

# BOLETIM

# APDIO

PUBLICAÇÃO SEMESTRAL | 62 | JUNHO '20

IO EM AÇÃO

**A INVESTIGAÇÃO  
OPERACIONAL  
COMO AUXILIAR NA  
VITICULTURA**

ARTIGO DE OPINIÃO

***OPTIMAL THINKING* EM  
GESTÃO FLORESTAL  
COM PREOCUPAÇÕES  
AMBIENTAIS**

TÉCNICAS DE IO

***DATA ENVELOPMENT ANALYSIS:*  
O USO DA PROGRAMAÇÃO  
MATEMÁTICA NA AVALIAÇÃO  
DE DESEMPENHO**

ENTREVISTA

**ANDRÉS  
WEINTRAUB**



# ÍNDICE

03 ENTREVISTA  
ANDRÉS WEINTRAUB

05 ARTIGO DE OPINIÃO  
OPTIMAL THINKING  
EM GESTÃO FLORESTAL  
COM PREOCUPAÇÕES AMBIENTAIS  
Isabel Martins

09 TÉCNICAS DE IO  
DATA ENVELOPMENT ANALYSIS:  
O USO DA PROGRAMAÇÃO  
MATEMÁTICA NA AVALIAÇÃO  
DE DESEMPENHO  
Ana Camanho

13 IO EM AÇÃO  
A INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL  
COMO AUXILIAR NA VITICULTURA  
João Matias

16 O SÓCIO N.º...  
...869  
Nelson Chibeles Martins

17 LUGAR AOS NOVOS  
SISTEMAS DE SUPORTE À DECISÃO  
APLICADOS À GESTÃO FLORESTAL  
SUSTENTÁVEL EM POVOAMENTOS DE  
PINHEIRO BRAVO  
Paulo Costa  
Adelaide Cerveira  
Teresa Fidalgo Fonseca

20 NOTÍCIAS DA APDIO



ELIANA COSTA E SILVA

Centro de Inovação e Investigação  
em Ciências Empresariais  
e Sistemas de Informação  
Escola Superior de Tecnologia e Gestão,  
Politécnico do Porto



RUI BORGES LOPES

Departamento de Economia,  
Gestão, Engenharia Industrial e Turismo.  
Universidade de Aveiro

## EDITORIAL

O número de seres humanos que habita o planeta ultrapassa valores alguma vez vistos, criando uma pressão cada vez maior nos recursos naturais existentes e enfatizando a importância de uma melhor gestão destes recursos. Na linha da frente da gestão destes recursos, a **Agricultura e Gestão Florestal** são cruciais para se ter economias sustentáveis e são atividades críticas para a competitividade e autonomia de muitos países, não sendo Portugal uma exceção.

Neste boletim contamos com o contributo de Andrés Weintraub, Professor do Departamento de Engenharia Industrial da Universidade do Chile, que nos fala do papel da IO na Agricultura e na Gestão Florestal e aponta caminhos futuros de investigação.

Isabel Martins, em Artigo de Opinião, dos diversos problemas que o sector florestal tem trazido para a IO, aborda os problemas de Gestão Florestal, salientando que muito há ainda a fazer na incorporação de restrições ambientais em tais problemas.

Em Técnicas de IO, Ana Camanho apresenta a metodologia de *Data Envelopment Analysis*, fazendo uma breve apresentação da origem dos modelos de DEA, desde o seu surgimento até à atualidade. O artigo termina com algumas considerações relativas ao papel das técnicas de avaliação de desempenho na sociedade atual, apontando oportunidades para futuros desenvolvimentos.

João Matias, apresenta em IO em Ação, um exemplo de aplicação da IO no setor vitivinícola, um sector que representa um grande volume de negócios e valor em Portugal. O comportamento das explorações vitícolas foi efetuado recorrendo a Modelos Baseados em Agentes, tendo sempre em vista a sustentabilidade da vinha na região Norte.

Um Sistema de Suporte à Decisão aplicado à Gestão Florestal sustentável em povoamentos

de pinheiro bravo é apresentado por Paulo Costa, Adelaide Cerveira e Teresa Fidalgo Fonseca, na rubrica Lugar aos Novos. A aplicação é relativa a uma área florestal no Perímetro Florestal do Barroso na região Norte de Portugal, tendo sido usado o simulador ModisPinaster. Segundo os autores, fazendo uso da Otimização, o sistema apresentado torna mais eficiente o processo de Gestão Florestal, garantindo a satisfação de requisitos legais, a sustentabilidade de recursos e o equilíbrio de receitas.

Nelson Chibeles Martins, sócio número 869, partilha o seu percurso académico e profissional desde a sua entrada para a IO, em particular o seu percurso pelas Meta-Heurísticas e o trabalho em colaboração com outros investigadores em IO.

Na última página surge como habitual o espaço para as notícias. São dadas a conhecer as novas datas dos eventos anunciados em edições anteriores deste boletim, que tiveram que ser adiados devido à situação pandémica atual. O ano de 2020 tem-se vindo a mostrar um ano repleto de desafios em todos as áreas da nossa sociedade. As vidas pessoais e profissionais de todos foram alteradas. Vimos o fecho, há muito não observado, de fronteiras e o confinamento domiciliário de todo o país (e de vários outros países!). Assistimos a toda uma sequência de acontecimentos que seria imprevisível de imaginar não há muito tempo e cujo impacto não é ainda perceptível.

Dada a necessária distância para uma análise mais assertiva do papel da IO neste contexto pandémico este tema não foi o enfoque do atual boletim.

# ENTREVISTA

**Looking at your impressive curriculum, one of the areas you have been focusing has been Forest Management. Can you give us an insight on how you got into this field and some important milestones?**

I got into the field of Operations Research (OR) in Forestry just by chance. I had just finished my PhD in OR at the Department of Industrial Engineering and Operations Research, University of California Berkeley, while my wife was doing her PhD in Statistics. So I needed a job in Berkeley, while waiting for her to complete her studies. The one I found was with the US Forest Service. Daniel Navon, who had developed TimberRAM, the first Linear Programming (LP) model actually used for forest management planning, as was done by the US Forest Service in the 1970's needed an assistant. Since I am not a US citizen and could not be directly hired by the US Government, the arrangement we worked out was that the US Forest Service would give grants to the OR Center, UC Berkeley, which hired me as a research engineer. With Daniel we worked on an extension of the harvesting model to include road building. This model was eventually used by the US Forest Service in their planning cycle of the 1980's. In 1974 I went back to Chile, to a position at the Department of Industrial Engineering, Universidad de Chile, where I am still an academic. But we had established a very good relationship, so I kept a ¼ time position. I would do the research in Chile and travel a couple of times a year to Berkeley to discuss results and develop new projects. We worked on multiple projects, with different colleagues for the next fifteen years, until the group disbanded. That gave me an entry into the area of OR in forestry which I have pursued until today.

The Chilean forest industry is important in Chile, being among the largest exports. In the late 80's, with a former student and then a colleague, Rafael Epstein, we started developing projects for the main Chilean forest firms. The first one was ASICAM, a daily truck scheduling system, based on simulation and heuristics, which was implemented in a very successful way by most Chilean forest firms, leading to reductions in costs of 15% to 25%. It was later exported to Brazil, Argentina, and

other South American forest firms. Mondi, one of the largest South African forest firms won the South African Logistics Prize in 1996 using ASICAM. The success of ASICAM led to us developing for the industry models for short, medium, and long term harvest planning. We also developed a system to optimize the location of harvest machinery and corresponding access roads. These systems won the INFORMS Edelman Prize in 1998, which selects each year the best applied OR projects worldwide. These projects, with very significant overhauls, are still being used by the industry, led by Rafael Epstein.

**Forest Management is not one of the most common OR applications. Can you give us an overview of the relevance of OR in it?**

Forestry has been one of the success stories for OR. Private forest firms as well as public institutions have used OR models for different areas of decision making. Starting in the 70's OR models were developed to plan long range forest harvest planning, using LP. Tactical models involving spatial constraints such as road building led to the introduction of mixed integer problems. Environmental constraints to protect animal species, water quality, limit erosion, led to the need to more complex models. The wide use of Geographic Information Systems (GIS) allows to map spatial details. Today, sophisticated tools including aerial photographs, and laser based light detection and ranging imagery, LiDar, allow very precise measurements of forest, at tree level. These OR systems have been widely and successfully used in many countries. Stochastic models reflecting uncertainty in tree growth, markets and other issues have been developed, but mostly as research and case studies. The same has happened with multi objective models, which consider among other goals economic returns, as well as preservation of species, erosion, carbon emissions.

**Can you tell us what have been, in your opinion, the most relevant recent contributions in Agriculture and Forest Management?**

In terms of methodology, the above mentioned technological advances in measurements



ANDRÉS WEINTRAUB

Department of Industrial Engineering  
University of Chile  
aweindra@dii.uchile.cl

**“AN IMPORTANT OR DEVELOPMENT HAS BEEN THE DESIGN OF SIMULATION MODELS, WHICH ARE USED TO DETERMINE THE LIKELY SPREAD OF FIRES ONCE THEY START”**



have had a significant impact in planning problems that can now capture forests in fine detail. Environmental issues, in particular carbon retention have gained importance. A major area of research and application has been the handling of forest fires. There is a high level of uncertainty involved in how fire ignites in a forest, most often due to human intervention, but also from natural causes such as lightning, and also how it spreads, based on climate characteristics (wind, moisture, temperature), vegetation (old, dry trees lead to faster spread for example), topography among others. On the other hand, fires are contained by natural causes like rain, and mainly by fire containment efforts, which include planes dropping water or fire retardants, firefighting crews. Models have been used to design and assign these firefighting elements. An important OR development has been the

design of simulation models, which are used to determine the likely spread of fires once they start. This allows for better decisions in crew and plane assignment. Our group has been working on what is called Fuel Management, where we define forest harvesting and debris cleaning in such a way, that once fires start (unknown at present), they will cause minimum damage. The tools we use are stochastic simulation models (using parallel running for speed), to capture the multiple possibilities of ignition and spread, simulation-optimization models to optimize decisions, as well as machine learning approaches.

**How do you think climate change is affecting or will affect forests? What do you consider are the aspects that should be considered in this regard in studies and future developments in the field?**

Climate change is playing a very significant role in forests. We just need to look at how forests fires have become larger and more frequent, due to change in temperature, dryness and wind. It is also affecting tree growth, animal species and other important forest elements. We still do not have enough solid quantitative data on climate change to be able to develop real decision-making systems.

As research, we worked on a problem based on (approximate) climate change scenarios developed for a region in Portugal. Another group transformed these weather scenarios into tree growth scenarios. Based on this data we constructed a stochastic model, based on tree growth scenarios to optimize forest harvesting management. As in this example, there will be many problems where the effects of climate change will have to be incorporated when dealing with long range forest planning.

# OPTIMAL THINKING EM GESTÃO FLORESTAL COM PREOCUPAÇÕES AMBIENTAIS

O sector florestal tem contribuído com muitos problemas para a comunidade de Investigação Operacional (IO). Ao mesmo tempo, a comunidade de IO tem desenvolvido muitos modelos e métodos de resolução para o sector florestal [6]. As primeiras contribuições surgiram nos anos 50 do século passado (Arimizu 1956, Yoho e Row 1958 citados em [1]) com recurso à programação linear.

Uns dos problemas principais no sector florestal são os da gestão florestal para produção de madeira. A floresta é dividida em parcelas, homogéneas em relação à idade das árvores, e o horizonte de planeamento é discretizado em períodos. Pretende-se determinar em que parcelas e em que períodos se deve fazer o corte raso das árvores, ou que prescrição associar a cada parcela, de forma a maximizar o valor actual líquido proveniente da madeira cortada. Pode haver mais de um corte raso em cada parcela caso a duração do horizonte de planeamento seja superior à rotação das árvores, o que em geral ocorre nos planeamentos de longo prazo. Várias restrições podem ser consideradas tais como as que impõem um mínimo e um máximo no volume de madeira cortada em cada período.

**“UNS DOS PROBLEMAS PRINCIPAIS NO SECTOR FLORESTAL SÃO OS DA GESTÃO FLORESTAL PARA PRODUÇÃO DE MADEIRA”**

Preocupações ambientais, como proteger a vida selvagem, reduzir a erosão e preservar a paisagem, levaram a modificações importantes nos problemas de gestão florestal para produção de madeira. Uma prática comum em muitos países para abordar estas preocupações tem sido restringir as áreas das clareiras, particularmente em florestas antigas (maduras).

Tem-se verificado no entanto que restringir as áreas das clareiras pode aumentar a fragmentação da floresta ao promover a dispersão das clareiras na paisagem. A fragmentação da floresta provoca não só a perda de área florestal, mas também o aumento do efeito de borda e a diminuição da conectividade entre os fragmentos florestais [7]. Quanto menos áreas florestais, menores são os espaços para as espécies viverem e se reproduzirem, o que causa uma redução no número de plantas, animais e microrganismos que conseguem viver nesses lugares. Quando uma mancha florestal passa a estar cercada por áreas abertas, ocorre o chamado efeito de borda. Há um aumento da incidência de luz solar nas bordas e, como consequência, uma elevação da temperatura do solo e uma diminuição da humidade do ar. As árvores que estão na borda do fragmento ficam mais expostas ao vento, tornando-as mais vulneráveis à queda, risco que não ocorre no interior, onde praticamente não há vento. Com a queda das árvores mais externas, o efeito de borda aumenta, encolhendo o espaço interior da mancha e, portanto, o espaço para as espécies viverem, nomeadamente para as espécies que mais dependem do espaço interior. Quanto menor a área e maior a irregularidade ou o alongamento da forma do fragmento, mais intenso é este fenómeno (Figs. 1 e 2). A diminuição da conectividade entre manchas florestais dificulta o movimento dos indivíduos, reduzindo assim a possibilidade de recolonização após uma extinção local.

Uma das 33 questões em aberto colocadas em [6] à comunidade de IO foi precisamente a integração da fragmentação da floresta nos problemas de gestão florestal para produção de madeira com restrições nas áreas das clareiras. A seguir, descrevo sumariamente alguns trabalhos em que participei que procuram responder a esta questão. Veja-se [5] para uma referência às abordagens publicadas por



ISABEL MARTINS

Centro de Matemática, Aplicações Fundamentais e Investigação Operacional  
 Instituto Superior de Agronomia  
 Universidade de Lisboa  
 isabelinha@isa.ulisboa.pt

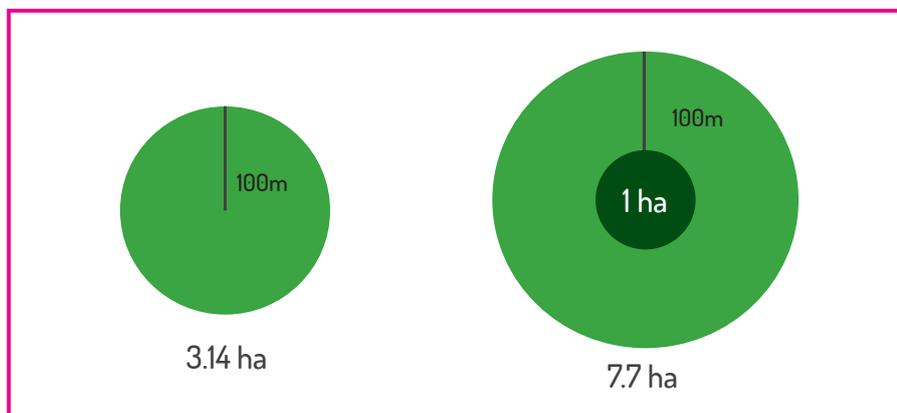


Fig. 1 - Espaço de borda (verde) e espaço interior (verde escuro) em manchas florestais com diferentes áreas, assumindo que os efeitos de borda deixam de existir a 100 m da fronteira.

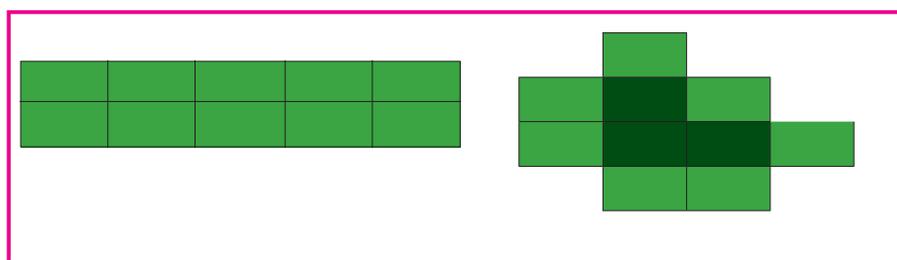


Fig. 2 - Espaço de borda (verde) e espaço interior (verde escuro) em manchas florestais com diferentes formas, assumindo que o efeito de borda ocorre nas parcelas exteriores.

outros autores (heurísticas e métodos exactos em programação linear inteira, com um ou mais objectivos).

Para cada período do horizonte de planeamento, assume-se que uma parcela é sujeita em toda a sua extensão à mesma decisão: ou se faz corte raso ou não se intervém. Uma parcela pode ter um corte raso se tiver idade adequada. Por questões de simplicidade, considera-se que a duração do horizonte de planeamento não é suficiente para permitir que uma parcela tenha mais de um corte raso. A integração da fragmentação é feita adicionando restrições nas áreas e conectividade dos habitats de espécies dependentes do espaço interior.

Em [2], um *habitat* é uma região contínua de parcelas maduras, com uma área mínima, rodeada de parcelas sem intervenção desde o início do horizonte de planeamento. Estas últimas parcelas, que podem não ser madu-

ras, definem o espaço de borda e as primeiras constituem o espaço interior. O valor da área mínima do espaço interior de um habitat está relacionado com as espécies que se pretende conservar. Se este valor for 2 ha, por exemplo, as manchas florestais representadas na Fig. 1 não poderão ser habitats. O problema impõe um mínimo na área total dos espaços interiores dos habitats em cada período.

Propõe-se um modelo de programação inteira mista, em que as variáveis de decisão binárias, relacionadas com as clareiras e os espaços interiores dos habitats, são as seguintes:

$$x_i^t = \begin{cases} 1 & \text{se a parcela } i \text{ tem um corte raso} \\ & \text{no período } t \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

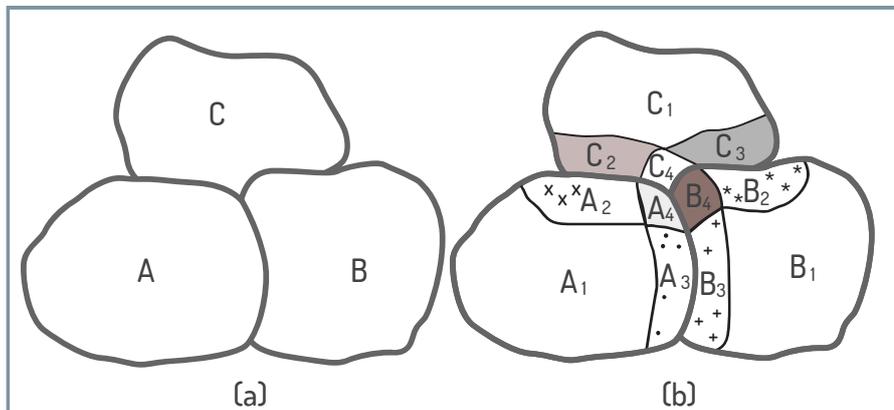
$$y_i^t = \begin{cases} 1 & \text{se a parcela } i \text{ pertence ao espaço} \\ & \text{interior de um habitat no período } t \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

O número de restrições deste modelo pode ser exponencialmente grande. Um algoritmo de *branch-and-cut* para resolver o modelo, no qual as restrições em número exponencial são geradas apenas quando necessário, é testado. As instâncias de teste são florestas reais e hipotéticas com 45 a 1363 parcelas (45 a 21148 ha) e os horizontes temporais dividem-se em três até sete períodos. As soluções obtidas, em três horas no máximo, estão a 1% ou um pouco acima de 1% da solução ótima.

A Fig. 4 ilustra o efeito das restrições ambientais consideradas em [2]. As situações (a), (b) e (c) apresentam uma solução obtida pelo modelo proposto relativamente ao final do horizonte de planeamento de sete períodos numa floresta com 1363 parcelas. Em (a) não são incluídas as restrições ambientais (clareiras não admissíveis e ausência de habitats). Em (b) são incluídas as restrições nas áreas das clareiras mas a restrição na área total dos espaços interiores dos habitats não é considerada (clareiras admissíveis e ausência de habitats). Em (c) são consideradas as restrições ambientais.

A definição de habitat é ligeiramente diferente em [4]. Neste trabalho, um *habitat* é uma região contínua de parcelas maduras com uma área mínima de espaço interior. Assume-se que uma parcela com corte raso pode causar um efeito de borda até uma determinada dis-

**“PREOCUPAÇÕES AMBIENTAIS, COMO PROTEGER A VIDA SELVAGEM, REDUZIR A EROSÃO E PRESERVAR A PAISAGEM, LEVARAM A MODIFICAÇÕES IMPORTANTES NOS PROBLEMAS DE GESTÃO FLORESTAL PARA PRODUÇÃO DE MADEIRA”**



**Fig. 3** - (a) Floresta com 3 parcelas maduras. (b) Sub-regiões após a decomposição dos potenciais espaços de borda. Os efeitos de borda causados por A, B e C são, respectivamente,  $B_3 \cup B_4 \cup C_2 \cup C_4$ ,  $A_3 \cup A_4 \cup C_3 \cup C_4$  e  $A_2 \cup A_4 \cup B_2 \cup B_4$ , caso tenham um corte raso e as outras duas parcelas permaneçam maduras.

tância. Para algumas espécies, a profundidade de 100 m representa uma distância razoável, enquanto para outras espécies esta distância é substancialmente menor ou maior. Na Fig. 3, o potencial efeito de borda causado pela parcela A corresponde à região  $B_3 \cup B_4 \cup C_2 \cup C_4$ , o que significa que se A tem um corte raso (e não houve intervenções nas parcelas B e C),  $B_3 \cup B_4$  e  $C_2 \cup C_4$  serão os espaços de borda e  $B_1 \cup B_2$  e  $C_1 \cup C_3$  os espaços interiores de B e C, respectivamente. O problema impõe, para cada período, um mínimo na área total dos espaços interiores dos habitats e um mínimo na área total dos habitats (espaço de borda e espaço interior). Tal como na Fig. 3, os potenciais espaços de borda são decompostos em sub-regiões de acordo com as parcelas que os possam causar e os potenciais espaços interiores são obtidos com base nestas sub-regiões.

Propõe-se um modelo de programação inteira, em que as variáveis de decisão são as seguintes:

$$z_{ct} = \begin{cases} 1 & \text{se a região } c \text{ tem corte raso no} \\ & \text{período } t \\ 0 & \text{Caso contrário} \end{cases}$$

$$y_{ht} = \begin{cases} 1 & \text{se a região } h \text{ é habitat no período } t \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$w_{irt} = \begin{cases} 1 & \text{se a sub-região } r \text{ da parcela } i \text{ é} \\ & \text{espaço interior no período } t \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

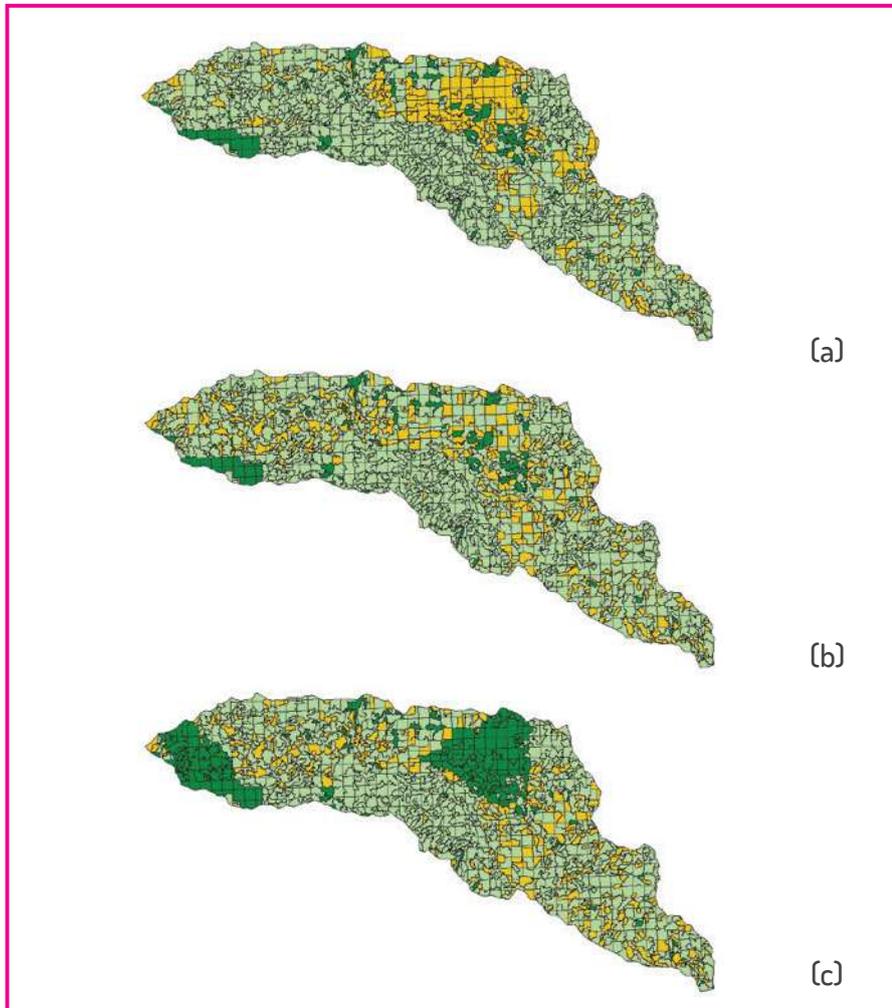
em que C é uma região contínua com uma área inferior ou igual à área máxima de uma clareira e h é uma região contínua madura com uma área superior à área mínima do espaço interior de um habitat. O número de variáveis deste modelo pode ser exponencialmente grande. Um algoritmo de *branch-and-bound* para resolver o modelo é implementado e testado. As instâncias de teste são florestas reais e hipotéticas com 238 a 21148 ha e os horizontes temporais dividem-se em três até oito períodos. Em geral, o algoritmo conseguiu encontrar soluções razoáveis em duas horas no máximo, a menos de 1% e, principalmente com as instâncias maiores, um pouco acima de 7% da solução ótima.

Um dos aspectos da fragmentação que não é considerado em [2] e [4] é a conectividade entre os fragmentos florestais. Sem restrições de conectividade, os modelos propostos permitem que os habitats estejam afastados uns dos outros no mesmo período (conectividade espacial), veja-se a Fig. 4 por exemplo, e os habitats apareçam e desapareçam ao longo do horizonte de planeamento (conectividade temporal). O problema estudado em [3] impõe um valor mínimo para a probabilidade de conectividade, um índice que quantifica a conectividade (espacial) entre os habitats [8]. A área total dos habitats deve também ser maior ou igual que um valor mínimo. Por questões de simplicidade, assume-se que um habitat é uma região

contínua madura com uma área mínima (sem espaço de borda). Propõe-se um modelo de programação inteira em que as variáveis de decisão são  $z_{ct}$  e  $y_{ht}$ . O modelo é não linear por causa da expressão não linear do índice. Um algoritmo de *branch-and-bound* para resolver o modelo é implementado e testado. As instâncias de teste são as do trabalho anterior. Em geral, o algoritmo conseguiu encontrar soluções razoáveis em duas horas no máximo, a menos de 1% nas florestas mais pequenas e a menos de 10% nas florestas maiores.

Os trabalhos referidos pressupõem que se conheça os valores mínimos da área do espaço interior de um habitat, da área total dos espaços interiores dos habitats, da área total dos habitats e da probabilidade de conectividade. No entanto, pode ser difícil identificar os valores mínimos que satisfaçam adequadamente as preocupações ambientais e, simultaneamente, não sejam demasiado restritivos para a produção de madeira. Uma abordagem multi-objectivo, em que se maximiza o valor actual líquido e, por exemplo, a área total dos espaços interiores dos habitats ou o índice de conectividade, pode ultrapassar esta dificuldade.

**“AS ABORDAGENS ACTUAIS NÃO RESOLVEM OS PROBLEMAS DE GESTÃO FLORESTAL COM RESTRIÇÕES AMBIENTAIS (...) DE FORMA SATISFATÓRIA, EM TERMOS DE QUALIDADE DA SOLUÇÃO E RAPIDEZ DE CÁLCULO, EM FLORESTAS DE GRANDE DIMENSÃO”**



**Fig. 4** - Floresta no final do horizonte de planeamento de 7 períodos. Verde escuro - parcela madura; amarelo - parcela com corte raso no período 7; verde claro - parcela com corte raso antes do período 7. (a) sem restrições ambientais (b) com restrições nas áreas das clareiras (c) com restrições nas áreas das clareiras e na área total dos espaços interiores dos habitats.

de, ao disponibilizar trade-offs entre os objetivos. O trabalho em [5] apresenta um método de pesquisa em árvore Monte Carlo para um problema bi-objectivo, em que se maximiza o valor actual líquido e o índice de conectividade, sujeito às restrições na área total dos espaços interiores dos habitats e na área total dos habitats. As instâncias de teste são as dos dois trabalhos anteriores. Em geral, esta abordagem foi capaz de encontrar várias soluções alternativas eficientes em tempo razoável, mesmo para as instâncias maiores.

As abordagens actuais não resolvem os problemas de gestão florestal com restrições ambientais (para além das restrições nas clareiras) de forma satisfatória, em termos de qualidade da solução e rapidez de cálculo, em florestas de grande dimensão. Nem quando os horizontes de planeamento são longos. Nem quando as parcelas podem ter mais de um corte raso. Concentrar esforços na modelação e nas metodologias de resolução para lidar com a fragmentação florestal ajudará a melhorar o valor e a função das florestas para produção de madeira. O problema mencionado há cinco anos em [6] está longe de ser resolvido, continuando a ser um desafio para a comunidade de IO.

"A árvore é um elemento regenerador e carrega o conceito de tempo. O carvalho, em particular, porque cresce lentamente e tem cerne sólido. Sempre foi uma espécie de escultura, um símbolo deste planeta."

Joseph Beuys, 1981.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Bare, B.B. (1971). *Application of operation research and forest management: a survey*. Quantitative science paper 26. Center for quantitative science in Forestry, Fisheries and Wildlife. University of Washington. Washington.
- [2] Constantino, M. & Martins, I. (2018). Branch-and-cut for the forest harvest scheduling subject to clearcut and core area constraints. *European Journal of Operational Research*, 265(2), 723-734.
- [3] Neto, T., Constantino, M., Martins, I., & Pedroso, J. P. (2013). A branch-and-bound procedure for forest harvest scheduling problems addressing aspects of habitat availability. *International Transactions In Operational Research*, 20(5), 689-709.
- [4] Neto, T., Constantino, M., Martins, I., & Pedroso, J. P. (2017). Forest harvest scheduling with clearcut and core area constraints. *Annals of Operations Research*, 258(2), 453-478.
- [5] Neto, T., Constantino, M., Martins, I., & Pedroso, J. P. (2020). A multi-objective Monte Carlo tree search for forest harvest scheduling. *European Journal of Operational Research*, 282(3), 1115-1126.
- [6] Rönnqvist, M., D'Amours, S., Weintraub, A., Jofre, A., Gunn, E., Haight, R., Martell, D., Murray, A., & Romero, C. (2015). Operations research challenges in forestry: 33 open problems. *Annals of Operations Research*, 232, 11-40.
- [7] Saunders, D.A., Hobbs, R.J., & Margules, C.R. (1991). Biological consequences of ecosystem fragmentation: a review. *Conservation Biology*, 5, 18-32.
- [8] Saura, S. & Pascual-Hortal, L. (2007). A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: Comparison with existing indices and application to a case study. *Landscape and Urban Planning*, 83(2), 91-103.

# DATA ENVELOPMENT ANALYSIS: O USO DA PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA NA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

## RESUMO

A avaliação de eficiência recorrendo a métodos de fronteira é um tema fascinante e muito relevante para a gestão das organizações, bem como para o desenho de políticas públicas de planeamento e desenvolvimento. Este artigo faz uma introdução a este tema, com particular ênfase na metodologia de *Data Envelopment Analysis* (DEA). Será feita uma breve apresentação dos principais objetivos dos métodos de análise de eficiência, motivando o seu uso na promoção do desenvolvimento sustentável das sociedades. Segue-se uma breve apresentação da origem dos modelos de DEA, e uma apresentação dos principais desenvolvimentos desde a publicação seminal de Charnes *et al.* [2] até à atualidade. Serão também referidas as áreas de aplicação em que DEA tem assumido maior preponderância. No final, apresentam-se algumas considerações relativas ao papel das técnicas de avaliação de desempenho na sociedade atual, bem como oportunidades para desenvolvimentos futuros.

**“É IMPORTANTE DEFINIR E MEDIR A EFICIÊNCIA E A PRODUTIVIDADE DE MANEIRA A RESPEITAR A TEORIA ECONÓMICA E FORNECER INFORMAÇÕES ÚTEIS PARA OS GESTORES E DECISORES POLÍTICOS”**

## MOTIVAÇÃO PARA O USO DE MODELOS DE AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA

A avaliação de desempenho e o *benchmarking* são ferramentas de melhoria contínua com uma contribuição muito relevante para a prosperidade das organizações. Contribuem positivamente para ajudar as organizações a evoluir, a fim de sobreviverem em ambientes exigentes e com níveis de concorrência elevados. Através de avaliação de desempenho é possível (i) revelar os pontos fortes e fracos das operações dentro das organizações (*benchmarking* interno); (ii) identificar as unidades/empresas/setores/países com o melhor desempenho e aprender com as suas políticas e melhores práticas (*benchmarking* externo); (iii) compreender as causas das diferenças entre os níveis de desempenho das organizações.

O desempenho de uma organização pode ser definido de diversas formas. Uma medida natural de desempenho é um índice de produtividade, calculado como o quociente entre os *outputs* (resultados) e os *inputs* (recursos), em que valores superiores deste índice estão associados a um melhor desempenho. Mas o desempenho também é um conceito relativo. Por exemplo, o desempenho de uma fábrica pode ser medido em relação aos níveis do ano anterior, ou pode ser medido em relação ao observado noutras fábricas. Estas três alternativas correspondem aos três conceitos chave da avaliação de desempenho: “produtividade”, “evolução da produtividade” e “eficiência”. O conceito de “eficácia” corresponde ao alinhamento dos resultados em relação à estratégia, pelo que implica ‘fazer as coisas certas’. Na literatura dedicada aos métodos quantitativos de avaliação de desempenho está subjacente que a escolha dos *outputs* deve estar alinhada com o que é realmente importante para a organização, pelo que se assume que a eficiência (‘fazer as coisas bem’) e a eficácia estão alinhadas.

Admitindo que níveis elevados de eficiência e produtividade, bem como níveis altos de crescimento da produtividade, são objetivos desejáveis, então é importante definir e medir a eficiência e a produtividade de maneira



ANA CAMANHO

Faculdade de Engenharia  
da Universidade do Porto  
acamanho@fe.up.pt

**“(…) A PRINCIPAL VANTAGEM DE DEA FACE A SFA [STOCHASTIC FRONTIER ANALYSIS] É O FACTO DE PERMITIR A MODELAÇÃO DE SITUAÇÕES COM MÚLTIPLOS INPUTS E OUTPUTS, E NÃO EXIGIR A IMPOSIÇÃO A-PRIORI DE UMA FORMA FUNCIONAL PARA A FRONTEIRA (…)”**

a respeitar a teoria económica e fornecer informações úteis para os gestores e decisores políticos. Na verdade, a melhoria da eficiência é um dos componentes-chave do aumento da produtividade, que por sua vez é o principal motor do bem-estar económico. Os benefícios da compreensão da relação entre a eficiência e produtividade, bem como da quantificação destas grandezas para saber agir sobre os seus determinantes, são os principais contributos da literatura associada aos métodos quantitativos de avaliação de desempenho.

**A ORIGEM DOS MÉTODOS DE FRONTEIRA**

A avaliação de eficiência é um assunto de grande interesse para as organizações empenhadas em melhorar o seu desempenho. As razões para a ênfase colocada na eficiência foram descritas há mais de sessenta anos por Farrell [9], no seu artigo seminal sobre a medição da eficiência produtiva:

*“The problem of measuring the productive efficiency of an industry is important to both the economic theorist and the economic policy maker. If the theoretical arguments as to the relative efficiency of different economic systems are to be subjected to empirical testing, it is essential to be able to make some actual measurements of efficiency. Equally, if economic planning is to concern itself with particular industries, it is important to know how far a given industry can be expected to increase its output by simply increasing its efficiency, without absorbing further resources.”*

Farrell [9], também referiu que a razão principal pela qual, até à data, todas as tentativas para resolver o problema de medição de eficiência tinham falhado era devido à incapacidade de combinar vários *inputs* e *outputs*, medidos em escalas distintas, numa medida de eficiência satisfatória. Farrell propôs uma abordagem designada *“activity analysis”* que permitia lidar mais adequadamente com este problema numa perspetiva multidimensional, considerando simultaneamente a existência de múltiplos *inputs* e *outputs*. As suas medidas destinavam-se a ser aplicáveis a qualquer organização produtiva, nas suas palavras *“from a workshop to a whole economy”*.

Para além disso, Farrell [9] propôs a estimação de eficiência com base em dados efetivamente observados, como contraponto à estimação teórica de funções de produção. Nestas circunstâncias, a fronteira deveria ser uma representação empírica das melhores práticas. Isto permitiu abrir novas perspetivas de análise, passando da procura da eficiência no sentido da definição de Pareto-Koopmans (ou eficiência absoluta) para o conceito de eficiência relativa, de acordo com a seguinte definição ([5, p.3]):

**Definição de eficiência relativa:**

*“A DMU is to be rated as fully 100% efficient on the basis of available evidence if and only if the performances of other DMUs do not show that some of its inputs or outputs can be improved without worsening some of its other inputs or outputs”*

Apesar de Farrell [9] ter apresentado os conceitos basilares dos métodos de fronteira para a medição de eficiência, não apresentou um método que fosse capaz de quantificar a eficiência num contexto multidimensional. Assim, o seu trabalho acabou por não receber muita atenção dos seus pares durante quase duas décadas. No entanto, as ideias de Farrell permitiram estabelecer as bases dos métodos de fronteira, que consideram que o desempenho é função do estado da tecnologia e do nível de eficiência. O estado da tecnologia depende da relação fronteira entre os *inputs* e os *outputs*, em que a posição desta fronteira define o limite do conjunto das possibilidades de produção (*Production Possibility Set - PPS*) associadas a uma dada tecnologia. Esse limite deve ser estimado com base no que foi efetivamente ob-

servado nas organizações. O nível de eficiência indica o posicionamento relativamente a essa fronteira, onde um mau posicionamento revela desperdícios (ou ineficiências) que podem ter diversas origens. Melhorias no desempenho de uma organização podem assim ocorrer através de duas vias: evolução tecnológica (alteração da posição da fronteira devido a ganhos de produtividade) ou ganhos de eficiência (alteração da distância à fronteira).

**DIFERENTES PERSPETIVAS DE AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA**

No âmbito da avaliação de eficiência por métodos de fronteira, os métodos quantitativos disponíveis podem classificar-se em dois grandes grupos: métodos paramétricos e métodos não-paramétricos. Cada um destes métodos tem por base uma abordagem distinta à construção do conjunto das possibilidades de produção, dando origem a duas abordagens concorrentes: *Stochastic Frontier Analysis* (SFA) e *Data Envelopment Analysis* (DEA). Assim, os modelos de DEA, correspondem à resposta da Investigação Operacional ao desafio de medição de eficiência de forma quantitativa e rigorosa, sendo os modelos de SFA a resposta da econometria. Ambas as técnicas permitem chegar a medidas sumárias de eficiência, e obrigam a que os indicadores usados na construção das estimativas de eficiência sejam quantificáveis. São metodologias direcionadas para a estimação de fronteiras, em contraponto à procura de tendências centrais. Graças ao recurso à programação matemática, a principal vantagem de DEA face a SFA é o facto de permitir a modelação de situações com múltiplos *inputs* e *outputs*, e não exigir a imposição *a-priori* de uma forma funcional para a fronteira do conjunto das possibilidades de produção. Em contrapartida, a vantagem de SFA é a modelação probabilísticas dos desvios em relação à fronteira, o que torna a técnica mais robusta a erros aleatórios nos dados e menos sensível a *outliers*. No entanto, SFA exige a especificação *ex-ante* da forma funcional da função de produção e das distribuições estatísticas da ineficiência e do erro aleatório. Para além disso, não permite avaliações com múltiplos *inputs* e múltiplos *outputs*, devendo os *inputs* ou os *outputs* ser previamente agregados numa medida única, habitualmente

representando um custo ou as receitas da organização em análise.

### O MODELO ORIGINAL DE DEA

DEA [2] é uma abordagem axiomática, assente na estimação dos níveis de eficiência de uma unidade de decisão (*Decision Making Unit - DMU*) com recurso a modelos de Programação Linear (PL). A sua natureza verdadeiramente multidimensional permite a modelação de atividades que envolvem vários *inputs* e *outputs*, podendo estes ser expressos em escalas distintas. DEA permite chegar a uma medida agregada de eficiência para cada unidade avaliada com recurso a valores locais dos pesos ótimos usados na agregação dos *inputs* e *outputs*. Em vez de tentar ajustar um hiperplano através do centro dos dados, tal como nas regressões estatísticas, podemos imaginar um modelo que faz flutuar uma superfície linear segmentada sobre um conjunto de possibilidades de produção, até que esta superfície flexível fique confortavelmente apoiada em cima das observações. A superfície assim construída corresponde à fronteira de DEA, o que inspirou a designação da técnica: *Análise Envoltória de Dados*.

Considere-se a avaliação de eficiência de  $n$  DMUs ( $j = 1, \dots, n$ ), cada uma consumindo *inputs*  $x_{ij}$  ( $i=1, \dots, m$ ) para produzir *outputs*  $y_{rj}$  ( $r=1, \dots, s$ ). O modelo de DEA para a estimação do nível de eficiência da DMU  $k$  (unidade em avaliação), orientado à redução dos níveis de *inputs* e assumindo Rendimentos Constantes à Escala é apresentado em (1). Esta formulação é conhecida como *weights formulation* (or *multiplier model*). A formulação dual, apresentada em (2) é conhecida como *envelopment formulation*.

De acordo com a teoria da dualidade da PL, os modelos (1) e (2) fornecem soluções ótimas

idênticas. O valor da função objetivo  $E_k$  varia entre 0 (pior) e 1 (melhor). Assim, se a DMU  $k$  em avaliação for radialmente eficiente (o que significa que se localiza na fronteira), a solução ótima obtida é igual a 1; caso contrário, se o valor de  $E_k$  for inferior a um, a DMU  $k$  é considerada ineficiente.

Na *weights formulation*, as variáveis de decisão são  $v_i$  e  $u_r$ . O modelo de PL (1) procura maximizar a eficiência da DMU  $k$  em avaliação. Como é resolvido um problema de PL para cada DMU, cada unidade  $k$  em avaliação obtém um conjunto individual de pesos, que a permitem mostrar 'na melhor luz possível'. Esta flexibilidade na determinação dos pesos é um argumento forte para concluir que no caso da DMU ser considerada ineficiente, existe efetivamente potencial de melhoria, dado que mesmo quando é possível evidenciar os aspetos mais fortes e negligenciar os mais fracos, há outras DMUs que a dominam em termos de desempenho.

Na *envelopment formulation*, as variáveis de decisão são  $\theta$  e  $\lambda_j$ .  $\theta$  é o nível de eficiência da DMU  $k$ , que também pode ser interpretado como o factor pelo qual os valores dos *inputs* da DMU em avaliação podem ser reduzidos radialmente (equiproporcionalmente), mantendo-se os *outputs* num nível igual ou superior ao observado. As variáveis  $\lambda_j$  são as variáveis de intensidade, que podem ser interpretadas como os ponderadores que definem um ponto na fronteira estimado a partir de uma combinação linear convexa de outras DMUs da amostra (designadas como *peers* na terminologia de DEA). Esta formulação dual é a mais usada para efeitos de *benchmarking*, dado que permite identificar de forma mais direta os *peers* (que representam as boas práticas a seguir), e os *targets* a atingir para que cada DMU se torne eficiente (através de proje-

ções radiais em direção à fronteira).

A secção seguinte discute a evolução da metodologia de DEA nas últimas quatro décadas, desde a sua origem em 1978 até à atualidade.

### A EVOLUÇÃO DA METODOLOGIA DE DEA

Desde a publicação seminal de Charnes *et al.* [2], tem havido um crescimento impressionante do conhecimento nesta área, tanto nos aspetos teóricos como nas aplicações desses desenvolvimentos a situações práticas. Dada a vastidão da literatura nesta área, torna-se cada vez mais difícil acompanhar os desenvolvimentos que têm sido propostos sem dispor de revisões bibliográficas adequadas. Estes artigos procuram enriquecer a literatura de DEA e melhorar a compreensão desta área do conhecimento. Existem revisões da literatura de DEA focadas nos desenvolvimentos teóricos [3, 4, 5, 16], bem como outras mais direcionadas para as aplicações [14], incluindo análises de áreas específicas, e.g., educação [7], instituições financeiras [1, 10], saúde [12], energia e ambiente [17]. Mais recentemente, têm sido publicados estudos bibliométricos das publicações [6, 8, 11, 13, 14].

Estes trabalhos fornecem orientações valiosas aos estudantes que estão a dar os primeiros passos nesta área, bem como ajudam a ampliar a visão de investigadores de longa data. As perspetivas que daqui resultam podem incentivar a reflexão sobre os caminhos futuros mais promissores nesta área. Numa visão pessoal dos principais desenvolvimentos de DEA, desde a sua origem até à atualidade, gostaria de destacar quatro grandes áreas (que naturalmente não correspondem a uma visão exaustiva da literatura de DEA, havendo muitas outras áreas relevantes que não são aqui referidas).

1. Construção da fronteira e medição da eficiência.

– Neste tema incluem-se desenvolvimentos relacionados com (i) o tipo de Rendimentos à Escala dos modelos; (ii) a forma da fronteira (convexa versus não convexa); (iii) a análise estocástica das estimativas de eficiência, incluindo o uso de *bootstrapping* e *robust conditional models* para incorporar o impacto de fatores da envolvente no desempenho das unidades em avaliação; (iv) a avaliação não-radial da distância à fronteira, incluindo

$$\begin{aligned}
 E_k &= \text{Max} \sum_{r=1}^s u_r y_{rk} \\
 \text{s.t.} \quad &\sum_{i=1}^m v_i x_{ik} = 1 \\
 &\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0, \quad j=1, \dots, n \\
 &u_r \geq 0, \quad r=1, \dots, s \\
 &v_i \geq 0, \quad i=1, \dots, m
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 E_k &= \text{Min} \theta \\
 \text{s.t.} \quad &\sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j \geq y_{rk}, \quad r=1, \dots, s \\
 &\sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j \leq \theta x_{ik}, \quad i=1, \dots, m \\
 &\lambda_j \geq 0, \quad j=1, \dots, n
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

## “O POTENCIAL DE APLICAÇÃO DOS MODELOS DE DEA É MUITO VASTO, E A INFORMAÇÃO QUE PODE SER OBTIDA ATRAVÉS DOS MODELOS DE DEA PARA APOIO À TOMADA DE MELHORES DECISÕES (...) É MUITO RICA”

o desenvolvimento de modelos *Directional Distance Function* (DDF); (v) a construção de indicadores compósitos (modelos sem a relação produtiva de transformação de inputs em outputs, que agregam *Key Performance Indicators*).

2. Incorporação de julgamentos do decisor nos modelos.

– Neste tema incluem-se desenvolvimentos relacionados com (i) modelos com restrições de pesos; (ii) modelos para definição de objetivos a atingir pelas organizações; (iii) modelos económicos (*cost efficiency, revenue efficiency e profit efficiency*).

3. Modelação da estrutura interna e inter-relações entre grupos de DMUs.

– Neste tema incluem-se desenvolvimentos relacionados com (i) *Network DEA* e (ii) Análi-

se comparativa do desempenho de grupos de DMUs.

4. Evolução de produtividade ao longo do tempo.

– Neste tema incluem-se desenvolvimentos relacionados com o *Malmquist index* (para modelos de DEA) e *Luemberger indicator* (para modelos de DDF).

### ROTEIRO DAS APLICAÇÕES DE DEA E OPORTUNIDADES PARA O FUTURO

William Cooper, um dos ‘pais’ de DEA, sempre defendeu o conceito de “*application driven theory*”. Efetivamente, sendo DEA uma técnica de investigação operacional / *management science* é natural que o objetivo principal de muitos desenvolvimentos metodológicos seja assegurar que os modelos respondem adequadamente a desafios concretos das organizações. A pesquisa realizada por Gattoufi et al. [11] verificou que 67% dos artigos de DEA apresentavam uma aplicação ao mundo real. As principais áreas de aplicação identificadas foram a educação, a saúde e o setor bancário. Um estudo posterior de aplicações de DEA, efetuado por Liu et al. [14], identificou as cinco áreas com maior número de estudos: educação, saúde, setor bancário, agricultura e transportes. No entanto, as áreas com maior dinâmica de crescimento eram a energia e o ambiente, bem como o setor financeiro.

O potencial de aplicação dos modelos de DEA é muito vasto, e a informação que pode ser obtida através dos modelos de DEA para

apoio à tomada de melhores decisões, não só dentro das organizações, mas também a nível setorial, regional ou nacional, é muito rica. Para ilustrar a vastidão do campo de aplicação de DEA, alguns exemplos de aplicações no contexto português incluem escolas secundárias, hospitais, cuidados de saúde primários, lares de idosos, agências bancárias, bancos, fundos de investimento, sociedades gestoras de fundos de pensões, *benchmarking* de municípios, repartições de finanças, forças policiais, operadores de águas residuais, empresas de distribuição de gás natural e de eletricidade, parques eólicos, centrais hidroelétricas, regulação no setor elétrico e no setor da água, serviços de resíduos urbanos, empresas de construção civil, empresas de calçado, *startups* de base tecnológica, empresas hoteleiras, agências de viagens, lojas de retalho, projetos rodoviários (autoestradas), portos marítimos, sector vitivinícola (cooperativas, empresas privadas e regiões), explorações pecuárias e agrícolas, e pesca artesanal da ganchorra.

Nos anos mais recentes, a eficiência ambiental, a cadeia de abastecimento, os transportes, a as políticas públicas estão entre os principais campos de aplicação de DEA [8]. Estas áreas estão alinhadas com os desafios de sustentabilidade das sociedades atuais, onde DEA poderá ter um contributo muito relevante no apoio à conceção de políticas públicas e estratégias empresariais, e no suporte à tomada de melhores decisões.

### REFERÊNCIAS

- [1] Berger A. N. & Humphrey D. B. (1997). *Efficiency of financial institutions: International survey and directions for future research*. *European Journal of Operational Research*, 98(2):175–212.
- [2] Charnes A., Cooper W., & Rhodes, E. (1978). *Measuring the efficiency of decision making units*. *European Journal of Operational Research*, 2(6):429–444.
- [3] Cook W. D. & Seiford L. M. (2009). *Data envelopment analysis (DEA) - Thirty years on*. *European Journal of Operational Research*, 192(1):1–17.
- [4] Cooper W., Seiford L., & Zhu, J. (2011). *Data envelopment analysis: History, models, and interpretations*. In Cooper, W., Seiford, L., and Zhu, J., editors, *Handbook on Data Envelopment Analysis*. *International Series in Operations Research & Management Science*, vol 164, chapter 1, pages 1–39. Springer, Boston, MA.
- [5] Cooper W. W., Seiford L. M., Tone K., & Zhu, J. (2007). *Some models and measures for evaluating performances with DEA: Past accomplishments and future prospects*. *Journal of Productivity Analysis*, 28(3):151–163.
- [6] Daraio C., Kerstens K., Nepomuceno T., & Sickles, R. C. (2020). *Empirical surveys of frontier applications: a meta-review*. *International Transactions in Operational Research*, 27(2):709–738.
- [7] De Witte K. & López-Torres L. (2017). *Efficiency in education: A review of literature and a way forward*. *Journal of the Operational Research Society*, 68(4):339–363.
- [8] Emrouznejad A. & Yang G.-I. (2018). *A survey and analysis of the first 40 years of scholarly literature in DEA: 1978-2016*. *Socio-Economic Planning Sciences*, 61:4–8.
- [9] Farrell M. (1957). *The Measurement of Productive Efficiency*. *Journal of the Royal Statistical Society*, 120(3):253–290.
- [10] Fethi M. D. & Pasiouras, F. (2010). *Assessing bank efficiency and performance with Operational Research and Artificial Intelligence techniques: A survey*. *European Journal of Operational Research*, 204(2):189–198.
- [11] Gattoufi S., Oral M., & Reisman A. (2004). *A taxonomy for data envelopment analysis*. *SocioEconomic Planning Sciences*, 38(2-3):141–158.
- [12] Hollingsworth B. (2008). *The Measurement of Efficiency and Productivity of Health Care Delivery*. *Health Economics*, 1131(2007):1127–1131.
- [13] Liu J. S., Lu L. Y., & Lu W. M. (2016). *Research fronts in data envelopment analysis*. *Omega*, 58:33–45.
- [14] Liu J. S., Lu L. Y., Lu W. M., & Lin, B. J. (2013). *A survey of DEA applications*. *Omega*, 41(5):893–902.
- [15] Liu J. S., Lu L. Y., Lu W. M., & Lin, B. J. (2013). *Data envelopment analysis 1978-2010: A citation-based literature survey*. *Omega*, 41(1):3–15.
- [16] Seiford L. M. (1996). *Data Envelopment Analysis: The Evolution of the State of the Art (1978-1995)*. *Journal of Productivity Analysis*, 7(2/3):99–137.
- [17] Zhou P., Ang B., & Poh K. (2008). *A survey of data envelopment analysis in energy and environmental studies*. *European Journal of Operational Research*, 189(1):1–18.

# A INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL COMO AUXILIAR NA VITICULTURA

Em Portugal, o setor vitivinícola representa um grande volume de negócios e valor agregado e, acima de tudo, um valor muito positivo na sua balança comercial. Sendo um dos principais produtores de vinho, Portugal ocupa o décimo primeiro lugar no ranking mundial e quinto no grupo de produtores europeus.

Em 2018 a produção atingiu cerca de 6,1 milhões de hectolitros correspondendo a 2,1% da produção mundial, apesar de se registar um decréscimo de 10% relativamente a 2017 [3]. Embora os números anteriores não pareçam impressionantes, eles representam um esforço convincente, considerando que o território de Portugal é bastante limitado.

Além dos pragmáticos rankings mundiais, as vinhas portuguesas oferecem muito mais do que uma simples produção de uva, já que é a região demarcada mais antiga do mundo, tendo sido classificada pela UNESCO como Património Mundial em 2001. Podemos assim afirmar que, se ao nível económico a atividade apresenta uma importância direta inegável, as extensas vinhas do país originam não só a produção de uvas e vinhos, essencialmente de qualidade, como proporcionam um conjunto de paisagens vitivinícolas consideradas como um recurso que em muito potencia o desenvolvimento do turismo.

Esta relação positiva entre o setor vitivinícola e a competitividade regional e os seus efeitos no ambiente, passando ainda pelo seu contributo na oferta de emprego, no desenvolvimento de infraestruturas e na melhoria do bem-estar social geral.

O país está ciente desse valioso património e, nos últimos anos, revelou um conjunto de esforços significativos visando a melhoria geral desse setor. Essas tentativas vão desde investimentos diretos (renovação de vinhedos, infraestruturas) até estudos académicos procurando atingir maior sustentabilidade ou níveis de eficiência.

É justamente na procura dessa sustentabilidade que as técnicas da Investigação Operacional (IO) entram em cena, vindo a ser aplicadas num contexto de modelação / simulação. É aliás neste sentido, que se irá apresentar o caso seguinte, da aplicação da IO à agricultura, mais concretamente à viticultura.

No sentido de perceber a viabilidade / sustentabilidade da viticultura de montanha, característica da Região Norte, como uma das principais áreas geográficas vitivinícolas de Portugal, com produções de vinho de qualidade e de denominação de origem protegida (DOP), tornou-se pertinente modelar e posteriormente simular, tendências no comportamento do setor vitivinícola a longo prazo, baseada na interligação das suas componentes.

Estas previsões permitem compreender melhor o comportamento coletivo, e daí se conseguir inferir sobre as atitudes a adotar ou a evitar, sendo este o principal objetivo em análise.

Para simular o comportamento das explorações vitícolas, foram considerados vários intervenientes que influenciam o seu desempenho, recorrendo-se a Modelos Baseados em Agentes (ABM). Os ABM constituem uma ferramenta que permite modelar com detalhe a forma como os indivíduos (agentes) respondem às circunstâncias externas. São particularmente valiosos para sistemas que não são compreendidos o suficiente para construir um modelo baseado em equações (sistema de equações diferenciais, por exemplo). Os ABM mostram tal simplicidade que An *et al.* em [1] os referem como capazes de tratar representações abstratas da vida real que parecem muito complexas para a análise matemática tradicional. Outra característica interessante é que podem gerar resultados imprevisíveis, mas reveladores de padrões e relações antes não conhecidas.

Os ABM têm sido aplicados numa ampla gama de vertentes, constituindo-se como uma ferramenta útil desde a Ecologia e Biologia às Ciências Sociais e Tecnológicas bem como da Economia. Em relação à economia agrícola, o uso de ABM tem aumentando progressivamente, nos últimos anos, para modelar os sistemas agrícolas, avaliar os fatores que afetam o processo de tomada de decisão e medir os impactos de políticas.

Para simular o comportamento das explorações vitícolas, foram consideradas várias variáveis que influenciam o seu desempenho. Esta metodologia foi escolhida devido à complexidade do sistema agrícola, com as suas múltiplas escalas de interações (incluindo o ecossistema natural) e a sua forte influência no processo de



JOÃO MATIAS

CMAT-UTAD,  
Departamento de Matemática,  
Universidade de Trás-os-Montes  
e Alto Douro  
j\_matias@utad.pt

tomada de decisão. Utilizando os ABM consegue-se compreender o comportamento dos agricultores em resposta às mudanças nas condições ambientais, económicas ou institucionais, particularmente no nível local. Foram assim consideradas as dimensões ambiental (custos com fertilizantes, produtos fitofarmacêuticos, combustíveis; eletricidade; e água), económica (custos com amortizações) e também a social (custos reais com o trabalho), como centrais ao modelo definido, tendo em conta as condições institucionais que podem descrever a sustentabilidade geral das explorações vitícolas. Por outro lado, foi também considerado um conjunto de variáveis que exibem características internas de cada exploração, como a sua área, qualidade da uva, saldo bancário e produtividade.

Para utilizar um ambiente de simulação e aplicar a metodologia ABM, houve necessidade de construir modelos matemáticos que descrevessem adequadamente as situações. Para isso, foram considerados os dados disponíveis na RICA [4] relativos aos vinhos de qualidade do

Norte de Portugal. Foram utilizados os valores por hectare de produção, em volume e valor; os subsídios auferidos pela atividade; os custos das amortizações como reveladores dos custos anuais de investimento; custos do trabalho; e uma variável ambiental que compila a soma dos custos com fertilizantes, produtos fitofarmacêuticos, combustíveis, eletricidade e água (todos especificados em euros). Considerando aqueles dados, disponíveis de 2001 até 2017, foram modeladas funções determinísticas, que descrevem o comportamento da região, tendo sido selecionadas aquelas que melhor se aproximam aos dados e que vão ao encontro

da informação recolhida via inquérito presencial a explorações vitícolas do Norte de Portugal. Constatando a existência de periodicidade nos fenómenos descritos pelos dados, foram utilizadas funções de Fourier como forma de melhor serem modelados. As funções referidas são da forma:

$$f(t) = a_0 + \sum_{k=1}^n (a_k \cos(wt) + b_k \sin(wt))$$

tendo sido analisadas e testadas até à ordem 6 ( $n=6$ ).

As Fig. 1 e 2 apresentam os dados relativos

**“PARA SIMULAR O COMPORTAMENTO DAS EXPLORAÇÕES VITÍCOLAS, FORAM CONSIDERADOS VÁRIOS INTERVENIENTES QUE INFLUENCIAM O SEU DESEMPENHO, RECORRENDO-SE A MODELOS BASEADOS EM AGENTES”**

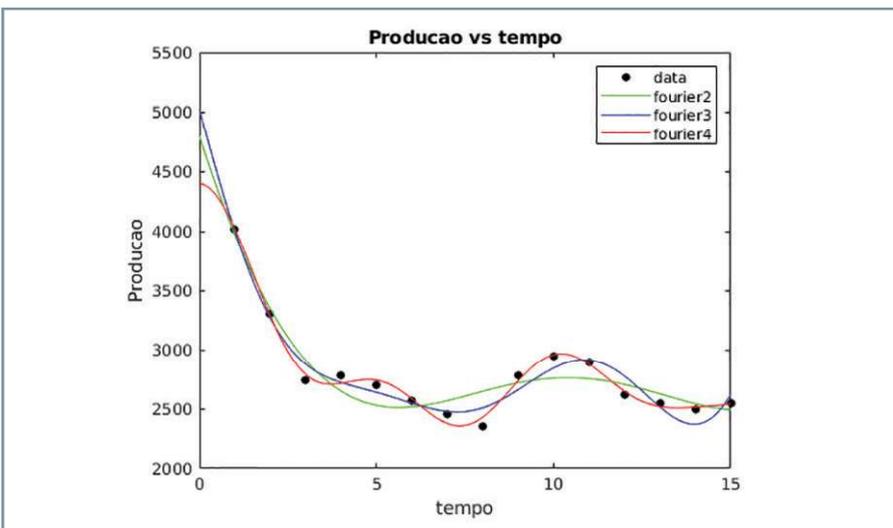


Fig. 1 – Modelos de aproximação da produção ao longo do tempo.

às despesas com a produção, pontos a preto, enquanto as linhas coloridas representam três diferentes ajustamentos com as funções de Fourier, de ordem 2, 3 e 4. Enquanto a primeira mostra o ajustamento nos anos de dados recolhidos, a segunda descreve o comportamento da mesma função, mas extrapolada para um horizonte temporal de 100 anos.

Considerando os parâmetros anteriores, bem como a manutenção da tendência de uma forma geral, foi ainda considerada a introdução de um acréscimo no preço da mão-de-obra, um acréscimo no preço de venda da uva e uma diminuição do valor dos subsídios, tentando desta forma evidenciar as consequências destes procedimentos.

De modo a permitir observar vários cenários, foram geradas aleatoriamente 500 explora-

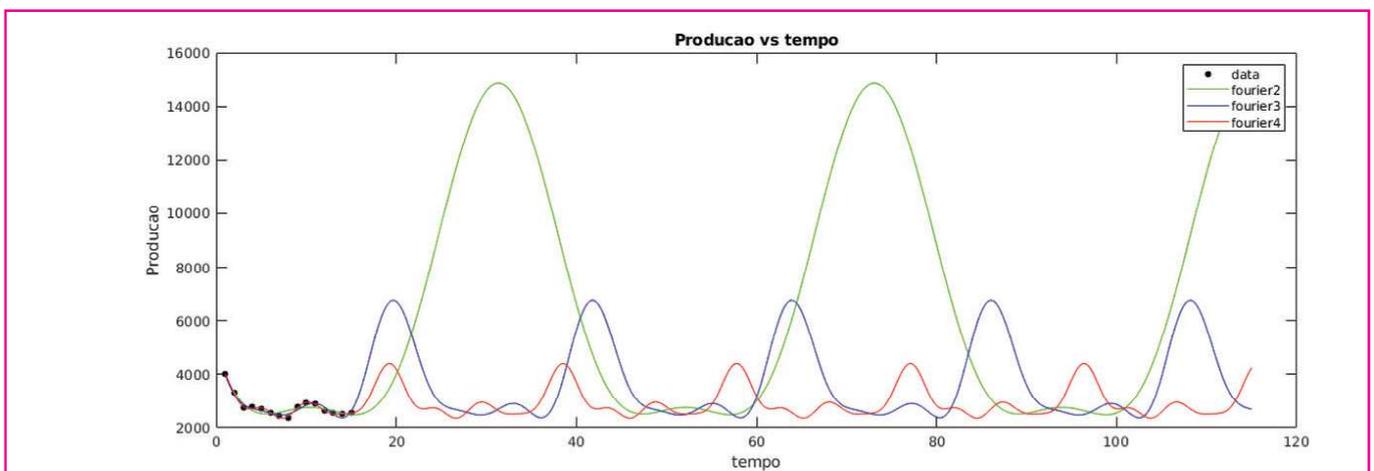


Fig. 2 – Extrapolação para um horizonte temporal de 100 anos.

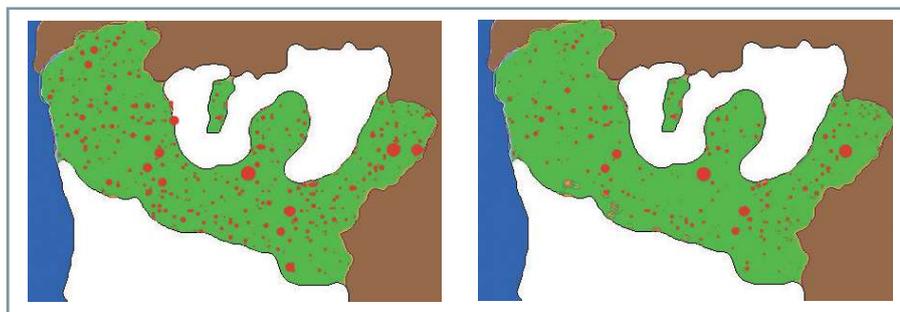


Fig. 3 – Exemplo de uma animação gráfica numa simulação com um início de 500 explorações, terminando com 330, num horizonte temporal de 100 anos.

ções, diferindo quanto à sua área, qualidade da uva, saldo bancário e produtividade. Em cada período, a exploração produz e vende as suas uvas (para produção de vinho), considerando a sua própria capacidade produtiva e os preços no mercado externo: valor de venda da uva, mão-de-obra, consumo intermediário, entre outros. Posteriormente, o saldo bancário é atualizado para avaliar se a exploração é sustentável e pode prosseguir com sua atividade ou se o fecho é inevitável.

Tendo sempre em vista a sustentabilidade da vinha na região Norte, no final do horizonte de simulação (100 anos) e considerando o preço da uva que tem vindo a ser utilizado, das 500 explorações existentes inicialmente sobrevivem entre 253 e 330 (entre 50,64% e 65,98%), dependendo do preço da mão de obra. Tal é ilustrado nas imagens da Fig. 3, com a apresentação da situação inicial (imagem esquerda) versus a situação final (imagem direita). Cada exploração é representada por um ponto vermelho, com tamanho proporcional à área produtiva que lhe foi atribuída. O desaparecimento de pontos vermelhos, são representativos de explorações que se tornaram inviáveis economicamente, enquanto os que se mantiveram representam explorações sustentáveis.

A evolução de algumas das grandezas anali-

sadas pode ser observada na interface gráfica da aplicação utilizada, tal como apresentada na Fig. 4, onde as variáveis labor, envi, e amorti, representam os montantes em euros, despendidos com a mão-de-obra, gastos ambientais e amortização de capital, respetivamente.

Considerando o nosso modelo de formulação e as premissas definidas, verifica-se que um simples acréscimo do preço de venda de uva de 0,19€/Kg, pode evitar a extinção de 23,66%

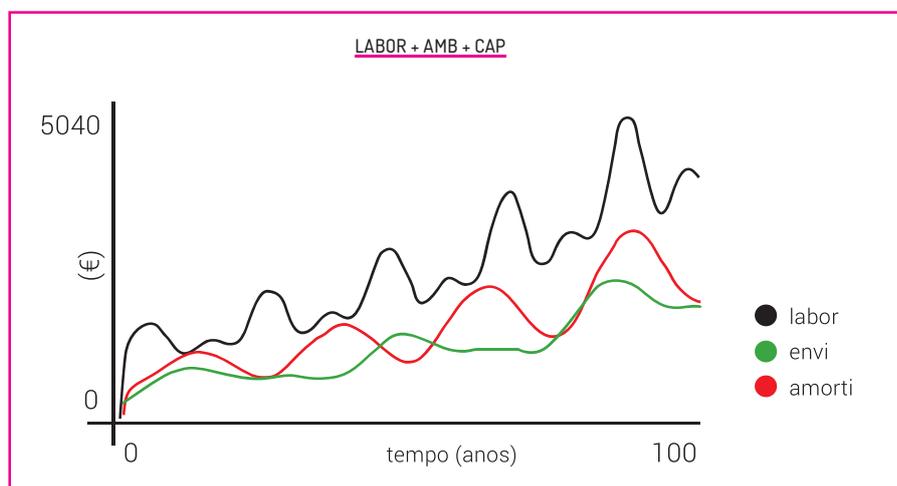


Fig. 4 – Exemplo da evolução das despesas numa simulação para um horizonte temporal de 100 anos.

das explorações, porém continua a verificar-se o desaparecimento de 36,68 %. Estes e outros resultados poderão ser constatados em [2].

De modo geral, os resultados mostraram que a região do Norte não está bem preparada para lidar com os cenários negativos que se estimam poder ocorrer, verificando-se uma diminuição grave das taxas de sobrevivência das explorações agrícolas durante as simulações desenvolvidas.

Estas conclusões vão ao encontro do que o setor tem vindo a reiterar, reforçando ainda que o preço a que a uva tem vindo a ser valorizada no mercado e o custo e disponibilidade de mão-de-obra devem ser objeto de intervenção rápida no setor, por forma a garantir a sua sustentabilidade na região. Note-se que se trata de uma região cujo relevo impõe o recurso intenso de mão-de-obra, para a manutenção da atividade.

Finalizando, não posso deixar de referir os colegas com quem tenho trabalhado neste tema, ajudando-me a perceber e a aplicar a IO ao mundo real, nomeadamente: Adelaide Cerveira, Ana Marta Costa, Aníbal Galindo e Cátia Santos.

#### REFERENCIAS

- [1] An, G., Fitzpatrick, B.G., Christley, S., Federico, P., Kanarek, A., Miller-Neilan, R., Oremland, M., Salinas, R., Laubenbacher, R., & Lenhart, S. (2017). Optimization and Control of Agent-Based Models in Biology: A Perspective. *Bull. of Math, Biology*, Vol. 79, no 1, pp. 63-87, <https://doi.org/10.1007/s11538-016-0225-6>
- [2] Galindo, A., Marta-Costa, A., Santos, C., Matias, J., & Cerveira, A. (2018). Simulation of Alternative Scenarios in Portuguese Wine Sector: An Agent-Based Model Approach. *Proceedings of the 11th Annual Conference of the EuroMed Academy of Business*, 544-558. ISSN: 2547-8516, ISBN: 978-9963-711-67-3.
- [3] OIV (International Organisation of Vine and Wine). (2019). *Statistical Report on World Vitiviniculture*, disponível em <http://www.oiv.int/public/medias/6782/oiv-2019-statistical-report-on-world-vitiviniculture.pdf>, acedido em 14/06/2020.
- [4] RICA (Rede de Informação de Contabilidades Agrícolas). (2001-2017), *Resultados médios por exploração*, disponível em <http://www.gpp.pt/index.php/rica/rede-de-informacao-de-contabilidades-agricolas-rica>.

# O SÓCIO N.º ... 869



NELSON CHIBELES MARTINS

Departamento de Matemática,  
Centro de Matemática e Aplicações  
Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Universidade Nova de Lisboa  
npm@fct.unl.pt

O meu primeiro contacto com a Investigação Operacional (IO) ocorreu no Secundário, especificamente durante o 12.º ano, no ano letivo de 88/89, graças a uma professora extraordinária. Eu estava a frequentar o Curso Técnico-Profissional de Contabilidade e Gestão e era a primeira vez que tal curso funcionava na minha escola. Por isso, houve um influxo de professores novos. Uma delas foi a Profª Isabel Monteiro (que irá receber um exemplar deste boletim, obviamente), uma jovem alegre e dinâmica, de 27 anos (portanto, apenas mais 10 anos do que nós) e que recebeu a Direção da nossa turma e a disciplina de "Fiscalidade", nos tempos em que IVA, IRS e IRC eram novidades no nosso sistema fiscal. Eventualmente, acabaria por se voluntariar para nos lecionar também "Estatística" que esteve uns meses sem docente... Portanto, a Isabel acabou por ficar a conhecer-nos muito bem. E percebeu que eu estava um pouco desgarrado das Economias e Gestões e Contabilidades que tanto atraíram os meus colegas de curso. Por sorte, a querida Isabel tinha-se licenciado no ISEG e tinha tido Investigação Operacional e achou que eu era capaz de achar graça aquilo. E, golpe de sorte n.º2, a Isabel era casada com um oficial da Força Aérea, a trabalhar na Base Aérea de Beja, em Logística e Planea-

mento, IIRC. Portanto, a nossa Diretora de Turma solicitou um Mini-Bus à Junta de Freguesia e levou-nos em visita de estudo à BATT. Foi fantástico ouvir falar de algoritmos e práticas (que só anos mais tarde consegui realmente compreender) que permitiam uma gestão mais eficiente da base. E a partir daquele dia decidi que apenas me candidataria a cursos de Matemática que tivessem ramos de Investigação Operacional: na FCT NOVA, na FCUL e na Universidade de Évora. Bem... Foi o ano da primeira Prova Geral de Acesso e das Provas Específicas e de uma monumental greve dos Professores do Ensino Superior! O que empatou a realização das ditas provas e das suas correções. E que atirou a publicação dos resultados do concurso nacional de acesso ao superior lá para... janeiro... Foi um período angustiante, mas lá saíram os resultados: Colocado em Matemática – FCT da NOVA. Yeah!!!

Mesmo assim, apenas no 3.º ano é que tive a oportunidade de começar a ter disciplinas de IO. E sim, era AQUILO que eu queria fazer. Graças a uns jovens professores, agora nomes bem conhecidos na nossa área: Profª Isabel Correia, Profª Paula Amaral, Prof. Ruy Costa,... que me apresentaram à nossa Arte com muita simpatia, sentido de humor e saber.

Confesso que quando estava a terminar a Licenciatura já tinha, mentalmente, dado fim à minha passagem pela Academia. Disciplinas todas concluídas, apenas a um estágio de seis meses de me licenciar. Tinha a vida desenhada para sair da Universidade e nunca mais lá voltar. Mas, numa das minhas últimas aulas na FCT, assim em conversa de final de semestre, o Prof. Ruy Costa comentou: "É pena o congresso nacional de IO ser no Minho. Se fosse mais perto sugeriria que participassem para poderem ver que esta área é muito mais do que viram nas vossas disciplinas.". Obviamente que estas coisas não se podem dizer a um bando de Universitários... Organizámo-nos e, pagando a inscrição do próprio bolso, lá fomos nós distribuídos por 5 ou 6 carros, a caminho de Braga. Apanhámos os nossos professores de surpresa. E fizemos questão de assistir às suas comunicações. Claro que percebi relativamente pouco, mas achei aquele ambiente muito entusiasmante!

Durante o IO94, e admito que aconteceu apenas porque fui arrastado por duas colegas, as-

sisti a uma sessão especial dirigida apenas a estudantes e proferida pela saudosa Profª Isabel Themido, sobre o Mestrado de Investigação Operacional e Engenharia de Sistemas do IST. A sessão falava também dos vários programas de bolsas e era uma forma descarada do Técnico seduzir alunos do Norte para se aventurarem a fazerem Mestrados em terras mais a Sul. Bem, não sei se os alunos da Universidade do Minho se convenceram, mas eu estava mais do que convencido. E quando comecei o tal estágio já estava a planear a minha candidatura ao Mestrado e a uma Bolsa do Programa Praxis XXI da JNICT (atual Fundação para a Ciência e Tecnologia).

Mas, apesar de ter concorrido ao Mestrado, estava longe de pensar em seguir uma carreira académica. Porém, logo no 1.º ano de Mestrado, como os resultados dos concursos do Praxis XXI tardavam a ser publicados e era necessário pagar uma avultada propina, voluntariei-me para ser monitor de IO e fui selecionado. E... foi... a... minha... Perdição. Ou o meu Chamamento. Depende do ponto de vista. :)

Entretanto, já com a parte escolar do Mestrado concluída, candidatei-me a uma vaga de Assistente na FCT NOVA. E, fui o selecionado. E é por lá que ainda me mantenho, 23 anos depois.

As Meta-Heurísticas (MH) entraram na minha vida pouco tempo depois, por culpa de uma escola de Verão... Os Profs. José Fernando Oliveira e Jorge Pinho de Sousa vieram ao Monte da Caparica mostrar o que era isso das MH. E como eu andava à procura de *something completely different* para o meu Doutoramento, e como a minha forma de estar na vida é bastante afim à Filosofia desses algoritmos: *Fiat Lux!* Mais tarde, após o Doutoramento, e depois de uma operação de charme da minha colega, a Profª Isabel Gomes - "sim, *go for it*. Vais gostar do ambiente e da equipa." - aceitei um convite para ser colaborador residente do Departamento de Modelação e Simulação, do INETI (atual LNEG). Aprendi imenso trabalhando com a dinâmica Profª Ana Paula Póvoa e o inigualável e marcante Doutor Augusto Novais. E dessa colaboração nasceu uma parceria, que dez anos depois ainda perdura, com a Profª Tânia Pinto-Varela, com a Tânia a testar modelos exatos e eu a contrapor com MH, aplicando as duas abordagens, paralelamente, aos mesmos problemas. E o resto é História...

# SISTEMAS DE SUPORTE À DECISÃO APLICADOS À GESTÃO FLORESTAL SUSTENTÁVEL EM POVOAMENTOS DE PINHEIRO BRAVO

O pinheiro-bravo (*Pinus pinaster* Ait.) é uma das espécies mais representadas na floresta nacional, possuindo um elevado interesse económico, social e ecológico. A proposta de criação de um Sistema de Suporte à Decisão (SSD) aplicado à Gestão Florestal surgiu com o objetivo de desenvolver uma ferramenta que permitisse melhorar a gestão de povoamentos desta espécie. A aplicação realizada respeita a uma área florestal localizada no Perímetro Florestal do Barroso, em Ribeira de Pena, na região Norte de Portugal. Esta área é composta por baldios, cuja gestão é da responsabilidade das direções dos baldios e do Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF). Até há bem pouco tempo era realizada de forma essencialmente empírica, tendo por base a experiência e sensibilidade dos técnicos deste instituto. O estudo é elucidativo das vantagens em recorrer a modelos de simulação e a SSD para ensaio de alternativas de gestão e otimização dos resultados. A seguir descrevem-se as etapas seguidas no desenvolvimento do SSD e recursos de suporte.

## MODISPINASTER

Os simuladores de crescimento providenciam informação útil acerca do desenvolvimento dos povoamentos e da respetiva produção, perante cenários silvícolas tradicionais ou especificados pelo utilizador, que pode ser usada como suporte à tomada de decisão. Neste trabalho foi selecionado como simulador apropriado o ModisPinaster (Modelo com Distribuição de Diâmetros para a *Pinus pinaster*). O ModisPinaster [1] é um modelo desenvolvido para o pinheiro-bravo, em Portugal, que simula o crescimento e a produção dos povoamentos, prevê a ocorrência de mortalidade associada a competição ou a depressões severas e apresenta flexibilidade para selecionar procedimentos silvícolas alternativos de suporte à gestão florestal. É um modelo que está disponível para utilização livre, em interface amigável, na plataforma CAPSIS (Computer Aided Projection of Strategies In Silviculture, <http://www.inra.fr/capsis>) [2].

A inicialização (Fig. 1) é feita a partir de dados de inventários florestais de rotina (e.g. idade, número de árvores, área basal, altura

e diâmetro médio das árvores dominantes), sendo as simulações realizadas numa base anual, desde o ponto de inicialização até um valor máximo de 65 anos, permitindo a simulação, a qualquer idade, de desbaste ou corte raso, de acordo com o cenário estipulado pelo utilizador. O modelo permite ensaiar abordagens alternativas de regulação da densidade (prescrições manuais ou automáticas baseadas em fatores de espaçamento e índices de densidade, além das medidas habituais de densidade do número de árvores ou área basal por hectare) e facultar informação diversa de produção, tal como volume do tronco, biomassa (aérea, por componentes, e radicular), carbono e energia, entre outras características. Os dados de saída estão acessíveis a qualquer idade compreendida no período de simulação. Nesta aplicação foi selecionada, como informação de saída do ModisPinaster, o volume em pé e o volume do material que é retirado em desbaste. Estes valores de volume servem de dados de entrada no SSD proposto.



PAULO COSTA

Attractive Cascade Unipessoal, Lda  
(CERNA Portugal), Braga  
[paulodanielcosta@hotmail.com](mailto:paulodanielcosta@hotmail.com)



ADELAIDE CERVEIRA

Departamento de Matemática  
Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro  
LIAAD -INESCTEC Polo UTAD Vila Real  
[cerveira@utad.pt](mailto:cerveira@utad.pt)



TERESA FIDALGO FONSECA

Departamento de Ciências Florestais  
e Arquitetura Paisagista,  
Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro  
Centro de Estudos Florestais,  
Instituto Superior de Agronomia,  
Universidade de Lisboa,  
[tfonseca@utad.pt](mailto:tfonseca@utad.pt)

**“O ESTUDO É  
ELUCIDATIVO DAS  
VANTAGENS EM  
RECORRER A MODELOS  
DE SIMULAÇÃO E A  
SSD PARA ENSAIO  
DE ALTERNATIVAS DE  
GESTÃO E OTIMIZAÇÃO  
DOS RESULTADOS”**

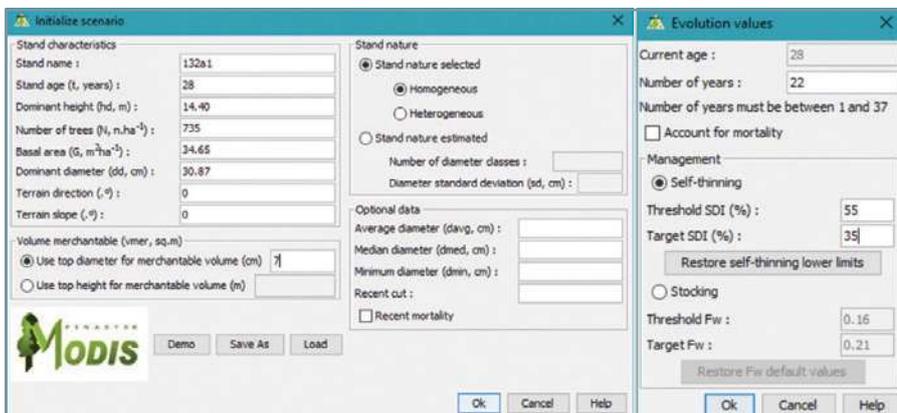


Fig. 1 – ModisPinaster: (esq.) dados para inicialização. (dir.) opções de simulação.

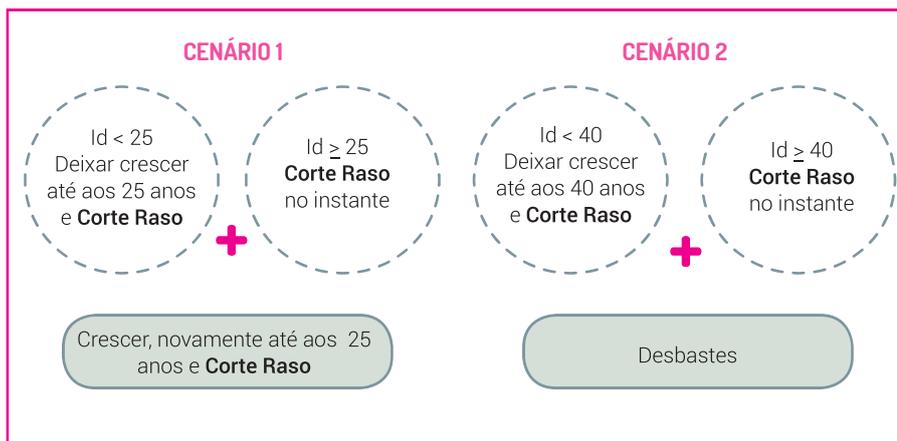


Fig. 2 – Cenários de simulação no ModisPinaster

### SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS

Após a inicialização do ModisPinaster com os dados de entrada, provenientes de inventariação, segue-se a realização das simulações, as quais incluem evoluções anuais que representam o crescimento do povoamento no período de simulação e as práticas de gestão (simulação de desbastes e corte raso), permitindo prever a evolução do povoamento no intervalo de tempo escolhido. Nesta aplicação considerou-se um modelo de regulação da densidade do povoamento assente no índice de densidade do povoamento (SDI), com variação entre 35% (limite inferior da ocupação completa) e 55% (valor próximo do limite in-

ferior de auto - desbaste, ou mortalidade natural por competição). Ou seja, quando o povoamento atinge um valor máximo estipulado de SDI igual a 55%, o modelo simula a realização de um desbaste pelo baixo, de modo a que o povoamento remanescente apresente um SDI igual a 35% (Fig. 1).

As simulações foram realizadas para dois cenários diferentes, apresentados na Fig. 2, que vão ao encontro das práticas silvícolas adotadas usualmente, relacionadas com o uso que se irá dar à madeira retirada, seja para trituração ou para serração. O cenário 1 consiste em manter o povoamento até aos 25 anos de idade e, a essa idade, realizar corte

**“O OBJETIVO É MAXIMIZAR O VOLUME DE MADEIRA EXTRAÍDA, CONSIDERANDO RESTRIÇÕES QUE LIMITAM A ÁREA DAS CLAREIRAS, RESTRIÇÕES DE SUSTENTABILIDADE E RESTRIÇÕES OPERACIONAIS”**

raso ou, caso a situação de partida respeite a um povoamento que já tenha ultrapassado os 25 anos, realizar corte raso a essa idade, e depois simular o crescimento do novo povoamento por mais 25 anos e realizar novamente um corte raso. O cenário 2 consiste em deixar que o povoamento desenvolva até aos 40 anos de idade e realizar corte raso a essa idade. Os desbastes são efetuados apenas em parcelas intervencionadas segundo o cenário 2 pois, no caso do cenário 1, como a idade de revolução é 25 anos, constatou-se, pelos dados de inventário, que a densidade dos povoamentos ficava aquém do limiar estipulado para realização de desbaste.

### O MODELO DE OTIMIZAÇÃO

A área de estudo refere-se ao Baldio de St. Aleixo e ocupa 441 ha. A área está dividida em 65 parcelas de gestão, e pretende planejar-se a sua gestão ao longo de um horizonte de planeamento constituído por 30 períodos, de um ano cada. As práticas que se consideram são desbastes e cortes rasos preconizadas seguindo um dos dois cenários. Os dados

de saída do ModisPinaster são acoplados a um modelo de otimização, que permitirá selecionar a melhor opção de gestão. Pretende determinar-se o conjunto de parcelas que são exploradas segundo um dos cenários, 1 ou 2 e, além disso, determinar o ano/periódico em que se realiza o primeiro corte raso. O problema é formulado como um modelo de programação linear inteira em que o objetivo é maximizar o volume de madeira extraída, considerando restrições que limitam a área das clareiras, restrições de sustentabilidade e restrições operacionais.

As restrições relativas à área das clareiras proibem a extração de um grupo contínuo de parcelas que exceda a área limite de corte raso, que em Portugal está estipulado ser 10ha, durante o tempo de exclusão, que para esta espécie se admite ser 3 anos. Foi utilizada a formulação *path* que consiste na enumeração de todos os *clusters* não admissíveis mínimos, regiões contínuas de parcelas com idade para serem sujeitas a corte raso cuja área é superior a 10ha e não contém outro cluster não admissível [3], [4] e na imposição de que, durante o tempo de exclusão, em cada um desses clusters pelo menos uma parcela não é sujeita a corte raso. As restrições operacionais contribuem para a regularidade de receita, garantindo que não haja grandes diferenças de volume de madeira extraída em cada período de 10 anos.

No grupo das restrições de sustentabilidade, garante-se que a idade média do baldio no final do horizonte de planeamento é de pelo menos 20 anos. Em [5] consideram-se outros tipos de restrições de sustentabilidade, nomeadamente o volume em pé e o acréscimo anual de produção de madeira no final do horizonte de planeamento (5 anos) serem pelo menos iguais aos valores correspondentes no início do horizonte de planeamento.

#### ANÁLISE DOS RESULTADOS

O modelo de otimização foi implementado e resolvido usando o Xpress Optimizer (disponível em <http://www.fico.com/Xpress>).

O volume total de madeira extraída é 32551 m<sup>3</sup>, sendo 29723 m<sup>3</sup> em corte raso e o restante em desbastes. Apenas 14 parcelas (103,62 ha), correspondentes a 23,5% da área total, foram intervencionadas segundo o cenário 1 e nas restantes adotou-se o cenário 2. De modo a facilitar ao utilizador a compreensão dos resultados obtidos, este sistema de suporte à decisão inclui também uma perceção espacial da área intervencionada. A cartografia apresentada nas Figs. 3, 4, 5 e 6 diz respeito às intervenções realizadas por período (desbaste ou corte raso), com indicação do ano civil de cada intervenção.

Na Fig. 3 pode observar-se as intervenções que se propõem entre os períodos 1 a 6 do horizonte de planeamento. Assumindo que

**“O RECURSO À OTIMIZAÇÃO REALIZADA TORNA MAIS EFICIENTE O PROCESSO DE GESTÃO FLORESTAL, GARANTINDO A SATISFAÇÃO DE REQUISITOS LEGAIS, A SUSTENTABILIDADE DE RECURSOS E O EQUILÍBRIO DE RECEITAS”**

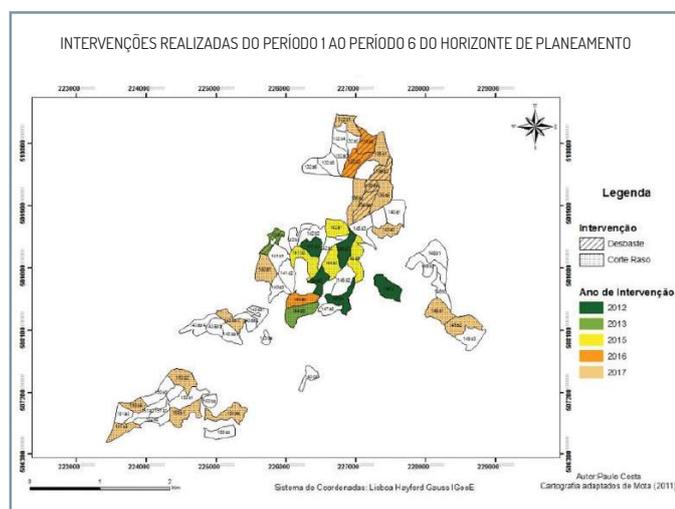


Fig. 3 – Cartografia das intervenções: período 1 (2012) ao período 6 (2017)

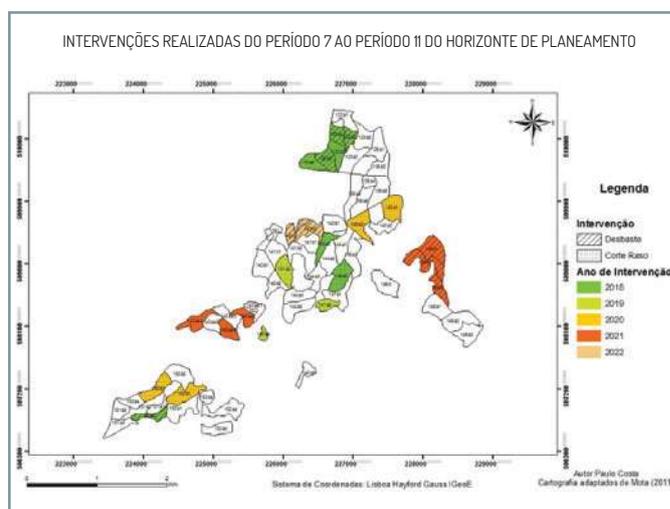


Fig. 4 – Cartografia das intervenções: período 7 (2018) ao período 11 (2022)

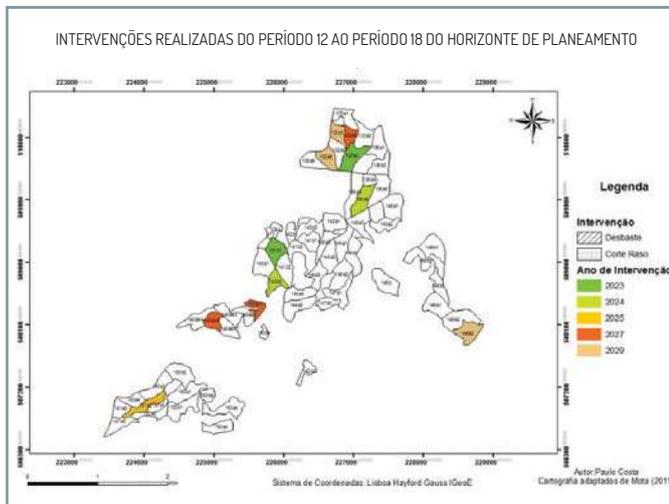


Fig. 5 – Cartografia das intervenções: período 12 (2023) ao período 18 (2029)

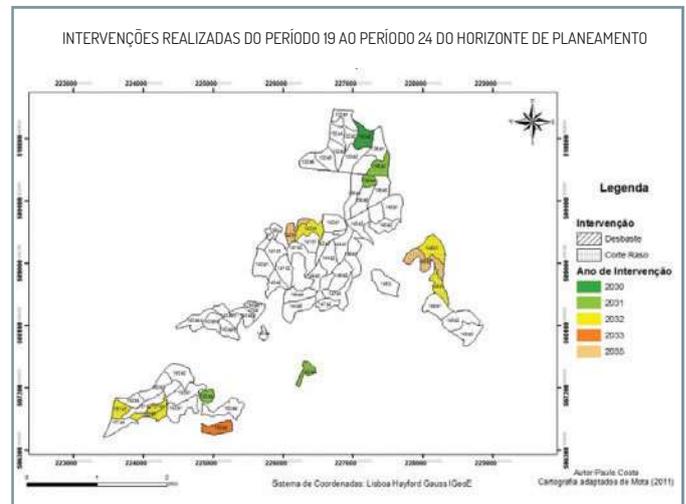


Fig. 6 – Cartografia das intervenções: período 19 (2030) ao período 24 (2035)

esta proposta é realizada tendo como ano base 2012, a parcela 138c sofre um desbaste em 2013 (período 2), as parcelas 133a2 e 133a3 sofrem desbaste em 2016 e as parcelas 136a2, 136a4 e 136a6 sofrem desbaste em 2017. As restantes parcelas

intencionadas são sujeitas a corte raso. O mesmo se pode observar nas Figs. 3, 4 e 5 nos respetivos períodos do horizonte de planeamento.

As intervenções adotando o cenário 1 contribuem para assegurar a idade média no

final do horizonte de planeamento de pelo menos 20 anos [6].

O recurso à otimização torna mais eficiente o processo de gestão florestal, garantindo a satisfação de requisitos legais, a sustentabilidade de recursos e o equilíbrio de receitas.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Fonseca, T.F., Parresol B., Marques C., & de Coligny F. (2012). Models to implement a sustainable forest management – an overview of the ModisPinaster model. In *Sustainable Forest Management / Book 1*. InTech - Open Access Publisher, p. 321-338. DOI: 10.5772/29808
- [2] Dufour-Kowalski S., Courbaud B., Dreyfus P., Meredieu C., & de Coligny F. (2012). Capsis: an open software framework and community for forest growth modelling. *Annals of Forest Science*. 69:221–233
- [3] Martins, I., Constantino, M., & Borges, J. (1999). *Forest management models with spatial structure constraints*, Working Paper No. 2/1999, Centro de Investigação Operacional, Faculdade de Ciências de Lisboa.
- [4] McDill, M. E., Rebañ, S.A., & Braze, J. (2002). Harvest scheduling with area-based adjacency constraints. *Forest Science* 48(4). 631-642.
- [5] Cerveira, A., Martins, I., Mota, A., Bento, J., & Fonseca, T. (2014). Otimização de planos de exploração Florestal em baldios do Norte de Portugal. In *Investigação Operacional em Ação: Casos de Aplicação*. Imprensa da Universidade de Coimbra, pp. 17-56, 2014. ISBN: 978-989-26-0737-5.
- [6] Costa, P. (2017). *Sistemas de Suporte à Decisão Aplicados à Gestão Florestal Sustentável em Povoamentos de Pinus pinaster Ait.* Dissertação de Mestrado em Engenharia Florestal, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real.

#### NOTÍCIAS

### EVENTOS A REALIZAR

#### IFORS 2021

22 a 27 de agosto de 2021

Hanyang University, Seoul, Coreia do Sul

Mais informações em <http://www.ifors2020.kr/>

#### ISOLDE XV e EWGLA XXVI

4 a 10 de julho de 2021

Kaiserslautern e Baden-Baden, Alemanha

Mais informações em <https://www.mathematik.uni-kl.de/opt/ISOLDE2021>



Associação Portuguesa de Investigação Operacional  
Departamento de Engenharia e Gestão  
Instituto Superior Técnico  
Av. Rovisco Pais, 1  
1049-001 Lisboa, Portugal  
[apdio@euro-online.org](mailto:apdio@euro-online.org)



<http://apdio.pt/home>  
<https://www.facebook.com/APDIO.PT/>  
<https://www.linkedin.com/in/apdio-pt-545718177/>

BOLETIM  
APDIO

**Equipa Editorial**  
Eliana Costa e Silva  
[eos@estg.ipp.pt](mailto:eos@estg.ipp.pt)  
Rui Borges Lopes  
[rui.borges@ua.pt](mailto:rui.borges@ua.pt)

**Design**  
Inês Assis  
[inesassis.design@gmail.com](mailto:inesassis.design@gmail.com)  
**Impressão**  
Gráfica Pacense, Lda.  
**Tiragem** 325 exemplares