

A climatologia como ferramenta essencial no apoio à decisão em viticultura

João A. Santos¹, Helder Fraga²

¹ Dep. de Física, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Quinta dos Prados, Vila Real, Portugal

² Dep. de Agronomia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Quinta dos Prados, Vila Real, Portugal

jsantos@utad.pt

Resumo

A Climatologia é uma disciplina eminentemente do domínio da Física, sendo o seu objeto de estudo o sistema climático. Ainda que neste sistema a atmosfera tenha um papel central, a interação complexa e não linear com os restantes subsistemas, onde se incluem os oceanos, requer abordagens multidisciplinares, que forcem o diálogo entre físicos e cientistas dos mais diversos domínios. A título ilustrativo, apresenta-se uma aplicação da Climatologia na avaliação dos impactos potenciais das alterações climáticas na viticultura. Estas abordagens aplicadas possibilitam o desenvolvimento de sistemas de apoio à decisão para a redução do risco e promoção da sustentabilidade de sectores vulneráveis às alterações climáticas. É também uma oportunidade para ressaltar o papel da Física na resposta aos desafios da sociedade atual.

O objeto de estudo da Climatologia

Em sentido lato, a Climatologia é a área científica que estuda o sistema climático em toda a sua abrangência [1]. Do ponto de vista da Física, o sistema climático pode ser encarado como um sistema termodinâmico composto, quase fechado (trocas de massa relativamente reduzidas com a sua vizinhança / universo exterior), encerrando várias componentes além da atmosfera, a sua componente central, designadamente a hidrosfera, biosfera, criosfera e litosfera. Entre estas diferentes componentes (subsistemas) ocorre uma multiplicidade de processos de transferência de massa, momento e energia, que se processam num espectro muito alargado de escalas espaço-temporais, desde frações de segundo até milhares de milhões de anos. A substância água permite um forte acoplamento entre os diferentes subsistemas, sendo o ciclo hidrológico um agente fundamental nos processos de interação. Os permanentes fluxos de água e as constantes transições de fase têm um papel determinante nestas interações. A interação oceano-atmosfera é indispensável na compressão do clima, sendo particularmente relevante na explicação de muitos mecanismos climáticos, nomeadamente dos episódios de El Niño / La Niña. Com efeito, os oceanos desempenham um papel fundamental na dinâmica do Sistema Climático e o seu estudo é absolutamente essencial

para a compreensão do clima. Contudo, a relevância das outras componentes na compreensão do clima tem vindo a ser demonstrada em numerosos estudos. A título de exemplo, refira-se a relevância da criosfera na circulação global oceânica e atmosférica, o papel da biosfera no ciclo do carbono e da água, ou a distribuição das massas continentais no balanço energético do planeta.

A fonte primária de energia do sistema climático é a radiação solar, que alimenta o sistema global, que funciona como uma máquina térmica que transporta incessantemente energia dos trópicos (fonte quente) para os polos (fontes frias), gerando permanentemente energia potencial disponível e energia cinética em várias escalas espaço-temporais. Deste modo, o sistema climático não é uma entidade em equilíbrio estático, nem mesmo em equilíbrio dinâmico. Na verdade, tem um comportamento dinâmico complexo e não linear, com flutuações mais ou menos acentuadas entre diferentes estados de quase equilíbrio. A prova deste comportamento é a sucessão de períodos glaciares e interglaciares ao longo da história do planeta. A variabilidade climática processa-se em escalas que vão de apenas algumas décadas a milhares de milhões de anos. A origem deste comportamento dinâmico é multifacetada, dependendo da escala temporal.

Uma parte significativa da variabilidade climática é atribuída a forçamentos externos (variabilidade externa), que variam desde a deriva continental, passando pelas alterações nos parâmetros orbitais da Terra (excentricidade da órbita, precessão e nutação dos equinócios ou inclinação do eixo de rotação), até alterações na atividade e luminosidade solar (manchas solares), entre outros. A estes forçamentos externos deve juntar-se a variabilidade interna ou livre do próprio sistema, isto é, toda a variabilidade possível num dado estado quando as condições de

fronteira do sistema são mantidas invariantes. A forte variabilidade atmosférica, parcialmente resultante do seu estado predominantemente gasoso, de baixa inércia e baixa capacidade calorífica, com consequentes curtos tempos de relaxação na resposta aos forçamentos, é potenciada por fortes gradientes diferenciais (horizontais e verticais) nos aquecimentos diabáticos (fluxos de radiação, calor sensível e latente), pelo campo gravitacional e pela rotação da Terra (indutora de acelerações inerciais). Esta variabilidade conjuga-se ainda com uma miríade de processos de retroação positiva (potenciadores de instabilidade) e negativa (potenciadores de estabilidade), quer dentro de cada componente individual do sistema climático, quer nas suas interfaces.

A variabilidade climática pode ser facilmente identificada através da variabilidade de diversas variáveis atmosféricas, tais como temperatura, precipitação, parâmetros de humidade, vetor vento ou fluxos radiativos, entre outras. Esta variabilidade nos elementos atmosféricos não só é transferida em cadeia para outras variáveis dos restantes subsistemas, sendo integrada num determinado domínio de escalas espaciais e temporais, mas é também influenciada por estes subsistemas. Trata-se, pois, de uma transferência bidirecional de variabilidade, através de uma cascata de subsistemas com forte hierarquização de escalas.

As distribuições de probabilidade das variáveis referidas atrás permitem caracterizar o clima de um determinado local. Não apenas as medidas de tendência central, mas também os extremos dessas distribuições, configuram características muito próprias de um determinado clima, não havendo nenhum clima rigorosamente igual entre dois locais distintos no planeta. Todavia, é possível agrupar condições climáticas semelhantes em classes ou categorias. Ao longo da história da Climatologia muitas têm sido as classificações climáticas propostas, sendo a de Köppen-Geiger a mais conhecida. Não deixando de ser um exercício muito útil de sistematização, todas elas apresentam limitações na sua aplicabilidade a domínios específicos.

Conforme enunciado atrás, a variabilidade climática é um processo natural, que sempre ocorreu e irá ocorrer ao longo de toda a vida do planeta Terra. Não obstante, a ação do Homem tem desencadeado perturbações nestes processos naturais que, de forma gradual e cumulativa, têm vindo a contribuir para as alterações climáticas mais recentes, observadas sobretudo nos últimos 40 anos. As emissões acentuadas de gases com efeito de estufa, tais como o dióxido de carbono e o metano, têm contribuído para um aumento contínuo nas concentrações atmosféricas destes gases, por via da sua contínua acumulação, favorecida por tempos de vida médios relativamente longos (algumas centenas de anos no caso do dióxido de carbono). Ora, estas alterações na composi-

ção química da atmosfera têm levado a uma intensificação do efeito de estufa natural, nomeadamente pela alteração dos fluxos de radiação solar e terrestre, com balanço líquido positivo para o planeta (superavit energético). Esta energia suplementar, integrada no tempo, conduz a um aumento da energia potencial disponível no sistema climático (e.g. subida no centro de gravidade da atmosfera), da energia cinética e da energia interna.

Estas alterações na energética do sistema têm como consequência alterações nos padrões espaciais e nos regimes temporais dos mais variados elementos climáticos da atmosfera (e.g. temperatura e precipitação), hidrosfera (e.g. correntes oceânicas, caudais, qualidade da água e reservas hídricas), criosfera (e.g. coberturas de gelo e neve, permafrost) e biosfera (e.g. fenologia de animais e plantas, produção de biomassa, stresses abiótico e biótico, trocas gasosas). Acresce ainda que o aumento da energia disponível no sistema climático potenciará a ocorrência de eventos extremos, incluindo extremos compostos, que resultam da ação combinada de vários extremos, dentro do mesmo subsistema ou em diferentes subsistemas. Deste modo, a avaliação dos impactos potenciais das alterações climáticas sobre os diversos elementos do sistema climático é essencial para uma melhor planificação de medidas de adaptação a essas alterações, bem como de opções de mitigação que permitam reduzir as emissões de gases com efeito de estufa para a atmosfera.

Modelação do clima e cenarização

A intrincada interação entre processos globais num vasto espectro de escalas espaço-temporais tornam as respostas do sistema climático altamente não lineares. Por conseguinte, atendendo à complexidade e extensão do sistema climático, a modelação é a única ferramenta que permite uma avaliação rigorosa da sua resposta a uma dada perturbação, designadamente ao forçamento antropogénico. Por esse motivo, foram desenvolvidos modelos de clima, que inicialmente incorporavam apenas a atmosfera, mas que foram consecutivamente incorporando os restantes subsistemas, ou partes destes. Com o desenvolvimento de computadores com capacidade de cálculo crescente, foi sendo possível incluir um número progressivamente maior de módulos nos modelos de clima, tendo a sua perícia na simulação do clima real e/ou observado vindo a aumentar de forma sucessiva. Tendo em conta estes resultados, os modelos de clima são uma ferramenta indispensável em estudos de sensibilidade climática, sendo, portanto, o laboratório da Climatologia.

Pelo exposto, assume-se que os mesmos modelos serão capazes de reproduzir climas futuros, com diferentes cenários de emissões de gases com efeito de estufa. Para tal, o Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (IPCC) tem vindo a definir conjuntos ou famílias de cenários que pretendem traduzir, em equivalentes de carbono ou de forçamento radiativo, o efeito antropogénico no clima de diversas trajetórias possíveis de desenvolvimento socioeconómico para as próximas décadas [2]. Estes cenários, atualmente designados por *Representative Concentration Pathways* (RCP), são utilizados como entrada nos modelos de clima, permitindo, por conseguinte, avaliar a resposta do sistema climático a essas perturbações. No entanto, dada a sensibilidade às condi-

ções iniciais de cada modelo, as respostas devem ser analisadas de forma probabilística, ainda que as equações primitivas de base sejam determinísticas. Uma vez que existem diversos modelos de clima, com diferentes aproximações, concepções e formalismos, resoluções espaciais e temporais e esquemas de parametrização de processos de subescala, é comum em investigação climática a utilização de *ensembles* (conjuntos) de modelos para uma melhor avaliação das incertezas inerentes às cenarizações.

O acoplamento de outros modelos não atmosféricos, tais como modelos hidrológicos ou de culturas agrícolas, aos diferentes cenários e projeções permite uma avaliação dos impactos potenciais das alterações climáticas nos mais variados setores e sistemas. Este é o campo de ação da Climatologia aplicada, que exige equipas de investigação multidisciplinares, dado requerer conhecimentos transversais a vários domínios científicos (e.g., Física, Química, Biologia, Geologia, Geografia, Hidrologia ou Agronomia) para a implementação de cadeias de modelos e para a interpretação dos seus resultados intermédios e finais. Nas secções seguintes será exposto um caso de estudo ilustrativo de Climatologia aplicada.

Clima e viticultura

Como é sabido, as culturas agrícolas são, em geral, fortemente influenciadas pela meteorologia e pelo clima de cada região. A cultura da vinha, com grande tradição histórica nos países da Bacia do Mediterrâneo, incluindo em Portugal, é um exemplo clássico desta estreita ligação atmosfera-plantas. Ainda que na atualidade a vitivinicultura seja uma atividade de grande importância socioeconómica a nível global, a maioria das regiões vitivinícolas mundialmente famosas estão localizadas em regiões com climas mediterrânicos ou temperados quentes (Figura 1).

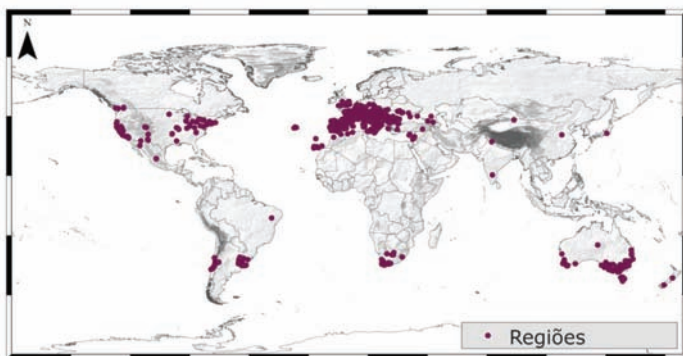


Figura 1 - Distribuição geográfica das principais regiões vitivinícolas mundiais.

Estas regiões são reconhecidas pelas suas distintas características climáticas, as quais têm uma elevada influência no produto final, as uvas e o vinho. As características climáticas de uma determinada região vitivinícola, nomeadamente as condições de temperatura, precipitação, humidade, vento e radiação, são fatores chave na determinação da adequação varietal (castas) e nos tipos de vinho produzidos nessa região [3].

Em geral, o clima de uma dada região e as condições meteorológicas num dado ano afetam fortemente o desenvolvimento da videira, visto que esta requer condições específicas de temperatura, intensidade e duração da radiação solar, e também de disponibilidade de água durante o seu ciclo de

crescimento. O ciclo vegetativo da videira compreende duas etapas: o período de dormência da videira e a estação de crescimento. No estado de dormência, que é iniciado com as baixas temperaturas durante o outono/inverno (acumulação de frio) e que se estende por aproximadamente quatro meses, a videira apresenta baixa atividade metabólica e mantém a sua aparência externa praticamente inalterada. Por outro lado, durante a estação de crescimento, a videira sofre constantes mudanças morfológicas e fisiológicas, principalmente provocadas por forçamentos térmicos (acumulação de calor). Um aumento da temperatura do ar durante a primavera define o fim do período de dormência da videira e a subsequente acumulação de calor impulsionará a progressão dos diferentes estados fenológicos. A duração dos estados fenológicos difere de acordo não apenas com a casta (variedade), mas também com o clima de cada região e com as condições meteorológicas de um determinado ano. Vários estudos, em diferentes partes do mundo, demonstraram que a duração da estação de crescimento da videira está diretamente relacionada com a temperatura média da estação de crescimento [4], embora também possa estar ligada à humidade do solo e às práticas de gestão de culturas [5].

A precipitação também é um fator crítico em viticultura, principalmente nas videiras de sequeiro (não regadas), uma vez que esta governa a disponibilidade de água no solo e os níveis de stresse hídrico das plantas, levando a uma ampla gama de efeitos, embora em grande parte dependentes do estado de desenvolvimento em que a planta se encontra. No entanto, condições atmosféricas moderadamente secas e estáveis durante o amadurecimento (período de maturação) são geralmente favoráveis à produção de uvas e vinhos de elevada qualidade. Pelo contrário, a precipitação excessiva é geralmente desfavorável à maturação, em parte devido à diluição do açúcar nos bagos e a diversas perturbações na síntese de compostos químicos benéficos, mas também favorece a propagação de doenças e pragas na vinha, requerendo a aplicação de copiosos tratamentos fitossanitários.

A radiação solar é também um fator chave, que é limitante em climas com maior nebulosidade e/ou latitude mais elevada. Durante a maturação, o açúcar e os compostos fenólicos são favorecidos pelos dias de elevada radiação solar. Assim, regiões com menor insolação tendem a otimizar a exposição solar da videira, aproveitando as inclinações dos terrenos, ou outras características orográficas locais, e ajustando os sistemas de condução e a densidade de plantação. Com folhas e cachos mais expostos a fotossíntese é favorecida, mas ao mesmo tempo aumenta as necessidades de água e potencia outros problemas, como queimaduras solares nas folhas e cachos. Por outro lado, videiras menos expostas, com bagos a temperaturas mais baixas, resultam em menores

concentrações de açúcar e maior acidez, comprometendo a qualidade do vinho.

Impactos

Vários estudos científicos têm-se dedicado à avaliação dos impactos da variabilidade climática na viticultura e no vinho. As temperaturas médias da estação de crescimento (dependente do hemisfério) têm vindo a aumentar para a maioria das regiões vitícolas do mundo [6]. Associadas às tendências de aquecimento nas últimas décadas, também foram identificadas mudanças no desenvolvimento fisiológico e no crescimento da videira para diferentes regiões vitivinícolas mundiais. De fato, vários estudos já relataram antecipações nos estados fenológicos e encurtamentos da estação de crescimento da videira em resposta a essas tendências de temperatura crescente [6]. Os avanços nos tempos fenológicos, com por exemplo a maturação a ocorrer durante um período mais quente, pode ter impactos negativos nas propriedades dos bagos e na qualidade do vinho, ameaçando a tipicidade do vinho de uma determinada região, ou mesmo a sua adequação vitícola.

Atendendo a que as projeções de alterações climáticas para o século XXI estão alinhadas com as tendências recentes, apontando mesmo para a sua intensificação, espera-se que estas tenham impactos não negligenciáveis na viticultura nas próximas décadas. Alterações nos padrões espaciais de temperatura e precipitação, bem como nos regimes temporais (por exemplo, sazonalidade), podem de facto modificar consideravelmente as condições agroclimáticas das zonas vitivinícolas atuais e alterar irremediavelmente a sua adequação vitivinícola. Estudos de alterações climáticas para Portugal [7], Grécia [8], Alemanha [9], Itália [10], Espanha [11], França [12], entre outros, projetam um aumento geral na temperatura média da estação de crescimento para as próximas décadas. Como resultado, a antecipação dos tempos fenológicos pode afetar de forma significativa a qualidade do vinho produzido em climas futuros, como já mencionado anteriormente.

Mais especificamente, índices de produtividade, fenologia, stresse hídrico e stresse de azoto na Europa foram analisados num estudo recente [13], para os climas atuais (1980–2005) e futuros (2041–2070), em dois cenários de forçamento radiativo antropogénico (RCP4.5 e RCP8.5). Para este estudo foi utilizado o modelo de cultura STICS, um modelo dinâmico, baseado em processos, com um módulo específico que simula o desenvolvimento fisiológico da videira. Este modelo foi acoplado aos dados climáticos, do solo e do terreno, tendo também implicitamente em consideração os possíveis efeitos fisiológicos do aumento das concentrações atmosféricas de CO₂. Para as simulações futuras, as mudanças projetadas destacam a diminuição na produtividade em algumas regiões do sul da Europa, incluindo Portugal (Figura 2).

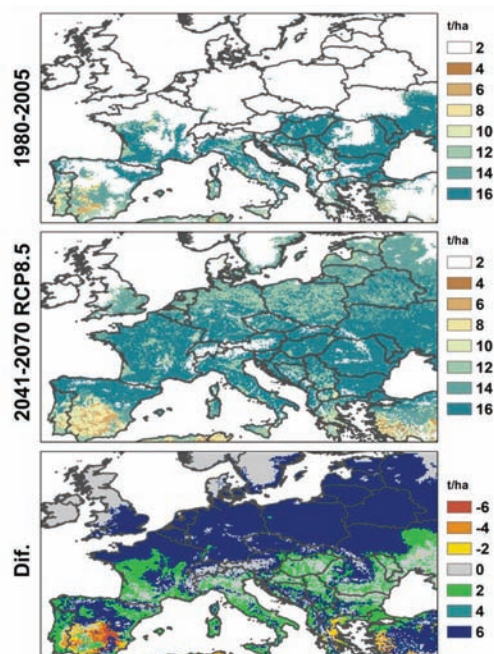


Figura 2 - Produtividade da videira na Europa no período (a) 1980-2005, (b) 2041-2070 (RCP8.5) e (c) respetiva variação (b) - (a).

Verifica-se também uma extensão para o norte da aptidão vitícola até ao paralelo 55°N, o que se pode traduzir no surgimento de novas regiões vitícolas no norte da Europa. Apesar da forte heterogeneidade regional, projeta-se que os tempos fenológicos médios (abrolhamento, floração ou pintor/veraison) ocorram muito mais cedo do que atualmente (e.g., o abrolhamento pode ser antecipado em cerca de 1 mês). A secura acentuada e o stresse hídrico severo no Sul da Europa, como é o caso do Sul da Península Ibérica e Sul de Itália, poderão reduzir a produtividade da videira e levantar questões de sustentabilidade económica que devem ser devidamente avaliadas e acauteladas. A título de exemplo, foi testada com o modelo STICS a aplicação da rega como opção de adaptação para a viticultura em Portugal [14]. Os resultados permitem determinar as necessidades de rega de forma a manter os níveis atuais de produção de uva (Figura 3). Estes resultados podem ser utilizados em modelos econométricos, que permitam avaliar os custos desta

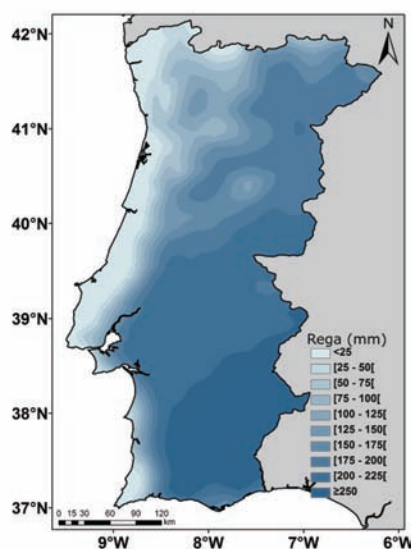


Figura 3 - Necessidades de rega (em mm) em Portugal para a manutenção dos níveis atuais de produção de uva no período 2041-2070 e para o cenário RCP8.5.

medida concreta de adaptação às alterações climáticas, servindo como ferramenta de apoio à decisão do viticultor.

Considerações finais

A Climatologia, à semelhança da Meteorologia, é iminentemente uma disciplina do domínio científico da Física. Todavia, se por um lado a sua aplicação a contextos mais específicos requer uma abordagem multidisciplinar, permite, por outro lado, o desenvolvimento de ferramentas de apoio à decisão, particularmente pertinentes no contexto atual de alterações climáticas e de preocupação crescente com os seus impactos. Estas ferramentas podem, pois, ser utilizadas pelos diversos agentes e decisores de setores vulneráveis às mudanças climáticas, o que permite o delineamento de medidas e estratégias de adaptação adequadas e oportunas, reduzindo a vulnerabilidade e o risco, aumentando a resiliência e promovendo a sustentabilidade ambiental e económica.

O projeto H2020 Clim4Vitis pretende dar resposta a alguns destes desafios para a viticultura Europeia, potenciando a transferência de conhecimento entre parceiros e para o setor produtivo, desenvolvendo ações de capacitação técnico-científica e promovendo a disseminação de resultados junto dos diversos agentes e decisores. Para mais informações sugere-se a consulta da página web do projeto (<https://clim4vitis.eu/>).

Nestas circunstâncias, a Física e os físicos têm um papel central em todo o processo, sendo uma excelente oportunidade para afirmar a Física como uma ciência moderna, que continua a procurar soluções para os problemas atuais e emergentes da nossa sociedade.

Referências

- [1] Peixoto, J.P. and A.H. Oort, *Physics of climate*. 1992, New York: American Institute of Physics. xxxix, 520 p.
- [2] IPCC, *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, ed. IPCC. 2014, Geneva, Switzerland: IPCC. 151 pp.
- [3] Magalhães, N., *Tratado de viticultura: a videira, a vinha e o terroir*. 2008, Lisboa, Portugal: Chaves Ferreira. 605.
- [4] Jones, G.V., et al., *Climate and Terroir: Impacts of Climate Variability and Change on Wine In Fine Wine and Terroir - The Geoscience Perspective*. Macqueen, R.W., and Meinert, L.D., (eds.). 2006, Newfoundland, Canada: Geoscience Canada, Geological Association of Canada.
- [5] Webb, L.B., et al., *Earlier wine-grape ripening driven by climatic warming and drying and management practices*. *Nature Climate Change*, 2012. 2(4): p. 259-264.
- [6] Jones, G.V., et al., *Climate and Wine: Quality Issues in a Warmer World*. Proceedings of the Vineyard Data Quantification Society's 10th Econometrics Meeting. Dijon, France, 2004.
- [7] Fraga, H., et al., *Climatic suitability of Portuguese grapevine varieties and climate change adaptation*. *International Journal of Climatology*, 2016. 36(1): p. 1-12.
- [8] Lazoglou, G., C. Anagnostopoulou, and S. Koundouras, *Climate change projections for Greek viticulture as simulated by a regional climate model*. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017.
- [9] Neumann, P.A. and A. Matzarakis, *Estimation of wine characteristics using a modified Heliothermal Index in Baden-Württemberg, SW Germany*. *International Journal of Biometeorology*, 2014. 58(3): p. 407-415.
- [10] Eccel, E., et al., *Simulations of quantitative shift in bio-climatic indices in the viticultural areas of Trentino (Italian Alps) by an open source R package*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016. 127: p. 92-100.

- [11] Ramos, M.C., *Projection of phenology response to climate change in rainfed vineyards in north-east Spain*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017. 247(Supplement C): p. 104-115.
- [12] Duchene, E. and C. Schneider, *Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace*. *Agronomy for Sustainable Development*, 2005. 25(1): p. 93-99.
- [13] Fraga, H., et al., *Modelling climate change impacts on viticultural yield, phenology and stress conditions in Europe*. *Global Change Biology*, 2016. 22(11): p. doi:10.1111/gcb.13382.
- [14] Fraga, H., I. García de Cortázar Atauri, and J.A. Santos, *Viticultural irrigation demands under climate change scenarios in Portugal*. *Agricultural Water Management*, 2018. 196: p. 66-74.



João Santos, é Professor no Departamento de Física da Escola de Ciência e Tecnologia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD, <http://www.utad.pt/>). Tem Agregação em Física (2012), Doutoramento em Climatologia/Meteorologia pela Universidade de Lisboa (2005) e Licenciatura em Ciências Geofísicas pela Universidade de Lisboa (1995). Tem como áreas de especialização as Ciências Atmosféricas, Climatologia, Alterações Climáticas e os seus impactos. É membro integrado do Centro de Investigação e de Tecnologias Agroambientais e Biológicas (CITAB, <https://www.citab.utad.pt/>). É também Investigador principal da linha do CITAB: "Monitorização integrada dos impactos climáticos e ambientais: estratégias de adaptação e mitigação". Tem participado em diversos projetos nacionais e internacionais e é atualmente investigador responsável pelo projeto europeu H2020 – Clim4Vitis.



Helder Fraga, é Investigador doutorado no Departamento de Agronomia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD, Portugal), além de membro do Centro de Investigação e de Tecnologias Agroambientais e Biológicas (CITAB). O seu trabalho atual foca-se nos efeitos do clima e das alterações climáticas em várias culturas relevantes na bacia do Mediterrâneo, particularmente na viticultura e no olival. Colaborou em mais de 15 projetos de investigação financiados por fundos nacionais e europeus. É autor de mais de 40 publicações indexadas no JCR, 1 edição de livro, 2 capítulos de livros, mais de 80 publicações / trabalhos em reuniões científicas e orador convidado em vários seminários científicos técnicos. Faz parte da equipa editorial da revista *Agronomy* e da revista *IVES Technical Reviews*.