliação de risco meteorológico a curto e médio prazos de incêndios florestais, a recuperação de vegetação em áreas queimadas, as condições meteorológicas associadas a eventos extremos (secas, ondas de calor, etc.) e a atividade das ondas planetárias e suas implicações na variabilidade climática.



José Miguel C. Pereira, é licenciado em Engenharia Florestal pelo Instituto Superior de Agronomia (ISA), da Universidade de Lisboa e doutorado em Estudo de Recursos Naturais Renováveis pela Universidade do Arizona. É Professor Catedrático do Departamento de

Recursos Naturais, Ambiente e Território do ISA, onde também coordena o Centro de Estudos Florestais, e sócio correspondente da Academia das Ciências de Lisboa, na secção das Ciências da Terra e do Espaço. Faz investigação em pirogeografia, desde a escala local até à escala global, com especial incidência em Portugal e nas savanas tropicais de África, Austrália e Brasil. Também tem trabalhado no desenvolvimento de algoritmos para cartografia de áreas queimadas, recorrendo a dados de deteção remota obtidos por diversos satélites de observação da Terra.



Renata Libonati, completou a Licenciatura em Ciências Geofísicas (2004) na FCUL, onde também se doutorou em Ciências Geofísicas (2011). Atualmente é Professora Adjunta do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro e investigadora do Instituto Dom Luiz (IDL) da FCUL e do

Centro de Estudos Florestais (CEF) da UL. As suas linhas de investigação abrangem a deteção remota de área ardida incluindo os processos de validação estatística, as inter-relações entre clima, atividade humana e fogos na vegetação de regiões tropicais, causas naturais e antrópicas de grandes incêndios florestais, assim como a análise de eventos climáticos compostos como ondas de calor e secas, incluindo os seus impactos diretos e indiretos na saúde humana e nos ecossistemas como, por exemplo, na produtividade primária da vegetação e nos fogos na Amazónia, Cerrado e Pantanal.



Sílvia A. Nunes, completou o Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente (2013) na FCUL e encontra-se a terminar o Doutoramento em Ciências Geofísicas e da Geoinformação na mesma instituição. Desde 2013 que é bolseira pelo IDL na FCUL, onde integrou diversos projetos e parcerias tanto

com outras instituições universitárias como com empresas e entidades nacionais, coorientou teses de licenciatura e mestrado e colaborou no leccionamento de aulas. A sua investigação tem incidido maioritariamente na utilização de dados provenientes de satélite e de reanálises para avaliar o risco meteorológico de incêndios florestais e rurais. Em 2016, cofundou uma plataforma web (www.ceasefire.pt) para disseminação diária de produtos na área da prevenção e combate a incêndios florestais.

O Clima da Terra a partir do Espaço: estimativas do Balanço Radiativo

Isabel F. Trigo^{1,2}, Carlos C. DaCamara²

¹ Departamento de Meteorologia e Geofísica, Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA)

² Instituto Dom Luiz (IDL), Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa

isabel.trigo@ipma.pt; cdcamara@fc.ul.pt

Satellite-based observations have transformed our perspective of the earth's climate, leading us to regard it both as an integrated global system and as a three-dimensional entity.

José P. Peixoto and Abraham H. Oort, *Physics of Climate* (1992)

1. Introdução

O conceito de Clima sofreu uma profunda evolução desde o início do século XX, quando se tinha por base as estatísticas dos elementos climáticos observados (temperatura e humidade do ar, precipitação, direção e força do vento, pressão à superfície, radiação solar direta e difusa, entre outros parâmetros), calculadas para períodos de trinta anos (as denominadas normais climatológicas). Durante muito tempo, a Climatologia teve um caráter eminentemente descritivo, centrando-se na identificação e caracterização de regiões mais ou menos homogêneas em termos de condições meteorológicas, que seriam definidas com base na variabilidade sazonal média de variáveis como a temperatura e a precipitação. Deste tipo de abordagem, surgiram as classificações climáticas clássicas, das quais a de Köppen-Geiger é ainda hoje largamente utilizada (e.g., Beck et al., 2018). A partir de meados do século XX, a atmosfera e posteriormente todo o planeta Terra começaram a ser encarados como um sistema complexo, que pode ser estudado e compreendido com recurso às leis da Física. Esta estratégia foi fundamental para o desenvolvimento da Meteorologia, dando origem à previsão numérica do tempo, e da Ciência Climática, com a modelação do clima. O Prof. Pinto Peixoto colaborou e privou de perto com cientistas de topo nestas áreas (sendo certamente injustos nas omissões, podemos referir Victor Starr, Edward Lorenz, Barry Saltzman, Syukuro Manabe), pioneiros no estudo da circulação geral da atmosfera e da dinâmica do clima. O seu livro *Physics of Climate* de 1992 foi um marco nesta área, conjugando teoria e observações ao serviço de uma compreensão profunda do sistema climático.

Hoje, a Ciência Climática não é apenas descritiva, mas os dados observacionais continuam a ser a sua espinha dorsal. A observação da Terra a partir de instrumentos a bordo de satélites veio proporcionar uma quantidade e variedade de dados sem precedentes, complementando as observações ditas convencionais, mas acima de tudo permitindo observar

indiscriminadamente tanto zonas densamente povoadas como áreas remotas ou inacessíveis. A cobertura espacial e a frequência temporal das observações a partir do Espaço permitem o acompanhamento em tempo quase real de uma enorme variedade de fenómenos meteorológicos, oceânicos ou ambientais (e.g., Trigo et al., 2011; Bauer et al., 2015). Por outro lado, os dados reunidos por vários satélites operados nas últimas quatro décadas, combinados com observações de missões atuais ou em preparação, fornecem informações fundamentais sobre o estado do sistema climático e a sua evolução, como é reconhecido no último relatório do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC) (2021): desde a extensão das calotes polares, à monitorização do nível médio do mar e do estado da vegetação, ou ao mapeamento do ozono, são inúmeras as variáveis atualmente estimadas a partir de observações de satélite, que contribuem decisivamente para o acompanhamento e compreensão do sistema climático.

Neste artigo, propomo-nos revisitar o balanço radiativo da Terra medido a partir do Espaço: a determinação de desvios ao equilíbrio radiativo do planeta é uma questão fundamental da Ciência Climática de difícil aferição e, também por isso, continuamente objeto de estudo ao longo das últimas décadas. Sendo uma questão fundamental, foi também abordada pelo Prof. Pinto Peixoto em várias das suas publicações (e.g., O Sistema Climático e as Bases Físicas do Clima de 1982). O livro *Physics of Climate* (Peixoto e Oort, 1992) dedica um capítulo ao Balanço Radiativo, no qual são discutidas as características da radiação solar e terrestre e respetivas interações com os constituintes da atmosfera, nuvens e superfície do globo. Nesse mesmo capítulo, são apresentadas as primeiras estimativas globais da radia-

ção absorvida e emitida pelo sistema Globo-Atmosfera obtidas a partir de observações de satélite. Os mesmos cálculos são aqui revistos, à luz de observações de satélite mais recentes.

2. O Balanço Radiativo do Planeta

2.1 Radiação absorvida, radiação emitida

A radiação solar é a fonte primária de energia dos processos bio-geofísicos que ocorrem no sistema climático. De toda a radiação solar que atinge o topo da atmosfera, parte é retrodifundida e/ou reflectida pelos constituintes atmosféricos, nuvens e superfície para o espaço (num total de quase 30 %), sendo a restante absorvida pelo sistema Globo-Atmosfera. Numa situação de equilíbrio radiativo global, em que o sistema climático se mantivesse num estado estacionário, a quantidade de radiação emitida pelo sistema Terra para o espaço deveria igualar a quantidade de radiação solar absorvida, ou seja, o balanço radiativo no topo da atmosfera seria nulo, i.e. teríamos $R_{NET_TA} = 0$, em que:

$$R_{NET_TA} = (1 - \alpha_{TA}) R_{SW_TA} - R_{LW_TA} \quad (1)$$

onde α_{TA} representa o albedo global do sistema Terra, i.e., a razão entre a quantidade de radiação solar incidente no topo da atmosfera, R_{SW_TA} , e a refletida, e onde R_{LW_TA} denota a quantidade de radiação emitida pelo sistema Globo-Atmosfera. O equilíbrio radiativo é quebrado (i.e., $R_{NET_TA} \neq 0$) localmente e, como detalhadamente comentado no capítulo 6 do livro *Physics of Climate* de Peixoto e Oort (1992), as distribuições espacial e temporal de R_{NET_TA} são os principais fatores que induzem as circulações atmosférica e oceânica.

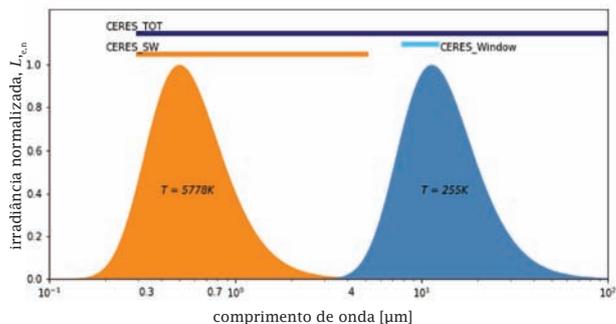


Figura 1 - Curvas da irradiância normalizada emitida por um corpo negro a 5778 K (laranja) e a 255 K (azul), correspondendo, respetivamente, à temperatura aproximada da superfície do Sol e à temperatura radiativa efetiva do sistema Terra. As linhas horizontais indicam a gama de comprimentos de onda dos três canais do instrumento CERES: CERES_TOT, sensível a radiação no domínio do visível e infravermelho (entre 0,3 μm e 200 μm); CERES_SW, sensível a radiação de curto c.d.o (entre 0,3 μm e 5 μm); e CERES_Window, sensível a radiação na "janela atmosférica" do infravermelho térmico (entre 8 μm e 12 μm).

O potencial da utilização de satélites para medir as componentes do balanço radiativo do sistema Globo-Atmosfera, i.e., os termos da equação (1), foi reconhecido desde muito cedo. A este respeito, convém lembrar que a quantidade de radiação solar (R_{SW_TA}) e a quantidade de radiação emitida pelo sistema Globo-Atmosfera (R_{LW_TA}) têm características distintas e, portanto, a estimativa do balanço radiativo implica a observação do fluxo radiativo em

zonas diferentes do espectro eletromagnético. O espectro de emissão solar segue, de um modo geral, o de um corpo negro a 5778 K, sensivelmente a temperatura da superfície do Sol, com um pico de emissão na gama da radiação visível, ou seja, para comprimentos de onda (c.d.o.) entre 0,3 μm e 0,6 μm . Por outro lado, podemos definir a temperatura radiativa efetiva do sistema Globo-Atmosfera, T_{TA} , como a de um corpo negro que emita a radiação R_{LW_TA} , em (1), i.e., tal que, de acordo com a lei de Stefan-Boltzmann, se tenha $R_{LW_TA} = \sigma T_{TA}^4$ (onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann). Se considerarmos que o sistema Globo-Atmosfera se encontra próximo do equilíbrio radiativo, i.e., que de facto $R_{NET_TA} \approx 0$, então sabendo que $\alpha_{TA} \approx 0,29$ e que $R_{SW_TA} \approx 340 \text{ W/m}^2$ (correspondente a um quarto do valor da constante solar no topo da atmosfera), facilmente concluímos que $T_{TA} \approx 255 \text{ K}$. Com efeito, o sistema Globo-Atmosfera segue o comportamento de um corpo negro a pouco mais de 255 K, com emissão significativa no infravermelho e máximos para c.d.o. entre 10 μm e 12 μm . A Fig. 1 mostra os espectros de emissão (valores normalizados), de acordo com a função de Planck, para corpos negros a 5778 K e 255 K, respetivamente, i.e., apresenta espectros próximos dos da radiação solar incidente e da radiação terrestre emitida, no topo da atmosfera.

2.2 O Balanço radiativo medido por satélites de Observação da Terra

No final da década de 1970, o instrumento ERB (*Earth Radiation Budget*) foi enviado para uma órbita helio-síncrona, a bordo do satélite Nimbus-7. Tratou-se do primeiro instrumento concebido para medir as componentes da equação (1), nomeadamente a irradiância solar no topo da atmosfera (R_{SW_TA}), a quantidade de radiação solar refletida ($\alpha_{TA} \cdot R_{SW_TA}$) e a radiação de c.d.o. longo emitida pelo sistema Globo-Atmosfera (permitindo estimar R_{LW_TA}). Seguiu-se o sensor ERBE (*Earth Radiation Budget Experiment*) que, cerca de 9 anos depois, garantiu a continuidade destas primeiras observações por mais de uma década (Barkstrom et al., 1989). Os campos de radiação solar absorvida, do albedo do sistema Globo-Atmosfera e da radiação emitida que são apresentados e discutidos no capítulo 6 de Peixoto e Oort (1992) são baseados nestas primeiras observações (ERB e ERBE), tratadas por Campbell e Vonder Haar (1980). O instrumento CERES (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*) tem operado, nas últimas décadas, a bordo de vários satélites de órbita polar helio-síncrona (e.g., Terra, Aqua) que cruzam o equador em torno das 10:30 e 1:30 (am e pm) locais. O CERES fornece observações nas bandas do espectro eletromagnético representadas na Fig. 1: o canal identificado como CERES_SW é obviamente utilizado para determinar a radiação solar refletida, que é observada no topo da atmosfera, enquanto a diferença entre as observações nas bandas CERES_TOT e CERES_SW permite calcular a radiação emitida pelo sistema Globo-Atmosfera, na gama do infravermelho. A função de resposta de cada canal do CERES não é uniforme ao longo da respetiva banda, sendo necessárias correções para que se obtenham observações de banda larga "não filtradas" e, portanto, correspondentes de facto a R_{LW_TA} ou a $\alpha_{TA} \cdot R_{SW_TA}$ (Loeb et al., 2001). A banda CERES_Window, que abrange o pico de emissão terrestre, fornece informação adicional para, entre outros, se obter estimativas ótimas de R_{LW_TA} .

Em comparação com os seus antecessores ERB e ERBE, as observações do CERES apresentam melhorias significativas quer em termos de precisão, quer em termos de resolução espacial, mas não são apenas esses os aspetos que contribuirão para aperfeiçoar as estimativas dos fluxos radiativos no topo da atmosfera. A frequência das observações de instrumentos em satélites de órbita polar pode ser muito limitativa para variáveis que apresentem flutuações diurnas consideráveis, como é o caso das componentes do balanço radiativo. A combinação de observações CERES a partir dos satélites Terra e Aqua (em 2 órbitas heliossincronas, com tempos de passagem local distintos), com observações de satélites geostacionários, que proporcionam sobretudo radiancias em canais de banda estreita, mas com frequências temporais sub-horárias, permitem aumentar significativamente a confiança nas estimativas das componentes do balanço radiativo, (Loeb et al., 2018). A Fig. 2 mostra os campos médios sazonais (dezembro a fevereiro e junho a agosto, respetivamente) e anuais do balanço radiativo no topo da atmosfera (R_{NET_TA}), estimados a partir de dados CERES_EBAF_Edition4.1 (CERES Energy Balanced and Filled) disponibilizados pela NASA¹, para o período entre 2005 e 2015².

A característica mais marcante dos campos da Fig.2 é o contraste latitudinal, com perdas radiativas ($R_{NET_TA} < 0$) nas regiões polares e ganhos ($R_{NET_TA} > 0$) nas latitudes baixas. A sazonalidade é acentuada, com máximos de R_{NET_TA} nas regiões subtropicais do hemisfério de verão e mínimos durante o inverno polar. Por outro lado, apesar de a distribuição da radiação solar que chega ao topo da atmosfera ser puramente zonal, o mesmo não acontece com R_{NET_TA} , como se pode ver na Fig. 2. Os desvios devem-se a flutuações na absorção da radiação solar e também da radiação emitida ao longo de cada banda latitudinal. As primeiras são devidas a alterações no albedo do planeta (α_{TA}), mais elevado na presença de nuvens ou onde a superfície está coberta de neve ou gelo, enquanto as flutuações na temperatura radiativa efetiva determinam as segundas: haverá máximos locais de T_{TA} em regiões quentes e simultaneamente secas, uma vez que tanto o vapor de água como as nuvens são eficazes em absorver a radiação emitida pela superfície e, portanto, em diminuir a temperatura radiativa do planeta; por sua vez, em regiões muito frias (e.g., polos), ou com grande nebulosidade (e.g. nas zonas de convergência dos ventos alísios) teremos mínimos locais de T_{TA} (ou de R_{LW_TA}).

A Fig. 3 mostra perfis meridionais das várias componentes do balanço de energia no topo da atmosfera: a radiação solar absorvida pelo sistema Globo-Atmosfera (Fig. 3b) segue inexoravelmente o perfil da radiação solar disponível (R_{SW_TA}), embora seja penalizada na região equatorial devido a um pico local do albedo (Fig. 3a) causado por uma maior cobertura de nuvens; as latitudes altas, no inverno, são duplamente penalizadas por valores baixos de R_{SW_TA} e albedos muito elevados associados à presença de neve e gelo na superfície (Fig. 3a e 3b); a variação meridional de R_{LW_TA} é modulada nos trópicos pela nebulosidade, com mínimos na estação húmida (Fig. 3c); nas latitudes médias e altas, a perda radiativa é maior no hemisfério de Verão, sendo, portanto, determinante a temperatura da superfície e da troposfera para elevar o valor de T_{TA} .

Finalmente, a Fig. 3d apresenta o perfil meridional do balanço R_{NET_TA} : o gradiente meridional, resultante do excedente de energia nas latitudes baixas em contraposição com o déficit nas altas, induz o transporte de energia para os polos sendo, por isso, a grande força motriz da circulação geral da atmosfera. Conforme descrito e amplamente discutido em Peixoto e Oort (1992), a célula de Hadley transporta energia, sob a forma de energia potencial, para as latitudes médias, onde, por sua vez, as perturbações transientes se encarregam de transportar energia para os polos. Ainda segundo Peixoto e Oort (1992), o transporte de energia para as latitudes elevadas realizado pelas circulações atmosférica e oceânica é determinado pelo balanço radiativo zonal, $R_{NET_TA}(\phi)$ (onde ϕ representa a latitude e r o raio médio da Terra):

$$Q(\phi) = \int_{\phi'=\phi}^{\pi} R_{NET.TA}(\phi') 2\pi r^2 \cos(\phi') d\phi' \quad (2)$$

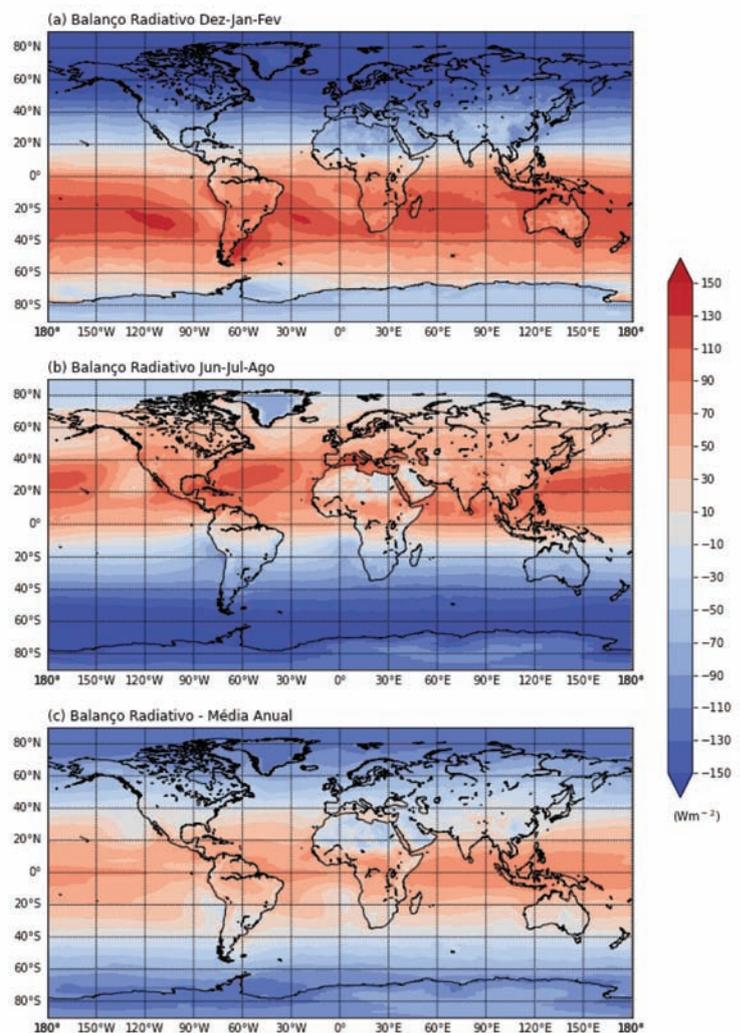


Figura 2 - Balanço radiativo médio no topo da atmosfera, R_{NET_TA} (Wm^{-2}), estimado para os meses de (a) dezembro a fevereiro; (b) junho a agosto; e (c) janeiro a dezembro, obtidos a partir de dados CERES_EBAF, Edição 4.1 (Doi: 10.5067/TERRA-AQUA/CERES/EBAF-TOA_L3B004.1), cobrindo o período entre 2005 e 2015.

¹ NASA - National Aeronautics and Space Administration

² CERES Energy Balanced and Filled Edition 4.1, doi: 10.5067/TERRA-AQUA/CERES/EBAF_L3B.004.1

Queremos sublinhar aqui, por um lado, a relevância do balanço radiativo para o transporte de energia no sistema climático e, por outro, a sua elevada sensibilidade a incertezas nas componentes. Mais ainda, quando estimado ao nível global, i.e., quando integrado sobre toda a superfície do globo e para períodos de tempo relativamente longos, o balanço global de energia é responsável pelo caráter estacionário do sistema climático. A tabela 1 mostra estimativas globais dos componentes do balanço radiativo, baseadas nos dados CERES, para o período 2005 – 2015, e os cálculos apresentados por Peixoto e Oort (1992) baseados em observações ERB e ERBE, obtidas nas décadas de 1970 e 1980. Notando que o valor anual de R_{NET_TA} é inferior a 0,3 % dos termos da diferença entre $(1 - \alpha_{TA}) \cdot R_{SW_TA}$ e R_{LW_TA} , a semelhança entre as estimativas do balanço de energia no topo da atmosfera, feitas à distância de mais de 30 anos, é notável. Claro que existem diferenças significativas nos valores de cada componente, bem como entre os balanços obtidos para o período de verão e inverno boreal. No entanto, ao comparar os valores obtidos com dados CERES com os de Peixoto e Oort (1992), há que ter em conta a evolução da qualidade das observações CERES versus as dos seus antecessores ERB e ERBE, as diferenças no período de observação e a persistência de incertezas nas estimativas aqui apresentadas (que estimamos ser da ordem de $0,1 \text{ W m}^{-2}$).

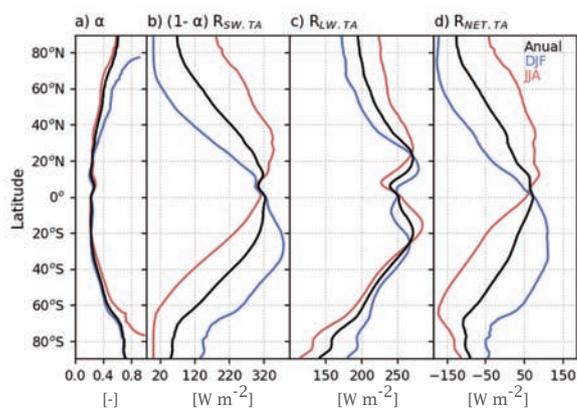


Figura 3 - Perfis meridionais (a) do albedo do sistema Globo-Atmosfera, (b) da radiação solar absorvida e (c) da radiação emitida pelo sistema Globo-Atmosfera, e (d) do balanço radiativo no topo da atmosfera. A linha preta representa médias anuais, enquanto as linhas a azul e vermelho correspondem a médias para dezembro-janeiro-fevereiro e junho-julho-agosto, respetivamente, para o período entre 2005 e 2015. Os perfis foram estimados a partir de dados CERES_EBAF, Edição 4.1 (Doi: 10.5067/TERRA-AQUA/CE-RES/EBAF-TOA_L3B004.1).

Tabela 1 - Estimativas globais dos componentes do balanço radiativo no topo da atmosfera apresentados em Peixoto e Oort (1992), baseadas em observações ERB e ERBE, e calculadas a partir de dados CERES (2005-2015) para todo o ano e para os meses de dezembro a fevereiro (DJF) e junho a agosto (JJA), respetivamente. Todos os valores (exceto o albedo) são em W m^{-2} .

	Peixoto e Oort (1992)			CERES_EBAF (Ed. 4.1)		
	Annual	DJF	JJA	Annual	DJF	JJA
Radição Solar: R_{SW_TA}	345	354	335	340,0	350,2	330,4
Albedo: α_{TA}	0,307	0,317	0,301	0,291	0,300	0,285
Rad. Solar Absorvida: $(1 - \alpha_{TA}) R_{SW}$	239	242	234	241,0	245,2	263,3
Radição Emitida: R_{LW_TA}	238	236	242	240,2	237,4	243,9
Balanço Radiativo: R_{NET_TA}	+0,8	+6,7	-7,5	+0,8	+7,8	-7,5

3. O desequilíbrio radiativo do Planeta e as Alterações Climáticas

A emissão de gases com efeito estufa para a atmosfera durante o período pós-revolução industrial veio quebrar o delicado equilíbrio entre radiação solar absorvida e emitida, estando na base das alterações climáticas de origem antropogénica (IPCC, 2021). Como resultado do desequilíbrio energético global ($\sim 0,8 \text{ W m}^{-2}$ de acordo com a Tabela 1), o sistema Globo-Atmosfera continuará a armazenar energia até que um novo equilíbrio radiativo seja atingido. Recentemente, von Schuckmann et al. (2020) estimaram que, durante a última década, os oceanos têm armazenado 90 % deste excesso de energia, as superfícies continentais têm retido cerca de 5 %, o degelo das grandes massas de neve e gelo consumiu cerca de 3 % e os restantes 2 % contribuíram para o aquecimento da atmosfera.

A relevância do cálculo e da monitorização do balanço radiativo para auscultar o clima é evidente. Apesar da dificuldade inerente, resultante da amplificação das incertezas numa pequena diferença entre dois grandes números, sabemos que o sistema climático se encontra em desequilíbrio energético e também que esse desequilíbrio está a aumentar. A Fig. 4 (de Loeb et al., 2021) mostra séries temporais de duas estimativas independentes do desequilíbrio energético do Planeta: uma baseada em estimativas de R_{NET_TA} com os mesmos dados CERES já referidos neste trabalho; outra obtida a partir inventários das variações de energia armazenada nas várias componentes do sistema climático (oceanos, criosfera, zonas terrestres e atmosfera, conforme referidas no parágrafo anterior), baseadas em extensas bases observacionais *in situ*. Para uma explicação mais pormenorizada sobre os dados, a metodologia e os resultados, remete-se o leitor para Loeb et al., (2021). Desse estudo, salienta-se aqui (i) a impressionante concordância de resultados obtidos de formas totalmente independentes; (ii) a persistência do aumento do desequilíbrio energético do sistema climático, sendo que a linha de tendência dos dados CERES sugere que os valores médios de R_{NET_TA} de $(0,42 \pm 0,48) \text{ W m}^{-2}$ em 2005 aumentam para $1,12 \pm 0,48 \text{ W m}^{-2}$ em 2019.

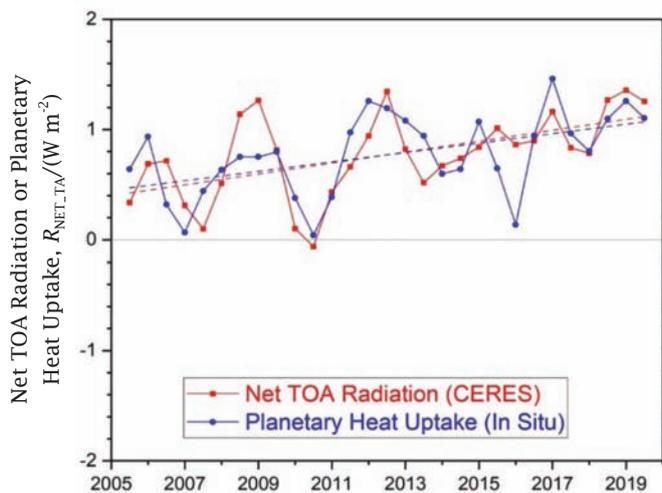


Figura 4 - Estimativas de médias móveis de R_{NET_TA} (médias móveis de 12 meses, calculadas de 6 em 6) baseadas nos dados CERES_EBAF, Edição 4.1 (linha vermelha, a cheio) e do armazenamento de energia no sistema climático estimado a partir de diversas observações *in situ* (linha azul, a cheio); as linhas a tracejado representam as respetivas tendências lineares, Fonte: Loeb et al. (2021).

O desequilíbrio energético do sistema climático levanta problemas quando se pretende manter a definição tradicional do clima, baseada em estatísticas dos elementos climáticos ao longo de um intervalo de tempo da ordem de 30 anos. Com efeito, a ausência de estacionariedade das séries temporais de elementos climáticos dificulta seriamente a definição da janela temporal onde se efetuam os cálculos, devendo a janela ser suficientemente longa para garantir a estabilidade das estatísticas e suficientemente curta para que se possam caracterizar as variações dessas estatísticas devidas ao forçamento radiativo do sistema climático.

Esta dificuldade pode, no entanto, ser mitigada definindo o clima como um ensemble (Leith, 1978). Nesta aceção, inspirada na noção introduzida por Josiah Willard Gibbs em Mecânica Estatística, o ensemble é constituído por um conjunto infinito de réplicas conceptuais da Terra, todas sujeitas à mesma evolução lenta do forçamento radiativo, e com o estado do tempo evoluindo em cada uma, independentemente das restantes. A distribuição dos estados do tempo no ensemble será tal que a distribuição de probabilidade não é afetada pelas flutuações rápidas de cada membro, mas sofre variações lentas devido a alterações no forçamento externo (como, por exemplo, as associadas a pequenas flutuações na radiação solar anual disponível no topo da atmosfera ou ao aumento antropogénico de concentração de dióxido de carbono na atmosfera ou ainda às mudanças profundas do coberto vegetal associadas ao avanço de terrenos agrícolas e urbanos). Nesta conformidade, o clima pode ser definido “num dado instante” através de estatísticas efetuadas sobre o ensemble nesse instante. Vale a pena notar que, caso os ensembles sejam estacionários (o que pressupõe o sistema climático em equilíbrio energético), esta noção generalizada de clima se reduz à definição tradicional: neste caso vale a hipótese ergódica, o que significa que a média temporal ao longo de um dado membro do ensemble é igual à média no ensemble.

Se bem que atrativa do ponto de vista concetual, a definição de clima como ensemble tem, no entanto, o inconveniente de não ser utilizável com base em séries de observações efetuadas no sistema climático, as quais obviamente só permitem conhecer um único membro da infinidade de membros do ensemble, circunstância que só não é limitativa no caso de validade da hipótese ergódica. No entanto, os modelos computacionais do clima, cada vez mais sofisticados e proporcionando simulações cada vez mais realistas, permitem operacionalizar a definição de clima como ensemble, abrindo novas perspectivas para uma compreensão mais profunda da natureza do sistema climático.

4. Considerações finais

A quantificação do balanço energético do sistema Globo-Atmosfera é fundamental em Ciência Climática, sendo o seu acompanhamento um indicador crucial de alterações climáticas a nível global. Cedo se percebeu o potencial de observações de satélite para medir os fluxos radiativos no topo da atmosfera: como se mostrou, essa foi

mesmo uma das primeiras aplicações de dados de satélite em clima. As grandes agências espaciais estão cientes desse facto: a NASA, depois da experiência pioneira com os instrumentos ERB e ERBE, tem vindo a apostar na continuidade do CERES em múltiplas plataformas; na Europa, a EUMETSAT³ tem vindo a operar o instrumento GERB (*Geostationary Earth Radiation Budget*) com observações em bandas semelhantes às representadas na Fig.1 como CERES_SW e CERES_TOT, a partir da série de satélites geostacionários Meteosat Second Generation (MSG), fornecendo observações de alta frequência, mas limitadas ao disco do MSG (centrado no ponto de 0° de latitude e 0° de longitude e estendendo-se, para norte e para sul, até cerca de 70° de latitude e, para oeste e para leste, até 70° de longitude); também na Europa, a ESA⁴ aprovou o desenvolvimento da missão FORUM (*Far-infrared Outgoing Radiation Understanding and Monitoring*), com lançamento previsto para 2026 e que aposta em observações detalhadas do espectro de emissão terrestre, com muito mais informação do que a obtida com canais de banda larga como o CERES (Palchetti et al., 2020). A caracterização dos fluxos de radiação emitida e absorvida pelo planeta será certamente um tema sempre presente na Observação da Terra.

Referências

- [1] Barkstrom, B. R., E. F. Harrison, G. L. Smith, R. D. Cess, 1989: *Results from the Earth Radiation Budget Experiment (ERBE)*, *Advances in Space Research*, Volume 9, Pages 75-82, doi: 10.1016/0273-1177(89)90146-4.
- [2] Bauer, P., A. Thorpe, G. Brunet, 2015: The quiet revolution of numerical weather prediction, *Nature*, 525, 47-55, doi: 10.1038/nature14956.
- [3] Beck, H., N. Zimmermann, T. McVicar, N. Vergopolan, A. Berg, E. F. Wood, 2018: Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5, 180214, doi: 10.1038/sdata.2018.214.
- [4] Campbell, G.G., T. H. Vonder Haar, 1980: *Climatology of Radiation Budget Measurements from Satellites*, *Atmospheric Science Paper No. 323*, Colorado State University, 73 p.
- [5] IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

³ EUMETSAT – Organização Europeia para a exploração de Satélites Meteorológicos

⁴ ESA – Agência Espacial Europeia

- [6] Leith, C. E., 1978: Predictability of climate. *Nature*, 276, 352–355, doi: 10.1038/276352a0.
- [7] Loeb, N. G., D. R. Doelling, H. Wang, W. Su, C. Nguyen, J. G. Corbett, L. Liang, C. Mitrescu, F. G. Rose, S. Kato, 2018: Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) energy balanced and filled (EBAF) top-of-atmosphere (TOA) Edition 4.0 data product. *Journal of Climate*, 31, 895–918. doi: 10.1175/JCLI-D-17-0208.1.
- [8] Loeb, N. G., G. C. Johnson, T. J. Thorsen, J. M. Lyman, F. G. Rose, S. Kato, 2021: Satellite and Ocean Data Reveal Marked Increase in Earth's Heating Rate, *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL093047, doi: 10.1029/2021GL093047.
- [9] Loeb, N. G., K. J. Priestley, D. P. Kratz, E. B. Geier, R. N. Green, B. A. Wielicki, P. O. Hinton, S. K. Nolan, 2001: Determination of unfiltered radiances from the Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) instrument. *J. Appl. Meteor.*, 40, 822–835, doi: 10.1175/1520-0450(2001)040%3c0822:DOURFT%3e2.0.CO;2.
- [10] Palchetti, L., H Brindley, R. Bantges, S. A. Buehler, C. Camy-Peyret, B. Carli, U. Cortesi, S. Del Bianco, G. Di Natale, B. M. Dinelli, D. Feldman, X. L. Huang, L. C.-Labonnote, Q. Libois, T. Maestri, M. G. Mlynchak, J. E. Murray, H. Oetjen, M. Ridolfi, M. Riese, J. Russell, R. Saunders, C. Serio, 2020: FORUM: Unique Far-Infrared Satellite Observations to Better Understand How Earth Radiates Energy to Space, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102, doi: 10.1175/BAMS-D-19-0322.1.
- [11] Peixoto, J. P., 1987: O Sistema Climático e as Bases Físicas do Clima, série "O Homem, o Clima e o Ambiente", Secretaria de Estado do Ambiente e dos Recursos Naturais, 187 p.
- [12] Peixoto, J. P., A. H. Oort, 1992: *Physics of Climate*, American Institute of Physics, 520 p.
- [13] Trigo, I. F., C. C. DaCamara, P. Viterbo, J.-L. Roujean, F. Olesen, C. Barroso, F. Camacho-de Coca, D. Carrer, S. C. Freitas, J. García-Haro, B. Geiger, F. Gellens-Meulenberghs, N. Ghilain, J. Meliá, L. Pessanha, N. Siljamo, and A. Arbole da, 2011: The Satellite Application Facility on Land Surface Analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 32, 2725–2744, doi:10.1080/01431161003743199.
- [14] Von Schuckmann, K., L. Cheng, M. D. Palmer, J. Hansen, C. Tassone, V. Aich, S. Adusumilli, H. Beltrami, T. Boyer, F. J. Cuesta-Valero, D. Desbruyères, C. Domingues, A. García-García, P. Gentine, J. Gilson, M. Gorfer, L. Haimberger, M. Ishii, G. C. Johnson, R. Killick, B. A. King, G. Kirchengast, N. Kolodziejczyk, J. Lyman, B. Marzeion, M. Mayer, M. Monier, D. P. Monselesan, S. Purkey, D. Roemmich, A. Schweiger, S. I. Seneviratne, A. Shepherd, D.A. Slater, A. K. Steiner, F. Straneo, F., M.-L. Timmermans, S. E. Wijffels, 2020: Heat stored in the Earth system: where does the energy go?, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 2013–2041, doi: 10.5194/essd-12-2013-2020.



Isabel F. Trigo, é investigadora no Instituto Português do Mar e Atmosfera (IPMA), onde coordena o Núcleo de Observação da Terra (NOT). Iniciou a sua carreira científica na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, onde obteve o grau de mestre em Ciências Geofísicas (2007), tendo-se doutorado em Meteorologia e Ciências Climáticas pela Universidade de East Anglia, Reino Unido (2000). Ao longo de mais de 20 anos, tem vindo a trabalhar em estudos de variabilidade climática e aplicações de dados de satélite para a monitorização das superfícies terrestres e caracterização da interação superfície-atmosfera. Tem liderado/co-liderado vários projetos nacionais e internacionais financiados pela FCT, ESA, EUMETSAT e programa Europeu Copernicus. É responsável pelo *Satellite Applications Facility on Land Surface Analysis* (LSA-SAF), parte integrante do segmento de solo da EUMETSAT, dedicado à produção de dados, em tempo real e climáticos, relacionados com as superfícies continentais.



Carlos C. DaCamara, completou o Bacharelato em Física (1979) e a Licenciatura em Ciências Geofísicas (1981) na FCUL e doutorou-se em Ciências da Atmosfera (1991) pela Universidade de Missouri-Columbia (EUA). É Professor Associado do Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia (DEGGE) e investigador do Instituto Dom Luiz (IDL) da FCUL. Foi vice-presidente do Instituto de Meteorologia (2003-2004) e membro do "Space Advisory Committee" para o 6.º Programa-Quadro de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico da União Europeia. A sua investigação tem incidido sobre um espectro largo de temas que incluem a deteção remota por satélite de fogos ativos e de áreas queimadas, a determinação da temperatura e da emissividade da superfície do solo com base em informação proveniente de satélite, a avaliação de risco meteorológico a curto e médio prazos de incêndios florestais, a recuperação de vegetação em áreas queimadas, as condições meteorológicas associadas a eventos extremos (secas, ondas de calor, etc.) e a atividade das ondas planetárias e suas implicações na variabilidade climática.

A influência da Atmosfera nas variações da rotação da Terra

José M Castanheira¹, Machiel Bos²

¹ CESAM & Departamento de Física da Universidade de Aveiro
jcast@ua.pt

² IDL & Universidade da Beira Interior
msbos@ubi.pt

Resumo

A qualidade dos sistemas de previsão meteorológica melhorou acentuadamente nas últimas décadas, alargando a utilidade das previsões a áreas muitas vezes insuspeitas, como é o caso dos sistemas de navegação espacial. A previsão da circulação atmosférica global permite determinar com melhor precisão as coordenadas das estações de recepção e das órbitas dos satélites, ou de sondas interplanetárias. De facto, a precisão da geodesia espacial também progrediu muito nas últimas décadas, tornando as previsões do momento angular da atmosfera úteis para reduzir o erro nas previsões dos parâmetros de orientação da Terra. Neste artigo analisamos com mais detalhe o efeito das variações do momento angular da atmosfera na velocidade de rotação da Terra ou, equivalentemente, nas variações da duração do dia.

O momento angular da atmosfera e a duração do dia

O momento angular de um sistema é uma grandeza tridimensional, que se conserva quando o momento resultante das forças externas aplicadas ao sistema é nulo. Descontando pequenos efeitos do atrito das marés, que reduzem o momento angular de rotação da Terra e aumentam o momento angular orbital da Lua (Morrison e Stephenson, 2001), o momento angular do Sistema Terra, incluindo a atmosfera, oceanos, criosfera, camadas sólidas (manto e crosta) e o núcleo, deve permanecer constante ao longo do tempo. Assim, qualquer alteração de momento angular de uma componente do Sistema Terra deve ser compensada por uma variação de sinal contrário nas outras componentes do Sistema (Peixoto e Oort, 1992).

As variações do momento angular da atmosfera são mais facilmente descritas utilizando um referencial que rode solidariamente com o globo e com um eixo alinhado com o eixo de rotação. Considerando o referencial representado na Figura 1, o momento angular, \vec{L} , de uma dada componente do Sistema Terra é dado por

$$\vec{L}(t) = \int_V \rho(\vec{r}, t) \vec{r} \times [\vec{\omega} \times \vec{r} + \vec{v}(\vec{r}, t)] dV,$$

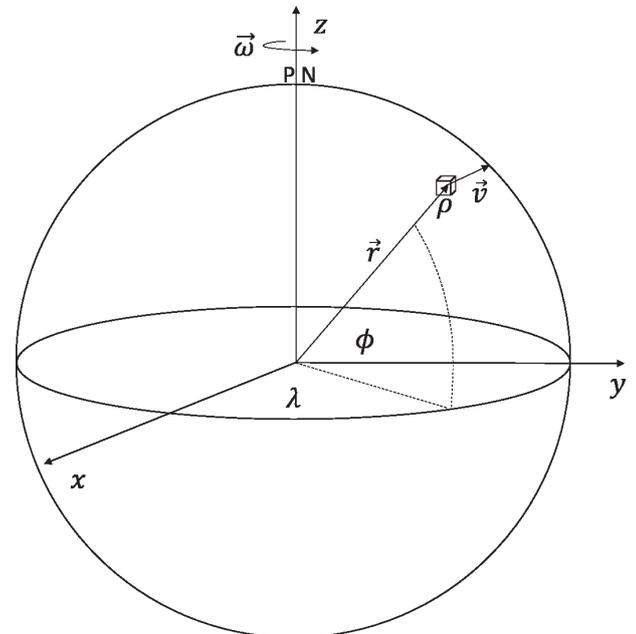


Figura 1 - Sistema de coordenadas geocêntricas fixo ao globo terrestre.

onde V é volume ocupado pela componente, ρ é a massa volúmica na posição \vec{r} e no instante t ; o vector $\vec{\omega}$ é a velocidade angular de rotação da Terra em relação a um referencial inercial, e \vec{v} é a velocidade relativa ao referencial que roda solidariamente com a Terra. Na realidade, a rotação de um referencial fixo ao globo terrestre não é uniforme, sofrendo pequenas variações como veremos. No entanto, para a derivação das expressões para o cálculo do momento angular das componentes do Sistema Terra, podemos assumir que o referencial roda com velocidade angular uniforme, $\vec{\omega}$, em torno do eixo z : $\vec{\omega} = \omega \hat{e}_z$.

Variações das projecções do momento angular no plano equatorial, i.e., variações das compo-

nentes L_x e L_y estão associadas com pequenas variações da orientação do eixo de rotação, ou, dito de outra forma, da posição dos pólos. As variações da componente axial, L_z , estão associadas com variações da intensidade da velocidade angular, $\vec{\omega}$, de rotação da Terra.

A componente axial do momento angular da atmosfera é dada por

$$L_z(t) = \int_V \rho(\vec{r}, t) [\omega r^2 \cos^2(\phi) + u(\vec{r}, t) r \cos \phi] dV,$$

onde u representa a componente Oeste-Este da velocidade do vento. Assim, o momento angular axial da atmosfera é composto por dois termos: um constante, L_ω , dado pela integração do primeiro termo entre parêntesis rectos na equação acima, e que representa a rotação da atmosfera solidária com a do globo; e um segundo termo, L_r , devido ao movimento relativo da atmosfera em relação ao globo.

Apesar de o momento angular relativo da atmosfera, L_r , corresponder apenas a cerca de 1 % do momento angular total (Peixoto e Oort, 1992), as suas flutuações explicam grande parte das variações da velocidade de rotação da Terra ou, equivalentemente, das variações da duração do dia, em intervalos de tempo inferiores à dezena de anos. A Figura 2 mostra as variações da duração do dia (*length of day*, L_{OD} , na língua Inglesa) e do momento angular relativo da atmosfera, L_r , no período de 2006 a 2020. A variação sazonal do L_{OD} é explicada quase completamente pela variação sazonal do momento angular da atmosfera (Schindelegger et al., 2013), com uma variação de $\approx 0,8 \times 10^{-3}$ s entre Janeiro e Julho (Peixoto e Oort, 1992). Na Figura, também se observam flutuações da duração do dia (L_{OD}) na ordem de $0,1 \times 10^{-3}$ s, coerentes com variações de L_r e que ocorrem em intervalos de alguns dias a várias dezenas de dias. Variações que ocorrem em intervalos de vários anos podem ser explicadas pela ocorrência de eventos de El Niño. Embora não sejam mostrados directamente na Figura 2, os valores máximos das médias de Inverno de ΔL_{OD} e de ΔL_r observaram-se no Inverno de 2015/2016, quando ocorreu o evento de El Niño mais intenso dos últimos 20 anos.

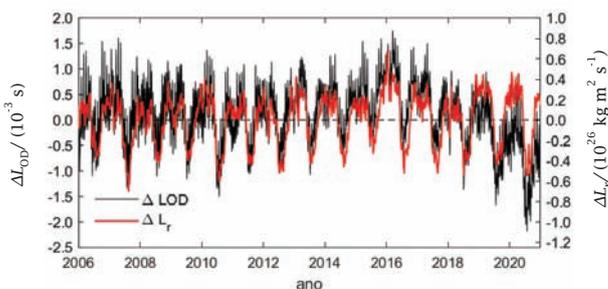


Figura 2 - Séries temporais das variações da componente axial do momento angular relativo, ΔL_r , da atmosfera e da duração do dia ΔL_{OD} . A cada série foi subtraída a respectiva média no período de 2000 a 2020. Os dados foram obtidos a partir do website do Serviço Internacional de Sistemas de Referência e Rotação da Terra (International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS) (<https://www.iers.org>).

Implicações para a geodesia espacial e a monitorização do Sistema Climático

Uma variação de $0,1 \times 10^{-3}$ s na duração do dia produz uma diferença de vários centímetros entre a posição real e a posição esperada de um ponto na superfície de uma Terra com rotação uniforme. As variações da velocidade de rotação também modificam a força centrífuga, que é responsável por a forma da Terra não ser perfeitamente esférica. Assim, a superfície da Terra sofre deslocamentos verticais de cerca de 10 mm a 20 mm ao longo de um ano. Os deslocamentos horizontais são inferiores a 7 mm a 8 mm. Os dispositivos GPS incorporados em carros e telefones celulares têm uma precisão de vários metros e, portanto, não serão sensíveis a essas variações. No entanto, essas variações são importantes para os receptores geodésicos de GPS, instalados em pilares estáveis e que possuem precisão da ordem do mm. Além do GPS, existem outras constelações de satélites que fornecem a geolocalização, como os sistemas GLONASS, operado pela Rússia, Galileo (Europa) e Beidou (China), referidos, conjuntamente, como Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS). A inter-operabilidade destes sistemas requer um Sistema de Referência comum (International Terrestrial Reference Frame, ITRF) definido com grande precisão (Malys et al., 2021).

A relação entre a geodesia e a meteorologia e clima vai muito além das perturbações nos parâmetros orbitais da Terra. Por exemplo, para determinar se o nível do mar está a subir um a dois milímetros por ano ou se a costa está a descer, há estações GNSS permanentes instaladas perto de marégrafos. As estações GNSS permanentes, instaladas ao longo das costas da Gronelândia e da Antártida, podem fornecer mais informações sobre o clima. O derretimento do gelo, associado a variabilidade climática e/ou a mudanças climáticas, diminui a pressão sobre a superfície terrestre subjacente, que se eleva vários milímetros por ano. Essa elevação é observada pelo GNSS e fornece estimativas das quantidades de gelo derretido em cada ano. Um outro exemplo é a utilização dos dados da missão GRACE (<https://www.gfz-potsdam.de/en/grace/>) cujo principal objectivo é medir o campo gravítico terrestre com alta precisão e observar a sua variabilidade. A determinação precisa das órbitas dos satélites permite utilizar essas observações para estimar a humidade do solo (<https://nasagrace.unl.edu/>). Os dados de GNSS são também utilizados, em modo operacional, para determinar o estado inicial dos modelos de previsão meteorológicas (Bauer et al., 2014).

Estas utilizações dos dados de GNSS e de observações de satélite requerem correcções dos efeitos da atmosfera nas variações da velocidade de rotação da Terra. Devido à importância dessas correcções para estas e outras aplicações geodésicas, o Serviço Internacional de Rotação da Terra (International Earth Rotation Service (IERS), <https://www.iers.org>) fornece séries diárias quer da orientação do eixo de rotação quer das variações na duração do dia. O cálculo das correcções para vários propósitos operacionais, incluindo o controlo de sondas espaciais, orientação de instrumentos astronómicos ou a geolocalização, requer a utilização de previsões dos parâmetros de orientação da Terra (Dill et al., 2019; Kalarus et al., 2010). Os erros das previsões da velocidade

angular da Terra são reduzidos consideravelmente, se for tido em conta o momento angular da atmosfera previsto por modelos de circulação global, tal como é feito operacionalmente no Centro de Previsão do IERS (*Dick e Richter, 2009; Dobslaw e Dill, 2018*).

Notas finais

A conservação do momento angular de um sistema isolado é uma lei básica da Física. Por isso, em termos teóricos, não é surpresa alguma que variações do momento angular da atmosfera impliquem variações da velocidade de rotação do globo terrestre. O que poderá ser menos esperado é a importância dessas variações em aplicações tecnológicas como o GNSS. De facto, as previsões meteorológicas são indispensáveis à operação e gestão deste e outros sectores baseados em tecnologia de ponta, como a produção de energia e o funcionamento de redes eléctricas, ou a aviação. O valor e aplicação das previsões meteorológicas crescerá à medida que a qualidade das previsões e a capacidade de as utilizar forem aumentando.

As previsões meteorológicas são um problema físico, matemático e computacional complexo, cuja melhoria poderá beneficiar muito com a atracção de estudantes e graduados com boa formação em física fundamental. A Física do Clima desempenha um papel central na compreensão e modelação das alterações climáticas. A este respeito, é importante referir um artigo publicado na revista *Nature* (*Schiermeier, 2015*), que chama a atenção para a necessidade de atrair físicos talentosos para as Ciências do Clima. No entanto, as Licenciaturas e Mestrados em Física não parecem contribuir para essa atractividade. De facto, se consultarmos os planos curriculares dos cursos de Física, a nível internacional, veremos que a grande maioria não contempla a Física do Clima. Portugal não é excepção, e a formação introdutória à Física do Clima não faz parte dos planos curriculares das Licenciaturas e Mestrados em Física. Os alunos com interesse em estudar Meteorologia, Oceanografia e Física do Clima podem escolher as Licenciaturas em Meteorologia, Oceanografia e Geofísica, leccionadas na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e no Departamento de Física da Universidade de Aveiro.

Referências

- [1] Bauer, P., G. Radnóti, S. Healy, e C. Cardinali, 2014: GNSS radio occultation constellation observing system experiments. *Mon. Wea. Rev.*, 142, 555-572, doi:10.1175/MWR-D-13-00130.1.
- [2] Dick, W. R., e B. Richter, 2009: IERS annual report, 2007, pp 61-67, International Earth Rotation and Reference Systems Service. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie. Frankfurt am Main. ISBN 978-3-89888-917-9.
- [3] Dill, R., H. Dobslaw, e M. Thomas, 2019: Improved 90-day earth orientation predictions from angular momentum forecasts of atmosphere, ocean, and terrestrial hydrosphere. *J. Geodesy*, 93, 287-295, doi:10.1007/s00190-018-1158-7.
- [4] Dobslaw, H., e R. Dill, 2018: Predicting earth orientation changes from global forecasts of atmosphere-hydrosphere dynamics. *Adv. Space Res.*, 61, 1047-1054, doi:10.1016/j.asr.2017.11.044.

- [5] Kalarus, M., e Co-autores, 2010: Achievements of the earth orientation parameters prediction comparison campaign. *J. Geodesy*, 84, 587-596, doi:10.1007/s00190-010-0387-1.
- [5] Kalarus, M., e Co-autores, 2010: Achievements of the earth orientation parameters prediction comparison campaign. *J. Geodesy*, 84, 587-596, doi:10.1007/s00190-010-0387-1.
- [6] Malys, S., R. Solomon, J. Drotar, T. Kawakami, e T. Johnson, 2021: Compatibility of terrestrial reference frames used in GNSS broadcast messages during an 8 week period of 2019. *Adv. Space Res.*, 67, 834-844, doi:10.1016/j.asr.2020.11.029.
- [7] Morrison, L. V., e F. R. Stephenson, 2001: Historical eclipses and the variability of the earth's rotation. *J. Geodynamics*, 32, 247-265.
- [8] Peixoto, J. P., e A. H. Oort, 1992: *Physics of Climate*. American Institute of Physics, New York, NY, 520 pp. ISBN 0-88318-712-4.
- [9] Schiermeier, Q., 2015: Physicists, your planet needs you. *Nature*, 520, 140-141, doi:10.1038/520140a.
- [10] Schindelegger, M., S. Böhm, J. Böhm, e H. Schuh, 2013: Atmospheric Effects on Earth Rotation. In: *Atmospheric Effects in Space Geodesy*. Edited by J. Böhm and H. Schuh. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-36931-5.



José M Castanheira, é licenciado em Física pela Fac. de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra e doutorado em Física (área da atmosfera) pela Universidade de Aveiro. É professor auxiliar da Universidade de Aveiro, regente de várias unidades curriculares nas áreas da Física da Atmosfera e do Clima, e Director de Curso de Mestrado em Ciências do Mar e da Atmosfera. É investigador do CESAM – Centro de Estudos do Ambiente e do Mar. Os principais temas de investigação a que se tem dedicado são a dinâmica subjacente aos padrões de variabilidade da circulação atmosférica de larga escala, e a dinâmica do clima.



Machiel Bos, é licenciado em Engenharia Aeroespacial pela Universidade de Tecnologia de Delft, Países Baixos, e doutorado em Oceanografia pela Universidade de Liverpool, Inglaterra. É investigador do Instituto Dom Luiz e recebeu apoio da FCT através dos projetos ATLAS (PTDC/CTA-GEF/31272/2017) e UIDB/50019/2021-IDL. O seu interesse científico é a Geodesia e a sua especialidade é a análise das séries temporais GNSS da deformação da Terra pela pressão da maré oceânica.

A importância dos Rios Atmosféricos no ramo aéreo do Ciclo Hidrológico

Ricardo M. Trigo¹, Alexandre M. Ramos¹

¹ Instituto Dom Luiz, IDL, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa 1749-016, Portugal
rmtrigo@fc.ul.pt

Preâmbulo

*O Prof. José Pinto Peixoto (JPP) desempenhou um papel central no desenvolvimento de uma teoria mais completa do ciclo hidrológico, contribuindo entre muitos outros aspetos, para sistematizar as equações que caracterizam o ramo aéreo e a sua ligação íntima com o ramo terrestre, bem como os vários modos de transporte atmosférico. Para se perceber a singularidade da sua contribuição para a climatologia, em geral, e para o ciclo hidrológico, em particular, não basta evocar os vastíssimos conhecimentos de matemática, termodinâmica, radiação ou física estatística que possuía e que sabia transmitir de forma tão clara aos milhares de estudantes que, como eu, tiveram a possibilidade de o ter como mestre. Como acontece com outros cientistas de renome, estou convencido que a enorme valia das suas contribuições científicas, sintetizadas nessa obra maior que é o livro *Physics of Climate* de 1992 resultou também de várias condicionantes externas que contribuíram de forma decisiva para que JPP alcançasse, com todo o mérito, uma posição cimeira no panorama científico internacional. A primeira condicionante central é relativa ao acesso a dados e aos meios computacionais necessários para os tratar. De facto, muitos dos dados meteorológicos em altitude, mas também relativos aos oceanos e às zonas polares, cruciais para um melhor entendimento das várias componentes do sistema climático, só passaram a ser recolhidos de forma sistemática após a segunda guerra mundial. Por outro lado, as duas instituições norte-americanas onde JPP trabalhou de forma continuada entre finais dos anos 1950 e os anos 1970 (MIT e GFDL na Universidade de Princeton), foram pioneiras no uso de supercomputadores para tratamento dessas grandes quantidades de dados meteorológicos e oceânicos então adquiridos e para desenvolver os primeiros modelos climáticos. Este preâmbulo pretende sublinhar que, num certo sentido, o Prof. José Pinto Peixoto era a pessoa com o intelecto e a preparação científica certa, que foi trabalhar na altura certa para as instituições certas dos EUA. De facto, é aproximadamente a meio da década de 1950 que JPP rumou para os EUA com o objetivo de obter o seu Doutoramento na prestigiada universidade MIT, passando a colaborar, no início da década seguinte e de forma muito ativa, no grupo coordenado pelo Prof. Victor Starr que integrava, ou viria a integrar, outros académicos proeminentes (e.g. E. Lorentz, B. Saltzman, A. Oort, J.J Smagorinsky, S. Manabe). Todos eles viriam a ter um papel central, particularmente nas décadas de 1960, 1970 e 1980 na caracterização das observações, sistematização analítica e modelação numérica do sistema climático. Este facto ficou bem patente com a recente atribuição a Syukuro Manabe de parte do Prémio Nobel da Física de 2021, pelos trabalhos pioneiros de modelação climática realizados no GFDL nos anos 1960 e 1970.*

1) Ramo aéreo do ciclo hidrológico clássico

O sistema climático do planeta Terra é bastante complexo, mas no essencial a sua dinâmica resulta da radiação solar diferencial que se observa entre as diferentes latitudes. A zona equatorial aquece mais, logo há valores muito mais elevados de evaporação de água nessas latitudes e a atmosfera é consideravelmente mais húmida (Figura 1). As leis da termodinâmica ditam que parte dessa energia interna e dessa humidade sejam transportados para latitudes mais frias e secas. Esse transporte é realizado por meio das grandes células que caracterizam a circulação geral da atmosfera, fortes correntes oceânicas e de sistemas transientes como os ciclones tropicais [1]. Sabemos que a atmosfera contém apenas uma pequena fração da água total existente no sistema climático terrestre. O vapor de água representa apenas cerca de 0,25 % da massa to-

tal da atmosfera, mas a sua importância na regulação do clima global e dos padrões climáticos é inegável. Por via do transporte de humidade, essa pequena fração desempenha um papel fundamental na ligação dos principais reservatórios de água (oceanos, lagos, rios, solos e gelo marinho), conjuntamente com os processos de precipitação e de evapotranspiração [2]. Podemos afirmar que o ciclo hidrológico pode ser resumido como sendo a ocorrência de evaporação de água da superfície em determinados locais e a precipitação noutros, em estreito equilíbrio com o transporte de água (nas fases líquida e de vapor) efetuado pelas componentes atmosférica, oceânica e hidrológica. Nas regiões oceânicas, a taxa de evaporação geralmente excede a taxa de precipitação, e os oceanos representam, portanto, uma fonte líquida de humidade que é então transportado pela atmosfera para os continentes [1]. A maior parte da água que evapora dos oceanos (90 %) precipita novamente nos oce-

anos, pelo que apenas 10 % acaba por cair sobre os continentes. Neste contexto, as grandes massas de terra continentais atuam como sumidouros líquidos de humidade atmosférica, pois nessas regiões a precipitação excede a evapotranspiração. Por outro lado, da precipitação total sobre os continentes, aproximadamente dois terços são reciclados sobre os próprios continentes (ou seja, voltam a evaporar), e apenas um terço desagua diretamente nos oceanos [3].

A quantidade de vapor de água (v.d.a) que existe numa coluna de atmosfera, de secção unitária e que se estende da superfície até ao topo da atmosfera, onde a pressão é nula, é denominada água precipitável W , a qual se exprime pela relação:

$$W(\lambda, \phi, t) = \frac{1}{g} \int_0^{p_0} q dp \quad (1)$$

onde q representa a humidade específica a um determinado nível, g a aceleração da gravidade. De facto, a água precipitável corresponde à água líquida que se obteria caso todo o v.d.a. na coluna vertical condensasse (expressa em mm ou kg/m²). A integração na vertical do transporte horizontal de v.d.a. representa o vetor fluxo de v.d.a. \vec{Q} , ou escoamento aéreo, que é calculado tendo em conta a humidade específica q e o vetor velocidade horizontal \vec{v} em cada nível considerado:

$$\vec{Q}(\lambda, \phi, t) = \frac{1}{g} \int_0^{p_0} q \vec{v} dp \quad (2)$$

Partindo das equações diferenciais relativas à continuidade, ao balanço de v.d.a. e ao balanço da água líquida, integrando na vertical para toda a coluna de atmosfera obtemos a equação de balanço da substância água. Se considerarmos médias para períodos de tempo relativamente longos temos:

$$\frac{\partial \bar{W}}{\partial t} + \text{div}(\bar{\vec{Q}}) = \bar{E} - \bar{P} \quad (3)$$

onde P representa a quantidade de água precipitada denominada precipitação e E a quantidade de água evaporada por transpiração à superfície denominada evapotranspiração à superfície e $(\bar{\quad})$ o operador média temporal. Esta equação mostra que o excesso de evaporação relativamente à precipitação na superfície da terra tem de ser compensado essencialmente pela variação temporal de conteúdo de v.d.a. na atmosfera ($\partial \bar{W} / \partial t$) e pelo fluxo (de ou para fora da coluna) de v.d.a., dada pelo termo $\text{div}(\bar{\vec{Q}})$.

Os estudos iniciais por Starr e Peixoto (1958) [4] demonstraram que, desde que o fluxo de vapor de água \vec{Q} possa ser medido com suficiente precisão, a equação (3) podia ser utilizada para avaliar a mudança conjunta dos valores de armazenamento de água superficial e subsuperficial, grandezas particularmente difíceis de medir de forma direta à época dos estudos. Após esses estudos pioneiros, vários autores prosseguiram com o objetivo de estimar o valor de \vec{Q} usando conjuntos de novas observações disponíveis, como os obtidos de radiossondas [5] ou por satélites [6]. Na verdade, a partir dos anos 1980 as observações por satélite, com cobertura praticamente global e resolução temporal e espacial fina, tendem a revelar-se como método alternativo para a estimativa do escoamento aéreo \vec{Q} . É de salientar que para médias temporais relativamente longas (por exemplo 30 anos), a variação temporal de v.d.a. na atmosfera ($\partial \bar{W} / \partial t$) é praticamente nula, o que significa que a divergência do campo integrado verticalmente do transporte horizontal da humidade é igual a $E - P$, ou seja $\text{div}(\bar{\vec{Q}}) \cong \bar{E} - \bar{P}$

A Figura 1 mostra o campo vetorial do fluxo horizontal integrado verticalmente de vapor de água - \vec{Q} (também denominado IVT - *Integrated Water Vapor Transport*) para os meses de inverno (painel superior) e de verão (painel inferior) do hemisfério norte. A escala de cores representa os valores do campo da divergência de fluxo horizontal para as mesmas estações. De uma forma simplificada, as zonas identificadas a vermelho correspondem às grandes fontes de humidade do nosso planeta, isto é, aquelas onde a evaporação (E) supera de forma substancial a precipitação (P). Estas zonas de fonte de humidade são frequentemente identificadas em estudos com métodos lagrangeanos de forma a estabelecer a relação entre a origem da água (normalmente oceânica) que acaba por precipitar em determinadas zonas continentais, como se pode ver na Figura 2. Naturalmente que por contraste as zonas assinaladas a azul correspondem às zonas sumidouro de humidade, isto é, aquela onde a precipitação supera a evaporação.

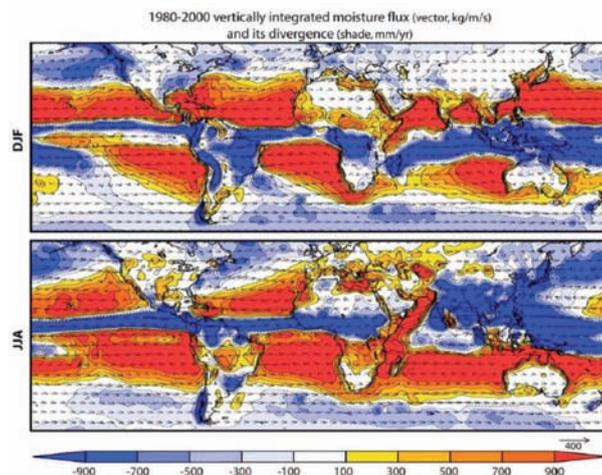


Figura 1 - Campo vetorial do fluxo horizontal de água integrado verticalmente (IVT, de símbolo de unidade de $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) para os meses de inverno (painel de cima) e de verão (painel de baixo entre 1980 e 2000. Pode-se também observar representado a cores, o campo da divergência de fluxo horizontal (mm/ano) para os mesmos meses. (Fonte: Gimeno et al., 2012 [2]).

2) Ramo aéreo do ciclo hidrológico com modelos lagrangeanos

O formalismo das equações 1 a 3 corresponde a uma perspetiva euleriana da quantificação da ligação entre o ramo aéreo e o ramo terrestre do ciclo hidrológico. Nas últimas décadas têm sido desenvolvidos modelos com formalismo lagrangeano, que fornecem informação complementar do ciclo hidrológico (uma síntese de todos os modelos pode ser encontrada em [7]). A utilização de modelos numéricos lagrangeanos, como o FLEXPART, permite estudar a evolução no tempo e no espaço, de grandes quantidades de partículas de ar representadas nos modelos, por milhões de parcelas elementares da atmosfera. Esta análise pode ser quantificada à medida que estas “partículas” se deslocam ao longo da sua trajetória, em função dos ventos conhecidos em cada ponto e instante. Este tipo de abordagem também nos permite caracterizar com precisão a evolução das massas de ar (por exemplo, a sua humidade

específica ou temperatura) que chegam a um determinado local. Ao conhecer a humidade específica (q) em cada passo temporal de uma determinada trajetória, é possível identificar as partículas que perdem humidade através da precipitação (p) ou ganham através da evaporação (e) local. O registo da evaporação menos a precipitação ($e - p$) fornece informação sobre as regiões de fonte de humidade (quando a evaporação excede a precipitação) e as correspondentes zonas de sumidouros de humidade (quando a precipitação excede a evaporação). Nestas condições, a equação diferencial de balanço para uma partícula de massa (m) que sofre ao longo da sua trajetória uma alteração de humidade específica, num intervalo de tempo elemental é dada por:

$$(e - p) = m \frac{dq}{dt} \quad (4)$$

As perdas ou ganhos de humidade específica ($e - p$) de todas as partículas de uma coluna de atmosfera com área (A) representam o balanço de água na superfície ($E - P$), onde E e P são as taxas de evaporação e de Precipitação por unidade de área:

$$E - P \approx \frac{\sum_{k=1}^K (e - p)}{A} \quad (5)$$

e cuja média temporal para períodos longos é dada pela mesma expressão ($\bar{E} - \bar{P}$) utilizada no método euleriano (equação 2) e onde K é o número total de partículas na coluna da atmosfera.

Estas metodologias baseadas em modelos lagrangeanos têm sido amplamente utilizadas ao longo da última década para a deteção e caracterização das fontes de humidade, tanto para estudos regionais (e.g.) Península Ibérica [8] como para estudos de carácter global [2]. Os leitores interessados podem encontrar nos artigos de revisão [2] e [7] muitos detalhes sobre a incerteza e significado desta abordagem lagrangeana, bem como a comparação com outros métodos de estimativa de transporte de humidade. As oito principais áreas de fonte de humidade oceânicas identificadas objetivamente podem ser observadas na Figura 2, estando identificadas com diferentes cores para se diferenciar melhor o impacto associado a cada uma delas nas zonas continentais adjacentes identificadas com as mesmas cores, durante a estação do inverno (painel superior) e de verão (painel inferior) do hemisfério norte. Seis destas regiões de fonte de humidade foram definidas considerando o limiar de 750 milímetros por ano do fluxo anual de humidade verticalmente integrado (ver as grandes regiões oceânicas a vermelho na Figura 1). Já as duas regiões fonte relativas ao Mar Mediterrâneo (MED) e o Mar Vermelho (REDS) foram definidas tendo em conta apenas os limites físicos de cada região.

Podemos afirmar que o impacto das principais fontes oceânicas de humidade não se encontra distribuído uniformemente entre elas, sendo algumas fontes oceânicas responsáveis por bastante mais precipitação continental do que outras. Por exemplo, a região fonte do Atlântico Norte (NATL) fornece humidade durante todo o ano a grande parte da zona leste da América do Norte e da re-

gião Amazónica (no inverno) Mas esta fonte de humidade é igualmente fundamental para a Europa ocidental e ilhas Britânicas. De facto, a ausência de grandes montanhas na costa atlântica da Europa Ocidental permite que a humidade seja transportada (principalmente em níveis baixos) até ao interior da Eurásia, e também a partir da região fonte do Mediterrâneo (MED) durante o inverno. A humidade do Pacífico Norte (NPAC) apresenta uma contribuição sazonal para a costa oeste da América do Norte. Relativamente às fontes do Pacífico Sul (SPAC) contribuem maioritariamente para o transporte de humidade sobre a costa oeste da América do Sul. No entanto, a sua área de influência é limitada, devido à presença dos Andes que correm paralelamente à costa oeste da América do Sul impedindo a humidade do Oceano Pacífico de penetrar muito para o interior do continente Sul americano [1].

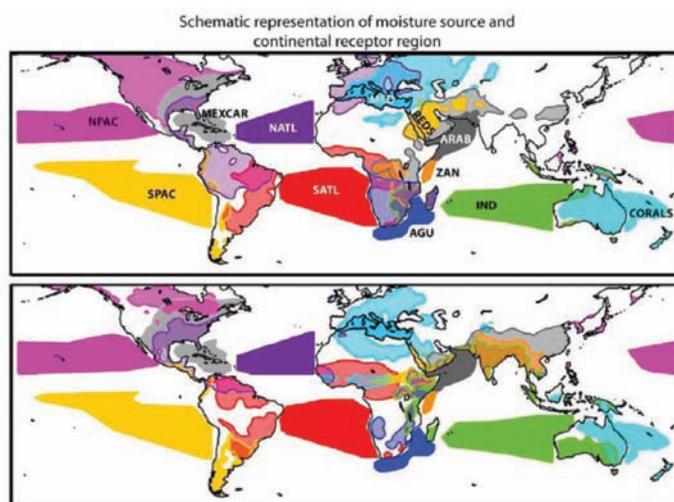


Figura 2 - Representação esquemática da fonte de humidade e das correspondentes regiões continentais recetoras para o período 1980-2000 DJF (painel superior) e JJA (painel inferior). As fontes de humidade (indicadas no painel superior) são as seguintes: NPAC, Pacífico Norte; SPAC, Pacífico Sul; NATL, Atlântico Norte; SATL, Atlântico Sul; MEXCAR, México Caribe; MED, Mar Mediterrâneo; REDS, Mar Vermelho; ARAB, Mar Árabe; ZAN, Corrente de Zanzibar; AGU, Corrente das Agulhas; IND, Oceano Índico; CORAIS, Mar de Coral. (Fonte: Gimeno et al., 2012 [2]).

3) Rios atmosféricos

Até há relativamente pouco tempo não se sabia que este transporte de humidade, mencionado nas secções anteriores, se faz, em grande medida, por meio de padrões de circulação atmosférica muito específicos denominados Rios Atmosféricos [9], os quais assumem uma relevância dantes desconhecida para o ramo aéreo do ciclo hidrológico [7]. Estas estruturas encontram-se diariamente na atmosfera sobre os oceanos e consistem em longas e estreitas faixas de elevada concentração de vapor de água nas camadas mais baixas da atmosfera. Em média, são responsáveis por cerca de 90 % do transporte de vapor de água das regiões subtropicais para as latitudes médias apesar de geralmente ocuparem apenas cerca de 10 % do globo [10]. Embora pouco profundos (relevantes apenas nos primeiros 1 km a 4 km da atmosfera) e relativamente estreitos (entre 300 km e 500 km), estendem-se por milhares de quilómetros (> 2000 km) como se pode observar na Figura 3. Um rio atmosférico de forte intensidade pode transportar uma quantidade de vapor de água superior ao fluxo médio de água do rio Amazonas.

Os Rios Atmosféricos estão normalmente associados a depressões extratropicais [11] e, como tal, têm uma orientação predominante oeste-este no hemisfério Norte. Quando chegam a ter-

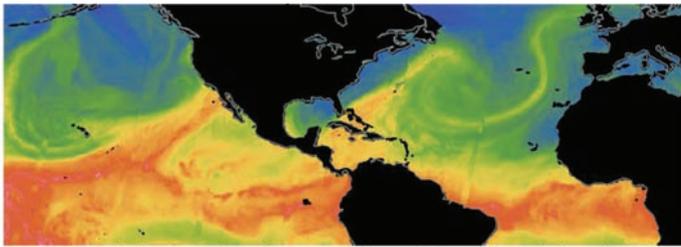


Figura 3 - Vapor de água integrado verticalmente obtido através de satélite, onde é possível observar diversos rios atmosféricos incluindo no Pacífico Norte (costa oeste dos estados unidos) e uma configuração mais fraca no Atlântico norte. Créditos: NASA Worldview

ra, estas bandas carregadas de humidade são frequentemente forçadas a subir, provocando forte condensação e favorecendo a ocorrência de forte precipitação, nomeadamente sobre Portugal [9]. Existem dois mecanismos principais de ascensão de massas de ar na atmosfera: quando deparam com sistemas orográficos (cadeias montanhosas, principal mecanismo na costa Leste do Pacífico e algumas regiões da Europa) ou quando estão associados a movimentos verticais em depressões extra-tropicais, como é frequente ocorrer em Portugal.

Os Rios Atmosféricos são responsáveis não só por uma fração significativa da precipitação que ocorre nas costas continentais ocidentais, mas particularmente pela maioria dos fenómenos hidrológicos extremos, como por exemplo cheias e deslizamentos de terra [9] e [12].

Um exemplo de um intenso rio atmosférico com fortes impactos, ocorreu na semana de 20-28 de Dezembro de 1909. Este evento hidro-geomorfológico provocou o maior número de eventos de inundações e de deslizamentos de terras ocorridos em Portugal desde 1865 [12], incluindo as maiores inundações nos últimos 200 anos na foz do rio Douro e na cidade do Porto (Figura 4).



Figura 4 - Postal referente à cheia no Rio Douro (zona da Ribeira) no dia 23 de Dezembro de 1909

Este evento registou também uma precipitação excecional na cidade da Guarda a 22 de Dezembro de 1909 e condições meteorológicas pouco usuais caracterizadas pela presença de uma depressão extratropical bastante profunda (966 hPa) localizada a noroeste da Península Ibérica associada a sistema frontal estacionário que produziu precipitações intensas na região Centro e Norte de Portugal e de Espanha (Figura 5, painel superior). A análise dos campos do vento e da humidade específica a 900 hPa (Figura 5, painel inferior) permitem inferir a disponibilidade de

humidade na região do Atlântico que pode ser advetada pelos ventos até Portugal Continental. É possível ver no painel inferior da Figura 5 a faixa estreita e prolongada de humidade (característico de todos os Rios Atmosféricos) a ser advetada de latitudes subtropicais, com origem próxima da região das Caraíbas. Esta faixa estreita apresenta um núcleo intenso com valores de humidade específica acima de 9 g/kg, sobre o Oceano Atlântico, sendo transportada para Portugal, por um jato de baixo nível com a direção de sudoeste, e com velocidades do vento claramente acima dos 25 m/s, ou seja 90 km/h (valores típicos associados a um Rio Atmosférico). Assim, é possível afirmar que este evento extremo esteve associado à presença de um Rio Atmosférico, que atravessou toda a bacia do Atlântico Norte e provocou um evento extremo de precipitação.

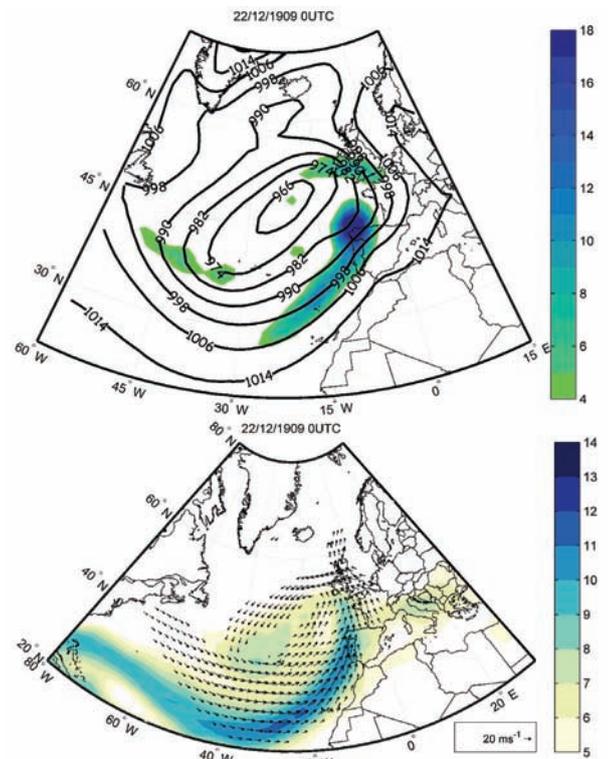


Figura 5 - A pressão ao nível médio do mar (hPa) e a precipitação (mm) são apresentados no painel superior, enquanto a direção e intensidade do vento (m/s) e a humidade específica (q , g/kg) aos 900 hPa são apresentados no painel inferior. Os mapas correspondem às 00UTC do dia 22 Dezembro 1909 utilizando os dados de reanálise do século XX (20CR). Adaptado de Pereira et al. [12].

4) Notas finais

Neste trabalho, damos a conhecer uma visão integrada do ramo aéreo do ciclo hidrológico, primeiro através de uma perspetiva clássica euleriana onde o formalismo das equações 1 a 3, que JPP ajudou a desenvolver, permite analisar o campo vetorial do fluxo horizontal de vapor de água integrado verticalmente. Nas últimas décadas, em virtude do acesso a bases de dados com maior definição espacial bem como aos enormes avanços no processamento, têm sido desenvolvidos modelos com formalismo lagrangeano mais exigentes computacionalmente, que fornecem informação complementar. Em particular, a utilização de modelos numéricos lagrangeanos, como

o FLEXPART, permite caracterizar com precisão a evolução das massas de ar, através de milhões de parcelas elementares da atmosfera, fornecendo assim informação sobre as regiões fonte de humidade, e as correspondentes zonas de sumidouros de humidade, onde a precipitação excede a evaporação.

Neste contexto, o papel desempenhado pelos Rios Atmosféricos é mais estrutural do que foi inicialmente considerado, uma vez que apesar de ocuparem apenas 10 % do globo, são responsáveis por cerca de 90 % do transporte de vapor de água das regiões subtropicais para as latitudes médias. Devido à gigantesca quantidade de vapor de água que transportam, os Rios Atmosféricos são responsáveis não só por uma fração significativa da precipitação que ocorre nas costas continentais ocidentais, mas particularmente pela maioria dos fenómenos hidrológicos extremos, como por exemplo cheias e deslizamentos de terra. Em contrapartida, a não ocorrência de Rios Atmosféricos durante um período de tempo prolongado pode levar à falta de precipitação em regiões continentais, podendo esta traduzir-se em períodos prolongados de seca. Dada a importância dos Rios Atmosféricos no contexto do ciclo hidrológico, o número de publicações dedicadas às diversas facetas deste tópico cresceu exponencialmente na última década. Este interesse crescente é bastante natural uma vez que os Rios Atmosféricos representam uma área de investigação de ponta, com evidentes potencialidades de virem a permitir melhorias no âmbito da modelação do clima, bem como no da previsão numérica do tempo a curto e médio prazo.

Agradecimentos

Este artigo foi publicado no âmbito do projeto HOLMO-DRIVE - "North Atlantic Atmospheric Patterns influence on Western Iberia Climate: From the Lateglacial to Present" (PTDC/CTA-GEO/29029/2017) financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia. Os autores gostariam de agradecer os comentários e sugestões dos colegas Carlos da Camara e Isabel Trigo.

Referências

- [1] Peixoto, J.P., A.H. Oort, "Physics of Climate", 520 pp., Am. Inst. of Phys., New York, (1992).
- [2] Gimeno, L., A.Stohl, R.M. Trigo, F. Dominguez, K. Yoshimura, L. Yu, A. Drumond, A.M. Durán-Quesada, R Nieto, "Oceanic and terrestrial sources of continental precipitation.", Rev. Geophys. 50 (4), <https://doi.org/10.1029/2012RG000389>, (2012).
- [3] Trenberth, K.E., L. Smith, T. Qian, A. Dai, J. Fasullo (2007), "Estimates of the global water budget and its annual cycle using observational and model data", J. Hydrometeorol., 8, 758-769, doi:10.1175/JHM600.1, (2007).
- [4] Starr, V.P. e J.P. Peixoto, "On the global balance of water vapor and the hydrology of deserts", Tellus,10(2), 189-194., (1958).
- [5] Peixoto, J.P., D.A. Salstein, R.D. Rosen, "Intra-annual variations in large-scale moisture fields", J. Geophys. Res., 86, 1255-1264, <https://doi.org/10.1029/JC086iC02p01255>, (1981).

- [6] Xie, X., W.T. Liu, B. Tang, "Spacebased estimation of moisture transport in marine atmosphere using support vector regression", Remote Sens. Environ., 112(4), 1846-1855, doi:10.1016/j.rse.2007.09.003, (2008).
- [7] Gimeno, L. et al, "Recent progress on the sources of continental precipitation as revealed by moisture transport analysis", Earth Sci. Rev. 201, 103070, (2020).
- [8] Gimeno, L., Nieto, R., Trigo, R. M., Vicente-Serrano, S. M., & López-Moreno, J. I. (2010). Where Does the Iberian Peninsula Moisture Come From? An Answer Based on a Lagrangian Approach, Journal of Hydrometeorology, 11(2), 421-436.
- [9] Ramos, A.M., R.M. Trigo, M.L.R. Liberato, R. Tome "Daily precipitation extreme events in the Iberian Peninsula and its association with Atmospheric Rivers", J. Hydro meteorol., 16, 579-597, doi: 10.1175/JHM-D-14-0103.1, (2015).
- [10] Zhu, Y., R.E Newell "A proposed algorithm for moisture fluxes from atmospheric rivers", Mon. Weather Rev., 126(3), 725-735, 1998.
- [11] Ralph, F.M., M.D. Dettinger, M.M. Cairns, T.J., J. Eylan-der, "Defining "atmospheric river": How the glossary of meteorology helped resolve a debat", BAMS, 99(4), 837-839, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0157.1>, (2018).
- [12] Pereira, S., A.M. Ramos, J.L. Zêzere, R.M. Trigo, J.M. Vaquero, "Spatial impact and triggering conditions of the exceptional hydro-geomorphological event of December 1909 in Iberia", Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 16, 371-390, <https://doi.org/10.5194/nhess-16-371-2016>, (2016).



Ricardo Machado Trigo. é Professor Associado do Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia e líder da linha de investigação de Alterações Climáticas no Instituto Dom Luiz (IDL), ambos da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. A sua pesquisa incide na análise da variabilidade e alterações climáticas no sul da Europa, bem como na

caraterização da componente meteorológica de eventos extremos climáticos como as secas, ondas de calor, inundações e incêndios florestais. Publicou mais de 270 artigos indexados (índice $h=65$ no SCOPUS). Recebeu o Prémio da Royal Meteorological Society (Reino Unido) em 2008 e o Prémio UL-CGD de 2017 pela produção científica na área das Ciências da Terra.



Alexandre Miguel Ramos. é Investigador Auxiliar no Instituto Dom Luiz (IDL), da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. A sua investigação foca-se na bacia do Oceano Atlântico e regiões continentais adjacentes, onde estuda as influências dos Rios Atmosféricos nos eventos extremos de precipitação. Mais recentemente tem prestado uma

particular atenção aos extremos climáticos de um ponto de vista de "Compound Events". Publicou mais de 80 artigos indexados (índice $h=32$ no SCOPUS) e recebeu o Prémio de "MECLIVAR 2016 Young Scientist Award" em 2016.

O papel da variabilidade climática na evolução da evapotranspiração e vegetação na Península Ibérica no século XXI.

Célia M. Gouveia¹²

¹ Instituto Português do Mar e Atmosfera, IPMA,

² Faculdade de Ciências Universidade de Lisboa, Instituto Dom Luiz, Lisboa
celia.gouveia@ipma.pt

Resumo

Nas últimas décadas, a investigação acerca da dinâmica da vegetação tem vindo a assumir um papel crucial. Vários estudos têm sido desenvolvidos no sentido de compreender as potenciais alterações nos intrincados ciclos de carbono, energia e água, nomeadamente no que diz respeito às alterações na evapotranspiração. Observações de satélite têm apontado para um 'planeta mais verde' e dados de modelos e observações parecem indicar um aumento da evapotranspiração a nível global, associado a um aumento de temperatura e a um incremento da transpiração da vegetação. Atenção especial tem sido dedicada à investigação das relações entre a dinâmica da vegetação e a Oscilação do Atlântico Norte (NAO), que é considerado o principal modo de variabilidade atmosférica no Hemisfério Norte. Neste trabalho vamos analisar as tendências de produtividade da vegetação e da evapotranspiração durante os últimos 21 anos na Península Ibérica, utilizando informação proveniente de satélite. Os padrões espaciais que representam a relação entre a NAO e a variabilidade da vegetação e da evapotranspiração permitem identificar as regiões em que esta relação é mais evidente, nomeadamente os sectores Noroeste e Sueste da Península.

A variabilidade climática e o ecossistema terrestre

A vegetação desempenha um papel fundamental nas trocas de carbono, água e energia entre a superfície terrestre e a atmosfera através da evapotranspiração, albedo da superfície e rugosidade. Enquanto os ciclos terrestres de carbono e água estão fortemente conectados (Figura 1, painel à direita), a evapotranspiração é o único termo que faz parte simultaneamente dos ciclos de água e energia.

Em 1982, Peixoto e Oort realçaram o importante papel da evapotranspiração da vegetação no ciclo hidrológico e balanço de energia (Figura 1, painel à esquerda). Compreender melhor o papel da vegetação na dinâmica do ecossistema terrestre é ainda hoje um tema de topo na investigação científica.

Mudanças nas variáveis climáticas de superfície, como a temperatura e a precipitação têm sido relacionadas com a dinâmica da vegetação. Observações feitas por satélite desde 1980 apontam para uma Terra mais verde (Piao *et al.*, 2020). Em particular, o aumento observado da temperatura durante a primavera e o outono nas regiões das latitudes elevadas do Hemisfério Norte leva a um incremento na atividade fotossintética e a estações de crescimento da vegetação mais longas. No entanto, enquanto na primavera, a fotossíntese domina sobre a respiração, no outono, ocorre o oposto e, portanto, é na primavera que se espera que ocorra um aumento na captação de CO₂ pela vegetação (Huang *et al.*, 2018).

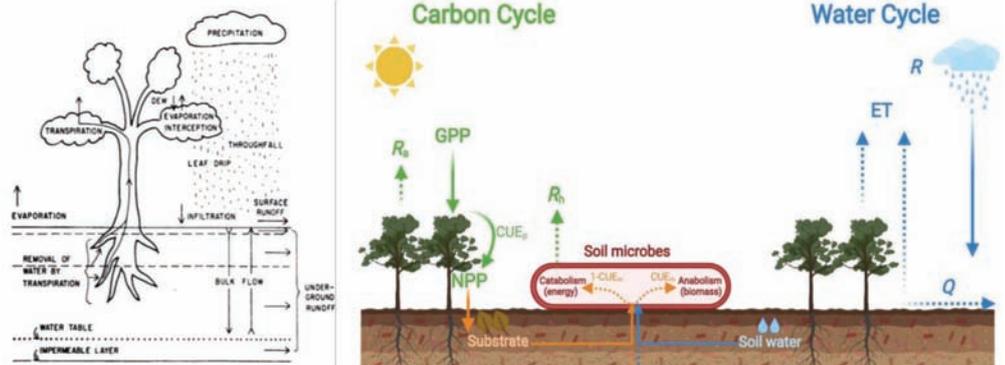


Figura 1 - Esquerda: Diagrama esquemático dos vários processos hidrológicos importantes numa superfície terrestre coberta com vegetação (fonte: Peixoto e Oort, 1992); Direita: Diagrama esquemático dos ciclos do carbono e da água (fonte: Huang *et al.*, 2021).

Para além das alterações climáticas, a variabilidade climática exerce um importante controlo na dinâmica da vegetação e na variabilidade da evapotranspiração real, através do controlo de variáveis climáticas como a temperatura e precipitação. Mudanças na sazonalidade de temperatura e precipitação podem ter impactos distintos, dependendo das características locais. A forte dependência da dinâmica da vegetação na disponibilidade de água nas regiões mediterrânicas é amplamente reconhecida. Tem sido demonstrado que a falta de precipitação em um determinado período, combinada com outras anomalias climáticas, como alta temperatura, vento forte e baixa humidade, podem resultar na redução da cobertura vegetal verde (Gouveia et al., 2017).

As recentes mudanças na dinâmica da vegetação têm vindo a ser monitoradas de forma contínua a partir do espaço utilizando informação proveniente de satélite. Os índices de vegetação (e.g., N_{DVI}) e de produtividade (G_{PP} e N_{PP}) e a Evapotranspiração (E_T) são frequentemente utilizados para avaliar a dinâmica do ecossistema terrestre. A produtividade primária bruta do ecossistema (G_{PP}) é a quantidade total de carbono fixada por meio da fotossíntese e a produção primária líquida de carbono pelas plantas (N_{PP}) é armazenada como biomassa vegetal ($N_{PP} = G_{PP} - R$). Além disso, parte da água proveniente da precipitação (R) é perdida nas plantas por evapotranspiração (E_T) (Figura 1, à direita; Huang et al., 2021).

A Oscilação do Atlântico Norte (NAO), conhecida há quase 100 anos (Walker, 1924), é definida a partir das variações do campo da pressão média ao nível do mar no Atlântico Norte. Estas oscilações geram mudanças na velocidade e direção do vento sobre o Atlântico e estão ligadas ao transporte de humidade e calor entre o Atlântico e o norte da Europa, bem como à frequência, intensidade e trajetória dos sistemas de baixa pressão (Hurrell et al. 1995). No entanto, foi somente na década de 1970 que a NAO foi reconhecida como o principal modo de circulação atmosférica do Hemisfério Norte e passou a ser objeto de ampla discussão. Grande parte dos estudos recentes têm-se concentrado na NAO de inverno, porque estes são os meses mais ativos do ponto de vista da dinâmica atmosférica, apresentando as amplitudes mais significativas das anomalias da pressão média ao nível do mar. Na fase positiva da NAO, o sul da Europa e em particular a Península Ibérica é afetada por condições de tempo seco e quente (Figura 2).

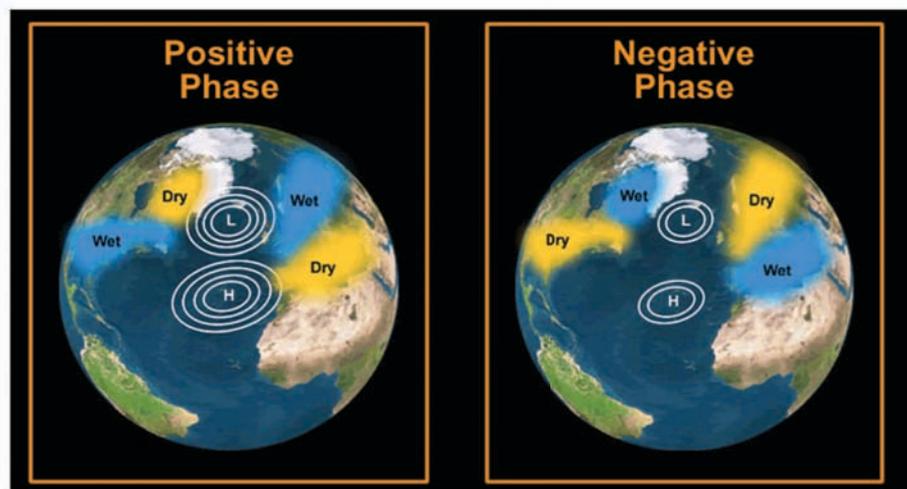


Figura 2 - A Oscilação do Atlântico Norte (NAO): fase positiva e negativa (fonte: https://www.windows2universe.org/?page=/earth/climate/images/nao_lg_gif_image.html).

No entanto, o padrão da NAO pode ser observado em qualquer época do ano, mas com uma variação sazonal pronunciada da localização de seus centros de ação. A NAO de inverno esteve na fase positiva em 15 dos últimos 21 anos, sendo que permaneceu nesta fase entre 2014 e 2020, sendo ligeiramente negativa no Inverno de 2021 (Figura 3). No entanto, a fase positiva da NAO de verão foi menos frequente, sendo de realçar a sua ocorrência em 2013 e 2018.

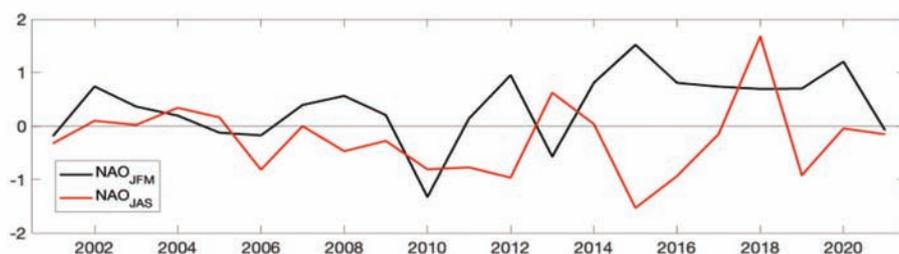


Figura 3 - Evolução temporal do compósito de inverno (janeiro a março) e verão (julho a setembro) da Oscilação do Atlântico Norte entre 2001 e 2021. Dados obtidos a partir do *Climate Prediction Center* (https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/nao_index.html).

Monitorização do ecossistema terrestre a partir do espaço

Informação proveniente de satélite tem sido utilizada para caracterizar a dinâmica da vegetação, utilizando índices de vegetação (e.g., $NDVI$) e de produtividade (G_{PP} e N_{PP}), bem como para monitorizar a variabilidade da evapotranspiração. Os sensores MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) permitem a geração de produtos para caracterizar a superfície terrestre com uma resolução espacial de 500m e com intervalos de 8 dias. Os produtos de Produção Primária (MOD17) são projetados para quantificar o crescimento da vegetação terrestre e a produção primária é determinada pelo cálculo do valor diário de fotossíntese líquida que é integrado num período de 8 dias de observações durante um ano. O produto NPP resulta da acumulação de valores GPP com base no conceito de eficiência do uso de radiação. Este produto é utilizado no cálculo do balanço da energia terrestre, do carbono, dos processos do ciclo da água e da biogeoquímica da vegetação. Por outro lado, o produto de evapotranspiração global (MOD16) é utilizado para o cálculo do balanço hídrico e energético regional e a quantidade de água no solo, sendo, portanto, essencial para a gestão dos recursos hídricos. Além disso, series longas de ET permitem

avaliar os efeitos das alterações climáticas, do uso do solo e dos distúrbios nos ecossistemas (como os incêndios florestais) nos recursos hídricos e energéticos.

Resultados recentes têm mostrado uma tendência significativa de esverdeamento do planeta associada a fatores diretos, tais como as alterações do uso do solo, e indiretos, como as alterações climáticas e a fertilização com CO₂. Esta tendência é especialmente evidente no caso da China e da Índia onde a contribuição das zonas agrícolas é significativa (Chen et al., 2019). De facto, um aumento generalizado da produtividade de vegetação foi observado na Península Ibérica entre 1982 e 2012, principalmente nos sectores central e sul e nas costas leste do Mediterrâneo e do Atlântico (Gouveia et al., 2016). Este incremento da produtividade tem sido associado a uma tendência positiva de humidade principalmente no NW da Península. Observações utilizando dados MODIS confirmam que a tendência de aumento de produtividade persiste no século XXI, nomeadamente nas costas a leste e oeste e na região NE da Península (Figura 4, painel à esquerda). Foi ainda observada uma generalizada tendência positiva de evapotranspiração (Figura 4, direita) que destaca o papel da crescente demanda de água decorrente do aumento de evapotranspiração associado ao aumento de temperatura (Gouveia et al., 2017).

A relação entre a variabilidade climática, a produtividade da vegetação e a evapotranspiração revela uma forte influência da Oscilação do Atlântico Norte (NAO) de inverno em toda a Península Ibérica (Figura 5, painel superior). No entanto, foram identificados padrões espaciais com características distintas: na região SE da Península observam-se correlações negativas entre a NAO e NPP (Figura 5, painel superior à esquerda) e entre a NAO e ET (Figura 5, em cima à direita), com maior ênfase para o último par; nos sectores N e NW são evidentes correlações positivas.

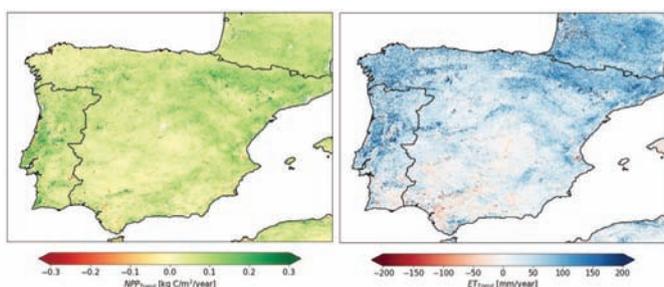


Figura 4 - Tendências de produção líquida de carbono (NPP) e de evapotranspiração anual (ET) na Península Ibérica nos últimos 21 anos (2001-2021). NPP e ET obtidos a partir dos produtos MOD17 e MOD16 do MODIS.

De facto, os invernos com a NAO em fase positiva são mais quentes e secos na Península Ibérica o que parece estar associado a maior produtividade anual da vegetação e maior evapotranspiração anual no sector NW e menor produtividade e evapotranspiração no sector SE (Figura 5, painel superior). No entanto, a contribuição da NAO de verão para os valores anuais de produtividade da vegetação e evapotranspiração parece ser de sinal contrário, com uma predominância das correlações positivas a SE e negativas a NW (Figura 5, painel inferior). Estes resultados enfatizam o papel da temperatura e precipitação nas diferentes fases de crescimento da vegetação, nomeadamente no final do inverno e primavera em que a fotossíntese predomina e no verão e outono em que a

respiração assume um papel mais significativo. A forte dependência da evapotranspiração da temperatura e a sua relação com a dinâmica da vegetação é também evidente nos meses de verão.

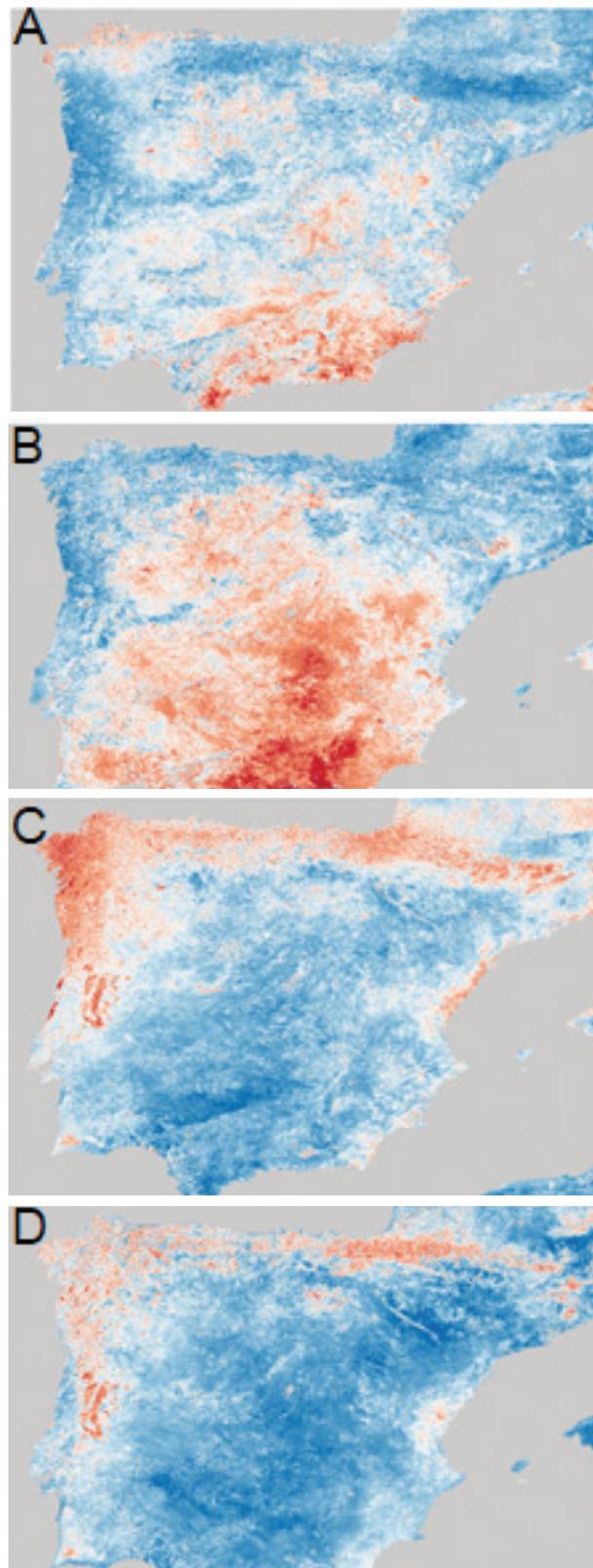


Figura 5 - Correlação entre a Oscilação do Atlântico Norte (NAO) de inverno (A,B) e de verão (C,D) e produção primária líquida de carbono, NPP (A,C) e evapotranspiração anual, ET (B,D) na Península Ibérica nos últimos 21 anos (2001-2021). Correlações positivas significam valores elevados (baixos) de NPP e ET em anos da fase positiva (negativa) de NAO de inverno.

Considerações Finais

No início da terceira década do século XXI, já estão disponíveis quase 50 anos de dados de satélite que têm permitido monitorizar a superfície terrestre, a atmosfera e o oceano, bem como detetar as recentes alterações na dinâmica dos ciclos mais importantes do sistema climático. Hoje, dispomos de dados com melhor resolução espacial que permitem uma análise com maior detalhe a nível regional da dinâmica e produtividade da vegetação e da sua relação com o ciclo de carbono e água, antecipando as mudanças impostas pela sua recente evolução e perspetivando as tendências futuras.

Em 1982, Peixoto e Oort reforçaram que a evapotranspiração de uma superfície com vegetação depende fortemente da radiação e é limitada pela capacidade evaporativa do ar. No entanto, os mesmos autores destacam 'a complexidade do papel desempenhado pela vegetação no ciclo hidrológico e no balanço de energia' (Peixoto e Oort, 1982). Este trabalho não pretende explicar ou detalhar o conhecimento atual acerca do papel da vegetação na dinâmica dos ciclos hidrológico, de energia e de carbono, mas sim realçar alguns resultados recentes, tornados possíveis pela utilização da informação proveniente de satélite, que permitem tentar compreender melhor a influência da variabilidade climática na 'complexidade do papel da vegetação' na dinâmica do ecossistema terrestre.

- [6] Huang, K., Xia, J., Wang, Y., Ahlstrom, A., Chen, J., Cook, R.B., et al., 2018. Enhanced peak growth of global vegetation and its key mechanisms. *Nature Ecol. Evol.* 2 (12), 1897-1905. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0714-0>.
- [7] Hurrell JW. 1995. *Decadal trends in the north Atlantic oscillation: regional temperatures and precipitation.* *Science* 269: 676-679.
- [8] Peixoto, J. P., e A. H. Oort, 1992: *Physics of Climate.* American Institute of Physics, New York, NY, 520 pp. ISBN 0-88318-712-4.
- [9] Piao, S., Wang, X., Park, T., Chen, C., Lian, X.u., He, Y., et al., 2020. *Characteristics, drivers and feedbacks of global greening.* *Nature Rev. Earth Environ.* 1 (1), 14-27. <https://doi.org/10.1038/s43017-019-0001-x>.
- [10] Walker GT. 1924. Correlations in seasonal variations of weather. *IX Memoirs of the Indian Meteorological Department* 24: 275-332.



Célia Marina P. Gouveia. é licenciada em Ciências Geofísicas pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e doutorada em Ciências Geofísicas (ramo deteção remota) pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. É professora auxiliar convidada da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e

Investigadora auxiliar no Instituto Português do Mar e Atmosfera (IPMA). É regente da unidade curricular de Deteção Remota do Ambiente Natural do Mestrado em Ciências Geofísicas e é investigadora do Instituto Dom Luiz. Os principais temas de investigação em que tem trabalhado incluem a influência da variabilidade climática e alterações climáticas na dinâmica e produtividade da vegetação, bem como os impactos de eventos extremos como secas, ondas de calor e fogos na agricultura e florestas.

Referências

- [1] Chen, C., Park, T., Wang, X. et al. *China and India lead in greening of the world through land-use management.* *Nat Sustain* 2, 122-129 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0220-7>.
- [2] Gouveia, C., Trigo, R.M., DaCamara, C.C., Libonati, R. and Pereira, J.M., 2008. *The North Atlantic oscillation and European vegetation dynamics.* *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 28(14), pp.1835-1847.
- [3] Gouveia, C.M., Páscoa, P., Russo, A. and Trigo, R.M., 2016. *Land degradation trend assessment over Iberia during 1982-2012.* *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 42(1), pp.89-112.
- [4] Gouveia, C.M., Trigo, R.M., Beguería, S. and Vicente-Serrano, S.M., 2017. *Drought impacts on vegetation activity in the Mediterranean region: An assessment using remote sensing data and multi-scale drought indicators.* *Global and Planetary Change*, 151, pp.15-27.
- [5] Huang, H., Calabrese, S. and Rodriguez-Iturbe, I., 2021. *Variability of ecosystem carbon source from microbial respiration is controlled by rain fall dynamics.* *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(52).

A Atmosfera como um laboratório de Física: a influência meteorológica nos incêndios rurais

Mário G. Pereira^{1,2}

¹ Centro de Investigação e de Tecnologias Agro-Ambientais e Biológicas (CITAB), Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real (UTAD), Portugal

² Instituto Dom Luiz (IDL), Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa
gpereira@utad.pt

Resumo

Este artigo teve como objetivo homenagear o Prof. José Pinto Peixoto, através da participação no número especial da Gazeta de Física dedicado aos 30 anos da publicação do seu livro *Physics of Climate*, escrito em coautoria com Abraham Oort e publicado em 1992 pelo *American Institute of Physics*, e aos 100 anos do seu nascimento, que se comemoram em novembro do corrente ano. Contudo, constitui essencialmente um testemunho e uma homenagem pessoal não apenas ao investigador, mas também ao professor e às suas qualidades pedagógicas e didáticas. A forma encontrada para realizar esta homenagem consiste na descrição dos conhecimentos adquiridos com o livro *Physics of Climate* e nas aulas do Prof. Peixoto, utilizados no estudo da influência das condições atmosféricas e climáticas nos incêndios rurais em Portugal. Em particular, serão salientadas algumas características específicas da meteorologia e da climatologia, nomeadamente a natureza dos seus objetos de estudo, que determinam e condicionam a investigação científica nestas áreas, sobretudo a abordagem metodológica e a importância da observação e da modelação da atmosfera e do sistema climático.

1) Introdução ao método científico

A ciência pode ser definida como o conhecimento da realidade empírica e o que diferencia o conhecimento científico de outro tipo de conhecimento é ser obtido pelo denominado método científico (Kosso, 2011). As atividades frequentemente identificadas como sendo características da ciência e do método científico incluem a observação e experimentação sistemáticas, o raciocínio indutivo e dedutivo a formação e teste de hipóteses e teorias (Andersen and Hepburn, 2015). Em detalhe, a forma e ordem como estas atividades são realizadas podem variar (Voit, 2019; Yeoman et al., 2015), mas o método científico pode ser esquematizado (Figura 1)

pele conjunto dos seguintes procedimentos: (1) efetuar uma observação sistemática, controlada, da realidade (ou identificar um problema), através da leitura, pensamento ou experiência pessoal, que conduza a factos verificáveis e que não pode ser imediatamente explicada com o conhecimento que se dispõe no momento; (2) fazer uma pergunta; (3) compilar o conhecimento existente sobre a observação e formular explicações potenciais; (4) formular uma hipótese testável e falseável, após selecionar a expli-

cação aparentemente mais provável, mas até agora não comprovada, identificada na fase anterior; (5) fazer uma previsão que resulte de a hipótese estar correta; (6) testar a hipótese ou previsão, com análise de dados recolhidos na literatura, novas observações ou dados recolhidos após projetar e executar experimentos formais (ensaios experimentais em laboratório ou



Figura 1 - Um esquema do método científico

computacionais) cuidadosamente controlados; as conclusões da análise dos resultados obtidos podem apoiar ou contradizer a hipótese; se os resultados do teste contradizerem a hipótese, muito provavelmente a hipótese é falsa e, exceto em caso de erro no teste, é necessário procurar novas hipóteses e/ou previsões (isto é regressar a 4); se os resultados corroborarem a hipótese não provam conclusivamente que está correta, mas significam que provavelmente poderá estar correta e, se for caso disso, (7) o conhecimento adquirido poderá ser utilizado para desenvolver teorias mais gerais; (8) o método termina com a comunicação, divulgação e disseminação dos resultados obtidos com a aplicação do método.

Esta descrição ajuda a explicar algumas características do método científico (Voit, 2019; Yeoman *et al.*, 2015). O método é denominado de problemático-hipotético, no sentido em que se baseia na identificação ou formulação de problemas, questões ou interrogações sobre a realidade e avança com hipóteses ou previsões prováveis na procura das soluções/respostas aos referidos problemas/questões. O método científico é indutivo e dedutivo. É indutivo, no sentido em que parte da observação para chegar às Leis, isto é, analisa os dados visando identificar relações, uniformidades e regularidades que apresentem, no que poderia ser classificado com um procedimento típico de uma aula prática laboratorial. É dedutivo, na medida em que evolui da causa para o efeito, definindo novos conceitos e Princípios a partir de conceitos e enunciados estabelecidos anteriormente, e não da observação da realidade, no que poderia ser classificado com um procedimento típico de uma aula teórica. O método científico pode ser operacionalizado com raciocínio indutivo ou dedutivo, em separado ou em associação, tal como a investigação teórica e experimental podem decorrer independentemente ou se podem suportar ou validar mutuamente. Os computadores surgem como uma terceira via para a metodologia científica, pois permitem automatizar medições, cálculos e análises estatísticas, realizar experimentações mais elaboradas (maior velocidade, melhor filtragem, mais variáveis, coordenação e controle sofisticados), mas também porque a modelação e a simulação constituem uma forma de experimentação, principalmente no âmbito das ciências físicas, onde os modelos são baseados em equações dinâmicas (Andersen and Hepburn, 2015). O método científico é também caracterizado pela controlabilidade das experiências, replicabilidade e repetibilidade (Gauch Jr *et al.*, 2003). A realização de experiências controladas permite comprovar ou invalidar adequadamente as hipóteses. A replicação tem como objetivo permitir a outros investigadores repetir os experimentos

para testar as mesmas hipóteses e verificar resultados e conclusões. A iteratividade do método científico caracteriza o processo de investigação na procura incessante até à descoberta do conhecimento.

2) Particularidades da investigação em meteorologia e climatologia

A evolução do conhecimento em meteorologia e climatologia segue os procedimentos deste método, mas a sua aplicação é condicionada por algumas características específicas da investigação científica destas duas subáreas das ciências atmosféricas, que importa salientar. Estas características estão descritas no livro *Physics of Climate* (Peixoto & Oort, 1992) e, para o autor, começaram a ser evidenciadas nas aulas do curso de Licenciatura em Ciências Geofísicas da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, lecionadas pelo Prof. Peixoto e pelos outros excelentes docentes desta instituição na área da meteorologia.

Para Coleman & Law (2015), meteorologia e climatologia são semelhantes nos princípios e fenómenos examinados, mas diferem na abordagem, escala de tempo e aplicação. Para estes autores, a meteorologia é: (i) o estudo da atmosfera e dos seus movimentos em escalas curtas de tempo (minutos a semanas); (ii) comumente conhecida como o estado do Tempo¹ e tende a concentrar-se nas variáveis atmosféricas² (e.g., precipitação e temperatura) relacionadas com a previsão do Tempo; e (iii) focada nos processos no interior da atmosfera e nas interações de energia com a superfície da Terra que afetam esses processos. Por outro lado, a climatologia é: (i) o estudo dos climas ou das condições atmosféricas médias de longo prazo e extremos num determinado local; (ii) concentrada nos processos que criam padrões e variabilidade climática; e (iii) focada nas interações dentro do sistema Terra-Atmosfera.

Do ponto de vista termodinâmico, frequentemente adotado pelo Prof. Peixoto e no livro *Physics of Climate* (Peixoto & Oort, 1992), o Tempo não é mais do que a descrição do estado da Atmosfera que fica definido com os valores das variáveis atmosféricas (e.g., precipitação, vento, temperatura e humidade do ar) num dado instante. Por outro lado, o clima pode ser definido como o estado do Sistema Climático (SC), que é um sistema composto, formado por cinco subsistemas – Atmosfera, Hidrosfera, Criosfera, Litosfera e Biosfera – abertos e não isolados, que interagem entre si, permutando massa, energia e momento.

O SC é também um sistema não isolado (pois recebe energia do exterior, principalmente do Sol e exporta energia sob a forma de radiação infravermelha), essencialmente fechado (se excetuarmos a troca de massa desprezável com o exterior, por exemplo na forma de

¹ Tempo meteorológico, *weather* em inglês, também designado por condições atmosféricas.

² Variáveis no sentido em que os seus valores variam no tempo e no espaço. Também denominadas por elementos climáticos, variáveis meteorológicas ou campos meteorológicos, no sentido em que são funções de ponto.

³ Para descrição mais detalhada, consultar subcapítulo 2.5 do livro *Physics of Climate* (Peixoto and Oort, 1992).

meteoritos, satélites, sondas e naves enviadas para o espaço, etc.), dinâmico e complexo devido às interações não lineares entre os seus componentes. Estas interações não lineares implicam que a mesma perturbação do sistema ou subsistema pode originar diferentes reações e que ocorrem processos de retroação³ no SC. Estas não linearidades estão refletidas nos termos não lineares das equações físicas que regem o comportamento (estado e evolução) da Atmosfera e integram os modelos atmosféricos. A Atmosfera é um fluido pelo que as equações fundamentais traduzem os princípios de conservação da mecânica dos fluidos nomeadamente de conservação da massa (equação da continuidade), energia (Primeira Lei da Termodinâmica combinada com a Segunda Lei) e momento (Leis de Newton ou equações do movimento), as quais não têm solução analítica, podendo apenas estimar-se soluções aproximadas numericamente recorrendo a computadores (Zhang & Moore, 2015).

A climatologia têm também um significativo carácter estatístico, no sentido em que o clima pode ser definido como a descrição da distribuição estatística (estatísticas de localização, dispersão e momentos de ordem superior) das variáveis atmosféricas, para um período suficientemente longo, que pode variar de alguns meses a milhares ou milhões de anos (Allwood *et al.*, 2014), mas é comum adotar o período clássico de 30 anos recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (Guttman, 1989; Pereira, 2015). Neste âmbito, importa salientar que para caracterizar estatisticamente uma situação é necessário considerar um conjunto de eventos ou um ensemble¹ e que a adoção da hipótese ergódica conduz à igualdade entre médias do ensemble e no tempo². Neste âmbito, importa salientar que para caracterizar estatisticamente uma situação é necessário considerar um conjunto de eventos ou um *ensemble*⁴ e que a adoção da hipótese ergódica conduz à igualdade entre médias do ensemble e no tempo⁵.

A operacionalização desta definição estatística da climatologia, a qualquer escala espaço temporal, exigem dados em quantidade e com a qualidade necessárias, incluindo duração, resolução temporal, cobertura e resolução espaciais adequadas. Atualmente está disponível uma grande quantidade de bases de dados, observados estações meteorológicas, dados em rede, reanálises e simulados por modelos atmosféricos globais ou regionais, com elevada resolução espaço temporal e suficientemente longas.

Contudo, importa salientar que a existência de bases de dados de grande dimensão (espaço temporal) reflete o facto de a aplicação do método científico na investigação em meteorologia e climatologia estar condicionada. Em outras áreas científicas, é possível projetar e executar experiências perfeitamente controladas para testar hipóteses e previsões. Contudo, não é possível

colocar a Atmosfera ou o SC nos estados adequados para testar a hipótese ou previsão, isto é, nas condições dos estudos. É neste sentido que a Atmosfera se apresenta como laboratório de investigação em Física, quer através da sua monitorização, quer através da sua modelação e simulação. Por um lado, a observação meteorológica pretende medir o maior número de variáveis/propriedades, em todo o globo, desde a superfície até aos níveis mais elevados da Atmosfera, durante o período mais longo possível que possibilite registar a maior quantidade possível de dados, na esperança de que possa incluir a informação necessária para a investigação. Por outro, os modelos atmosféricos, ainda que sejam apenas uma representação limitada da realidade, podem ser utilizados para simular a atmosfera e fornecer uma descrição aproximada do seu comportamento nas condições definidas para os estudos.

3) A investigação da influência das condições atmosféricas nos incêndios

O estudo dos padrões sinóticos associados aos grandes incêndios de verão em Portugal, publicado em 2005 (Pereira *et al.*, 2005), teve em conta as especificidades da investigação em meteorologia e climatologia e, naturalmente, seguiu o método científico, embora as diferentes fases possam não ter sido descritas explicitamente no manuscrito. A observação e motivação para o estudo foi o problema dos incêndios em Portugal, em particular a sua magnitude, quer em termos da incidência do fogo (número de incêndios e área ardida), quer em termos das suas consequências. A pergunta foi de como se explica a variabilidade inter-anual observada na incidência do fogo em Portugal continental. A compilação do conhecimento foi realizada com os resultados da pesquisa bibliográfica sobre o tema. A hipótese formulada foi: será que a variabilidade inter-anual da incidência do fogo se deve, ainda que parcialmente, a condições atmosféricas anómalas, nomeadamente (i) à existência de longos períodos de seca com ausência de precipitação no final da primavera e início do verão (anomalia climática) e (ii) à ocorrência de veranicos muito intensos em dias de situações sinóticas extremas (anomalia meteorológica)? A previsão consistiu em que as condições atmosféricas, antes da época de incêndios e durante o período de ocorrência dos incêndios, teriam de ser significativamente diferentes das normais⁶. Para testar a previsão, foi adotada uma metodologia, base-

⁴ Conceito da mecânica estatística que consiste em sistemas identicamente construídos, cada um num estado independente dos estados dos outros membros do Ensemble.

⁵ Para descrição mais detalhada, consultar subcapítulo 2.2 do livro *Physics of Climate* (Peixoto and Oort, 1992).

ada na análise de compósitos e testes de significância estatística, que permitiu identificar e caracterizar os padrões sinóticos atmosféricos, bem como avaliar a significância estatística das diferenças obtidas. O Desenvolvimento da teoria sobre a influência das condições atmosféricas/meteorológicas nos incêndios prosseguiu com a incorporação dos resultados e conclusões deste estudo e o processo foi concluído com a preparação, submissão e publicação do manuscrito.

Importa descrever algumas das fases com maior detalhe. De acordo com os relatórios anuais do Sistema Europeu de Informação sobre Incêndios Florestais⁷ (*European Forest Fire Information System*, EFFIS) dessa época, os incêndios na Europa afetavam principalmente os países da bacia Mediterrânica, em particular a Península Ibérica (*Schmuck et al.*, 2006). Apesar de se terem passado quase 20 anos, a situação não se alterou. No período 1980 – 2020, Portugal continua a ser, em termos absolutos, o país onde se registou o maior número de incêndios e o segundo maior valor de área ardida, apesar da sua menor dimensão territorial em comparação com os outros países do sul da Europa (*San-Miguel-Ayanz et al.*, 2021). Para perceber a motivação para este estudo, importa referir que, dois anos antes, o verão de 2003 tinha sido excecionalmente quente na Europa, particularmente durante as duas primeiras semanas de agosto, quando se observou uma sequência devastadora de grandes incêndios, queimando uma área de cerca de 450000 ha, o maior valor alguma vez registado em Portugal, até essa altura (*Trigo et al.*, 2006).

Outro fator motivacional para o estudo, e para te o verão o que ajuda a explicar o padrão de variabilidade intra-anual da incidência do fogo. A distribuição temporal da incidência do fogo revela também uma elevada variabilidade inter-anual, com anos onde se registam valores muito elevados de número de incêndios e/ou área ardida e outros anos em que as duas métricas da incidência do fogo assumem valores relativamente mais baixos. A Hipótese deste estudo pretende atribuir este padrão ao agravamento das condições habitualmente adversas para a vegetação durante o verão, devido à ocorrência de eventos extremos de temperatura e precipitação, nomeadamente ondas de calor e seca, como se viria a verificar (*Parente et al.*, 2018, n.d.).

A metodologia utilizada no estudo para testar a Hipótese incluiu a análise de compósitos das variáveis atmosféricas/meteorológicas e testes de

significância estatística. A análise de compósitos consiste no cálculo de duas médias aritméticas temporais enquanto o teste visava concluir se essas médias eram, ou não, estatisticamente diferentes. Uma das médias é calculada para todo o período de dados, que se deseja ser tão longo quanto possível, preferencialmente 30 anos, e, por essa razão, se denomina média climatológica ou normal climática. A outra média é calculada apenas para um subperíodo, substancialmente menor, é denominada de compósito. A diferença entre o compósito e a média climatológica é a anomalia e tem uma interpretação muito simples. Se a anomalia for positiva (negativa) isso significa que o compósito é superior à média climatológica, ou seja, para o para o subperíodo considerado, os campos meteorológicos assumem, em média, valores mais elevados (baixos) que o normal. Não é suficiente avaliar o sinal da anomalia, mas também tem de se testar se a magnitude da anomalia é estatisticamente significativa, ou seja, se o compósito e a média climatológica são estatisticamente diferentes. Importa salientar que estas metodologias estão perfeitamente de acordo com o fato de a Atmosfera ser um laboratório de investigação, tal como referido na seção anterior, com a necessidade de dispor de grandes quantidades de dados e com o carácter estatístico da climatologia.

Os resultados obtidos incluíram a identificação e caracterização dos padrões atmosféricos associados com a ocorrência de grandes incêndios em Portugal, bem como a avaliação da influência da precipitação. No primeiro caso, os resultados indicam que a ocorrência de grandes incêndios de verão tende a ocorrer associada com condições atmosféricas anómalas, caracterizadas por ventos com significativa componente de leste, associadas a massas de ar terrestres e, por isso, anormalmente quentes e secas durante o verão, à superfície e em altitude, contribuindo para a forte advecção de energia de sul (do norte de África) e de leste (de Espanha) depois de atravessar o planalto ibérico central sobreaquecido, confirmando o ditado popular “De Espanha, nem bom vento, nem bom casamento” (Pais, 1985). No segundo caso, foi verificada a existência de correlação significativa entre a área ardida no verão e a precipitação, nomeadamente o coeficiente de correlação positivo com a precipitação de inverno e princípio da primavera (P_{GFMA} , precipitação acumulada de janeiro a abril) e negativo com a precipitação de final de primavera e verão (P_{GFMA} , precipitação acumulada de maio a agosto). Finalmente, foi desenvolvido um modelo de regressão múltipla com base em apenas dois preditores: a P_{GFMA} e um índice meteorológico baseado numa variável meteorológica (a altura do geopotencial ao nível de 500 hPa) e na distância euclidiana entre o padrão sinótico de cada dia e o padrão sinótico médio calculado para os dias de ocorrência dos grandes incêndios. No fundo, este índice mede quão diferente é o padrão diário em relação ao padrão associado à ocorrência de grandes incêndios. Este modelo demonstrou que as condições meteorológicas/climáticas explicam cerca de 2/3 da variabilidade inter-anual da área ardida de verão em Portugal continental.

⁶ Normais do clima definidas como médias calculadas para um período uniforme e relativamente longo, compreendendo pelo menos três períodos consecutivos de dez anos (Regulamento Técnico da Organização Meteorológica Mundial).

⁷ Designação habitual na Europa dos incêndios de vegetação.

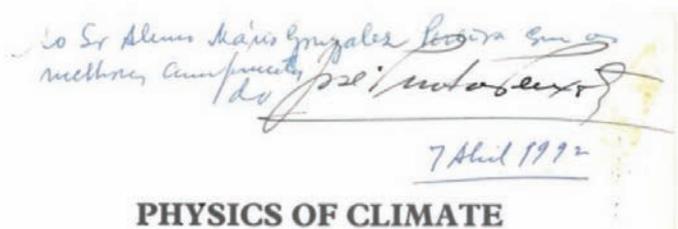


Figura 2 - Dedicatória de J. P. Peixoto no seu livro *Physics of Climate*

4) Conclusões

Foram descritas e salientadas algumas das características fundamentais da investigação em meteorologia e climatologia que obrigam a algumas adaptações do método científico, incluindo o conceito de Atmosfera como laboratório de Física, associado à necessidade de monitorização e simulação da Atmosfera, o carácter composto, dinâmico e complexo do Sistema Climático, e os alicerces da climatologia nas leis da Física e na estatística como fica bem patente no livro *Physics of Climate*. Para ilustrar algumas destas características salientadas neste manuscrito, bem como o visionarismo do Prof. Peixoto, transcrevo o resumo do artigo *Physics of Climate*, de Peixoto e Oort publicado na *Reviews of Modern Physics*, em 1984, mas que bem poderia ser um resumo atual do livro com o mesmo título, publicado quase uma década depois,

"A review of our present understanding of the global climate system, consisting of the atmosphere, hydrosphere, cryosphere, lithosphere, and biosphere, and their complex interactions and feedbacks is given from the point of view of a physicist. This understanding is based both on real observations and on the results from numerical simulations. The main emphasis in this review is on the atmosphere and oceans. First, balance equations describing the large-scale climate and its evolution in time are derived from the basic thermohydrodynamic laws of classical physics. The observed atmosphere-ocean system is then described by showing how the balances of radiation, mass, angular momentum, water, and energy are maintained during present climatic conditions. Next, a hierarchy of mathematical models that successfully simulate various aspects of the climate is discussed, and examples are given of how three-dimensional general circulation models are being used to increase our understanding of the global climate "machine." Finally, the possible impact of human activities on climate is discussed, with main emphasis on likely future heating due to the release of carbon dioxide in the atmosphere."

Este manuscrito pretendeu homenagear o Prof. José P. Peixoto, celebrar os 30 anos da publicação da sua obra, o livro *Physics of Climate* e os 100 anos do nascimento do Prof. Peixoto. Tive a oportunidade de ser seu aluno em várias unidades curriculares e muito do meu conhecimento atual sobre meteorologia e climatologia foi aprendido nas suas aulas. Muitos dos atuais professores universitários não receberam formação formal para se-

rem docentes. Integro este grupo, e para tentar desempenhar adequadamente a minha atividade, segui as metodologias de ensino dos meus professores que considereei como os melhores. O Prof. Peixoto foi certamente um deles, embora não tenha adotado a sua prática pedagógica de dar calduços aos alunos.

Era aluno do Prof. Peixoto quando o seu livro foi publicado. Nesse ano, a turma tinha apenas três estudantes: eu e duas colegas. Algumas das suas aulas foram lecionadas com o apoio do *Physics of Climate* pelo que a sua aquisição foi recomendada. Na altura, comprar um livro no estrangeiro não era tão fácil nem rápido como é hoje. No final do semestre, o Prof. Peixoto disponibilizou o seu próprio exemplar para poder ser adquirido por um de nós. Muito ao seu estilo, agitando o livro na mão, perguntou na aula quem estava interessado em adquirir o livro. Tive a sorte de ter sido o escolhido e posso afirmar que continuo a ser o proprietário de um dos primeiros exemplares do *Physics of Climate* do próprio Prof. Peixoto. O livro já estava assinado por si – a preto –, mas quando mo entregou, escreveu uma dedicatória – agora, a azul (Figura 2)!

Enquanto investigador e docente, continuo a utilizar e a recomendar o livro *Physics of Climate* pela sua atualidade e pertinência para o estudo da teoria do clima, tal como algumas das revisões/apreciações do livro já deixavam antever:

"A superb reference." *Physics Today*.

"Will become a classic text in climate research." *Physics World*.

"Valuable to anyone who studies, models, or uses the climate of the earth." *Bulletin of the American Meteorological Society*.

"Informative and authoritative on a remarkably wide range of topics." *Nature*.

Agradecimentos

Não posso deixar de felicitar a Sociedade Portuguesa de Física, na pessoa da sua presidente, Prof. Maria Conceição Abreu, a Gazeta de Física na pessoa do seu diretor, o colega Bernardo Almeida, e o editor da edição especial, o colega Carlos da Camara, pela iniciativa de homenagear o Professor José Pinto Peixoto e de agradecer o convite para participar no número especial da Gazeta de Física dedicado aos 30 anos da publicação do livro *Physics of Climate* e celebrar os 100 anos do nascimento do Prof. Peixoto. Este trabalho foi apoiado/financiado por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, no âmbito do projeto UIDB/04033/2020.

Referências

- [1] Allwood, J.M., Bosetti, V., Dubash, N.K., D', M., Brazil, A. Baiocchi, G., Barrett, J., Broome, J., Brunner, Steffen, Olvera, M.C., Clark, H., Clarke, L., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlömer, S., Von Stechow, C., Zwickel, T., Minx, J.C., 2014. Oswaldo Lucon (Brazil), Andreas Löschel (Germany). Pete Smith.
- [2] Andersen, H., Hepburn, B., 2015. Scientific method.
- [3] Coleman, J.S.M., Law, K.T., 2015. Meteorology, in: Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09492-6>
- [4] Gauch Jr, H.G., Gauch Jr, H.G., Gauch, H.G., 2003. Scientific method in practice. Cambridge University Press.
- [5] Guttman, N.B., 1989. Statistical Descriptors of Climate, journals.ametsoc.org.
- [6] Kosso, P., 2011. A summary of scientific method. journals.ametsoc.org.
- [7] Pais, J.M., 1985. «De Espanha nem bom vento nem bom casamento»: sobre o enigma sociológico de um provérbio português. *Análise Soc.* 21, 229-243.
- [8] Parente, J. Amraoui, M., Menezes, I., Total, M.P.-S. of the, 2019, undefined, n.d. Drought in Portugal: Current regime, comparison of indices and impacts on extreme wildfires. Elsevier.
- [9] Parente, J., Pereira, M.A.-S. of the total, 2018, U., 2018. Heat waves in Portugal: Current regime, changes in future climate and impacts on extreme wildfires. Elsevier.
- [10] Parente, J., Pereira, M.G., Tonini, M., 2016. Space-time clustering analysis of wildfires: The influence of dataset characteristics, fire prevention policy decisions, weather and climate. *Sci. Total Environ.* 559, 151-165. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.129>
- [11] Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11, 1633-1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- [12] Peixoto, J., Oort, A., 1992. Physics of climate.
- [13] Pereira, M.G., 2015. Mathematics of Energy and Climate Change: From the Solar Radiation to the Impacts of Regional Projections. Springer, Cham, pp. 263-295. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16121-1_12
- [14] Pereira, M.G., Trigo, R.M., DaCamara, C.C., Pereira, J.M.C., Leite, S.M., 2005. Synoptic patterns associated with large summer forest fires in Portugal. *Agric. For. Meteorol.* 129, 11-25. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.12.007>
- [15] San-Miguel-Ayanz, J., Durrant, T., Boca, R., Maianti, P., Liberta, G., Artes-Vivancos, T., Oom, D., Branco, A., De Rigo, D., Ferrari, D., 2021. Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2020, EUR 30862 EN.
- [16] Schmuck, G., San-Miguel-Ayanz, J., Barbosa, P., Camia, A., Kucera, J., Libertá, G., Amatulli, G., Boca, R., Schulte, E., Dierks, H.H., 2006. Forest Fires in Europe.
- [17] Trigo, R.M., Pereira, J.M.C., Pereira, M.G., Mota, B., Calado, T.J., DaCamara, C.C., Santo, F.E., 2006. Atmospheric conditions associated with the exceptional fire season of 2003 in Portugal. *Int. J. Climatol.* 26, 1741-1757. <https://doi.org/10.1002/joc.1333>
- [18] Voit, E.O., 2019. Perspective: Dimensions of the scientific method. *PLoS Comput. Biol.* <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1007279>
- [18] Voit, E.O., 2019. Perspective: Dimensions of the scientific method. *PLoS Comput. Biol.* <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1007279>
- [19] Yeoman, K., Bowater, L., Nardi, E., 2015. The representation of research in the national curriculum and secondary school pupils' perceptions of research, its function, usefulness and value to their lives. *F1000Research* 4, 1442. <https://doi.org/10.12688/f1000research.7449.1>
- [20] Zhang, Z., Moore, J.C., 2015. Climate and Earth System Models, in: *Mathematical and Physical Fundamentals of Climate Change*. Elsevier, pp. 457-472. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-800066-3.00014-0>



Mário Gonzalez Pereira, terminou a Licenciatura em Ciências Geofísicas (1993), o Mestrado em Ciências Geofísicas, na área de Especialização de Meteorologia (1998) e o Doutoramento em Física, Meteorologia (2005), na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL). É Professor Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, investigador do Centro de Investigação e de Tecnologias Agro-Ambientais e Biológicas (CITAB) e colaborador do Instituto Dom Luiz (IDL) da FCUL. É vice-presidente da Associação Portuguesa de Meteorologia e Geofísica. Mário é um geocientista especializado em meteorologia e climatologia, com especial interesse na gestão, ensino e investigação das condições atmosféricas, caracterização, variabilidade e alterações climáticas, eventos extremos, seus impactos nos sistemas humanos e naturais, incêndios florestais, hidrologia e termodinâmica.

Alterações Climáticas em Portugal: projeções de alta resolução

Rita M. Cardoso¹, Pedro M.M. Soares¹, Daniela C.A. Lima¹

¹ Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 1749-016 Lisboa, Portugal
rncardoso@fc.ul.pt

Resumo

Os últimos relatórios do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas afirmam de forma explícita que as alterações climáticas são o resultado da ação antrópica. Os modelos globais e regionais de clima são a única forma para avaliar e efetuar projeções de alterações climáticas futuras. Assim, estabeleceram-se consórcios internacionais de modelação climática que permitem o estabelecimento de cenários climáticos futuros. Aqui, recorrendo às simulações climáticas do consórcio do EURO-CORDEX, apresentam-se os resultados das projeções sintetizadas para Portugal. De acordo com os cenários aqui apresentados, Portugal terá uma redução significativa da precipitação, associada a um aumento de eventos com precipitação extrema. As alterações climáticas far-se-ão sentir mais intensamente no final do século, particularmente na primavera e outono. Estes cenários revelam a intensificação da vulnerabilidade hídrica do país não só em termos de precipitação média com também em termos de extremos (secas ou inundações). As alterações da temperatura em território nacional serão mais severas nas zonas do interior, particularmente no nordeste transmontano e Beira Interior. Em termos de média anual, são expectáveis subidas máximas de 4,5 °C no interior e de 3 °C a 4 °C nas zonas costeiras. Mesmo no cenário mais moderado, a temperatura máxima média será, a meio do século, 1 °C mais elevada do que a de 1971-2000. No caso da temperatura mínima, projeta-se uma redução significativa de dias frios e com geada, mas também aumentos significativos de noites tropicais. As subidas de ambas as temperaturas nas estações intermédias (primavera e outono) terão reflexos no aumento do período de crescimento das plantas e antecipação dos períodos de florescimento e maturação de várias espécies. A amplificação das temperaturas máximas no verão conjugada com a redução da precipitação aumentará o stress hídrico podendo amplificar a mortalidade de algumas espécies.

1. Introdução

O clima das zonas mediterrânicas é caracterizado por invernos temperados e húmidos e por verões secos e quentes, representando os grandes gradientes espaço-temporais de

precipitação a grande vulnerabilidade desta região às alterações climáticas. De 1850 até 2020, a temperatura média global aumentou em média 1,09 °C, entre 0,95 °C e 1,20 °C, sendo os derradeiros 30 anos os mais quentes dos últimos 1400 anos [1] e com cada década mais quente do que as anteriores. Paralelamente ao aquecimento médio, registou-se uma intensificação dos eventos extremos [2, 3] e na Europa ocidental, de 1880 até 2005, a amplitude térmica diária não só aumentou cerca de 6 % como triplicou a frequência do número de dias com temperaturas acima dos 35 °C [4]. Estas alterações são inequivocamente resultantes da ação antrópica [1]. A avaliação integrada destas transformações e das projeções de futuras alterações climáticas, a qualquer escala espacial (da global até à local) e temporal (da secular à horária) só podem ser realizadas recorrendo a conjuntos de resultados de simulações climáticas provenientes de modelos globais de clima (GCM) ou modelos regionais de clima (RCM). Só recorrendo a um ensemble de projeções é que é possível uma avaliação quantitativa destas e uma caracterização da sua incerteza inerente. Com este fim, a comunidade científica tem desenvolvido um conjunto de projetos coordenados para facultar projeções climáticas à escala planetária CMIP (*Coupled Model Intercomparison Project*), cujos modelos partilham vários aspetos computacionais. As projeções futuras do clima para diferentes cenários climáticos segue os procedimentos estabelecidos pelo Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC [1]). No projeto global CMIP5, utilizaram-se GCM, alicerçados na dinâmica e física da atmosfera, para obter uma coletânea de cenários passados (1800 até 2005) e de futuros (2005-2100). Nestes últimos, consideraram-se 4 cenários de emissão de gases com efeito de estufa, caracterizados pelo incremento da irradiância no final do sec XXI, em comparação com o período pré-industrial (RCP2.6, RCP4.5, RCP6, RCP8.5). O primeiro corresponde a um incremento do forçamento radiativo de 2,6 W/m² e neste caso, dois terços dos modelos pro-

jetam temperaturas globais superiores à temperatura pré-industrial entre 0,3 °C e 1,7 °C [5,6]. Dado o irrealismo do calendário de redução das emissões dos gases com efeito de estufa e dos desenvolvimentos tecnológicos necessários para a mitigação dos efeitos do aumento do CO₂, este é o cenário menos verosímil e simulado. Em contrapartida, o cenário RCP8.5 assume emissões crescentes dos gases de efeito de estufa ao longo de todo o século XXI [7], representando um aumento da irradiância de 8,5 W/m² e um agravamento da temperatura entre 2,6 °C e 4,8 °C no final do século. Embora este seja o cenário mais severo e extremo, é também o mais credível se não houver alterações da taxa de emissões. No cenário intermédio, RCP4.5, as emissões estabilizam cerca de 2040 e em 2070 serão inferiores às atuais, enquanto no cenário RCP6 as emissões só estabilizam cerca de 2080. As projeções de dois terços dos modelos são, temperaturas superiores entre 1,1 °C e 2,6 °C no primeiro caso e 1,4 °C e 3,1 °C no segundo cenário. Todos os GCMs envolvidos no CMIP5 preveem um aumento maior das temperaturas de verão, com um incremento maior nas temperaturas máximas do que nas mínimas e vice-versa no inverno. Todos os modelos menos um, projetam uma redução da severidade e número dos eventos extremos de frio e inversamente, uma amplificação dos eventos extremos associados à temperatura máxima. Devido à amplificação da temperatura, é expectável que a quantidade de vapor de água na atmosfera aumente cerca de 7 %/K induzindo um incremento de precipitação global, que, no entanto, não será igualmente distribuída por todas as regiões. São expectáveis alterações de intensidade e dos padrões de precipitação, com as zonas secas tornando-se ainda mais secas e as húmidas mais húmidas [8, 9]. A resolução horizontal destes modelos é, no entanto, insuficiente para caracterizar os processos termo-hidrodinâmicos da atmosfera à escala regional ou local. Assim, para se efetuar uma avaliação dos impactos das alterações climáticas a estas escalas é necessária a utilização de coletâneas de modelos regionais de clima (RCM). Estes representam apenas uma fração do globo, necessitando por isso, de informação nos limites externos da região representada. Esta é facultada pelos GCM e, é o binómio RCM/GCM que é utilizado nas projeções regionais de clima. Nas últimas décadas, três projetos, coordenando os principais centros de meteorologia europeus, dedicaram-se à elaboração de cenários climáticos para o século XXI - PRUDENCE [10], ENSEMBLES [11, 12] e EURO-CORDEX [13]. Este último corresponde ao domínio europeu do *World Climate Research Program Coordinated Regional Downscaling Experiment* (CORDEX), onde um grande conjunto de simulações à escala continental é realizado usando os GCM do CMIP5 como condições fronteira. No EURO-CORDEX, foi definido um domínio europeu comum a todos os modelos, tendo as simulações duas resoluções horizontais – 0,44° (~50 km) e 0,11° (~12 km). Todos os modelos efetuaram simu-

lações para o período 1970-2100. A análise dos resultados revelou que a resolução mais baixa representa igualmente bem as características médias da atmosfera para grandes sub-regiões e para largas escalas temporais (anuais e sazonais). Os resultados das simulações revelaram a capacidade dos modelos de simular corretamente as características do clima europeu, incluindo a sua variabilidade espaço-temporal [14]. No entanto, e de uma forma geral, certas zonas da Europa são excessivamente húmidas com temperaturas inferiores às observadas e nalguns modelos, as temperaturas do sul e sudoeste europeu são mais elevadas do que as observadas. Os cenários do EURO-CORDEX evidenciam alterações robustas e significativas de temperatura e precipitação, que embora estejam alinhadas com as dos modelos globais, apresentam um maior detalhe espacial e temporal e alguma amplificação dos extremos em algumas regiões. Muito embora a representação dos extremos de temperatura e precipitação tenha associada uma maior incerteza, o aumento da resolução espacial reduz os erros, particularmente nas regiões costeiras e montanhosas, consubstanciando a necessidade da realização de simulações de alta resolução.

Dada a dispersão dos resultados individuais dos diversos modelos e dado que a qualidade dos modelos individuais varia consoante a variável analisada e das métricas utilizadas na avaliação, impossibilitando a determinação de o melhor modelo, a análise dos resultados deve ser efetuada de forma probabilística. A metodologia consensual para a redução da incerteza baseia-se na construção de ensembles onde os resultados dos modelos individuais são pesados de acordo com a sua performance [15]. Assume-se, assim, que se consegue reduzir a incerteza se os resultados dos “melhores” modelos pesarem mais na construção das projeções probabilísticas.

Os resultados da precipitação, temperatura máxima e mínima dos modelos do EURO-CORDEX para os cenários RCP4.5 e RCP8.5, juntamente com os resultados de uma simulação de alta resolução do modelo WRF [16] para o cenário RCP8.5, são aqui analisados de modo a quantificar as alterações climáticas expectáveis para Portugal. A análise focar-se-á nos períodos 2041-2070 e 2071-2100, propondo-se a construção de ensembles multimodelo, de modo a reduzir a incerteza associada às projeções. Primeiro, os resultados correspondentes ao período histórico (1971-2000) são comparados com observações do Instituto Português do Mar e Atmosfera e é estabelecido um ranking de modelos. Em seguida, é efetuada a construção de ensembles, sendo estes igualmente avaliados. Por fim, analisam-se as projeções, quantificando o sinal das alterações climáticas dos períodos 2041-2070 e 2071-2100 relativamente ao clima de 1971-2000.

2. Dados e Métodos

2.1 Simulações EURO-CORDEX

A precipitação diária, temperatura máxima e mínima diária para as duas resoluções horizontais, 0,44° e 0,11°, do EURO-CORDEX foram obtidas no portal ESGF¹ (*Earth System Grid Federation*). Os resultados são provenientes de 9 institutos europeus (incluindo o Instituto Dom Luiz), correspondendo a 9 RCM diferentes. Dado que alguns dos RCMs utilizaram vários GCM como condições fronteira, esta análise inclui 19 simulações a 0,44° de resolução e 15 a 0,11°. Pormenores do

binómio RCM/GCM encontram-se descritos nas tabelas 1 de [17] e [18].

2.2 Simulações WRF

O modelo Weather Research and Forecasting (WRF) provou ser uma ferramenta assaz eficaz na simulação de alta resolução do clima atual da Península Ibérica; e.g. temperatura e precipitação [19,20]; ciclo de humidade [21]; vento junto à costa [22]; ciclo diurno da nebulosidade costeira [23]; estudos de propagação de fogo [24, 25] e caracterização de potencial de arrefecimento de edifícios [26]. A qualidade dos resultados validou as configurações da simulação de clima presente de modo a permitir a sua utilização em simulações de cenários climáticos. Os resultados para a precipitação e temperatura máxima e mínima do WRF forçado pelo GCM EC-EARTH [27] são aqui apresentados. Dada a elevada resolução horizontal destas simulações (9 km), optou-se por simular apenas o cenário RCP8.5 e os períodos 1971-2000 e 2071-2100.

2.3 Observações

A temperatura máxima e mínima para o período de 1971 a 2000 empregue na validação dos modelos, proveio de 42 estações meteorológicas do Instituto Português do Mar e Atmosfera (figura 1) e a validação da precipitação baseou-se na precipitação diária da grelha regular a 0,2° (~22 km) de resolução [28].

2.4 Construção do ensemble

A metodologia aqui descrita corresponde à de [17] e [18]. A capacidade de cada um dos modelos para descrever as características espaço-temporais do clima presente é avaliada recorrendo ao cálculo de métricas estatísticas. Assim, procurou-se investigar a correspondência entre os resultados dos modelos e as observações para o período 1971-2000. Para cada modelo, os valores da temperatura correspondem aos valores do ponto de grelha mais próximo da localização das estações observacionais. No caso da precipitação diária, a grelha de cada modelo foi interpolada para a grelha a 0,2° das observações. Para ambas as resoluções (0,44° e 0,11°) estabeleceu-se um ranking dos modelos para cada uma das métricas e o ensemble foi construído através da seleção dos três melhores modelos, no caso da precipitação [18] e através do produto ou da média dos rankings normalizados nos casos das temperaturas [17]. Para cada resolução, foi igualmente criado um ensemble resultante da média de todos os modelos. Para a precipitação, de todos os ensembles, o que revelou melhor performance foi aquele resultante da média dos três melhores modelos com

0,11° de resolução. Nas temperaturas, o ensemble a 0,11° de resolução resultante do produto dos rankings revelou ser o que exibiu melhores resultados. A tabela 1 apresenta os resultados de algumas das métricas calculadas para estes ensembles. A qualidade dos resultados é comprovada pelos baixos valores de viés e erros médios absolutos, a elevada correlação espacial, a sobreposição entre as distribuições ($S = 100$, sobreposição perfeita) e na proximidade de 1 do desvio padrão normalizado. De uma forma geral, os modelos são ligeiramente mais secos e frios do que as observações (vieses negativos).

A figura 1 ilustra a representação da precipitação e temperatura máxima e mínima dos dados observacionais do IPMA, dos ensembles multimodelo do EURO-CORDEX e do modelo WRF. Esta evidencia a clara capacidade do ensemble e WRF para representarem os gradientes norte-sul da precipitação e temperatura máxima, assim como os gradientes nordeste-sudoeste da temperatura mínima.

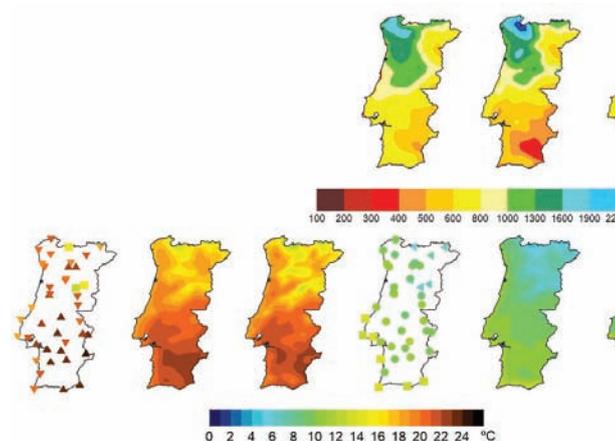


Figura 1 - Precipitação anual para a grelha 0,2° do IPMA, para o ensemble multimodelo EURO-CORDEX e WRF9km (linha superior). Temperatura máxima para as estações observacionais do IPMA, ensemble multimodelo EURO-CORDEX e WRF9km e temperatura mínima para as estações observacionais do IPMA, ensemble multimodelo EURO-CORDEX e WRF9km (linha inferior)

Tabela 1 Erros globais do ensemble multimodelo do EURO-CORDEX e do WRF9km

	Ensemble	Vies%	EMA%	Desvio Padrão Normalizado	Correlação Espacial	S
Prec.	ENS_S_0.11	-6.54	15.76	1.08	0.93	95.53
	WRF9km	-7.04	20.3	1.05	0.80	94.2
	Ensemble	Vies	EMA	Desvio Padrão Normalizado	Correlação Espacial	S
Tmax	ENS_WP_0.11	-0.84	1.09	1.06	0.96	90.69
	WRF9km	-1.01	1.22	1.05	0.95	91.54
Tmin	ENS_WP_0.11	-0.36	1.08	1.05	0.87	92.60
	WRF9km	-1.41	1.82	1.05	0.73	87.95

3 Alterações climáticas para Portugal

3.1 Precipitação

A figura 2 apresenta as anomalias relativas da precipitação anual para o WRF e para o ensemble multimodelo EURO-CORDEX. Para cada um dos cenários consideraram-se projeções para dois períodos de 30 anos (2041-2070 e 2071-2100); sendo estes comparados com o período de referência 1971-2000. Para o primeiro período, prevêem-se reduções de precipitação inferiores a 10 % em praticamente todo o território continental exceto no sudoeste alentejano onde decréscimos entre 10 % e 15 % são expetáveis. O sinal das alterações climáticas para meio do século é semelhante para os dois cenários. No final do século, o sinal dos dois cenários é deveras díspar. No cenário RCP4.5 as emissões no final do século são inferiores às do período 2041-2070 prevendo-se um desagravamento das condições secas. Assim, nes-

te cenário a projeções apontam para uma redução maioritariamente inferior a 5 %. No cenário RCP8.5 as alterações da precipitação anual são muito significativas, sendo expeáveis decréscimos superiores a 20 % no sudoeste e sul de Portugal no caso do ensemble e maiores do que 25 % no caso da simulação WRF. Excetuando o litoral norte e algumas zonas do sudeste transmontano, as projeções apontam para precipitações anuais no período 2071-2100 inferiores entre 15 % e 20 % relativamente ao período histórico (1971-2000). Segundo [18] as alterações das taxas de precipitação ocorrerão essencialmente na primavera (-30 % a -40 %) e outono (-20 % a -30 %), não se prevendo alterações significativas na precipitação de inverno. Associada à redução da precipitação, é igualmente expectável uma redução de dias de chuva (figura 3). Enquanto entre 2041 e 2070 ambos os cenários apontam para diminuições entre 10 % e 15 %; no final do século XXI, o cenário mais drástico prevê reduções entre 15 % e 25 %. Este padrão é comum a todas as resoluções dos ensembles do EURO-CORDEX representando por isso um sinal robusto de alteração do número de dias com pluviosidade. A maior resolução da simulação WRF indica um decréscimo ainda mais acentuado no sul de Portugal. Reduções desta ordem de grandeza aumentam significativamente a vulnerabilidade hídrica do país. Segundo os mesmos autores, no final do século são expectáveis cerca de 120 dias por ano com precipitação no Noroeste, contrastando com apenas 70 dias no sudeste. As características da precipitação sofrerão também alterações significativas; prevendo-se um aumento da precipitação intensa (maior que 20 milímetros por dia) e uma redução dos dias com precipitações inferiores a 20 mm. A conjugação destes fatores não só reduzirá a capacidade dos solos para reterem água devido ao aumento da escorrência, como potenciará a erosão destes.

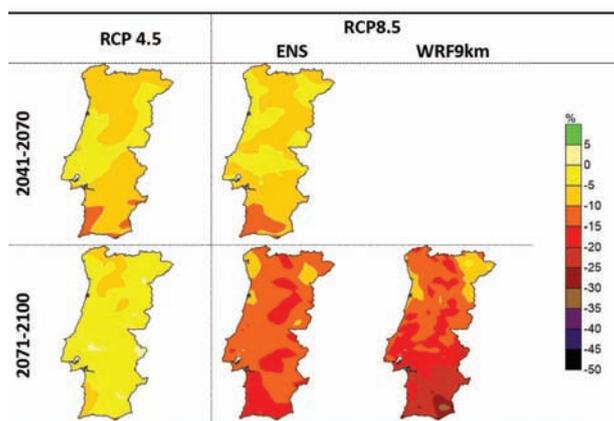


Figura 2 - Anomalias relativas da precipitação anual para WRF9km e para o *ensemble* multimodelo EURO-CORDEX ([2041-2070 menos 1971-2000]/[1971-2000] e [2071-2100 menos 1971-2000]/[1971-2000]).

3.2. Temperatura

As projeções para as alterações da temperatura são algo severas, particularmente para o cenário RCP8.5 (figuras 4 e 5). Note-se que as projeções para o meio

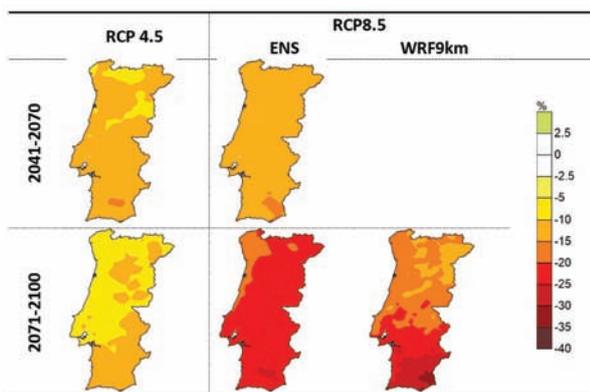


Figura 3 - Anomalias relativas do número de dias por ano com precipitação superior a 1mm. ([2041-2070 menos 1971-2000]/[1971-2000] e [2071-2100 menos 1971-2000]/[1971-2000]).

do século (2041-2070), no cenário RCP8.5 são semelhantes às do cenário RCP4.5 para o final do século. Em todas as projeções, as zonas do interior estarão sujeitas a maiores incrementos de temperatura e as alterações são mais significativas na temperatura máxima do que na mínima. Apesar do cenário RCP4.5 ser considerado um cenário moderado, a subida média da temperatura máxima entre 2041-2070 é superior a 1 °C relativamente a 1971-2000 e no final do século registar-se-ão aumentos superiores a 2 °C. No caso do cenário RCP8.5, as regiões do nordeste transmontano e Beira interior sofrerão incrementos superiores a 4,5 °C, enquanto as zonas costeiras registarão aumentos de 3 °C a 4 °C. As projeções do modelo WRF são mais amenas, no entanto, algumas zonas do interior sofrerão temperaturas máximas superiores em 4 °C relativamente ao período 1971-2000. [17] demonstra que apesar das diferenças entre os modelos individuais, o sinal dos vários modelos do ensemble do EURO-CORDEX é consistente entre cenários. No caso da temperatura máxima os incrementos mais relevantes ocorrem no verão e outono. No verão, projeta-se que no final do século, as temperaturas máximas no nordeste transmontano sejam superiores em 6 °C a 7 °C em relação a 1971-2000 (RCP8.5) e no outono esta será 5 °C a 6 °C mais elevada. A evolução decadal de dias com temperaturas muito quentes (máximas acima de 35 °C), exibe uma taxa de amplificação ao longo de todo o século no cenário RCP8.5, enquanto no cenário RCP4.5 esta abranda a partir de 2040. Entre 1971 e 2000 projetam-se cerca de 3 dias com temperatura máxima acima de 35 °C no ensemble multimodelo do EURO-CORDEX no período 1971-2000 e final do século, estes valores são 4 a 5 vezes mais elevados no cenário RCP8.5.

Tal como para a temperatura máxima, em média, a temperatura mínima em 2041-2070 já será entre 1 °C a 2 °C superior à temperatura mínima de 1971-2000 (RCP4.5 e RCP8.5 respetivamente). Para o último trinténio do século XXI, as projeções no cenário mais severo (RCP8.5) apontam para temperaturas mínimas superiores em 3 °C a 4 °C. No caso do modelo WRF, o padrão das alterações está intimamente ligado à topografia e as projeções indicam incrementos de cerca de 3 °C. Tal como na temperatura máxima, é no verão que as alterações mais expressivas são expectáveis (maiores que 5 °C no nordeste transmontano). A evolução decadal, para todo o século XXI, do número de dias frios revela uma redução 12 dias para cerca de 1 dia por ano em 2071-2100 [17].

Em contraste, o número de noites tropicais (temperaturas mínimas superiores a 20 °C) aumenta de cerca de 10 dias por ano para 50 no cenário mais severo. Enquanto temperaturas mínimas mais elevadas no inverno contribuem para um aumento do conforto térmico, redução das geadas e redução da mortalidade associada ao frio, no verão contribuem para aumentar o desconforto térmico e a mortalidade pois dificultam o arrefecimento noturno do corpo humano.

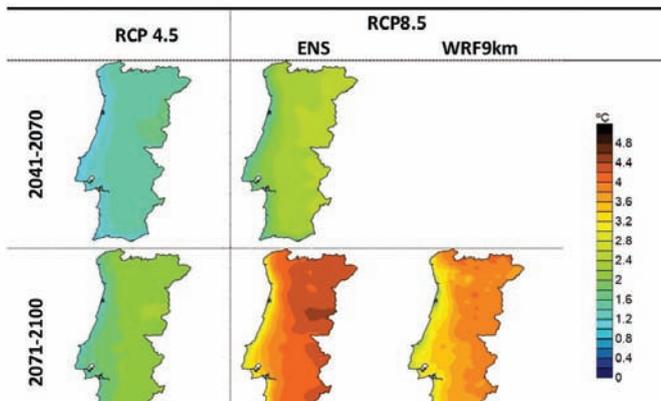


Figura 4 - Anomalias relativas da temperatura máxima média anual para WRF9km e para o *ensemble* multimodelo EURO-CORDEX ([2041-2070 menos 1971-2000]/[1971-2000] e [2071-2100 menos 1971-2000]/[1971-2000]).

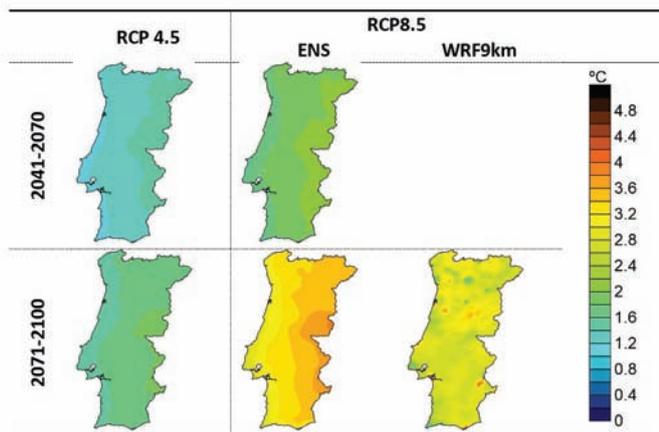


Figura 5 - Anomalias relativas da temperatura mínima média anual para WRF9km e para o *ensemble* multimodelo EURO-CORDEX ([2041-2070 menos 1971-2000]/[1971-2000] e [2071-2100 menos 1971-2000]/[1971-2000]).

4. Considerações finais

O clima resulta de interações não lineares entre as várias componentes do sistema Terra, i.e., atmosfera, hidrosfera, criosfera, biosfera e litosfera. A complexidade dos processos termo-hidrodinâmicos, químicos e bioquímicos e o acoplamento entre os seus sistemas, levam a que a modelação climática seja a única ferramenta disponível para a obtenção de projeções futuras robustas. Nos anos 70, os GCM reproduziam apenas a dinâmica atmosfera, hoje, todo ciclo hidrológico, as interações com a superfície (oceano, solo e gelo), circulação oceânica, ciclo do carbono, química da atmosfera, cobertura vegetal e sua evolução sazonal a decadal e evolução da composição da atmosfera encontram-se representados nos modelos globais. Além da incerteza associada às projeções da evolução da composição da atmosfera e da ocupação do solo, nenhum modelo é capaz de simular de

forma perfeita todas as componentes do sistema. No entanto, estes já conseguem proporcionar uma imagem realista do clima atual e projetar de forma consistente um clima futuro que, devido ao aumento dos gases de efeito de estufa, será inevitavelmente mais quente. Os esforços para a redução da incerteza têm sido ajudados pelo aumento da capacidade computacional, possibilitando a ampliação da resolução horizontal e vertical dos modelos e um incremento do detalhe da representação de todos os processos, nomeadamente os de pequena escala (ex: convecção, formação de nuvens). No entanto, os progressos têm sido lentos, pois a inclusão destes últimos também introduz novas fontes de incerteza relacionadas com a sua representação. A construção de ensembles multimodelo demonstrou ser uma técnica que permite não só reduzir a incerteza dos resultados dos modelos como melhorar a qualidade das projeções, pois os ensembles têm uma performance melhor do que os modelos individuais. Embora os modelos individuais apresentem alguma dispersão de resultados, estes são na generalidade consistentes com as projeções do ensemble multimodelo.

Os grandes desafios que a modelação climática enfrenta estão relacionados com a representação do gelo terrestre, dos aerossóis e da química da atmosfera e a introdução de uma biosfera dinâmica que interage com o clima, alterando-o e sendo por ele transformada. Todos eles com impactos significativos no ciclo da água e do carbono, que podem atuar como amplificadores do efeito de estufa.

Nos próximos dois anos, vai ser efetuado um novo exercício de projeção climática à escala regional, utilizando os mais modernos modelos regionais de clima. Neste novo exercício do EURO-CORDEX, não só se utilizarão como forçadores os resultados provenientes da nova geração de modelos globais de clima, mas também serão incorporados novos processos, como aerossóis e alterações da vegetação. O Instituto Dom Luiz vai novamente participar neste consórcio, visando contribuir para uma avaliação robusta do impacto das alterações climáticas à escala regional.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através dos projetos LEADING (PTDC/CTA-MET/28914/2017) e UIDB/50019/2020 - Instituto Dom Luiz (IDL). Os autores gostariam de agradecer ao IPMA, I.P. pela disponibilização dos dados observados. Os autores gostariam igualmente de agradecer ao *World Climate Research Programme's Working Group on Regional Climate*, e ao *Working Group on Coupled Modelling*, coordenador do CORDEX e responsável pelo CMIP5. Por fim, os autores gostariam de agradecer aos grupos de modelação climática participantes no EURO-CORDEX, pela disponibilização dos seus dados.

Referências

- [1] IPCC (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- [2] Della-Marta PM, Luterbacher J, Weissfluh HV, Xoplaki E, Brunet M, Wanner H (2007) Doubled length of Western European summer heat waves since 1880. *J Geo-phys Res* 112 doi:10.1029/2007JD008510
- [3] Moberg A, Jones P, Lister D, Walther A, Brunet M, Jacobeit J, Alexander L, Della-Marta P, Luterbacher J, Yiou P, Chen D, Tank A, Saladie O, Sigro J, Aguilar E, Alexandersson H, Almarza C, Auer I, Barriendos M, Begert M, Bergstrom H, Bohm R, Butler C, Caesar J, Drebs A, Founda D, Gerstengarbe F, Micela G, Maugeri M, Osterle H, Pandzic K, Petrakis M, Srnec L, Tolasz R, Tuomenvirta H, Werner P, Linderholm H, Philipp A, Wanner H, Xoplaki E (2006) Indices for daily temperature and precipitation extremes in Europe analyzed for the period 1901–2000. *J Geophys Res* 111 doi:10.1029/2006JD007103
- [4] Fischer EM, Schär C (2010) Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. *Nat Geosci* 3(6):398–403. doi:10.1038/ngeo866
- [5] Moss RH, Edmonds JA et al (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463(7282):747–756
- [6] van Vuuren DP, Edmonds J, Kainuma M et al. (2011) The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 109: 5. doi:10.1007/s10584-011-0148-z
- [7] Riahi K, Rao S, Krey V, Cho C, Chirkov V, Fischer G, Kindermann G, Nakicenovic N, Rafaj P (2011) RCP 8.5 - A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change* 109: 33–57, doi: 10.1007/s10584-011-0149-y
- [8] Meehl GA, Stocker TF, Collins WD, Friedlingstein P et al (2007) Global climate projections. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds) *Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the 4th assessment report of the IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 747–846
- [9] Westra S, Fowler H, Evans JP, Alexander LV, Berg P, Johnson F, Kendon EJ, Lenderink G, Roberts NM (2014) Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall. *Rev Geophys* 52. <http://dx.doi.org/10.1002/2014RG000464>
- [10] Christensen JH, Christensen OB (2007) A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of the century. *Clim Change* 81:7–30
- [11] Hewitt CD (2005) The ENSEMBLES project: providing ensemble based predictions of climate changes and their impacts. *EGGS Newsl* 13:22–25
- [12] van der Linden P, Mitchell J (Eds.) (2009) ENSEMBLES: Climate change and its impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Report, 160 pp, Met Off. Hadley Cent, Exeter, U. K.
- [13] Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O.B., Bouwer, L.M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G. and Georgopoulou, E. (2014) EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional environmental change*, 14, 563–578, <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
- [14] Kotlarski S, Keuler, K., Christensen, O. B., Colette, A., Déqué, M., Gobiet, A., Goergen, K., Jacob, D., Lüthi, D., van Meijgaard, E., Nikulin, G., Schär, C., Teichmann, C., Vautard, R., Warrach-Sagi, K., and Wulfmeyer, V (2014) Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geosci Model Dev* 7:1297–1333. doi:10.5194/gmd-7-1297-2014
- [15] Christensen JH, Kjellström E, Giorgi F, Lenderink G, Rummukainen M (2010) Weight assignments regional climate models: exploring the concept. *Clim Res* 44:179–194 doi: 10.3354/cr00916
- [16] Skamarock WC et al (2008) A description of the advanced research WRF version 3. NCAR tech. note TN-475_STR, 113 pp
- [17] Cardoso RM, Soares PMM, Lima DCA, Miranda PMA (2018) Mean and extreme temperatures in a warming climate: EURO CORDEX and WRF regional climate high-resolution projections for Portugal. *Climate Dynamics* DOI: 10.1007/s00382-018-4124-4
- [18] Soares PMM, Cardoso RM, Lima DCA, Miranda PMA (2017) Future precipitation in Portugal: high-resolution projections using WRF model and EURO-CORDEX multi-model ensemble *Climate Dynamics*, 49:2503–2530, DOI:10.1007/s00382-016-3455-2
- [19] Soares PMM, Cardoso RM, Miranda PMA, Medeiros J de, Belo-Pereira M, Espirito-Santo F (2012) WRF high resolution dynamical downscaling of ERA-Interim for Portugal. *Climate Dynamics* 39:2497– 2522. DOI: 10.1007/s00382-012-1315-2
- [20] Cardoso RM, Soares PMM, Miranda PMA, Belo-Pereira M (2013) WRF high resolution simulation of Iberian mean and extreme precipitation climate. *Int. J Climatol* 33:2591–2608. doi:10.1002/joc.3616.
- [21] Rios-Entenza A, Soares PMM, Trigo RM, Cardoso RM, Miguez-Macho G (2014) Precipitation recycling in the Iberian Peninsula: spatial patterns and temporal variability. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 5895–5912 doi: 10.1002/2013JD021274
- [22] Soares, P.M., Cardoso, R.M., Semedo, Á., Chinita, M.J. and Ranjha, R. (2014) Climatology of the Iberia coastal low-level wind jet: weather research forecasting model high-resolution results. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 66, 22377, <https://doi.org/10.3402/tellusa.v66.22377>
- [23] Martins JPA, Cardoso RM, Soares PMM, Trigo I, Belo-Pereira M, Moreira N, Tomé R (2016) The summer diurnal cycle of coastal cloudiness over west Iberia using Meteosat/SEVIRI and a WRF regional climate model simulation. *International Journal of Climate*, 36(4):1755–1772, DOI: 10.1002/joc.4457
- [24] Pinto RMS, Benali A, Sá ACL, Fernandes PM, Soares PMM, Cardoso RM, Trigo RM, da-Camara CC, Pereira JMC (2016) Probabilistic Fire Spread Forecast as a Tool for Fire Management in an Operational Setting. *SpringerPlus* 5:1205, DOI 10.1186/s40064-016-2842-9

- [25] Sá A, Benali A, Fernandes PM, Pinto RM, Trigo RM, Salis M, Russo A, Jerez S, Soares PMM, Shroeder W, Pereira JM (2017) Evaluating fire growth simulations using satellite active fires data. *Remote Sensing of Environment*, 190:302-317, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.023>
- [26] Campaniço H, Soares PMM, Hollmuller P, Cardoso RM (2016) Climatic cooling potential of direct ventilation and evaporative cooling: high resolution spatiotemporal analysis for Iberia. *Renewable Energy*, 85:766-776, DOI 10.1016/j.renene.2015.07.038
- [27] Hazeleger W et al (2010) EC-Earth: A seamless earthsystem prediction approach in action. *Bull Amer Meteor Soc* 91:1357-1363. doi:10.1175/2010BAMS2877.1
- [28] Belo-Pereira M, Dutra E, Viterbo P (2011) Evaluation of global precipitation datasets over the Iberian Peninsula. *J Geophys Res* 116: D20101. doi:10.1029/2010JD015481



Rita M Cardoso, é investigadora no Instituto Dom Luiz (IDL) da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL). Doutorou-se em Meteorologia Na Universidade de Leeds (Reino Unido) em 2005, focando-se o seu trabalho na análise e modelação da interacção da superfície terrestre com a atmosfera. Na última década colaborou na implementação e execução das primeiras simulações regionais de clima em Portugal, assim como na execução das primeiras simulações de alterações climáticas de alta resolução. É membro do CORDEX (*Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*), um consórcio internacional patrocinado pelo *World Climate Research Programme*. É a coordenadora do projeto FCT, *LEADING – “Land Use Changes And Mitigation Of Global Warming”* e a coordenadora portuguesa das simulações de alterações climáticas âmbito da *Flagship Pilot Study LUCAS (Land-Use and Climate Across Scales)* participando na elaboração e implementação de estudos especializados na área do impacto das alterações do uso do solo nas alterações climáticas.



Pedro Miguel Matos Soares é Investigador Principal do Instituto Dom Luís (IDL) e Docente do Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, ambos da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Concluiu o seu Doutoramento em Física (área de Meteorologia) na Universidade de Lisboa em 2004. Durante a última década, o seu trabalho focou-se em modelação climática regional, mudanças climáticas, eventos extremos e interações terra-atmosfera-oceano. Atualmente coordena o “Roteiro Nacional para Adaptação no Sec XXI - Avaliação da Vulnerabilidade do Território Português às Alterações Climáticas do Sec XXI”, e é o coordenador da equipa portuguesa do CORDEX (*Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*) e da participação portuguesa no CORDEX *Flagship Pilot Studies* “Fenómenos convectivos em alta resolução na Europa e no Mediterrâneo”, ambos patrocinados pelo *World Climate Research Program*.



Daniela C. A. Lima. Concluiu a Licenciatura em Meteorologia, Oceanografia e Geofísica em 2011 pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa; Mestrado em Ciências Geofísicas em 2013 pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa; e Doutoramento em Ciências Geofísicas e da Geoinformação em 2019 pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. É Investigadora no projecto *LEADING – “Land Use Changes And Mitigation Of Global Warming”* (PTDC/CTA-MET/28914/2017) no Instituto Dom Luiz da Universidade de Lisboa, e participa na *Flagship Pilot Study LUCAS – “Land Use and Climate Across Scales”*.

Projeto do Clube Escolar “MeteoFreixo”

Sérgio Bastos¹

¹ Agrupamento de Escolas de Freixo

f1305@prof.aefreixo.ptt

Resumo

O projeto do MeteoFreixo tem a sua génese com uma estação meteorológica analógica, instalada em 2017. Este projeto conta com 25 alunos do 2º e 3º ciclos que fazem o registo e análise dos dados meteorológicos com a publicação regular. O reconhecimento surgiu no concurso de Ciência Escolar da Fundação Ilídio Pinho, tendo sido selecionado para a Mostra Nacional, nas edições XV e XVI. Em 2018, o projeto MeteoFreixo organizou, o 1º Congresso Transfronteiriço de Meteorologia e Alterações Climáticas, tendo realizado outras edições em 2019 e 2022. Recentemente (2021), no âmbito da rede de escolas de clubes da Ciência Viva, o MeteoFreixo instalou um sismógrafo.

Introdução

O projeto escolar do MeteoFreixo nasceu a partir da instalação de uma estação meteorológica analógica, em outubro de 2017 (fig. 1). A participação de alunos neste projeto de ciências experimentais efetua-se com o registo regular e tratamento dos dados meteorológicos e que asseguram a publicação do boletim de previsão regional. O projeto ganhou dimensão com aquisição de uma nova estação automática digital (fig. 2), dispondo de informação online. O caráter do serviço público da previsão do tempo, também passou a ser em formato digital com o “tv mete-



Figura 1 - Estação meteorológica analógica do MeteoFreixo

Figura 2 - Estação meteorológica digital automática

ofreixo”, disponível nas diversas redes digitais. O projeto foi a concurso de Ciência Escolar da Fundação Ilídio Pinho, tendo sido selecionado para a Mostra Nacional dos melhores projetos, nas edições XV e XVI. Na última edição, o projeto MeteoFreixo foi premiado com menção honrosa ao criar uma fórmula inovadora de Índice de Risco NATural

de Incêndio e Geadas (IRINA). Em novembro de 2018, o projeto MeteoFreixo organizou em Ponte de Lima, o 1º Congresso Transfronteiriço de Meteorologia e Alterações Climáticas, tendo realizado a 2ª edição em 2019 e a 3ª edição em fevereiro de 2022. Recentemente, no âmbito da rede de escolas de clubes da Ciência Viva, o MeteoFreixo instalou um sismógrafo, sob supervisão técnica do Instituto D. Luiz. A informação das ocorrências sísmicas, está disponível online e os fenómenos regionais relevantes são relatados publicamente.

MeteoFreixo da génese à atualidade

Objetivos do Clube MeteoFreixo

Estimular o desenvolvimento das ciências experimentais numa perspetiva formativa, lúdica e de serviço público. Sensibilização da comunidade para comportamentos preventivos face a riscos naturais. Elaboração do boletim meteorológico diário da região do Minho, disponibilizado na comunidade escolar e sociedade civil. Tratamento estatístico dos dados meteorológicos, e publicação de relatórios climáticos mensais/anuais de temperatura e precipitação. Pesquisa e monitorização sobre alterações climáticas, catástrofes naturais (cheias, furacões, tempestades, ondas de calor, vagas de frio, incêndios florestais e sismos), associados a eventos meteorológicos extremos e fenómenos telúricos. Desenvolver estudos científicos em áreas protegidas (lagoas de Bertandos) sobre os impactos das alterações climáticas na evapotranspiração de zonas húmidas.

Atividades

O Clube MeteoFreixo, criado no Agrupamento de Escolas de Freixo (Ponte Lima), em final de 2017 tem a sua génese no serviço meteorológico regional diário, conhecido por TV Meteo que difunde regularmente a previsão do estado do tempo na região Minho. Esporadicamente também são emitidos avisos de risco natural, associados a eventos naturais extremos. Toda esta dinâmica suscitou o interesse de outras escolas para criar intercâmbios em projetos piloto de meteorologia escolar nas escolas de São Tomé e Príncipe e Espanha. A experiência acumulada e os equipamentos adquiridos criaram condições para workshops de meteorologia e aposta na formação a professores e alunos de outros agrupamentos de Ponte de Lima. Entretanto o projeto alargou ao “centro de estudos climáticos”, constituído por uma equipa de alunos investigadores que monitoriza a base de dados com publicações de relatórios mensais/anuais de temperatura e precipitação.

O trabalho de investigação estendeu-se ao estudo de riscos (Lourenço, 2004), criando uma função matemática inovadora de cálculo de risco de incêndio (fig.3) e de geada (fig.4), integrando variáveis humanas. Os principais objetivos são: disponibilizar a informação simplificada sobre o índice de risco natural adaptado ao contexto nacional. Prestar um serviço público de avisos do Índice de Risco NATURAL aos agentes da Proteção Civil. A certificação científica da fórmula IRINA por parte do IPVC reuniu condições para concorrer ao XVI concurso de ciência escolar, reconhecido com uma menção honrosa dos 8 melhores projetos nacionais. A fórmula de cálculo de risco é aplicada pelos bombeiros voluntários limianos.

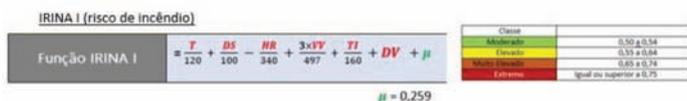


Figura 3 - Função matemática cálculo de risco de incêndio.

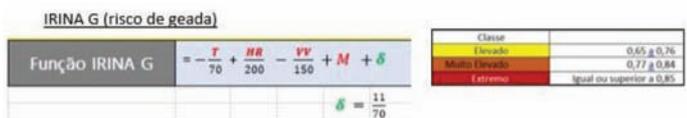


Figura 4 - Função matemática cálculo de risco de geada.

Sismógrafo: O testemunho de uma escola com sismógrafo no encontro nacional de escolas de Ciência Viva de 2019, despertou o nosso interesse na aquisição desse equipamento em 2021 – sismómetro Raspberry Shake com um geofone que regista o som dos movimentos do solo. Através do seu software específico permite a leitura dos dados, disponibilizando-os online. O Instituto D. Luiz da Universidade de Lisboa, pela orientação do professor Luís Matias tem sido um parceiro científico importante para a certificação de todo o processo. A gestão da informação sísmica é da responsabilidade do MeteoFreixo que também trata dos seus dados com publicações esporádicas sobre a situação sísmica na região. A estação sísmica está instalada no quiosque construído por alunos do clube de Robótica/MakerSpace, num espaço público (fig.5), sendo possível a sua visita e consulta do histórico das ocorrências sísmicas de magnitude superior a 2 num perímetro de 600 km. O clube MeteoFreixo aposta no estudo dos riscos naturais que começou com os climáticos, agora os sísmicos e em breve também na qualidade do ar.



Figura 5 - Estação sísmica e expositor do MeteoFreixo na área pública da escola

Congresso Transfronteiriço de Meteorologia e Alterações Climáticas: Este evento anual, dinamizado pelo Clube MeteoFreixo conta com três edições e reúne um painel de especialistas conferencistas (geógrafos, físicos, geólogos, engenheiros ambientais), havendo também comunicações de projetos



Figura 6 - Comunicação do MeteoFreixo no 3º Congresso Transfronteiriço

de meteorologia do MeteoFreixo (fig. 6) e de uma escola convidada da Galiza.

Parcerias: Em todos os projetos do clube destacamos as parcerias com o IPVC-ESA, Instituto Politécnico Superior que acompanhou e certificou o novo índice de risco natural-IRINA; Instituto D. Luiz no acompanhamento técnico e científico da estação sísmica; Câmara Municipal de Ponte de Lima – divulgação do projeto e apoio logístico na organização do Congresso Transfronteiriço de Meteorologia e Alterações Climáticas; Paisagem Protegida Lagoas Bertandos – acampamento científico e estudo de microclimas; agentes da Proteção Civil: CDOS Viana do Castelo, GNR do Freixo; Bombeiros Voluntários de Ponte de Lima – receção do boletim meteorológico, relatórios climáticos e avisos de riscos naturais.

Para consultar as nossas atividades, sugerimos a consulta da nossa página de Facebook, canal youtube e a nossa página web.

Para saber mais:

Página web: <https://aefreixo.pt/meteofreixo/>; <https://aefreixo.pt/estacao-sismica/>

Facebook: <https://www.facebook.com/meteofreixo>

Youtube: (TV MeteoFreixo) <https://www.youtube.com/channel/UCYwQX5k91WzzhW05lxV8zUA/videos>

Referências bibliográficas

- [1] Luciano Lourenço, “Risco Meteorológico de Incêndio Florestal” (2004), Gabinete de Publicações da FLUC / Núcleo de Investigação Científica de Incêndios Florestais - Coimbra



Sérgio Amaro Bastos, é licenciado em Geografia pela Universidade de Coimbra em 1998 e fez mestrado em Património Geológico e Geoconservação, pela Universidade do Minho em 2012. Desenvolveu investigação no NICIF (Núcleo de Investigação Científica de Incêndios Florestais). Leciona Geografia no Agrupamento de Escolas de Freixo – Ponte de Lima. Paralelamente, envolveu-se em diversos projetos escolares: Clubes de Meteorologia; Proteção Civil e Desporto Escolar (patinagem). É autor de diversos livros com destaque para: “Um olhar geográfico sobre ilha de Santa Maria” (2002); “Mobilidades populacionais de Santa Maria. Suas evoluções e tendências.” (C.M. Vila do Porto, 2003); “Estrada Nacional 2 sobre rodas” (Edições Vieira da Silva, 2018); “Geografias de um agente secreto” (2021). Também tem artigos publicados dos quais se destacam entre outros “Património Geológico da Baía Superior do Neiva” (2011); “Património geológico do Caminho Português de Santiago” (2017).

O ensino das Ciências Geofísicas na Universidade de Lisboa

Susana Custódio^{1,2}, Álvaro Peliz^{1,3}, Luis Matias^{1,4}

¹ Instituto Dom Luiz, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa.

² Coordenadora da Licenciatura em Meteorologia, Oceanografia e Geofísica

³ Coordenador do Mestrado em Ciências Geofísicas

⁴ Coordenador do Doutoramento em Ciências Geofísicas e da Geoinformação

Após concluir uma primeira licenciatura em Ciências Matemáticas em 1944, o Professor José Pinto Peixoto foi um dos primeiros alunos a concluir, em 1952, a licenciatura em Ciências Geofísicas da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL). Este curso, criado em 1946, oferecia uma formação dedicada à Física da atmosfera, oceano e terra sólida e era na altura uma das cinco licenciaturas da FCUL. Foi durante vários anos a única licenciatura de especialização numa sub-área da Física, acompanhando a licenciatura em Ciências Físico-Químicas. Após a conclusão desta segunda licenciatura, o professor Peixoto juntou-se aos quadros da FCUL como Assistente Extraordinário, onde continuou a ensinar Física e Ciências Geofísicas de forma muito carismática até ao final da sua vida, passando os seus profundos conhecimentos e intuição física aos seus alunos. De especial memória ficam os seus ensinamentos de Termodinâmica, Meteorologia e Dinâmica da Atmosfera.

Com o aumento do número de alunos no ensino superior, o ensino em Ciências Geofísicas na FCUL foi também evoluindo. Em 1964 foi criada a licenciatura em Física, onde as Ciências Geofísicas passaram a ser ensinadas no ramo de Macrofísica. Em 1982/83, a oferta formativa da FCUL foi formalmente re-estruturada de forma a reflectir as várias alterações que vinham sendo introduzidas desde 1974 com a democracia. A licenciatura em Ciências Geofísicas era agora uma das quatro licenciaturas oferecidas na área da Física e foi criado o mestrado em Ciências Geofísicas, com especialização nas áreas da Oceanografia, Meteorologia e Geofísica Interna. As Ciências Geofísicas passaram a ser uma das secções do recém-criado Departamento de Física da FCUL. Mais tarde, em 2005, a licenciatura em Ciências Geofísicas mudou de nome para licenciatura em Meteorologia, Oceanografia e Geofísica, de forma a melhor reflectir a abrangência da formação. Pouco

depois, a duração da licenciatura foi adaptada de 5 para 3 anos, de acordo com o Processo de Bolonha. Em 2006 as Ciências Geofísicas foram uma das três áreas que se juntaram para formar o novo Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia da FCUL, um departamento dedicado à Física, Matemática e Engenharia da Terra. O 3º ciclo foi introduzido em 2009, com a criação do doutoramento em Ciências Geofísicas e da Geoinformação.

O ensino em Ciências Geofísicas na FCUL beneficiou desde o início de uma relação próxima com a investigação que se fazia na área, em particular no Instituto Geofísico Infante D. Luís (IGIDL) e no Serviço Meteorológico Nacional (SMN). Aliás, foi no IGIDL que o professor Peixoto fez um estágio, após a conclusão da sua primeira licenciatura em Ciências Matemáticas, que viria a determinar o seu percurso. A herança do Instituto Geofísico Infante D. Luís é hoje preservada pelo Laboratório Associado Instituto Dom Luiz (IDL). O IDL é actualmente um centro de investigação interdisciplinar, com cerca de 100 membros integrados, que se dedicam a estudar a dinâmica da Terra, abrangendo a Meteorologia, Oceanografia, Geofísica, Geologia, Engenharia Geográfica e Energias Renováveis. Além da ciência fundamental, o IDL trabalha para responder a importantes desafios sociais, como as alterações climáticas, desastres naturais, recursos e sustentabilidade. O IDL continua a colaborar no ensino a todos os níveis, com particular destaque para o 3º ciclo, onde tem conseguido apoiar programas doutorais.

Ao longo dos três ciclos formativos – licenciatura, mestrado e doutoramento – os alunos recebem actualmente uma formação de base abrangente nas áreas da Matemática, Física e Programação, que vai sendo progressivamente aplicada à dinâmica da Terra. Além da formação teórica, é dada ênfase às componentes observacionais e de modelação computacional, imprescindíveis numa abordagem a um sistema complexo. Numa época em que a relação da sociedade com o nosso planeta está cada vez mais em foque, as Ciências Geofísicas tomam um lugar de destaque na resposta aos desafios que temos pela frente.



Susana Custódio, é Professora Auxiliar na FCUL, na área de Geofísica, e investigadora do Laboratório Associado IDL. É licenciada em Eng. Física Tecnológica pelo Inst. Sup. Técnico e doutorada em Ciências Geológicas pela Univ. Califórnia, Santa Bárbara. Dedicar-se à sismologia, com ênfase no estudo das fontes sísmicas, sismologia em tempo real, e educação e divulgação sobre riscos.



Álvaro Peliz, é Licenciado e Mestre em Ciências Geofísicas pela Universidade de Lisboa e Doutorado em Física pela Universidade de Aveiro. A sua área de investigação é a oceanografia física, dinâmica do oceano, circulação e correntes de mesoscale, interação do escoamento com a topografia e modelação numérica do oceano. Atualmente coordena o Mestrado em Ciências Geofísicas da FCUL.



Luís Matias, é Professor Associado com Agregação da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, e investigador do IDL, Instituto Dom Luiz. As suas áreas principais de investigação têm sido a Sismologia e a Geofísica Marinha. Tem coordenado e participado em vários projetos de divulgação científica nestes domínios, quer a nível nacional quer a nível internacional. A observação sismológica nos oceanos tem permitido a ligação da investigação a outras áreas científicas, como a Oceanografia, a Meteorologia e a Biologia Marinha.

Homenagem a José Pinto Peixoto*

José Carvalho Rodrigues¹

¹ Professor Emérito IADE-UEP

Do Casal de Cinza à Miuzela

Mas foi nos meus dezoito anos, em 1965, no segundo ano da Licenciatura em Física que num exame no Anfiteatro da Física a paredes meias com o Instituto Geográfico D. Luis I, falei pela primeira vez com José Pinto Peixoto. Levei um calduço por erro que tinha feito. Perguntou-me de onde era, disse Casal de Cinza. Durante um semestre chamou-me Sr. Monteiro. Lá balbuciava Carvalho Rodrigues e com descrença e talvez um carolo dado sempre acompanhado de... com muita caridade... dizia: ... de Casal de Cinza só pode ser Monteiro. Só se remediou no ano e semestres seguintes onde muitas vezes foi meu Professor.

Era então Meteorologista, que era uma Profissão, dirigia o Instituto Geográfico D. Luis I e era Professor Extraordinário. No meu quarto ano foi feito Professor Catedrático, depois de umas provas de Agregação memoráveis.

Antes desse encontro tinha começado a frequentar as suas lições numa sala de aula que tinha janelas de um lado para o Jardim Botânico, de outro, a noventa graus, uma magnífica ardósia ladeada por duas outras enormes janelas por onde se viam as copas das Palmeiras e a Biblioteca da Faculdade de Ciências.

Fui um dos Senhores Alunos que teve. E teve muitos. Todos podemos dizer que nos conhecia e que se deixava aproximar e fazer sentir que cada um era especial. Que lhe era íntimo. E um sentir de unidade com o Professor José Pinto Peixoto une-nos a todos na garantia que era quase como só nosso.

Já vou a três quartos de século e a cinquenta e sete de o encontrar e nunca alguém que com ele aprendera, privara, ou trabalhara, ou a quem o Prof. Pinto Peixoto comprava os objectos mais diversos que se possam imaginar que não afirmasse a proximidade pessoal e afectiva ao Prof. José Pinto Peixoto. O que é quase inverosímil é que todos dizemos, sentimos, juramos com verdade, se necessário for, que assim era. Mais ... a afirmação de pertença, a quase sensação que só de cada um de nós era Amigo íntimo, que cada um é que o conhecia muito bem era em todos verdadeira.

Quando tive a incumbência de escrever a minha lembrança do Prof. Pinto Peixoto só senti que eu

era um igual a todos os que com ele se tocaram. Desde a mana Judite que idolatrava, até ao mano Acácio que lhe cuidava e supervisionava as terras e que tinha o encargo anual de lhe anunciar o prejuízo que a agricultura lhe dava, até aos Sobrinhos que acompanhava, protegia e estimava. O amor à Mariazinha, ao Palheiro e aos colegas que nele se albergaram vindos de todo o Portugal, ao Liceu Nacional de Gil Vicente na altura mesmo dentro do Convento de S. Vicente de Fora. À Joanhinha onde almoçava. A todos os que lhe vendiam antiguidades, bugigangas e móveis e que por falta de espaço continuavam por anos e anos nas montas de lojas com o sinal de vendidos. Em alguns sábados fazíamos a romaria para, ainda hoje suponho, falar com as Pessoas donas das lojas e lhe apaziguar a saudade pelos objectos. Claro que o carro excelente que tinha fez uma primeira viagem até à garagem do seu amigo Major Rueff de onde nunca mais saiu. Era um dos locais da peregrinação às suas coisas. Bem, na Joanhinha tinha em profusão serviços de jantar, café, chá e tudo o que se possa imaginar de artefactos de vidro. "Quando ao Domingo "O Belém" i.e. "Os Belenenses" jogavam em casa lá iam e o Professor, não estava um momento quieto e...muito sofria".

A nós que aprendíamos levávamos calduços e carolos, aos Senhores Ministros que lhe pediam dava conselhos sempre por escrito. Para um desses Ministérios produziu há mais de quarenta anos a melhor colectânea de livros sobre ambiente, física e clima. Do melhor que até hoje se produziu em Portugal. Aos Senhores Presidentes da República recusava todos os convites para recepções ou similares para que a Academia não pudesse jamais repetir o que fez com Junot. Os confrades Académicos, os funcionários, os taxistas, os condutores e revisores de autocarros, eléctricos e comboios, esses todos sempre me repetiram a verdade: Conheço o Prof. Pinto Peixoto muito bem, e é muito meu Amigo e muito me considera. Cada um sabia que era especial para o Professor e o prodígio é que era a verdade. É assim porque alguém como o Prof. Pinto Peixoto jamais parte, só deixamos de o ver.

Qualquer um desses todos podia fazer o que me atrevo a fazer hoje. Aqui estou só por causa da bondade da Senhora Presidente da Sociedade Portuguesa de Física a Prof^{ra}. Catedrática Conceição Abreu que mo mandou fazer.

E hoje faço-o em casa de granito, em cima de terra que nos viu. Devo-lhe o que sou como Profissional. Devo-lhe o que de melhor haverá em mim.

Em primeiro lugar percebi que era Professor, mas que para ser Professor, tinha um ofício, era Meteorologista, fazia consultadoria, calculava e punha probabilidade no futuro, nas observáveis do futuro ou por curiosidade ou para quem lho encomendava.

E era esta combinação que hoje é quase vedada que fazia o Sublime Professor quando nos ensinava. Se me é permitido lembro o Prof. Carvalho Fernandes do Técnico, por ser de tão perto, do Soito. Era Professor com a mesma actividade global incluindo a de Director Geral da Standard Electric. O Prof. José Pinto Peixoto que vivia Física para lá do horizonte conhecido, aprendia e ensinava ao mais alto nível de saber disponível em cada momento. Como primeiro anexo vai um manuscrito que o Prof. Prigogine ofereceu ao Prof. Pinto Peixoto para comentários. E eu fiquei com esse manuscrito por onde aprendi sobre Entropia, Informação, Tempo e Irreversibilidade. Aliás nesse Anexo onde começa o Capítulo II no final da página está a celeberrima expressão da inexorabilidade do tempo e da informação, ambos “filhos” da entropia e como o Universo se pode descrever ou se se quiser organizar, ou pelo tempo ou pela informação. Como Professor deixou-nos também escritas o que eram as suas lições. O anexo II é um exemplo daquilo que ensinava, depois escrevia e nos dava.

Mas é claro que eu tal como todos os outros sentia que tinha...e era especial para o Prof. Pinto Peixoto. Como não me canso de repetir: era mesmo verdade para mim e para todos os outros.

Mas houve um que nunca conheci mas que era uma interacção, um contacto diferente. Chamava-se Vitorino Nemésio. É tal como o Prof. Dias Agudo escreveu no seu ensaio sobre “As “Duas Culturas”: “recordo a satisfação que o confrade Vitorino Nemésio sentia ao conversar na Academia das Ciências com ele (Pinto Peixoto) sobre os problemas da então física moderna. Por altura dessas conversas com Pinto Peixoto, Vitorino Nemésio já tinha sido levado com gosto até à biologia molecular e genética por outro Açoreano também da Terceira, Aurélio Quintanilha (1892-1987).

Mas das conversas com Pinto Peixoto, Vitorino Nemésio deixou notas e apontamentos que tirou. Alguns tenho-os e as suas reproduções constituem o anexo III.

Destas lições o Confrade Vitorino Nemésio escreveu o livro mais profundo sobre Filosofia da Ciência que jamais li publicado em 1972. Os Nemesianos só o descobriram em 2005. Já estava esgotado e a Imprensa Nacional apressou-se, e com um forte aplauso da minha parte, a publicar. O Prefácio é que foi entregue, nessa edição, a uma escola que toma o alinhar de palavras utilizando regras válidas e elegantes de linguagem como pensamento.

O livro é a “Era do Átomo / Crise do Homem”. A “Era do Átomo / Crise do Homem” é a prova da inspiração que o Prof. Pinto Peixoto gerava nos seus alunos.

E Vitorino Nemésio que já era sublime estava agora inspirado pela conversa, pela mente e produziu a melhor poesia de “Ciência Contemporânea” que se escreveu até hoje.

Rómulo de Carvalho é um soberbo Poeta mas de Ciência Clássica. Nemésio é o Poeta da modernidade da Ciência. Um das vezes o poema foi, quase, a Harmonia:

”O outro ainda vai com Newton como fogueiro
Mas já leva ao emprego, a Berne, o amanuense de Patentes
Que harmoniosamente, relativamente distraído,
Escreveu a sigla $E = mc^2$ no arco do seu violino”

E por vezes até radical com uma versão materialista, científica, da História baseada na irreversibilidade de Prigogine. E talvez o Prof. Pinto Peixoto lhe tenha mostrado que na nossa vida de hoje de entrega ao domicílio, sustentada, quase só em informação e não em observáveis que gera, é por isso eficaz. Eficaz, mas sem sentido. Na incerteza de para onde vamos não sabemos onde estamos. E a nós preenche a alma pelo menos consola-a porque explica e faz previsões. Talvez por isto a ciência não é o cimento da união dos povos. O credo científico une os homens na coerência matemática e nos laboratórios. Mas é só aí. Cá fora ficam desunidos, frios, lutam, destroem-se. Nem podiam ser de outro modo porque o íntimo não é do âmbito da Ciência.

Mas de Pinto Peixoto, Vitorino Nemésio absorveu, intuiu, deduziu, pelo menos, o que escreveu neste pedaço de “Era do Átomo/Crise do Homem”: “Suspendendo por hoje a meditação da crise do Homem confesso que esta “Entropologia” ou Sociologia da entropia me não é de todo antipática. Metade dos problemas do homem actual bem se resolveriam talvez pelo segundo princípio da termodinâmica e com a teoria da informação”.

Aprendendo com os dois fiz a minha vida. Não me saí nada mal e hoje em que a minha pele desperta ao amanhecer dos galos e na cor da luz agora que está em tempo de fazer guerra e falar Paz sei quanto devo ao Prof. Pinto Peixoto.

Eu escrevi alguns textos e assinei publicações com o Prof. Pinto Peixoto e um livro “Sistemas Entropia e Coesão”. Eu vivia no 3º andar e ele no 4º amplo e duplex. Tinha tanta e tanta coisa que, no andar de baixo, nos divertíamos a fazer exposições temporárias, desde pintura, a crucifixos, a livros e a mais vistosa foi uma de paramentos.

Jantava no terceiro, ia até ao seu duplex no quarto andar. Iria até ao quarto, no piso de cima, que tinha porta independente. Estava organizado de tal maneira que levantando-se da cama para o lado da janela podia de imediato sentar-se à secretária pronto para escrever, com biblioteca por perto. O anexo IV é um exemplar dessa escrita.

la por grandes temporadas até aos Estados Unidos da América, até ao MIT, Chicago, Boston ensinava, investigava, era consultor, trabalhava para Companhias que faziam meteorologia por contrato para sectores tão diferentes como Espaço, Ambiente, Agricultura, a gestão da Água e a Defesa. Ficava sempre muito nervoso quando era a altura de preencher os formulários americanos do IRS porque não tinha quem lho fizesse. Em Portugal os amigos faziam isso por ele. Nunca abria a caixa do correio

porque “ou são contos ou más notícias”. Lá lhe fazíamos a gestão das cartas. Almoçar, com os velhos Amigos, sempre na Joaninha. A isso era impossível faltar. Consoava e passava o Natal connosco (Fig. 1). Tratava com desvelo pelo Instituto Geofísico Infante D. Luis, onde contava com todos mas sobretudo com o Prof. Corte Real e o seu Prof. Mendes Vitor. A Academia das Ciências de Lisboa era o seu centro nevrálgico. Tudo por perto e à volta da Escola Politécnica como gostava de dizer.



Figura 1 - Almoço de Natal.

No mais ajudou-me em todos os projectos em especial os de Detecção Remota com a NATO e no Po-SAT1 que tinham que ver com o espaço uma vez que desde que se iniciou em Portugal actividade no espaço exterior em 1972 (está a fazer cinquenta anos) fez parte da então constituída e muito dinâmica “Comissão Permanente de Estudos do Espaço Exterior”. Teve um enorme empenho no estabelecer de Escolas de Óptica e Optometria e na introdução de Licenciaturas e Doutoramentos integralmente pagas pelas Empresas desta actividade nas Universidades da Beira Interior e do Minho.

Participou na fundação da Universidade da Beira Interior. Sem a contribuição do Prof. Pinto Peixoto teria sido muito mais difícil. Contribui para a UTAD e instalou a Universidade Nova de Lisboa, sobre a qual uma vez me disse com desgosto: “Ó Fernandinho, a Faculdade de Economia nunca irá para a outra banda!”. Muito incrédulo perguntei-lhe porquê. E o Prof. Pinto Peixoto na Sabedoria dos Beirões da Beira Serra disse-me: “Vai ficar do lado de Lisboa porque é onde estão os bancos”. Na altura achei que não seria assim. Hoje sei que sim. Ficou mesmo na margem norte do Tejo.

Depois ajudava todos sem contabilidade e com bonomia. Em Casal de Cinza com o Eng. Vitor Vasques, Presidente da Federação Portuguesa de Futebol recebe uma lembrança entregue por um rapaz da minha criação, o Sr. Jorge Pires, que naquele momento de inauguração de muito boas instalações era o Presidente do Grupo Cultural e Recreativo de Casal de Cinza (Fig. 2) com a mesma simplicidade, alegria, humildade e naturalidade com que foi agraciado com a Grã-Cruz da Ordem Militar de Santiago



Figura 2



Figura 3

da Espada pelo Sr. Presidente da República, o Prémio Artur Malheiros e o Prémio Boa Esperança na foto comigo, com o Eng. Fernando Carvalho e o Prof. Santos Silva (Reitor da UBI 2009-2016) (Fig. 4).

Houve um dia que o Compadre Tomás Espírito Santo o levou ao hospital. Vi-o sair de casa. Sei que não partiu. Só deixei de o ver.

Uns quantos de nós já tínhamos organizado uma Homenagem Científica no Hotel Altis quando do septuagésimo aniversário com um grande simpósio, com os grandes Meteorologistas e Professores de Meteorologia do Mundo e antecipava-se já a edição do “*The Physics of Climate*”. No dia em que deixámos de o ver eu, a Família e juntando os Amigos, em especial o Dr. Norberto Pilar, o General Pereira Pinto, o Major Rueff, o Eng. Tomás Espírito Santo, o Juiz Conselheiro Dr. Joaquim Matos, o Prof. Santos Silva, o Prof. Passos Morgado, o Prof. Mendes Vítor, a Prof.^a Solange da UTAD conseguimos por subscrição pública, encomendar a estátua de bronze do Prof. José Pinto Peixoto (foto 4) que está no Campus da Universidade de Lisboa sobre uma pedra de granito cortada e levada da Miuzela (foto 5).

O Dr. João Soares, extraordinário Presidente da Câmara de Lisboa, para além da eficácia na escolha e na prontidão na decisão do local onde ficou a estátua ainda foi por sua exclusiva iniciativa que mandou colocar uma placa no fachada do prédio onde o Prof. Pinto Peixoto (Fig. 6) viveu e atribuiu o seu nome a uma Rua em Lisboa. No que foi seguido por Oeiras e Almeida.

Na Miuzela para quem escreveu o seu último livro “Miuzela e a sua Gente”, o Povo comprou e instalou a “Casa da Cultura José Pinto Peixoto” [http://www.casaculturapinto-peixoto.org/\(foto7\)](http://www.casaculturapinto-peixoto.org/(foto7)) que atribui todos os anos o Prémio



Figura 4

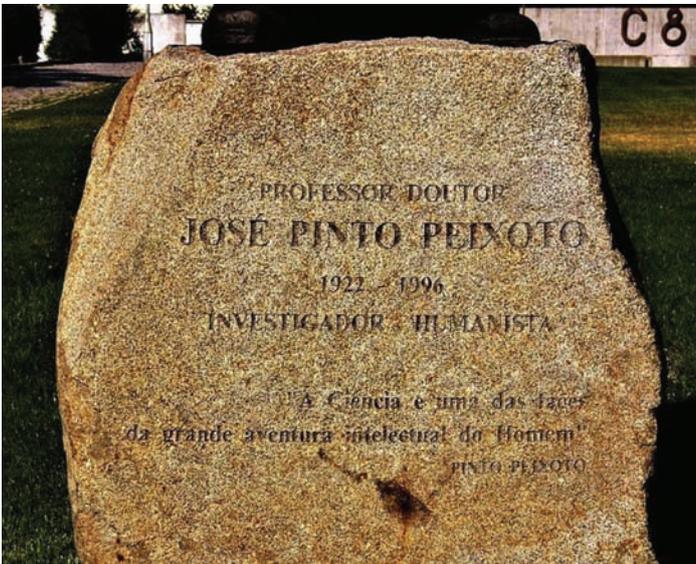


Figura 5

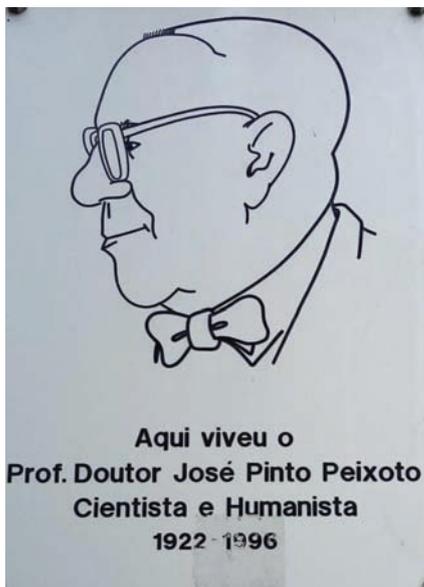


Figura 6

Nacional José Pinto Peixoto. Têm vindo prestar-lhe tributo Colegas quer Estrangeiros, quer Nacionais têm por lá organizado excelentes debates e conferências sobre os temas que tornaram o Prof. Pinto Peixoto, como todos os que ao alcançarem pela sua inextinguível competência e humanidade, de um Cientista, num atleta de Deus.

De José Pinto Peixoto posso dizer que:

Serviu e não contabilizou o custo; Lutou e não contou as feridas; Trabalhou e não pediu descanso; Deu-se e pediu nada em troca.



Figura 7

Pelo Prof. Pinto Peixoto podem repetir-se as palavras de Virgílio: "Feliz daquele que procurou a causa das coisas, porque um dia ultrapassará o medo e será entronizado pelo destino".

*Feito em Casal de Cinza nos cem anos do seu Nascimento na Miuzela do Côa por F. Carvalho Rodrigues (foto 8) que pede, a quem queira informar mais a curiosidade, o favor de ir até:

www.fernandocarvalhorodrigues.eu

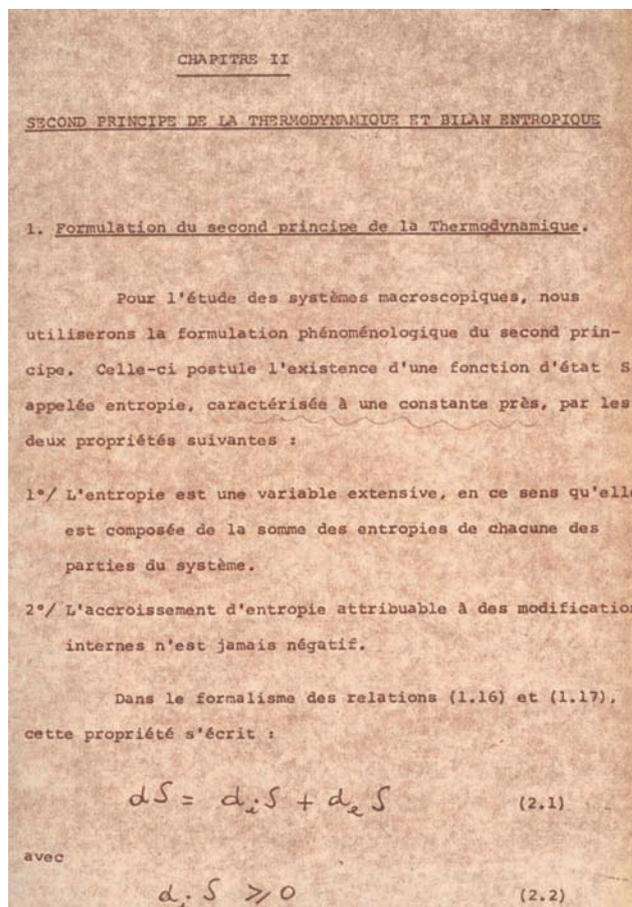
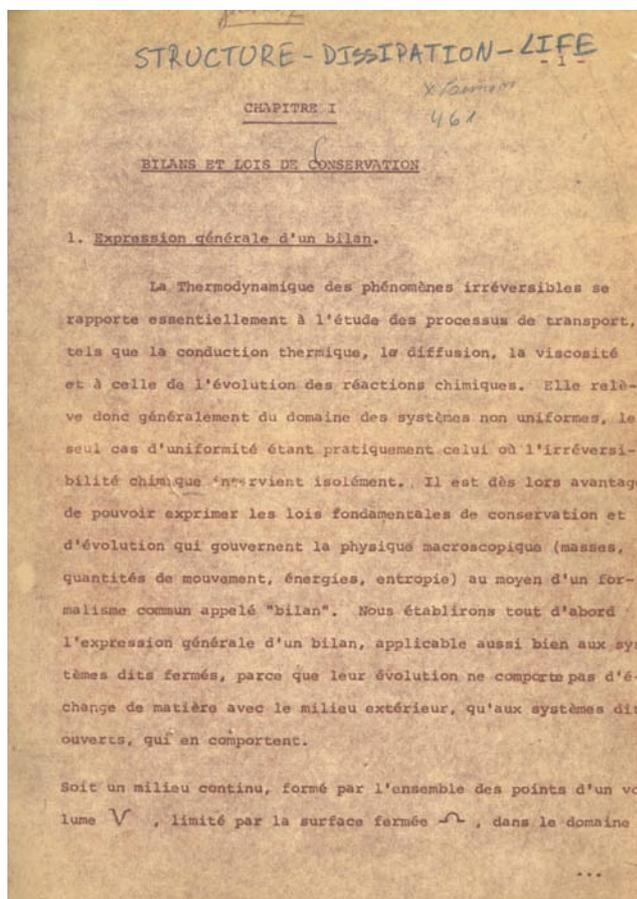


Figura 8



Fernando Carvalho Rodrigues é Professor Emérito no IADE - UEP Instituto de Arte, Design e Empresa. Membro da Academia de Ciências de Lisboa e da Academia de Marinha, bem como da Sociedade Internacional de Astronáutica e do Centro de Investigação Professor Doutor Joaquim Veríssimo Serrão. Pertence ao Conselho Supremo da Sociedade Histórica de Portugal e é Membro Honorário da Associação Nacional dos Óticos (ANO), assim como da União Profissional dos Óticos-Optometristas(UPOOP). É Licenciado Física pela Universidade de Lisboa e doutorado em Engenharia Eletrotécnica pela Universidade de Liverpool. Tem seis livros publicados, e supervisionou mais de vinte teses de Doutoramento. Publicou mais de duzentos artigos científicos. Foi premiado com o Prémio Pfizer (1977), duas vezes com o Prémio Gulbenkian (1978 e 82), a Casa da Imprensa votou-o Cientista do Ano de 1989, recebeu o Prémio Aboim Sande Lemos de Identidade Nacional da SHIP(1990), o Prémio Boa Esperança (1991), foi personalidade Nacional do Ano de 1993 no Diário de Notícias. Tem o Prémio Albert J. Meyer (1995), a medalha de Lavoisier (2013) e o Prémio Carreira Nacional de Ótica atribuído pela Associação Nacional dos Óticos (2014). Tem as Medalhas de Prata (1992) e de Ouro (2016) da Cidade da Guarda. Em 2017 a Vila da Moita do Ribatejo concedeu-lhe a Medalha de Mérito Cultural e Artístico. É Comendador da Ordem Militar de Santiago da Espada (1992). Para lá das inúmeras atividades que desenvolveu ao longo da sua carreira, que podem ser consultadas em www.fernandocarvalhorodrigues.eu, liderou o Consórcio responsável por construir, lançar e operar com sucesso o primeiro satélite Português (Po-Sat1), que foi colocado em órbita em 1993.

ANEXO I



ANEXO II

J. P. Texte

aposta de Prof. Prigogine

Vol. (8.3)

STRUCTURE, DISSIPATION and LIFE

par

I. PRIGOGINE

Professeur à la
Faculté des Sciences, Université
Libre de Bruxelles

Communication présentée le lundi 26 juin 1967 à
la Conférence Internationale " Physique Théorique
et Biologique " organisée par l'Institut de la Vie,
du 26 au 30 juin 1967, Versailles, France.

x Borrões
463

CADERNA DE METEOROLOGIA
(1964-1965)
de Alunos.

I - O papel da intuição na resolução de problemas de física

1. Na resolução dum problema de física é indispensável o recurso à intuição.

O estabelecimento das equações que permitem resolver o problema é a fase preliminar, obrigatória. É um trabalho difícil, porque exige o conhecimento de dois domínios diferentes: o da física ao que se refere aos fenómenos que se pretendem traduzir por equações; e o da intuição que consiste na resolução dessas equações.

A resolução de problemas compreende normalmente as seguintes fases:

- escolha dum sistema de referências (isto é, determinação das variáveis independentes que permitam a "parâmetrização" do fenómeno);
- escolha das funções desconhecidas para "caracterizar" o fenómeno;
- estabelecimento das equações que traduzem, quer as "necessidades internas" (relações entre as várias funções desconhecidas), quer as leis físicas que regem o fenómeno;
- transformação das equações, adaptando-as às condições fronteiras ou às condições iniciais (condições limites) que especificam o problema;
- resolução intutiva das equações;
- interpretação física dos resultados;
- resolução do problema físico.

2. A intuição na solução dos problemas de física é um "instrumento" extremamente conveniente. É uma forma de linguagem com que se pode descrever o problema físico e por meio da qual certos processos de raciocínio lógico podem ser conduzidos com relativa facilidade.

Não há física "sem intuições". Uma hipótese física incorreta é sempre uma hipótese incorreta, quer seja expressa em linguagem científica, quer não. Uma hipótese incorreta introduzida na equação diferencial que traduz o problema físico, só pode conduzir a resultados incorretos, por mais perfeita que seja a lógica do formalismo. É sempre indispensável fazer uma verificação e uma crítica dos resultados.

Na resolução dum problema físico pode obter-se um resultado errado devido a alguma das seguintes causas:

- solução intutiva incorreta dum problema formulado correctamente;
- solução intencionalmente correcta ou não dum problema físico mal formulado;
- solução intutiva incorreta dum problema físico mal formulado.

Como se vê, o caso referente à alínea a) é o geral e mais frequente; juntam-se as dificuldades da física às da intuição (infelizmente os Drs. alunos são vítimas da alínea c) ...).

UNIVERSIDADE DE LISBOA

Faculdade de Ciências

TERMODINÂMICA
(ALGUMAS NOÇÕES ELEMENTARES SOBRE A TEORIA DA INFORMAÇÃO)

Boltzmann

$$W = \prod_j \frac{c_j^{N_j}}{N_j!}$$

Prof. Dr. José Pinto Peixoto

$$W = \prod_j \left\{ \frac{(c_j + N_j - 1)!}{(c_j - 1)! N_j!} \right\} \rightarrow B.E.$$

$$W = \prod_j \left\{ \frac{c_j!}{(c_j - N_j)! N_j!} \right\} \rightarrow F.D.$$

Lisboa
1968

TEORIA DA INFORMAÇÃO

"Thus when one meets the concept of entropy in communication theory, he has a right to be rather excited - a right to suspect that one has hold of something that may turn out to be basic and important".

Warren Weaver

1. Noções fundamentais

1. Informação é a "entidade" que resulta da diferença entre saber e não saber, conhecer e não conhecer, ou a diferença que há entre encerrar várias possibilidades e saber aquela que de facto se realisa.

Consideremos o conceito de informação na segunda acepção, por ser mais objectivo; tomemos o caso simples em que temos que fazer uma escolha dentre n acontecimentos possíveis. Por exemplo suponhamos que um objecto se encontra dentro dum das n caixas todas semelhantes. É evidente que o objecto não pode estar em mais do que uma caixa simultaneamente, o que significa que as n possibilidades se excluem mutuamente. Além disso, todas são equiprováveis: não vemos nenhuma razão que nos leve a preferir uma das possibilidades a qualquer das outras.

A nossa dificuldade em inferir qual a caixa em que se encontra o objecto traduz de facto uma dada incerteza ou uma falta de informação. Esta falta de informação é uma função de n e tanto maior quanto mais elevado for n ; isto é, podemos aceitar que:

$$I = I(n) \tag{1.1}$$

com a condição de ser:

$$I(n) > I(m) \text{ para } n > m \tag{1.2}$$

Mas também é evidente que se só existe uma caixa ($n=1$), não teríamos dúvida

CADREIRA DE TERMODINÂMICA
A MATEMÁTICA E A TERMODINÂMICA (II)

Prof. Dr. José Pinto Peixoto
Dr. João Alexandre Medina Corte Real

Lisboa
1968

4. Entropia; incertezas

1. O valor médio da quantidade de informação recebida aqui dada por:

$$\langle I_Q(x_k/y_j) \rangle = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_j \sum_k N(x_k/y_j) \cdot I_Q(x_k/y_j) = \sum_j \sum_k P(x_k/y_j) I_Q(x_k/y_j) \quad (4.1)$$

Como resulta da "definição" de probabilidade.

2. A expressão anterior (4.1) pode escrever-se sob a forma:

$$\langle I \rangle = \sum_j \sum_k P(x_k/y_j) \left[-\log P(x_k) \right] - \left[-\log P(x_k/y_j) \right], \quad (4.2)$$

notando que:

$$P(x_k/y_j) = P(x_k) \cdot P(y_j/x_k) = P(y_j/x_k) = P(y_j) \cdot P(x_k/y_j) \quad (4.3)$$

Se definirmos a função H pela fórmula:

$$H = - \sum_k P(x_k) \log P(x_k) \quad (4.4)$$

conclui-se que a grandeza H é afinal o valor médio de grau de incerteza ou o valor médio da surpresa. Com esta simbologia o valor médio da quantidade de informação < I > pode escrever-se:

$$\langle I \rangle = H(x) - H(x/y) \quad (4.5)$$

7. Estados de regime estacionário

O estado de produção mínima de entropia

1. Vamos mostrar que em regime estacionário a taxa de geração da entropia é mínima (teorema de Prigogine).

Consideremos um sistema sob a acção de n forças independentes X_1, X_2, \dots, X_n e suponhamos que se mantem constante as primeiras k forças. Então é possível escolher um conjunto de forças $\{X_{k+1}, \dots, X_n\}$ para as quais os fluxos $J_{k+1}, J_{k+2}, \dots, J_n$ são nulos e a taxa de geração de entropia σ é mínima.

De facto, tem-se:

$$\sigma = \sum I_{ik} X_i X_k$$

Porque a taxa quadrática σ é definida a partir de equações de balanço para σ nos X_i . $(\frac{\partial \sigma}{\partial X_i}) = 0$ em $X_i = 0$.
Se k das X_i forem nulas então também os fluxos associados J_{k+1}, \dots, J_n são nulos.

IX - Aplicação ao equilíbrio crítico

1. Da teoria exposta sobre formas quadráticas, inversão de matrizes, sobre o equilíbrio crítico, pode compreender-se sem dificuldade, alguns dos aspectos apresentados nas lições, para sistemas termodinâmicos. Considero-se um sistema cuja relação fundamental é:

$$U = U(s, v)$$

Para que a forma quadrática

$$\frac{1}{2} u_{ss} (ds)^2 + u_{sv} ds dv + \frac{1}{2} u_{vv} (dv)^2$$

cuja matriz é a matriz de rigidez:

$$\begin{bmatrix} u_{ss} & u_{sv} \\ u_{sv} & u_{vv} \end{bmatrix}$$

Seja definida positiva ($d^2U > 0$) todos os menores principais têm de ser positivos, isto é:

$$a) u_{ss} > 0 \quad b) u_{vv} > 0 \quad c) u_{ss} u_{vv} - u_{sv}^2 = D > 0$$

Derivando esta expressão em ordem a X_m , vem:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial X_m} = I_{mk} X_k + I_{m1} X_1 = 2J_m \quad (45)$$

Se a produção de entropia é mínima, então:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial X_m} = 2J_m = 0 \quad (46)$$

o $J_m = 0$ é a condição de mínimo, porque a forma quadrática σ é positiva e definida.

Logo, é necessário que todos os fluxos associados às forças generalizadas, que não foram fixadas previamente se anulam. Portanto, em regime estacionário σ é mínima.

2. Notemos que a taxa de geração de entropia σ está associada uma energia dissipada por segundo (potência dissipada) que vale σT .

3. Vamos calcular a variação da taxa de produção de entropia, quando há uma variação nas forças generalizadas ou nos fluxos generalizados.

Diferenciando a expressão (16), vem:

$$d\sigma = \sum_i X_i dJ_i + \sum_i J_i dX_i = d_J \sigma + d_X \sigma \quad (47)$$

fazendo:

$$d_J \sigma = \sum_i X_i dJ_i \quad (48) \quad d_X \sigma = \sum_i J_i dX_i \quad (49)$$

Mas no domínio linear é:

$$d_J \sigma = \sum_i X_i I_{ik} dX_i \quad \text{e} \quad d_X \sigma = \sum_i I_{ik} X_i dX_i$$

4. Entropia; incertezas

1. O valor médio da quantidade de informação recebível será dado por:

$$\langle I_Q(x_k/y_j) \rangle = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_j \sum_k H(x_k/y_j) \cdot I_Q(x_k/y_j) = \sum_j \sum_k P(x_k/y_j) I_Q(x_k/y_j) \quad (4.1)$$

Como resulta da "definição" de probabilidade.

2. A expressão anterior (4.1) pode escrever-se sob a forma:

$$\langle I \rangle = \sum_j \sum_k P(x_k/y_j) \left[-\log P(x_k) \right] - \left[-\log P(x_k/y_j) \right], \quad (4.2)$$

notando que:

$$P(x_k/y_j) = P(x_k) \cdot P(y_j/x_k) = P(y_j/x_k) = P(y_j) \cdot P(x_k/y_j) \quad (4.3)$$

Se definirmos a função H pela fórmula:

$$H = - \sum_k P(x_k) \log P(x_k) \quad (4.4)$$

conclui-se que a grandezza $\frac{H}{N}$ é afinal o valor médio de grau de incertez ou o valor médio de surpresa. Com esta simbologia o valor médio da quantidade de informação $\langle I \rangle$ pode escrever-se:

$$\langle I \rangle = H(x) - H(x/y) \quad (4.5)$$

ANEXO III

acústica ondulat. - espalh. e imagens
" física (Robt/Reverb.) for. matem. matr.

part. / part. / part. base amplitudes
= análise a nível de feixes (Dematerial)
e o inverso

e Planck = $h\nu$
(Boltzmann: emiss. e absorç. do espectro.)
os electrões só podem ser
aumentados de movimento quan-
tificados: a energia radiante
de freq. ν é exp. emitida e
absorvida por quant. de $h\nu$
restos = $h\nu$

Derivando esta expressão em ordem a X_m , vem:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial X_m} = \sum_k I_{mk} X_k^{-2} L_{mk}^{-1} = 2J_m \quad (45)$$

Se a produção de entropia é mínima, então:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial X_m} = 2J_m = 0 \quad (46)$$

o $J_m=0$ é a condição de mínimo, porque a forma quadrática σ é positiva e definida.

Logo, é necessário que todos os fluxos associados às forças generalizadas, que não foram fixadas previamente se anulam. Portanto, em regime estacionário σ é mínima.

2. Notemos que a taxa de geração de entropia σ está associada uma energia dissipada por segundo (potência dissipada) que vale σT .

3. Vamos calcular a variação da taxa de produção de entropia, quando há uma variação nas forças generalizadas e nos fluxos generalizados. Diferenciando a expressão (15), vem:

$$d\sigma = \sum_i X_i dJ_i + \sum_i J_i dX_i = d_J \sigma + d_X \sigma \quad (47)$$

fazendo:

$$d_J \sigma = \sum_i X_i dJ_i \quad (48) \quad \text{e} \quad d_X \sigma = \sum_i J_i dX_i \quad (49)$$

Na no domínio linear é:

$$d_J \sigma = \sum_i X_i I_{ik} dX_k \quad \text{e} \quad d_X \sigma = \sum_i I_{ik} X_i dX_k$$

óptica: Fresnel (Optica)
prop. calor: Fourier
Electricid.: → Maxwell (Electromagnetism)
Termodin.: Sadi Carnot... Joule, Clausius

Fis. Cl.: "part. materiais" - estrat. discont. da mat.
Fis. mod.: representações contínuas → derivadas parciais
Termodin. abstr.: conservação de energia e aumento da entropia

As leis da electrodin. (Faraday) requerem uma estrat. discontinua da electricid.

Átomos e molécula. Clausius, Maxwell + BOLTZMANN
teoria cinética da matéria

H. A. LORENZ: electrões: cargas localizadas e corpusculares

Energetistas versus Atomistas
Mach, Ostwald, Duhem

1880-1900: estruturas descontínuas da electricid.

Peixoto e a Física do Clima

Miranda PMA¹

¹Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, IDL (Instituto Dom Luiz, Laboratório Associado)



José Pinto Peixoto

JOSÉ PINTO PEIXOTO nasceu em 9 de novembro de 1922 na aldeia de Miuzela, concelho de Almeida, distrito da Guarda. Filho de professores primários, realiza os seus estudos secundários em Lisboa, no liceu Gil Vicente, com o apoio do Instituto do Professorado Primário. Apesar da separação resultante dessa vinda para Lisboa, manterá sempre uma forte ligação à sua terra de origem. No liceu Gil Vicente destaca-se com um excelente desempenho escolar, interessando-se especialmente pela matemática. Terminado o liceu, ingressa na Faculdade de Ciências de Lisboa, onde termina a licenciatura em Ciências Matemáticas em 1944.

Em 1945 surge-lhe uma oportunidade de trabalho, que o obriga a uma mudança da sua área de interesse. A um estágio no Instituto Geofísico do Infante D. Luís, segue-se o ingresso no Serviço Meteorológico Nacional (SMN), quando da sua criação em 1946. A sede do SMN localizava-se então em Lisboa, na freguesia de Santa Isabel, a escassas centenas de metros da Escola Politécnica, permitindo uma estreita colaboração entre as duas instituições, ambas então dirigidas por Herculano Amorim Ferreira, Físico e Professor catedrático da FCUL.

Entre 1946 e 1952, Peixoto dedicou-se completamente ao estudo da Física e da Meteorologia, completando, nesse ano de 1952, a licenciatura em Ciências Geofísicas, após o que ingressará nos quadros da Faculdade de Ciências como Assistente Extraordinário. Uma grande parte da sua atividade continuará, no entanto, a realizar-se no SMN, onde assume um papel fundamental na formação de quadros e dá origem à Divisão de Estudos que dirigirá até 1974.

Na Faculdade de Ciências, Peixoto assume rapidamente grandes responsabilidades no ensino da Meteorologia. Amorim Ferreira, diretor do SMN e do Instituto Geofísico, tem pouco tempo para se dedicar ao ensino e transfere progressivamente a regência efetiva das cadeiras para o seu assistente. Peixoto, dotado de uma excelente preparação matemática, dedica-se a essa tarefa com grande entusiasmo, renovando o estilo de ensino praticado.

Em 1954, uma bolsa da Academia das Ciências permite-lhe realizar uma estadia de dois anos nos Estados Unidos da América, onde fará a preparação dos trabalhos que vão constituir a sua tese de doutoramento [Peixoto 1958], a defender na Universidade de Lisboa, e que constituirá o ponto de partida para uma colaboração com a ciência americana, que será a chave fundamental do seu sucesso futuro.

O Ano Geofísico Internacional de 1958

Entre 1954 e 1956, Peixoto estuda no Massachusetts Institute of Technology (MIT) onde se integra na equipa de Victor Starr, então responsável pelos primeiros estudos sistemáticos da circulação global da atmosfera. Starr é um dos grandes nomes da Física da Atmosfera no século XX. Nas décadas de 1950 e 1960 reuniu em torno de si uma escola de cientistas, em que se incluíram Peixoto, Edward Lorenz, Barry Saltzman e Abraham Oort, que viriam a ser responsáveis por importantes contribuições para a Teoria da Circulação Global da Atmosfera.

O MIT é então o centro de um conjunto de projetos de investigação concebidos e dirigidos por Starr, cujo objetivo é a compreensão das características fundamentais da circulação global da atmosfera. A rede global de observação meteorológica é ainda incipiente. Em 1958 a comunidade internacional lança uma grande campanha de observação e exploração do nosso planeta, abrangendo todas as áreas da Geofísica, que irá dar origem ao atual sistema de observação contínua. O grupo do MIT toma em mãos a tarefa de analisar o grande volume de dados que começa a ser disponibilizado. Peixoto encarrega-se do estudo do ciclo da água à escala global, desenvolvendo uma metodologia de análise

totalmente baseada em dados de sondagens atmosféricas. O resultado desse estudo é a produção dos primeiros mapas globais do transporte de água pela circulação atmosférica [Starr & Peixoto 1958] cuja importância veio a ser reconhecida pelos artigos que foi convidado a publicar nas revistas *Scientific American* [Peixoto & Ketanni 1973] e *La Recherche*.

Os estudos da circulação global da atmosfera

Na sequência da investigação sobre o ciclo da água, Peixoto vira-se para o estudo de outras variáveis meteorológicas. Starr interessava-se muito pelo problema do balanço do momento angular atmosférico, em especial pela explicação dos mecanismos responsáveis pela ocorrência e manutenção dos máximos da velocidade do vento médio na alta troposfera das latitudes médias – as correntes de jato – descobertas na década de 1940. Starr mostra a existência de mecanismos de transferência de energia das pequenas para as grandes escalas, ao contrário do que é observado em escoamentos turbulentos laboratoriais. Em 1962, Starr e Peixoto sugerem que esses mecanismos podem ser relevantes noutros sistemas físicos, em particular na dinâmica de galáxias [Starr & Peixoto 1962].

Nas décadas seguintes, Peixoto estabelece uma estreita colaboração com Abraham Oort, no *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFDL), em Princeton, que dará origem à publicação de diversos trabalhos de grande impacto, sobre a circulação atmosférica. Nestes trabalhos fazem uma análise sistemática e muito cuidadosa dos ciclos globais de energia [Peixoto e Oort 1974], momento angular [Oort & Peixoto 1983], e entropia [Peixoto et al. 1991] que se tornam obras de referência desta área. São também da sua autoria alguns estudos sobre a variabilidade interanual do clima. A frutuosa colaboração e amizade entre Peixoto e Oort durará até à morte do primeiro.

Nas décadas de 1960 e 1970 são desenvolvidos os atuais modelos de circulação global da atmosfera, que virão a transformar-se nas principais ferramentas de previsão do tempo e de investigação da dinâmica da atmosfera e do Clima. O desenvolvimento desses modelos exige dados precisos sobre a circulação média observada e ideias claras sobre os mecanismos físicos que devem ser incluídos e os balanços globais que devem ser satisfeitos. O sucesso desses modelos vai dever muito ao trabalho de diagnóstico da circulação global iniciado por Starr na década de 1950 e continuado por Peixoto e colaboradores, nas décadas seguintes.

Ensino e investigação em Portugal

Desde a sua primeira estadia no MIT até à morte, Peixoto mantém uma colaboração permanente com a ciência americana, com visitas anuais prolongadas, primeiro ao MIT, mais tarde à *Atmospheric Environment Research* (AER) e ao GFDL. Nestas



Figura 1 - Peixoto (centro) em 1963, com Jules Charney (esquerda) e Barry Saltzman (direita). Massachusetts, USA.

universidades, em paralelo com a atividade de investigação, leciona cursos de pós-graduação em Meteorologia.

Em Lisboa, Peixoto toma conta do ensino da Meteorologia e, mais tarde, da Termodinâmica. Nas suas aulas introduz muito do estilo e da qualidade do ensino pós-graduado com que tinha contactado no MIT. O curso de Meteorologia torna-se uma oportunidade para ensinar muitos tópicos de Física e de Matemática que sempre o interessaram e que não faziam parte dos cursos então lecionados nos primeiros anos da licenciatura. Promove igualmente o ensino da Hidrologia e da Oceanografia Física. Devido ao seu estilo muito próprio, estabelece com a maioria dos seus alunos uma relação próxima e estimula o interesse pelo estudo da atmosfera e do clima.

Em 1969, Peixoto é empossado como vice-Reitor da Universidade de Lisboa, cargo que ocupa até 1973. Os tempos, no entanto, não são favoráveis para as mudanças que a sua experiência como cientista parecia justificar. A partir de 1970, assume a direção do Instituto Geofísico do Infante Dom Luiz, atual Instituto Dom Luiz, tentando renovar a influência desta instituição na geofísica portuguesa. Em 1975, lança, juntamente com Luís Mendes Victor, o Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa, local onde se irá integrar, nas duas décadas seguintes, uma geração de novos geofísicos, cuja formação será profundamente marcada pelo contacto com Peixoto.

A partir de 1980, e até 1996, Peixoto assume a presidência da Classe de Ciências da Academia das Ciências de Lisboa e, em anos alternados, a presidência da Academia. Entretanto, vai dividindo o seu tempo entre a Faculdade de Ciências, o Instituto Geofísico, a Academia e colaborações com outras universidades portuguesas: em especial a Universidade da Beira Interior, que ajudou a criar, a Universidade Nova, de cuja Comissão Instaladora fez parte, e a Universidade do Algarve. Continua a passar nos Estados Unidos da América pelo menos dois meses por ano, onde mantém projetos de investigação em colaboração com Oort. Esta atividade intensa será mantida até às vésperas da morte inesperada em 6 de dezembro de 1996. Nesse mesmo mês, é publicado no *Journal of Climate*, o seu último artigo, sobre a Climatologia da Humidade Relativa [Peixoto & Oort 1996].

A mudança climática

Peixoto focou sempre o seu trabalho na análise de dados observacionais, não tomando parte direta na evolução da meteorologia no sentido da simulação numérica, que viria a dar origem aos atuais modelos de previsão meteorológica e climática. O seu instituto de acolhimento em Princeton, o GFDL, foi, no entanto, a instituição pioneira no desenvolvimento dos modelos de circulação global da atmosfera e do oceano, sob direção de Joe Smagorinsky. Quando em 1981 Peixoto organizou em Lisboa a conferência comemorativa dos 200 anos da Academia das Ciências de Lisboa [Saltzman 1983] a mudança climática ocupou um papel central, incluindo a apresentação de uma conferência por Syukuro Manabe, autor do primeiro estudo consistente do impacto da duplicação do CO₂ sobre o clima da Terra [Manabe & Wetheral 1967], prémio Nobel da Física em 2021.



Figura 2 - Conferencistas no Symposium sobre a Teoria do Clima, Lisboa, 1981

A Física do Clima

A partir do início da década de 1980 Peixoto dedicou muito do seu tempo à preparação de uma síntese do trabalho de investigação que realizou ao longo de toda a sua vida. Nessa síntese, pretendia reunir uma grande parte dos resultados obtidos na análise da circulação global da atmosfera e também muitas das notas que tinha vindo a acumular em inúmeros cursos de pós-graduação lecionados nos Estados Unidos e em Portugal. Em 1984 é convidado para publicar um longo artigo de revisão na *Reviews of Modern Physics* intitulado "*Physics of Climate*" cujo sucesso dará origem, em 1992 ao livro *Physics of Climate*, publicado pelo *American Institute of Physics*. O livro torna-se rapidamente numa obra de referência em Meteorologia e Climatologia, mantendo-se ainda hoje como uma das sínteses de referência no estudo da circulação atmosférica.

O trabalho de Pinto Peixoto foi por diversas vezes reconhecido. Em 1960 foi-lhe atribuído o Prémio Artur Malheiros (Academia das Ciências); recebeu por duas vezes, em 1989 e 1993, o Prémio Boa Esperança; e ainda em 1993, foi agraciado com a Grã-Cruz da Ordem de Santiago de Espada. Nesse mesmo ano foi convidado para proferir a Lição em memória de Starr no Massachusetts Institute of Technology.

Nas palavras de dois amigos e colaboradores de longa data, Oort (GFDL, Princeton) e Saltzman (Yale University):

Besides his legacy as a prolific and highly creative scientist, as well as an inspiring teacher for many generations of students in

Portugal and the United States, José Peixoto will always be remembered by his great qualities. His warmth, sense of humor, and unpretentiousness endeared him to his many colleagues worldwide, particularly in Portugal, and at MIT, AER, and GFDL, where he spent most of his time abroad. As Edward Lorenz of MIT noted, whenever José entered a room the entire atmosphere would immediately brighten. We will all miss his phenomenal energy, enthusiasm, optimism, insight, and curiosity about the world at large.

À data da sua morte, em 6 de dezembro de 1996, Peixoto deixa publicados mais de 50 artigos em revistas internacionais referenciadas, inúmeros textos e livros de divulgação em português e um dos principais livros de referência sobre o Clima. O seu trabalho na Faculdade de Ciências permitiu desenvolver diversas áreas das Ciências Geofísicas, contribuindo para fazer desta escola um dos locais por excelência para o estudo da Terra.



Figura 3 - Retrato de José Peixoto na biblioteca do IDL, pintura de Alves de Sousa (2009).

Agradecimentos

Este texto foi adaptado de "Miranda PMA, Mendes Victor L (2001) José Pinto Peixoto (1922-1996) A Física do Clima, in Memórias de Professores Cientistas, Simões AI (ed), Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa".

Referências Bibliográficas

- [1] Manabe S, Wetherald RT (1967) Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 24, 241-259. doi:10.1175/1520-0469(1967)024<0241:teotaw>2.0.co;2.
- [2] Oort AH, Peixoto JP (1983) Global angular-momentum and energy-balance requirements from observations, *Advances in Geophysics*, 25, 355-490.
- [3] Oort AH, Saltzman B (1997) José Pinto Peixoto, EOS, American Geophysical Union, 520.
- [4] Peixoto JP (1958) Contribuição para o Estudo da Energética da Circulação Geral da Atmosfera. *Contribution to the Study of the Energetics of the General Circulation of the Atmosphere*. Tese de Doutoramento na Univ. Lisboa: 183pp.
- [5] Peixoto JP, Ketanni MA (1973) *The control of the water cycle*, Scientific American, 228, 46-61, doi: 10.1038/scientificamerican0473-46
- [6] Peixoto JP, Oort AH (1974) *The annual distribution of atmospheric energy on a planetary scale*, *Journal of Geophysical Research*, 79, 2149- 2159, doi:10.1029/JC079i015p02149.
- [7] Peixoto JP, Oort AH (1982) *Physics of Climate*, American Institute of Physics, 520pp.
- [8] Peixoto JP, Oort AH (1996) *The climatology of relative humidity in the atmosphere*, *Journal of Climate*, 9, 3443-3463, doi:10.1175/1520-0442(1996)009<3443:TCORHI>2.0.CO;2
- [9] Peixoto JP, Oort AH (1984) *Physics of Climate*, *Reviews of Modern Physics*, 56, 365-429, doi: 10.1103/RevModPhys.56.365
- [10] Peixoto JP, Oort AH, De Almeida M, Tomé A (1991) *Entropy budget of the atmosphere*, *Journal of Geophysical Research*, 96(D6), 10981-10988, doi:10.1029/91JD00721.
- [11] Saltzman B, ed (1983) *Theory of Climate, Proceedings of a Symposium Commemorating the Two-Hundredth Anniversary of the Academy of Sciences of Lisbon*, *Advances in Geophysics*, 25, Academic Press.
- [12] Starr VP, Peixoto JP (1958) *On the Global Balance of Water Vapor and the Hydrology of Deserts*, *Tellus*, 10:2, 188-194, doi: 10.3402/tellusa.v10i2.9237
- [13] Starr VP, Peixoto JP (1962) *Certain basic processes and their counterparts in celestial mechanics*, *Geofisica Pura e Applicata*, 51, 171-183, <https://doi.org/10.1007/BF01992659>



Pedro M A Miranda, é Professor catedrático da Universidade de Lisboa, Diretor do Instituto Dom Luiz. PhD em Meteorologia na Universidade de Reading (UK, 1991). Tem realizado investigação em diversas áreas de Meteorologia, Clima e Oceanografia, em geral com recurso a modelos numéricos ou a modelos

teóricos, incluindo estudos sobre a dinâmica de ondas internas na atmosfera, processos de interação atmosfera-oceano, processos de mudança climática e determinação da distribuição de vapor de água em tempestades com novas técnicas de deteção remota.

ORCID: 0000-0002-4288-9456

<https://scholar.google.pt/citations?user=UWqW9PEAAAAJ&hl=pt-PT>

TRÊS INSTANTÂNEOS PARA A ETERNIDADE

Carlos da Camara¹

¹Instituto Dom Luiz (IDL), Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa

cdcamura@fc.ul.pt

O Professor José Pinto Peixoto (1922-1996) marcou a sua época como homem de ciência notável e como pedagogo excepcional. A sua obra *Physics of Climate*, que escreveu com o seu colega Abraham Oort, não só se tornou um texto clássico da Teoria do Clima como continua, trinta anos depois, a ser uma referência obrigatória nos cursos pós-graduados de Climatologia. Esta resistência ao tempo, que apenas se observa num número reduzido de livros científicos, se não é alheia à qualidade com que os assuntos são expostos e discutidos, deve-se, sobretudo, à intemporalidade das leis da Física que impregnam todo o livro graças à perspetiva adotada pelos autores de que “os conceitos em climatologia se devem construir sobre o suporte da Física a fim de se obter um significado e uma interpretação apropriados dos resultados”.

Por outro lado, quem teve a sorte de ter sido aluno do Professor Peixoto decerto ficou marcado pela originalidade das suas aulas, pelos exemplos inesquecíveis que dava e sobretudo pela forma simples com que transmitia os assuntos mais complexos. Quem poderá esquecer o teorema de Stokes a que o Professor Peixoto chamava “teorema da lagarta”, devendo-se a “circulação” das lagartas do tanque de guerra ao somatório dos “rotacionais” das rodas motrizes dentadas? Ou a analogia do Primeiro Princípio da Termodinâmica ao “contabilista” que apenas se preocupava com que as contas do deve e haver da energia batessem certo e do Segundo Princípio ao “gestor” que não autorizava os processos que levassem a uma diminuição de entropia do universo?

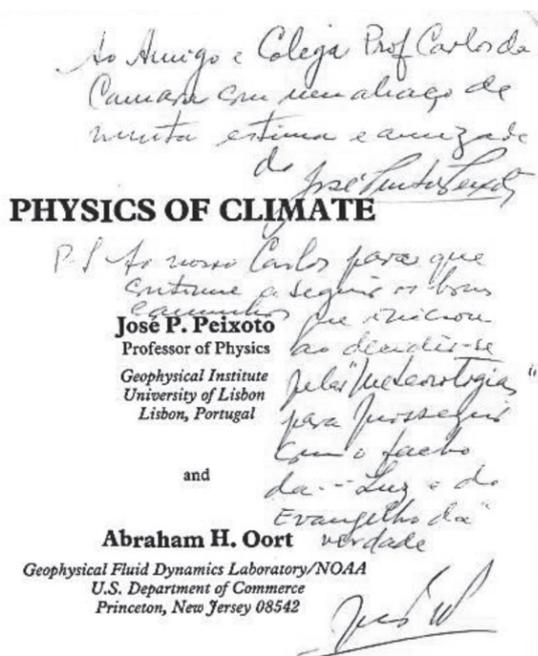
O Professor Peixoto tinha também uma personalidade muito própria e uma forma sui generis de interagir com aqueles que o rodeavam. Deixo aqui três instantâneos que retratam o homem e o professor.

Ele oficialmente sabe tudo!

Estava eu a dar uma aula teórico-prática de Meteorologia quando o Professor Peixoto pára à porta da sala e me diz: – A dar Cálculo Tensorial? Agora dá-se Cálculo Tensorial em todas as cadeiras! E depois queixem-se de que os alunos não aprendem o que verdadeiramente interessa e saem da Faculdade com uma cultura jornalística! O Belenenses deve ter perdido, pensei eu antes de retorquir: – Fui ter consigo para combinar a matéria e o professor disse-me que eu tinha carta branca... E, se escolhi este tópico, foi porque me ensinou nas aulas que o Cálculo Tensorial era fundamental porque todas as leis da Física eram tensoriais! Vai daí o Professor Peixoto irrompe pela sala dentro e vira-se para os alunos: – Pois disse e disse muito bem! E os senhores aproveitem bem a aula porque o Carlinhos foi um aluno distinto e oficialmente ele sabe tudo! E saiu porta fora.

Duas dedicatórias

Quando comprei o “*Physics of Climate*” pedi ao Professor Peixoto que me escrevesse uma dedicatória. As três linhas de texto eram assim: “Ao Amigo e Colega Prof Carlos da Camara com um abraço de muita estima e amizade”. Saltou-me a tampa: – Isto é o que o professor escreve para qualquer um! E, como sabe muito bem, eu não sou um qualquer! – Tens razão, meu filho. Vou acrescentar um post-scriptum! E redigiu de imediato um texto que me tocou, no qual relembrava a conversa com que me tinha convencido a optar pela especialidade em Ciências Geofísicas e em que também aludia às minhas ideias católicas e conservadoras: “PS Ao nosso Carlos para que continue a seguir os bons caminhos que iniciou ao decidir-se pelas “Meteorologias” para prosseguir com o facho da Luz e do Evangelho da verdade”.



Foreword by
Edward N. Lorenz
Professor Emeritus of Meteorology
MIT

AIP

**American Institute of Physics
New York**

Estava eu em casa do Professor Peixoto a corrigir exames de Hidrologia, quando reparei no livro “Sistemas, Entropia, Coesão” que o professor tinha escrito com o Professor Carvalho Rodrigues. Diz-me o Professor Peixoto: – Pelos vistos, gostaste de o ler! – Não li, ainda estou à espera que me ofereça um exemplar! – Não te ofereci? Espera aí, este livro era para o ter oferecido ao Tiago Oliveira da Estatística, mas coitado! morreu antes de eu lho ter dado. Já resolvo o problema. E, pegando numa caneta azul, rasurou o “Tiago” escrito a preto e escreveu por cima o meu nome. E entregou-me o livro dizendo: Olha, para compensar acrescentei uma linha e até embelezei a minha assinatura!

Não posso deixar de sorrir depois de escrever estas memórias. Nos tempos que correm, de crise profunda do Ensino a todos os níveis, do jardim de infância até ao doutoramento, não será afinal a regra do Professor Peixoto um indicador de que o problema é mais simples do que porventura parece? Pistolas (por enquanto) à parte, nós, professores (velhos e novos), é que não nos prostituímos como deve ser! Homem de ciência notável, pedagogo excecional, o Professor Peixoto era também um visionário!



A regra dos três pêis

Em princípios de 1991, acabado de regressar dos Estados Unidos, onde fiz o meu doutoramento, dei com o Professor Peixoto à saída de uma aula: – Carlinhos, agora que és professor, vê lá não te esqueças da “regra dos três pêis”! E lá seguiu corredor fora, conversando com este e aquele, como era seu costume. Para quem não saiba, a “regra dos três pêis” diz o seguinte: “Não há nada mais perigoso que professor novo, prostituta velha e pistola encravada”.

Perpetuação da Memória do Professor na Universidade da Beira Interior

António Rodrigues Tomé¹

¹Universidade da Beira Interior

Muito já se escreveu sobre a importância do Professor Pinto Peixoto no desenvolvimento do ensino superior nas regiões do Interior do País, na qual se inclui a Universidade da Beira Interior. No caso da UBI, contava-me o Prof. Pinto Peixoto que aquando da criação do instituto politécnico o Dr. Duarte Simões terá ido, com grande humildade, bater à porta de muitos professores catedráticos originários da Beira Interior pedindo-lhes auxílio para implementar o ensino superior na região. Não foram os benefícios financeiros, ou profissionais, que poderiam auferir que motivou uma resposta positiva de muitos desses professores, onde se incluía o Pinto Peixoto, mas sim a vontade de contribuírem para o desenvolvimento de regiões mais desfavorecidas do País. O caso do Pinto Peixoto é muito singular, entre outras razões, porque a morte veio encontrá-lo quando ainda lecionava na UBI aulas de Termodinâmica, para centenas de alunos do 2º ano de diversos cursos de Engenharia, apesar de já Jubilado.

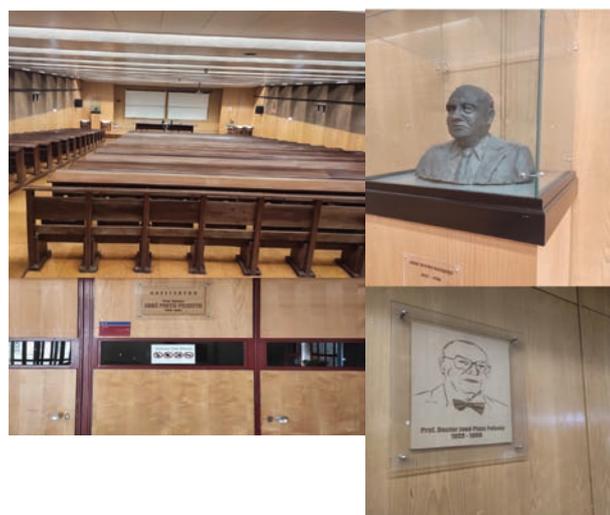
Após o choque da notícia da sua morte, houve logo uma preocupação imediata, que começou no departamento de Física, de deixar sinais físicos da sua passagem pela UBI porque, apesar daqueles que com ele privaram contarem ao longo da vida histórias do professor -eu ainda conto muitas aos meus alunos e não só- também esses um dia deixarão a UBI e a memória do professor deixará de estar tão presente como ainda hoje acontece, 26 anos após a sua morte.

Em pouco tempo com a ajuda do professor Carvalho Rodrigues, um dos organizadores da conferência de comemoração do 65º aniversário do professor, afixou-se no Hall do Departamento de Física, na parede em frente da porta de entrada, um poster alusivo à mencionada conferência e uma foto tirada durante o jantar da mesma



quando o professor discursava. Uma foto que eu sempre gostei muito, tenho uma igual nas paredes da minha casa. A foto transmite a ideia de sucesso, o corpo parece dizer “eu consegui”. No referido discurso o professor fez, como em muitos outros, referência aos seus pais professores primários no Portugal profundo. Tinha um imenso orgulho pelo papel essencial dos progenitores na educação do povo português. O ensino primário há muito que já tinha coberto todo o Portugal, seguindo-se o ensino liceal e muito mais tarde o superior, na minha cabeça não subsistem dúvidas que foi o legado dos Pais que motivou o envolvimento ativo do professor no estabelecimento de ensino superior no País, de norte a sul, e não apenas na região que o viu nascer.

Posteriormente a UBI batizou o anfiteatro onde o professor lecionou a última aula, a sala 4.2, de anfiteatro José Pinto Peixoto. Ladeando o quadro (infelizmente não mais de giz) encontra-se um busto da autoria do professor Abraham H. Oort, co-autor do livro *Physics of Climate*, e um esboço a laser providenciado pelo professor Carvalho Rodrigues. O professor posou em vida para o referido busto.



Abraham Oort, pensando no tempo livre que a reforma lhe proporcionaria, tinha iniciado algumas atividades lúdicas, entre as quais se encontrava a escultura e anualmente, sempre que ia aos Estados Unidos, o professor posava para ele no intervalo das discussões científicas.

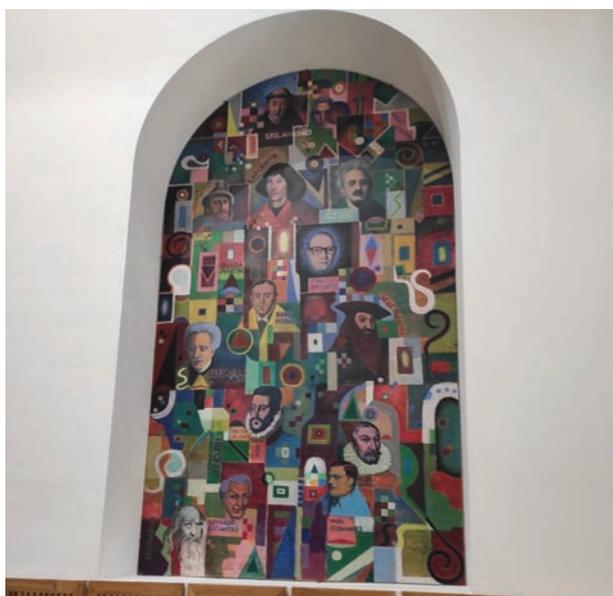
Na Sala da Lareira da Reitoria da UBI, situada num antigo Mosteiro, sala onde desde 2009 os diversos reitores oferecem o almoço aos membros do Conselho Geral (há que excluir os recentes anos da pandemia) existem três retratos do mestre Alves de Sousa de professores fundamentais para a criação e consolidação da Universidade. No centro o retrato do professor Pinto Peixoto (membro do Conselho Científico de 1978 a 1996), ladeado pelos professores António Ribeiro Gomes (membro do Conselho Científico de 1979 a 2005), e José Veiga Simão (Ministro da Educação Nacional de 1970-1974). Não apresento fotos desses retratos porque o mestre Alves de Sousa retratou várias vezes o professor após a sua morte e sempre lhe disse que nenhum se comparava ao original, feito em vida, e para o qual o professor posou durante meses ou anos. O mestre Alves de Sousa sempre respondeu que pintar um retrato com um modelo era sempre melhor que recorrer a fotografias e à memória. Uma história curiosa com o mestre Alves de Sousa é que nunca consegui que ele fosse ver o busto do professor, resmungava sempre que ele não fazia Física logo os físicos deveriam abster-se de fazer esculturas, sempre achei que o que o incomodava era a UBI ter colocado em lugar de destaque o busto modelado por um artista amador. Contudo, nós sempre nos sentimos muito honrados pela doação do busto ao departamento de Física da UBI.

Por último, na Sala dos atos na reitoria da universidade, e também pela mão do mestre Alves de Sousa, existem dois painéis com rostos de grandes cientistas universais. Num deles, mesmo em frente ao candidato, aparece em lugar de destaque o professor Pinto Peixoto, futuras gerações de formados na UBI, ainda que possam nunca ter ouvido falar do professor, passado os tempos de aperto que são a prestação das provas, interrogar-se-ão, e procurarão saber, quem era o professor que os olhava lá do alto.



António Rodrigues Tomé, foi de Janeiro de 1989 até Dezembro de 1996 colaborador assíduo do Prof. José Pinto Peixoto, e, nessa qualidade, deu apoio a vários estágios de conclusão de licenciatura (Universidade de Lisboa), deu apoio a várias monografias de alunos orientadas pelo professor e deu apoio a diversas comunicações nacionais e internacionais proferidas pelo Prof. José Pinto Peixoto. Foi, ainda na qualidade de estudante de licenciatura co-autor do artigo *Entropy Budget of the Atmosphere*. J. Geophys. Res., 96, 10,981-10,988, 1991, no qual José Pinto Peixoto é o primeiro autor. Doutorou-se em Física em 1997, já após a morte do professor, na Universidade da Beira Interior com a tese: "Balanços Globais e Regionais de Entropia, de Energia e de Massa da Atmosfera". É actualmente professor Associado da faculdade de Ciências da UBI e presidente do Instituto Coordenador da Investigação da Universidade da Beira Interior.

O seu researcherid é <http://www.researcherid.com/rid/A-5681-2013> onde a sua obra científica e respectivo impacto pode ser consultada.



José Pinto Peixoto como professor e pessoa

Carlos Pires¹

¹ Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia da FCUL e Investigador Sénior do Instituto Dom Luiz

José Pinto Peixoto (JPP) foi um daqueles meus professores com uma personalidade, um cariz, uma genialidade, uma forma de ensinar e escrever, todas tão vincadas que deixou indelevelmente marca na forma como comunico hoje nas minhas aulas. Foi em 1984 na cadeira de Termodinâmica que os secundanistas de Física como eu, tomámos conhecimento com JPP num dos anfiteatros da, já na altura, centenária e histórica Escola Politécnica. Já íamos de sobreaviso pelos colegas mais velhos que JPP era uma celebridade da Física e da Meteorologia e que valeria a pena ‘absorver’ tudo o que dizia como uma esponja. As suas aulas bastante sonoras, vivas, interativas e saudavelmente intimidatórias, eram apoiadas por elegantes e caligraficamente belas fórmulas escritas no quadro preto com giz que à mínima distração vinda do fundo da sala, era disparado das mãos de Peixoto atingindo certamente alguém a quem a seguir perguntava: ‘Então, meu menino, enuncie-me lá o Primeiro Princípio da Termodinâmica’. JPP não esquecia os seus alunos, fossem bons ou maus, mantendo com eles uma relação de quase paternalismo. As provas orais obrigatórias de JPP eram intensas e por vezes tinham versões coletivas com 3 a 4 alunos simultaneamente no quadro. Dessas orais fazia parte a averiguação do caderno diário da disciplina cujos melhores exemplares ficavam retidos pelo professor, e que para tal precaver deveriam ser fotocopiados com antecedência.

É costume lembrar antigos professores pelas suas ‘piadas’ ou pelas suas idiossincrasias. Era por exemplo vulgar JPP corrigir-se ao dar matéria libertando um ‘Está salva a Pátria’ ou usando citações bíblicas de Eclesiastes graças à sua grande bagagem cultural. No entanto, dele, JPP, muito mais ficou, tal como os geniais exemplos explicativos dos conceitos físicos. Relembro, por exemplo as suas frases: Diluir o café com uma colher significa anular o Laplaciano da sua concentração’ ou ‘As nuvens são a caligrafia do céu sem erros de ortografia’ para ilustrar que a cada tipo de nuvem correspondem certos processos óticos e da termodinâmica do ar húmido e da precipitação. Ou ainda a mnemónica do diagrama termodinâmico de Born-Tisza ‘Se Urso Vires Foge Tocando Gaita Para Hamburgo’ cujas iniciais correspondem à sequência: S-Entropia, U-Energia, V-Volume, F-Energia Livre, T-Temperatura, G-Potencial de Gibbs, P-Pressão, H-Entalpia. JPP tinha, tal como Feynman, a capacidade de transmitir a ubiquidade da Física na natureza como no seu exemplo de mostrar que a conservação do momento angular está tanto no aumento da velocidade angular de uma bailarina ao fechar os braços como na presença dos ventos de oeste às latitudes médias na atmosfera terrestre. Foi também, pela boca de JPP que pela primeira vez ouvi falar do ‘efeito borboleta’, graças à sua convivência científica com o descobridor do caos determinista Edward Lorenz através das suas colaborações nos Estados Unidos da América e que veicularam para Portugal investigações primordiais na área da Circulação Geral

da Atmosfera e dos Balanços Globais do Sistema Climático. A esse respeito, Peixoto foi contemporâneo e colaborador, nomeadamente com um dos Laureados Nobel de 2021, Syukuro Manabe.

JPP era pessoa exigente e rigorosa, mas que também sabia valorizar publicamente quem merecia. Esse sentimento era expresso em todas as provas académicas e que pude bem comprovar em 1988 na minha própria prova de ‘Estágio Profissionalizante’ e que cobria integralmente o 5º ano da licenciatura em Ciências Geofísicas nos anos 1980-90. Após o regresso do meu doutoramento na Universidade de Paris em outubro de 1996 tive o prazer de conversar várias vezes com José Pinto Peixoto e relembro como eu, já mais emancipado cientificamente, consegui dialogar e desfrutar ainda mais da sua cultura e manifestar o entusiasmo e energia de um recém-doutorado. Poucos meses depois assistimos, nós colegas da FCUL à sua morte inesperada em dezembro de 1996 deixando academicamente órfãos muitos que com ele partilharam conhecimentos e privaram.

É com louvável empenho que vale a pena evocar a memória de José Pinto Peixoto pelo centenário do seu nascimento, pelo seu legado e pelo esforço em trazer para a atualidade internética a qualidade dos seus escritos, da sua obra e das suas aulas.

Lisboa, março de 2022



Carlos Pires, é Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e investigador sénior do Instituto Dom Luiz. PhD em Meteorologia pela Universidade de Paris VI (França, 1996). Tem realizado diversos trabalhos na área da Meteorologia, Clima, Oceanografia e Modelação Estatística de séries temporais. Tem desenvolvido metodologias de separação de fontes estatísticas e cálculos poli-espaciais (e.g. temperatura do mar) para diagnóstico de não-linearidade e não-Gaussianidade em séries geofísicas. Tem também estudado o problema inverso em oceanografia (e.g. tsunamis), previsão e modelação probabilista de secas e assimilação não-linear de dados. Contribuiu também para a modelação estatística da pandemia de COVID na Europa.

O que nos fica de quem nos deixa

Miguel Miranda¹

¹IPM - Instituto Português do Mar e Atmosfera

A formação em 1946 do Serviço Meteorológico Nacional a partir da junção dos recursos até então existentes nas universidades e no Serviço Meteorológico dos Açores marcou a modernidade da meteorologia portuguesa e estruturou a integração de Portugal na Organização Meteorológica Mundial, transformada na mesma década numa agência das Nações Unidas. O projeto liderado por Amorim Ferreira contou, desde o seu início, com o papel insubstituível daquele que viria a ser o mais importante físico da atmosfera portuguesa do século XX: José Pinto Peixoto.

O progresso da meteorologia em Portugal, ao longo da segunda metade do século XX, obrigou à reorganização das redes de observação, à melhoria de procedimentos de análise e previsão, e à adoção de uma estrutura operacional capaz de assegurar a qualidade a pontualidade e o rigor necessários para a segurança dos cidadãos e da atividade económica, e em particular da aviação civil. Para que tal fosse possível três fatores foram decisivos: a integração nos procedimentos da meteorologia global, sob os auspícios da Organização Meteorológica Mundial, a cooperação com os serviços meteorológicos europeus, e a articulação com a universidade, muito em particular com o Instituto Geofísico dirigido por José Pinto Peixoto.

A previsão numérica do tempo tornou-se viável a partir de 1950 com a utilização de modelos barotrópicos de baixa resolução. Dez anos depois era lançado o primeiro satélite meteorológico (Tiros I). Na década de setenta são formadas as duas organizações europeias que reúnem capacidades até então inexistentes na Europa de observação da Terra (EUMETSAT) e de previsão numérica do tempo (ECMWF). Estas organizações projetaram a Europa para uma posição de liderança mundial. José Pinto Peixoto acompanhou de perto esta grande mudança, formando gerações de meteorologistas e apoiando a modernização de procedimentos de diagnóstico e prognóstico.

José Pinto Peixoto tornou a meteorologia portuguesa melhor.

Da sua memória cada um de nós ficou com uma parte do que foi a sua vida e a sua relação com os outros. Podemos recordar dele a intransigência sobre a relevância fundacional da física e da matemática e sobre o primado da ciência sobre a experiência.

Podemos recordar a capacidade quase inultrapassável de compreender e ensinar termodinâmica e dinâmica global da atmosfera. A sua paixão pela meteorologia e pela física do clima. O seu desprezo pela mediocridade. A defesa do esforço como caminho para o conhecimento científico. Podemos recordar a irreverência, o desassombro e a linguagem colorida.

Manteve sempre a sua ligação científica a um dos melhores grupos científicos do mundo, e sempre investigou e ensinou a meteorologia e o clima nas duas línguas que melhor dominava: a matemática e a física.

A 6 de dezembro de 1996 José Pinto Peixoto deixou-nos sós.

Mas ele está presente sempre que analisamos uma situação meteorológica complexa, decidimos um novo procedimento ou estruturamos um novo serviço ou uma nova rede de observação. Está ainda mais presente sempre que participamos numa ação de divulgação científica, qualquer que seja o seu nível de complexidade.

É também por isso que 1922-2022 é o século Peixoto da meteorologia portuguesa.

De Miuzela para o mundo

Carlos Fiolhais¹

¹Departamento de Física, Universidade de Coimbra

Eu não sabia onde ficava Miuzela. Desde agosto passado que já sei: é uma aldeia no interior profundo de Portugal, no concelho de almeida, distrito da guarda. Fui lá por ser miuzelense um dos físicos portugueses mais notáveis do século XX, José Pinto Peixoto (1922-1996), professor da Universidade de Lisboa e especialista em geofísica.

Peixoto doutorou-se no MIT (de facto, a defesa da tese foi em Lisboa, mas quase todo o trabalho foi feito no MIT) e trabalhou mais tarde em Princeton. Um dos seus colegas e amigos do MIT foi o físico norte-americano Edward Lorenz (1918-2008), o autor de uma célebre formulação da teoria do caos, segundo a qual o bater das asas de uma borboleta pode originar um tornado no Texas. A tese de Peixoto, “Contribuição para o Estudo da Energética da Circulação Geral da Atmosfera”, foi submetida no ano de 1958, que foi declarado pelas Nações Unidas Ano Geofísico Internacional (passadas cinco décadas, 2008 é o Ano Internacional da Terra). O geofísico português foi o autor de um dos primeiros modelos sobre o movimento global da atmosfera, proposto na mesma altura em que no Hawaii, sob a direção de outro norte-americano, Charles Keeling, começavam as observações sistemáticas das emissões de dióxido de carbono que constituem um grande suporte experimental para os conceitos de efeito estufa e de aquecimento global.

Na escola primária de Miuzela, num dia muito quente, falei para as pessoas da terra sobre o aquecimento global, para o que me preparei com base no manual de Peixoto e Oort “*Physics of the Climate*”, publicado em 1992 pelo *American Institute of Physics*, e dos seus artigos de divulgação na *Scientific American* e na *Recherche*. Se o famoso Professor fosse vivo (faleceu inesperadamente um ano antes do tratado de Quioto) seria hoje famosíssimo pois os média não cessariam de lhe fazer perguntas sobre o aquecimento global. E ele haveria de responder a tudo, sempre rigoroso e, ao mesmo tempo, sempre bem disposto, pois não há um princípio de incerteza que limite o humor quando se é exato. O seu rigor alicerçava-se na sua sólida formação matemática, uma vez que se tinha licenciado nessa disciplina antes de se formar em geofísica. Ele sabia que sem matemática não pode haver física e, por isso, não pode haver geofísica. Nas suas palavras: A matemática está para a física assim como a gramática está para a literatura. A gramática ensina a expressar bem as ideias, se as houver! Não cria literatura.

Lembro-me bem da primeira vez que o vi, num seminário em Coimbra sobre termodinâmica, de ter sorrido com uma das suas extraordinárias frases: “A senhora da limpeza desentropiou-me o gabinete todo”. A linguagem do Prof. Peixoto, nas aulas ou fora delas, podia ser bastante colorida, como mostra o exemplo que dava da produção de entropia por humanos: “Meus meninos, como fazem para se livrarem da vossa entropia? Sim, puxam o autoclismo”. Tal como o seu contemporâneo Feynman (que, como ele, esteve no MIT e em

Princeton) Peixoto era um físico divertido, e algumas das suas tiradas bem podem ser equiparadas às do físico nova-iorquino. Como disse Lorentz, onde estivesse o Peixoto, o ambiente mudava. Uma alteração climática local, portanto.

A Associação Casa de Cultura Prof. Dr. José Pinto Peixoto, sediada em Miuzela, distribuiu no dia em que lá fui prémios aos melhores alunos do ensino primário local. Essas distinções servem para lembrar que o seu patrono era filho de professores primários e estudou em Lisboa no Instituto do Professorado Primário. Mas essa associação tem também um prémio nacional para o melhor aluno do secundário, que tem sido ganho por alunos de vintes.

Se graças ao Prof. Peixoto Miuzela já estava no mapa da ciência mundial, com estes prémios está hoje no mapa da educação nacional.

Nota: Este artigo foi originalmente publicado em outubro de 2008, na Gazeta de Física, volume 31, fascículo 4. Pela sua atualidade, republica-se aqui no contexto da homenagem ao Professor José Pinto Peixoto.

Vamos fazer ciência, não guerra!

Carlos Herdeiro

Departamento de Matemática, Universidade de Aveiro

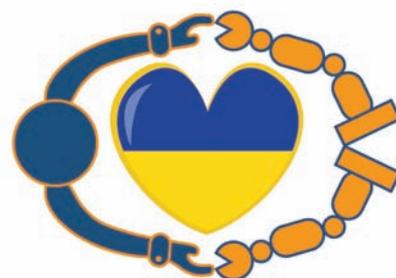
Entre as histórias associadas a Arquimedes - o sábio natural de Siracusa que tornou célebre a expressão “Eureka” - existe uma que coloca a ciência ao serviço da guerra. Esta história, de acordo com o relato (bem mais tardio, do Sec. XII) do historiador Bizantino Joannes Zonaras, decorre em 213 D.C., quando Siracusa, uma cidade portuária na costa leste da Sicília, foi cercada tanto por mar como por terra pelas forças da República Romana. Roma pretendia evitar uma aliança entre Cartago, à época a sua cidade arqui-rival, e o Reino de Siracusa. Durante o cerco, Arquimedes teria usando espelhos para refletir e focar a luz solar de modo a incendiar toda a frota Romana. Tal engenhosidade não evitou a conquista da cidade pelos Romanos, e a própria morte de Arquimedes no processo, mas ilustra como a ciência (como base da tecnologia) poderia dotar um “David” de uma “funda” para derrotar um “Golias”. Este relato, contudo, e apesar de todo o seu encanto, será provavelmente uma lenda, ou pelo menos exagerado. Uma análise moderna da física envolvida sugere que o procedimento seria ineficiente e portanto imprático (*A A Mills and R Clift 1992 Eur. J. Phys. 13 268*).

Ao longo da história são múltiplos os exemplos em que a ciência, com as vantagens tecnológicas que permitiu, impactou decisivamente em conflitos bélicos. O uso da artilharia alimentada por pólvora é uma ilustração conhecida. Os canhões, em particular, permitiram no Sec. XV alterar a lógica da guerra e dos longos cercos medievais. A queda de Constantinopla, em 29 de Maio de 1453, com o seu profundo impacto na ordem mundial, foi em grande parte possibilitada pela artilharia, incluindo a famosa “Bombarda Turca” criada pelo engenheiro húngaro Orbán, ao serviço do sultão Maomé II. Orbán representa aqui o papel do inventor mercenário, que no ano anterior, 1452, tinha oferecido os seus serviços ao imperador Bizantino de Constantinopla, tendo sido recusado pelos elevados honorários que pediu. Esses mesmos serviços seriam

aceites por Maomé II, que forneceu a Orbán todas as condições e materiais para criar os seus canhões, que foram instrumentais em derrubar as lendárias muralhas da capital do Império Romano do Oriente, e instalariam uma nova lógica na guerra. Orbán morreria precisamente durante o cerco de Constantinopla, quando um dos seus canhões explodiu, ilustrando os riscos associados às novas tecnologias que estavam a ser desenvolvidas.

Avançando para o Sec. XX, as duas grandes guerras foram decisivamente impactadas por desenvolvimentos científicos conduzidos por cientistas vestindo a camisola do patriotismo. O “manifesto dos 93” (de 4 de Outubro de 1914), assinado por académicos e artistas, proclamava o seu apoio às ações militares da Alemanha no início da Primeira Guerra Mundial. Entre os signatários encontravam-se vários laureados Nobel, incluindo Philipp Lenard, Max Planck e Wilhelm Rontgen, todos premiados com o Nobel da Física. Um outro signatário foi Fritz Haber (Nobel da Química em 1918), considerado o fundador da “Guerra Química”, pelos seus contributos para converter o cloro (um gás mais pesado que o ar) e outros gases venenosos em armas, que acabariam por gerar o terror na guerra das trincheiras, iniciando o uso de armas químicas na segunda batalha de Ypres, em Abril-Maio de 1915.

Já na segunda guerra mundial, é sobejamento conhecido o papel do programa nuclear dos EUA em precipitar a capitulação do Japão e o final da guerra. O início desse programa remonta aos desenvolvimentos do final



“Let’s make science, not war!”

- Open letter of Russian scientists and science journalists against the war with Ukraine -

da década de 1930. Em Dezembro de 1938 a fissão nuclear do urânio foi confirmada por Otto Hahn, Fritz Strassmann e Lise Meitner. No verão seguinte, Enrico Fermi e Leo Szilard propuseram a ideia de um reator nuclear para mediar uma reação em cadeia usando a fissão do urânio. Compreendendo as implicações, em 2 de Agosto de 1939, Albert Einstein escreveu ao presidente dos EUA, Franklin D. Roosevelt alertando para o trabalho de Fermi e Szilard, que poderia levar a converter “o urânio numa importante forma de energia”. Mas, acrescenta Einstein, “Este novo fenómeno também poderá levar à construção de bombas, e é concebível - embora muito menos certo - que bombas extremamente poderosas desse tipo possam ser construídas.” O projeto Manhattan concretizou, de facto, a antevisão de Einstein. As primeiras bombas nucleares usadas em Hiroshima e Nagasaki, em 6 e 9 de Agosto de 1945, mostraram ao mundo o horror nuclear.

O início de 2022 trouxe ao mundo, novamente, um grave conflito. A história mostra-nos que a ciência e os cientistas podem impactar decisivamente numa guerra:

podem usar o poder da ciência para criar armas mais inovadoras, poderosas e destrutivas. Mas também podem usar a sua influência para tentar desagrar essa mesma guerra. É muito importante ver os exemplos de Instituições Académicas de referência que abriram as suas portas a estudantes e investigadores afetados pelo conflito, para mitigar um pouco as consequências destrutivas e injustas da guerra. É muito importante não contribuir para a escalada de uma guerra que, como todas as guerras, nunca se sabe como e quando pode terminar. Mais de 7000 cientistas, académicos e jornalistas de ciência russos assinaram em Março uma carta aberta condenando esta guerra. A carta termina: “Exigimos paz para nossos países. Vamos fazer ciência, não guerra!”

Que as dolorosas lições da história não sejam esquecidas no caminho que todos, incluindo cientistas e líderes mundiais, venhamos a escolher trilhar.



Trabalhar na The Navigator Company é poder fazer parte de uma empresa com visão de Portugal para o Mundo, líder no mercado internacional, com presença nos 5 continentes e em mais de 130 países.

Se ambicionas começar a tua carreira em grande, temos oportunidades para ti! Procuramos recém-Licenciados ou Mestres, para projetos desafiantes, em áreas como Ambiente, Florestal, Energia, Bioquímica, Transformação Digital e Sistemas de Informação.

Sabe mais em:
thenavigatorcompany.com/Pessoas/Programa-de-Recrutamento

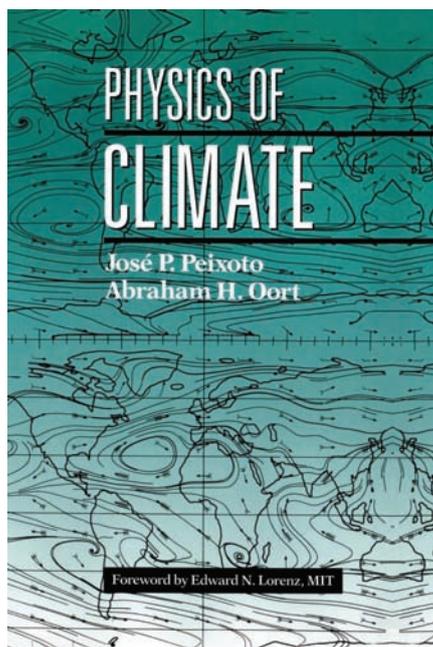


Livros

Carlos da Camara¹

¹Instituto Dom Luiz (IDL), Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa

cdcamara@fc.ul.pt



Publicada em 1992 pelo American Institute of Physics, a primeira e única edição do livro *Physics of Climate* por José P. Peixoto e Abraham H. Oort continua a constituir uma referência obrigatória para os cursos de Climatologia e de Dinâmica e Modelação do Clima. Uma breve incursão pelo Google, utilizando como palavras-chave “*syllabus*”, “*physics of climate*” e “*Peixoto and Oort*” permite logo identificar mais de meia centena de universidades, das mais prestigiadas dos quatro cantos do mundo, em que o livro de Peixoto e Oort é de leitura obrigatória.

Não vale, portanto, a pena fazer aqui uma recensão crítica de um livro que, não tendo sofrido qualquer alteração desde o seu lançamento, logo se tornou, e ainda continua a ser, uma leitura obrigatória para quem deseje conhecer a física por detrás dos processos que ocorrem no Sistema Climático. Mas já se reveste, porventura, de algum interesse procurar descortinar os fatores que levaram a que se concretizasse a antevisão dos críticos da *Physics World* de que o livro de Peixoto e Oort “*will become a classic text in climate research*”.

Em primeiro lugar, o livro foi testado durante muitos anos nos cursos dados pelos dois autores nas Universidades de Lisboa, Princeton e MIT. Quando, em finais dos anos setenta do século passado, fui aluno da disciplina de Dinâmica da Atmosfera, o Prof. Peixoto forneceu fotocópias de alguns textos em inglês cobrindo os tópicos dos balanços de momento angular e de energia da atmosfera os quais, mais tarde, reconheci ao ler *Physics of Climate*. Acresce que partes do texto e algumas das figuras já haviam integrado dois extensos artigos, o primeiro constituindo um capítulo de 136 páginas do livro *Theory of Climate* publicado em 1983 pela *Academic Press* e o segundo uma revisão do estado da arte com 65 páginas, publicada em 1984 na “*Reviews of Modern Physics*”.

Em segundo lugar, *Physics of Climate* aborda o clima de uma forma integrada, sendo apresentados os fundamentos físico-matemáticos dos processos que têm lugar na Atmosfera, Oceanos e Criosfera e também dos processos de transferência entre a superfície do Globo e a Atmosfera. Esta abordagem não só permite interpretar os dados observacionais provenientes de estações convencionais à superfície, de navios e de bóias, de radiossondagens e de instrumentos a bordo de satélites, como permite corrigir essas informações por forma a que constituam um todo coerente que respeite os constrangimentos impostos pelos princípios da física, tais como os da conservação da massa e da substância água ou do balanço do momento angular, da energia e da entropia.

A qualidade do texto, a forma harmónica como os capítulos se encontram organizados permitindo que facilmente se combinem conforme o tipo de curso e de audiência e ainda a profusão de tabelas, mapas e gráficos que possibilitam discussões variadas nas aulas ou em trabalhos a propor aos alunos, fazem com que *Physics of Climate* continue a ser um livro altamente recomendável como base de qualquer curso que envolva aspetos observacionais ou de modelação do clima.

Por outro lado, a preocupação tida pelos autores de que a física do clima fosse apresentada com base nas equações fundamentais que regem o comportamento termohidrodinâmico do geofluido são o garante de que o texto resistirá ao tempo, continuando a servir de guia de interpretação das torrentes de novos dados observacionais que, graças a instrumentos com resoluções espaciais, temporais e radiométricas cada vez mais finas, irão abrir novos horizontes para a compreensão do Sistema Climático.

Porque está a mudar o clima?

Constança Providência¹, Rita Wolters²

¹ CFisUC, Departamento de Física, Universidade de Coimbra

² Ilustradora

Material

- dois copos de vidro
- termómetro
- saco de plástico e fecho
- gelo
- areia, cascalho ou pequenas pedras



Figura 1 - Urso polar no Pólo Norte.

Efeito de estufa e consequências

Certamente já ouviste falar em mudanças climáticas e nas consequências destas mudanças para a vida sobre o planeta Terra. Todos os países serão atingidos por estas alterações e, por isso, precisamos de atuar em conjunto, e todos temos de contribuir no nosso dia a dia se queremos impedir que as previsões que os cientistas fazem se concretizem.

Mas afinal do que se trata? Tem-se verificado nos últimos anos o aumento médio da temperatura acompanhado de vários efeitos secundários como grandes incêndios, grandes tempestades, grandes inundações, destruição de habitats. Temos consumido demasiada energia, demasiados recursos naturais e colocamos em risco a nossa vida e a dos outros seres vivos. Muita da produção de energia está associada à emissão de gases para a atmosfera. Estes gases alteram a atmosfera. A atmosfera funciona como se estivéssemos numa estufa. Durante o dia, a radiação emitida pelo Sol atravessa a atmosfera aquecendo o planeta Terra. Durante a noite o planeta não arrefece demasiado porque a atmosfera não deixa sair a energia emitida pela Terra resultante do aquecimento da sua superfície. Chamamos a este fenómeno efeito de estufa pois algo semelhante se passa nas estufas: o vidro

ou o plástico deixam que a luz do Sol entre na estufa e contribua para aumentar a temperatura no seu interior; contudo, impedem que a energia emitida a partir do interior da estufa (radiação infravermelha) saia e, por isso, dentro de uma estufa existe uma maior humidade e uma temperatura mais alta. O problema é que quando alteramos a atmosfera com a emissão de gases extra como o dióxido de carbono, o efeito de estufa aumenta.



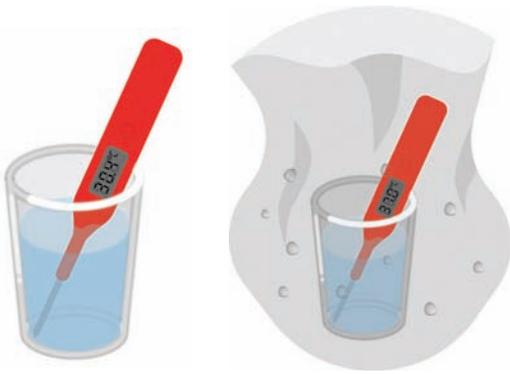


Figura 2 - Copo 1 e copo 2 (dentro de um saco de plástico) com água antes (a) e (b), durante (c) e (d) e depois (e) e (f) de estarem 1h30 ao Sol.

Faz a seguinte experiência para perceberes o que é o efeito de estufa. Toma dois copos com a mesma quantidade de água e mede a temperatura da água. Verifica que ambos têm a mesma temperatura. Regista a temperatura e a hora a que fizeste a medição no copo 1 e no copo 2. Coloca ambos os copos ao Sol, por exemplo no parapeito da janela ou na varanda, o copo 1 sem qualquer cobertura e o copo 2 dentro de um saco de plástico fechado com um fecho. Passada uma hora e meia, volta a medir a temperatura de ambos os copos e anota novamente no caderno. Qual foi o aumento da temperatura da água no copo 1 e no copo 2? A temperatura do copo 2 aumentou muito mais. Sabes porquê? Porque a radiação solar consegue atravessar o saco de plástico e aquecer a água e o ar dentro do saco, fazendo aumentar a sua temperatura, mas a energia por eles emitida não consegue atravessar as paredes do saco para o exterior. O outro copo, por outro lado, vai cedendo energia ao meio exterior e, por isso, a água não aquece tanto. O saco de plástico funciona como a atmosfera, impede que a energia emitida pelo copo com água quente se liberte.

Mas quais são as consequências do aquecimento global da Terra? Faz estas duas experiências simples para perceberes rapidamente algumas consequências:

1- coloca num copo com água vários cubos de gelo e com uma caneta marca o nível da água no copo. Deixa o gelo derreter e volta a marcar o nível da água. O nível mudou?

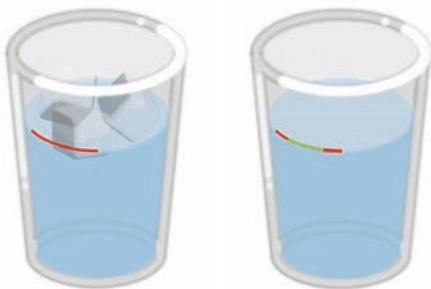


Figura 3 - Copo com água e gelo: antes (esquerda) e depois (direita) de o gelo derreter. A marca no copo indica o nível da água, antes (vermelho) e depois (verde) do gelo derreter.

2 - repete a experiência mas desta vez coloca pedrinhas no copo até dois terços e cobre com água. Agora coloca o mesmo número de cubos de gelos em cima da água. Marca o nível da água com uma caneta. Deixa o gelo derreter e volta a marcar o nível da água. O nível mudou?

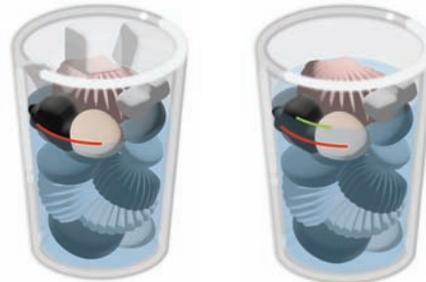


Figura 4 - Copo com pedrinhas cobertas de água e gelo: antes (esquerda) e depois (direita) de o gelo derreter. A marca no copo indica o nível da água, antes (vermelho) e depois (verde) do gelo derreter.

No primeiro caso o nível da água não muda. No Pólo Norte o gelo forma-se em cima da água. Se a temperatura global da Terra subir e o gelo derreter, o nível da água no oceano não sobe. Mas há um problema grave: os animais que vivem naquele ambiente como os ursos polares perdem o seu habitat, perdem a capacidade de se alimentar e ficam em risco de extinção.

No segundo caso, o nível da água sobe! No Pólo Sul o gelo está assente sobre o solo, por isso, se derreter, o nível da água sobe. O mesmo se pode dizer do gelo no topo das montanhas altas com neves permanentes: se a neve derreter, a água vai escorrer até ao oceano e o nível do mar sobe. E agora pensa nas consequências. O que acontece às povoações em ilhas ou à beira-mar? Podem simplesmente desaparecer engolidas pelo mar!

Para impedir o aumento da temperatura da Terra, muito trabalho tem que ser feito pelos governantes, mas também muitas atitudes e tarefas podem ser levadas a cabo por cada um de nós. Descobre o que está nas tuas mãos fazer! Já ouviste falar da Greta Thunberg? Desafio-te a que descubras e que percebas como cada um de nós pode escolher salvar o planeta Terra!

Na verdade, a atmosfera protege a vida na Terra e sem ela a vida não seria possível. A atmosfera funciona como um cobertor, impedindo que a temperatura seja demasiado alta ou demasiado baixa. Ela protege-nos de radiações prejudiciais como a radiação ultravioleta. É graças à atmosfera que a água, de que tanto precisamos, existe no estado líquido.

Mas ela forma apenas uma fina e frágil camada acima da Terra, ligada ao planeta pela força da gravidade. Se queremos manter a vida no planeta Terra temos de a respeitar e não podemos alterar a sua constituição através de ações individualistas e desconcertadas. Temos que pensar no planeta como um todo e estarmos disponíveis para colaborar nas iniciativas que contribuam para a sua conservação.

Agradecimentos

Agradeço à Lucília Brito a revisão do texto e todas as sugestões-

notícias

Conferências 45.^a WOCSDICE - *Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits* e 16.^a EXMATEC - *Expert Evaluation and Control of Compound Semiconductor Materials and Technologies*.

Com o apoio da Sociedade Portuguesa de Física, decorreram em Ponta Delgada, nos Açores, a 45.^a WOCSDICE - *Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits* e a 16.^a EXMATEC - *Expert Evaluation and Control of Compound Semiconductor Materials and Technologies*, de 3 a 6 de maio de 2022. A WOCSDICE é uma workshop que reúne anualmente investigadores reconhecidos internacionalmente e jovens cientistas e engenheiros com elevado potencial, com vista a divulgar os resultados mais recentes nas áreas dos semicondutores, dispositivos associados e circuitos integrados. Por sua vez, a EXMATEC é um encontro bienal, que se destaca por juntar especialistas de renome, investigadores jovens e representantes de empresas de todo o mundo, para apresentar e discutir ideias e tecnologias avançadas nas áreas de fabricação, caracterização e processamento de semicondutores. As duas conferências, complementares, representaram uma excelente oportunidade para adquirir novos conhecimentos, bem como para trocar ideias sobre a investigação de ponta e os avanços mais recentes nos seguintes temas:

- Compostos semicondutores, incluindo materiais com hiato de banda elevado e ultraelevado
- Dispositivos semicondutores eletrónicos, magnéticos, optoelectrónicos e fotónicos (materiais, processamento, caracterização e modelização)

- Eletrónica orgânica
- Nanomateriais, incluindo materiais 2D, superfícies e interfaces (crescimento, caracterização, teoria e aplicações)
- Aspectos de fiabilidade de materiais, processos e dispositivos
- Técnicas avançadas de simulação e caracterização de semicondutores

Na cerimónia de encerramento das conferências foi atribuído o prémio da Sociedade Portuguesa de Física dedicado à melhor apresentação na área de Física e Aplicações. O prémio foi atribuído a Manuel Fregolent, da Universidade de Pádua, pelo trabalho “*Deep Levels and Threshold Voltage Instability in Vertical a-Plane Oriented GaN MISFETs*”.



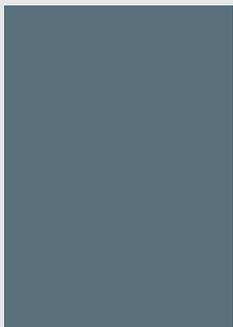
TABELA PUBLICIDADE GAZETA DE FÍSICA



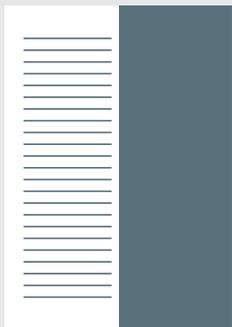
1 - Verso Capa



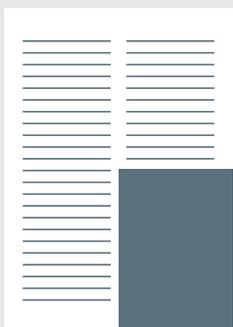
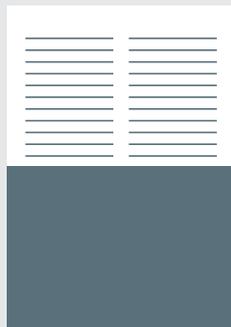
2 - Contracapa



3 - Página



4 - 1/2 Página



5 - 1/4 Página



6 - Destacável/folha



7 - Rodapé



Para os físicos e amigos da física.
WWW.GAZETADEFISICA.SPF.PT

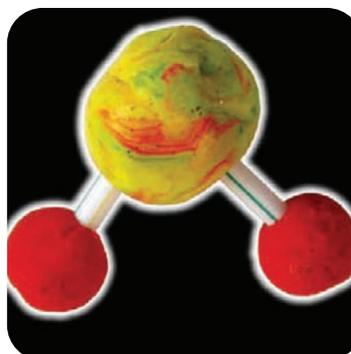
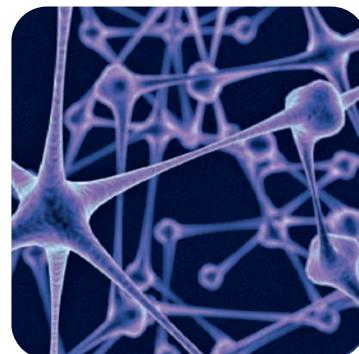
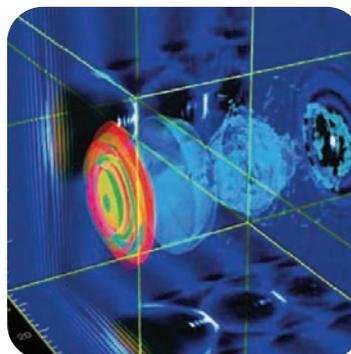
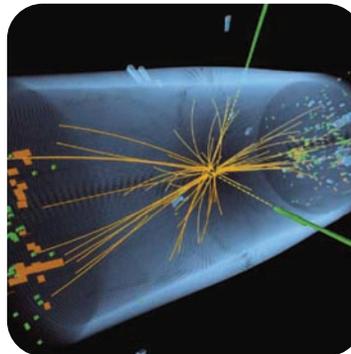


Tabela (acresce IVA)

1 - 1.500,00 €	Descontos
2 - 2.000,00 €	Sócios coletivos - 20%
3 - 800,00 €	Quantidade
4 - 600,00 €	2 x 20% 3 x 30% 4 x 40%
5 - 400,00 €	Tiragem: 3000 exemplares
6 - 1.500,00 €	Consulta online 15000 (C/CPLP)
7 - 100,00 €	Facebook ~40000 (C/CPLP)

CONTACTOS:

Sociedade Portuguesa de Física
Av. da República, 45 - 3º Esq. | 1050-187 Lisboa
Telef.: 217 993 665 | spf@spf.pt

FÍSICA 2022

23^a Conferência
Nacional de Física

31^o Encontro Ibérico
para o Ensino da Física

7—10
Setembro,
2022

Física do Clima

Gravitação

Grafeno & “ângulo mágico”

Eletrónica Flexível

100 anos da experiência
de Stern-Gerlach

Faculdade de
Ciências da
Universidade
do Porto

fisica2022.spf.pt

