

Podem as plantas indicar desertificação?

Apresentado por: *pupinada*

“Pelo figo e pela azeitona” 95:1

1

Introdução

A desertificação é um problema global com sérias implicações para a biodiversidade, eco-segurança e estabilidade sócio-económica. Este fenómeno consiste na persistente degradação do ecossistema por alterações climáticas e atividades humanas como mineração e práticas agrícolas insustentáveis como sobre pastoreio e desflorestação. A consequente diminuição da cobertura vegetal resulta no aumento das taxas de erosão e escoamento, levando à progressiva degradação do solo e perda da vegetação [1]. Em 1992, durante a *Rio Earth Summit*, a desertificação foi identificada como um dos grandes desafios ao desenvolvimento sustentável, juntamente com as alterações climáticas e a perda de biodiversidade [2].

Atualmente, não existe uma metodologia acordada para a avaliação de desertificação dentro da União Europeia [3], embora indicadores de desertificação tenham sido desenvolvidos a nível nacional [4], e internacional [5]. A falta de consenso científico para definir uma metodologia deve-se principalmente ao facto da desertificação e degradação de solos ser um fenómeno complexo, afetado por muitos fatores independentes, o que dificulta a construção de modelos e indicadores precisos.

O que poderá então constituir um indicador de desertificação? Será a biodiversidade vegetal uma opção, visto que é particularmente afetada pelos fatores abióticos, como temperatura, humidade e qualidade de solo, de que a desertificação depende? Quais as espécies mais suscetíveis a estas mudanças e quais as que criam comunidades vegetais resistentes a estes impactos ambientais? **Pode a biodiversidade vegetal ser utilizada como um indicador de risco, ou até de resiliência, à desertificação?**

Sabe-se que as espécies vegetais têm diferentes resistências à desertificação [6]. *Cistus ladanifer*, por exemplo, é capaz de sobreviver em solos degradados e contaminados [7]. A utilização de sistemas agro-florestais para a restauração de ecossistemas pode mitigar os efeitos da desertificação e das mudanças climáticas, preservando a biodiversidade e abordando uma série de problemas ambientais, económicos e sociais [8]. Espécies do género *Astragalus* L. (*taxa* herbáceos), protegem a integridade do solo e vegetação em áreas inclinadas devido ao seu forte sistema radicular, combatendo a erosão mesmo em condições climáticas extremas [6].

Porém, a construção de modelos para a identificação de espécies indicadoras é difícil devido à grande quantidade de dados e da complexidade do problema. Existe, no entanto, uma tendência emergente para a utilização de algoritmos de *Machine Learning* capazes de identificar padrões em conjuntos de dados. Este tipo de ferramentas poderá então ser utilizado para destacar espécies vegetais indicadoras da desertificação ou resistentes à mesma, tal como as áreas de risco de desertificação, bem como para desenvolver sistemas agro-florestais eficientes, seja para conservar ou recuperar ecossistemas perdidos.

2

Área de estudo

Portugal está localizado no extremo sudoeste da Europa e abrange uma área de 92.212 km². A região continental apresenta uma grande diversidade de paisagens, vegetação e micro-climas. As áreas costeiras caracterizam-se por dunas e praias com vegetação adaptada às condições de salinidade. Já o interior do país é dominado por matagais e florestas de Carvalhos, Pinheiros e Eucaliptos. Tradicionalmente, a floresta portuguesa é categorizada em nove classes de povoamentos florestais, cada uma definida pela espécie de árvore dominante. Essas classes incluem o Pinheiro bravo, Sobreiro, Eucaliptos, Azinheira, Carvalhos, Pinheiro manso e Castanheiro, além de outras espécies [9]. As zonas montanhosas apresentam uma vegetação rica e variada, com árvores como o Castanheiro, o Carvalho, o Azevinho e o Medronheiro.

Portugal é dos países da União Europeia mais expostos à desertificação, com mais de 50% do seu território em risco [3, 10]. Esta situação é agravada por fatores climáticos e atividade humana: sobre exploração da água e dos solos na agricultura, abate descontrolado de árvores, uso excessivo de produtos agro-químicos, políticas de ordenamento do território deficientes, entre outros fatores. Também a ocorrência frequente de incêndios durante os meses de verão e o aumento da intensidade de episódios de seca e precipitação extrema têm contribuído para a degradação do solo [11].

Para desenvolver um algoritmo de *Machine Learning* é fundamental obter um conjunto de dados robusto. Numa primeira instância, é necessário coletar dados da biodiversidade vegetal e possíveis indicadores de desertificação, incluindo informações sobre o clima, solo, cobertura vegetal e atividade humana e, se possível, dados que ilustrem a evolução temporal destes parâmetros. Esses dados deverão ser posteriormente tratados para garantir a sua qualidade e aplicabilidade ao treino de algoritmos de *Machine Learning*.

Seguidamente, proceder-se-á ao levantamento dos diferentes índices e caracterizações de desertificação propostos pela comunidade científica. Tendo em conta a existência de mais de 100 definições formais [12], o modelo será treinado sobre os diferentes índices, calculados utilizando os dados recolhidos e armazenados no *dataset*. Finalmente, uma análise exaustiva dos dados identificará padrões de suscetibilidade ou resiliência à desertificação, caso existam.

3.1 Construção do *dataset*

A colheita de dados de biodiversidade vegetal em Portugal pode ser feita através de levantamentos de campo ou por meio de bases de dados existentes sobre biodiversidade. É importante ter uma amostra ilustrativa das diferentes regiões de Portugal, de forma a garantir que os resultados possam ser aplicados em todo o país.

Atualmente, existem várias bases de dados sobre a biodiversidade de plantas que podem ser utilizadas para obter informações em Portugal. No âmbito deste trabalho, destacam-se as seguintes:

1. **Flora-On**¹: base de dados que disponibiliza informações sobre a flora vascular de todas as espécies de plantas em Portugal, incluindo informação fotográfica, geográfica, morfológica, fenológica e ecológica;
2. **Global Biodiversity Information Facility (GBIF)**²: plataforma que disponibiliza dados de biodiversidade de todo o mundo, incluindo espécies vegetais. Permite assim a pesquisa e *download* de dados de ocorrência de plantas em Portugal.

Além da necessidade de se obter dados sobre a biodiversidade de plantas, é preciso também coletar informações sobre os diferentes fatores abióticos indicadores de desertificação. Neste sentido, as bases de dados disponíveis incluem:

1. **Portal do Clima**³: plataforma online que disponibiliza informações e dados relacionados com as mudanças climáticas e o seu impacto ambiental;
2. **European Environment Agency**⁴: fornece informações atualizadas sobre o meio ambiente na Europa e disponibiliza os dados utilizados para as obter.

Após os dados terem sido coletados, é necessário realizar um pré-processamento dos mesmos. Este passo conta com a integração das informações geográficas correspondentes aos dados de desertificação e à biodiversidade de plantas, obtendo-se os respetivos *datapoints*.

Uma pré-análise será também realizada para identificar zonas pobres em dados ou com grandes discrepâncias em relação a outras zonas na área de estudo. Para complementar o *dataset*, uma parte do orçamento será alocado a levantamentos de campo e acesso a bases de dados privadas, especialmente na vertente de biodiversidade vegetal e de solo.

¹<https://flora-on.pt/>

²<https://www.gbif.org/>

³<http://portaldoclima.pt/pt/>

⁴<https://www.eea.europa.eu/>

3.2 Indicadores de desertificação

Devido à natureza multi-facetada e multi-disciplinar da desertificação, diferentes instituições políticas e comunidades de investigação têm apoiado o desenvolvimento de diversos métodos de análise. Estes seguem diferentes metodologias como abordagens empíricas [13, 14, 15, 16, 17], aplicações de deteção remota [18, 19, 20, 21, 22, 23] e modelagem [24, 25, 26, 27, 28, 29]. Estes indicadores são necessários para treinar o modelo e criar uma noção de desertificação. Após uma colheita de indicadores, estes podem ser calculados e integrados em cada *datapoint* a partir das informações disponíveis.

3.3 Desenvolvimento do algoritmo

O algoritmo de *Machine Learning* será desenvolvido com o propósito de identificar espécies possivelmente indicadoras de desertificação, bem como espécies resistentes à mesma.

Primeiro, devemos compreender melhor os dados disponíveis no *dataset* e a sua distribuição de valores, assim como possíveis erros, e planejar/descrever as etapas de pré-processamento que devem ser executadas de seguida. É igualmente importante verificar a distribuição dos valores no alvo, i.e distribuição de classes. Esta etapa é fundamental para garantir a precisão e confiabilidade do modelo. Depois de analisar os diferentes dados, é necessário selecionar os que deverão ser utilizados para treinar o algoritmo.

A etapa seguinte é treinar o modelo. Existem diversos tipos de modelos *Machine Learning* que podem ser aplicados, como *Decision Trees*, *Random Forest* e *Support Vector Machine*. Para escolher o mais adequado, utiliza-se *Cross Validation*, uma técnica de avaliação dos diferentes modelos de *Machine Learning* com diferentes conjuntos de dados de entrada, de teste e parâmetros. Para avaliar a qualidade do modelo escolhido, serão utilizadas várias métricas como precisão, *recall*, e pontuação F1.

3.4 Prova de Conceito

Para demonstrar a viabilidade deste projeto, pode ser realizado um exercício de conceito de escala menor, analisando dados de vegetação de uma única base de dados, a *GBIF*, e um único indicador de desertificação, o *Índice de Sensibilidade de Desertificação*, ou **ISD**, desenvolvido no projeto DISMED (*Desertification Information System for the Mediterranean*) [30]. Este indicador é uma medida da potencial vulnerabilidade de um ecossistema à desertificação e é calculado a partir da média geométrica de três indicadores-chave: qualidade do solo, clima e vegetação [31].

A qualidade do solo, caracterizada pelo índice de qualidade do solo ou **IQS**, é um fator crítico na determinação do **ISD**, pois os solos degradados são mais suscetíveis à desertificação. Padrões climáticos como a seca, temperaturas extremas e chuvas erráticas, quantificados pelo índice de qualidade climática ou **IQC**, também podem contribuir para a desertificação. Finalmente, a vegetação, representada pelo índice de qualidade de vegetação ou **IQV**, é um indicador-chave da resistência de um ecossistema à desertificação. A presença de diversas espécies de plantas pode ajudar a estabilizar os solos e promover a biodiversidade, enquanto as monoculturas ou o sobre pastoreio podem levar à degradação do solo e ao aumento do **ISD**. Os **ISDs** são calculados pela equação Equação 1, onde um **ISD** maior indica um maior risco de desertificação. Os **ISD** da região Mediterrânica estão disponíveis no EEA ⁵.

$$ISD = (IQS * IQC * IQV)^{1/3} \quad (1)$$

A *GBIF* possui, para Portugal Continental, mais de 4 milhões ocorrências de espécies vegetais, incluindo localização geográfica e data, das quais mais de 1.7 milhões foram identificadas entre 2010 e 2023. Obtidos os dados de biodiversidade vegetal, estes serão integrados com as informações geográficas dos **ISD** e analisados de forma a determinar as espécies de plantas presentes em áreas potencialmente vulneráveis à desertificação, bem como as que estão presentes em áreas menos vulneráveis ou não afetadas.

⁵<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/desertification-in-the-mediterranean-region>

A estimativa para a duração total do projeto é de 2 anos, sendo este dividido em três grandes objetivos:

1. Coleta de dados
2. Processamento dos dados
3. Relatórios finais

A coleta de dados consiste na construção de um *dataset* de biodiversidade vegetal em Portugal continental, compreendendo dados espaciais e temporais, disponibilizados por diversas bases de dados, e cálculo dos indicadores de desertificação desenvolvidos por várias instituições de investigação. Esta etapa terá a duração de um ano.

Coletados e tratados os dados, passar-se-á ao processamento dos mesmos. Este passo consiste na escolha e desenvolvimento dos algoritmos de previsão e classificação e requer uma constante testagem paralela do modelo, para uma adequada construção e parametrização do mesmo. Construído o modelo, a análise de dados é fundamental para responder à questão científica do projeto: quais as espécies ou comunidades indicativas do risco de desertificação ou capazes de mitigar os seus efeitos.

No caso de identificação dessas espécies, é então possível uma análise preliminar de áreas em risco de desertificação e sugestão de contra-medidas, nomeadamente a aplicação de espécies resilientes em processos de reflorestação ou construção de sistemas agro-florestais. Todas as discussões e conclusões serão compiladas no final dos dois anos estimados para a duração do projeto. A organização temporal do projeto encontra-se ilustrada no diagrama de Gantt da Figura 1.

O orçamento de 100.000,00€ (cem mil euros) distribui-se pelas diferentes tarefas. A alocação de fundos às tarefas 1.1 e 1.3 baseia-se principalmente no acesso e aquisição de informação, compilação de dados de múltiplos sistemas num único, e pré-processamento. Na tarefa 1.2, deve-se ao cumprimento das missões de campo, que requerem meios de transporte e aquisição de equipamento. Em processamento de dados, uma parte do orçamento será alocado ao desenvolvimento de aptidões, consultoria, uso de servidores, licenciamento, e eventual aquisição de equipamento, tudo de modo a desenvolver o software e analisar os resultados. Na tarefa final, o orçamento proposto baseia-se em custos derivados da revisão geral do projeto.

O projeto contará com um desenho da estratégia global *a priori*, onde haverá um investimento inicial para planeamento e organização do orçamento de forma detalhada, precisa e eficiente.

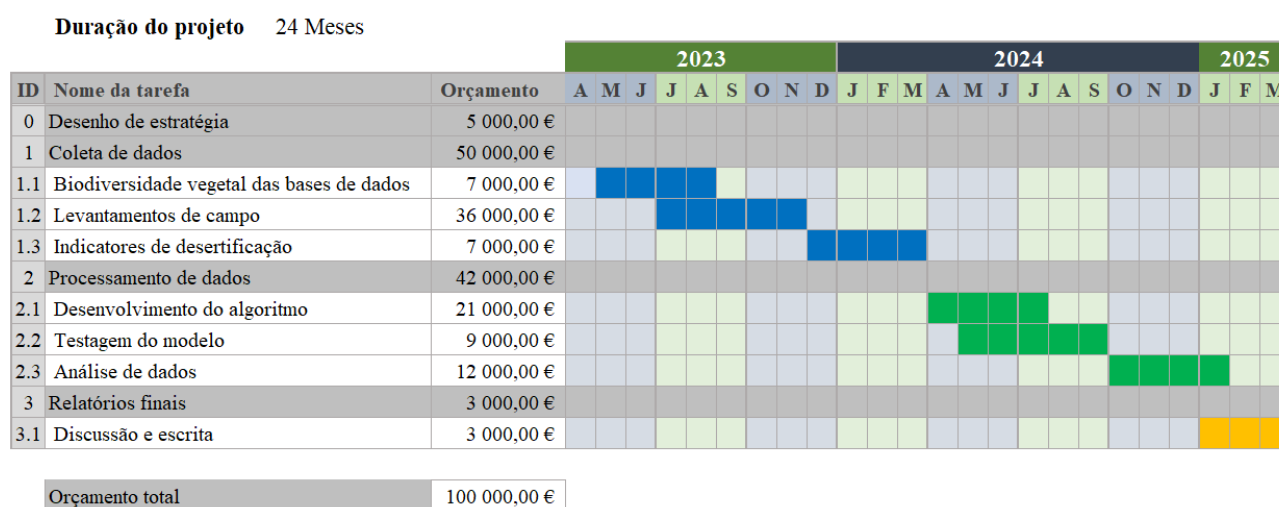


Figure 1: Diagrama de Gantt do projeto. O projeto está delineado em três fases, para um financiamento de cem mil euros e duração de dois anos.

Neste capítulo, é apresentada uma análise de dados que sugere que *Machine Learning* pode ser utilizado para identificar espécies ou padrões de espécies que possam prever ou mitigar o impacto da desertificação, seguindo a metodologia descrita em Subsecção 3.4. Devido à falta de poder de processamento, foram obtidos apenas os dados presentes na *GBIF*, disponibilizados pela *Flora-On* [32] entre 2010 e 2023. No total, foi possível obter um *dataset* com mais de 187 mil entradas vegetais e respetivas coordenadas geográficas, compilando 2199 diferentes espécies.

Em Portugal, apenas é possível encontrar áreas com os seguintes ISDs, calculados pela equação Equação 1: **Not Affected**, **Very Low**, **Low**, **Low-Moderate** e **Moderate**, nunca estando presente em **High**. Foi possível verificar que nenhuma das espécies foi encontrada na zona de ISD **Moderate** e apenas 252 espécies foram identificadas na zona **Low-Moderate** (Figura 3). A maioria das espécies encontra-se em zonas **Very Low**, o que se enquadra nas expectativas, uma vez que a maior parte do território se encontra neste ISD, como mostra a Figura 3. Também foi possível verificar que existem 761 espécies que são encontradas num único tipo de ISD. Os resultados podem ser consultados na Figura 2.

Analisando apenas as espécies que se encontram apenas num tipo de ISD, é possível encontrar espécies que apenas existem em zonas de ISD **Very Low**, tal como **Low**. Em zonas **Low-Moderate**, tal já não se verifica. Segundo os dados obtidos, a espécie *Medicago rigidula* encontra-se apenas em zonas com ISD **Very Low**, (Figura 3 A). Contudo, uma análise do mapa de distribuição da mesma presente no *Flora-On* revela que a mesma se deveria encontrar em zonas com ISD maior, como **Low** e **Low-Moderate** (Figura 3 B). No entanto, esta situação pode resultar da falta de entradas, i.e apenas 7, existindo também a hipótese de terem sido utilizados dados anteriores a 2010 para obtenção da distribuição no *Flora-On*, demonstrando que uma análise cuidada implica uma avaliação, não só das espécies presentes nas diferentes áreas classificadas, mas também da evolução temporal dessas espécies e do índice da área. Como poderá o modelo considerar estas variáveis? Quais são os métodos mais eficientes?

Temos também o exemplo da espécie *Cistus libanotis*, que pode ser encontrada apenas em zonas ISD superior a **Very Low** (Figura 3 A). Isto é expectável uma vez que o género *Cistus* é conhecido por crescer em terrenos xerofílicos, i.e baixa humidade e expostos ao sol [7]. Será então esta espécie um possível indicador de desertificação? Existirão igualmente espécies que indiquem zonas de ISD baixo?

Com a recolha de mais dados é possível complementar os já existentes, permitindo assim desenvolver um *dataset* mais robusto, bem como o desenvolvimento de algoritmos com uma maior confiança e precisão. Este processo aumentará a eficiência de identificação das espécies vegetais de alguma forma associadas ao processo de desertificação, bem como a compreensão dos padrões espacio-temporais associados.

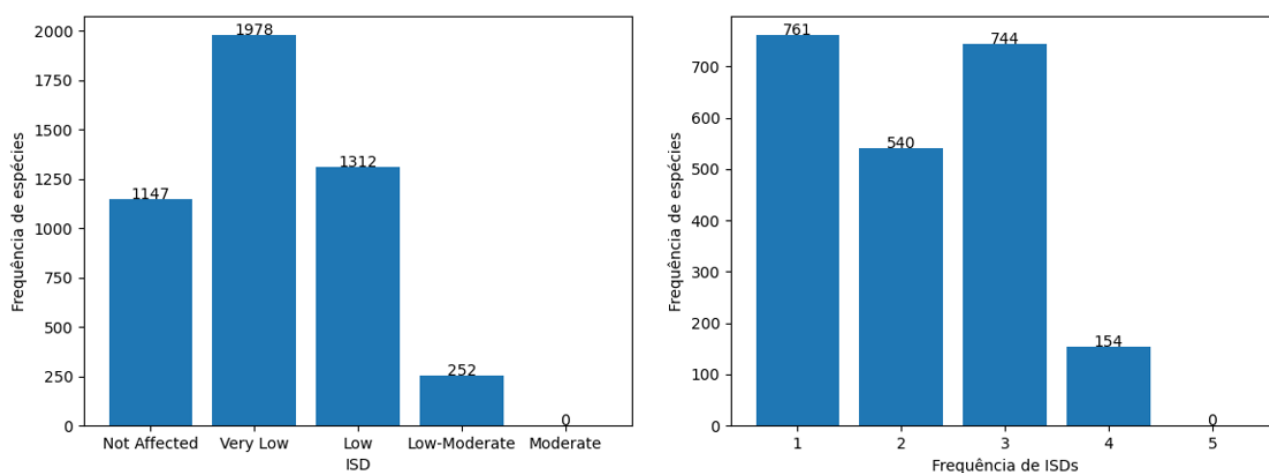


Figure 2: No histograma à esquerda está presente o número de espécies registadas por ISD. À direita, o histograma representa o número de ISDs diferentes em que cada espécie foi registada.

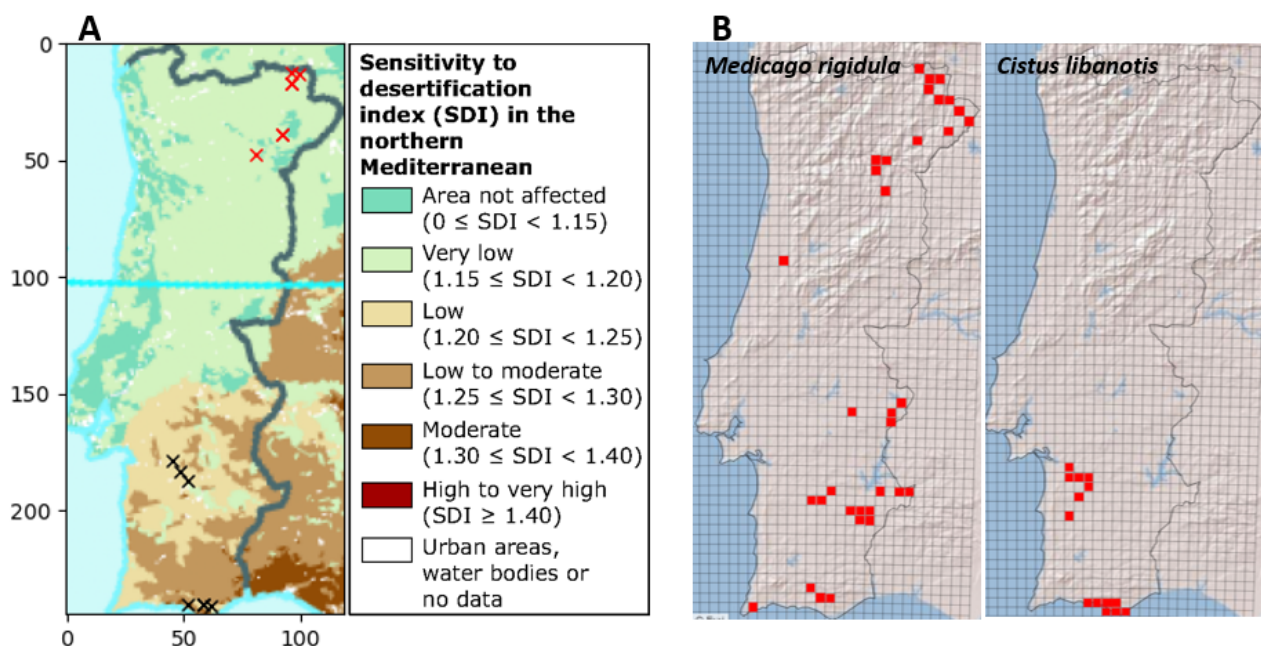


Figure 3: Mapas da localização geográfica da espécie *Medicago rigidula* e *Cistus libanotis*. O mapa à esquerda (A) foi obtido através do conjunto de dados que inclui os respetivos índices de sensibilidade à desertificação. A vermelho está representada a distribuição de *Medicago rigidula* e a preto a de *Cistus libanotis*. O mapa da direita (B) é o mapa disponibilizado pelo *Flora-On* para ambas as espécies.

6

Discussão

A desertificação afeta uma grande área global e tem sérias implicações ambientais, sociais e económicas. No entanto, não existe consenso científico nos indicadores de desertificação devido à complexidade do fenómeno. Os resultados preliminares da Secção 5 mostram que poderá ser possível utilizar algoritmos de *Machine Learning* para identificar padrões na ocorrência de biodiversidade vegetal e indicações de desertificação.

Com base na análise de dados realizada na Secção 5, foram identificadas espécies vegetais que apenas estão presentes apenas em zonas com ISD *Low-Moderate*, bem como em zonas *Very Low* e *Not Affected*. Os resultados sugerem que poderá haver espécies que indiquem tanto a desertificação, assim como o seu contrário. No entanto, é importante realçar que esta análise de dados, por si só, não é suficiente para tirar conclusões definitivas, uma vez que o crescimento das plantas é influenciado pelo pH, tipo de solo, exposição solar, entre outros fatores. Para além disso, a análise da evolução temporal dos fatores e da vegetação deverá ser incorporada nos algoritmos de modo a obter resultados fidedignos, visto que a desertificação trata-se de um processo dinâmico.

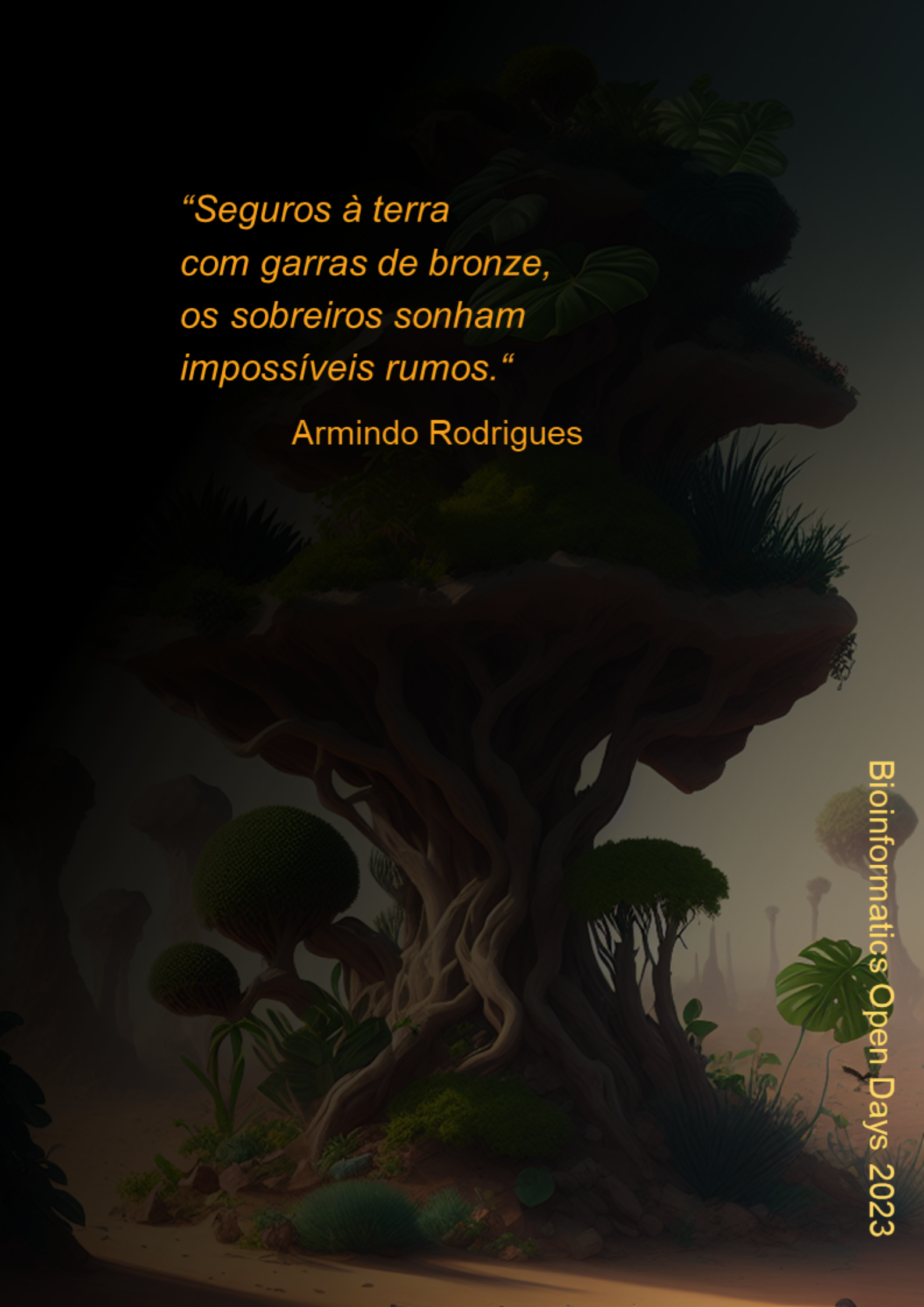
Embora seja necessário um maior, e melhor, *dataset* para chegar a conclusões mais precisas, algoritmos deste tipo têm o potencial de destacar padrões de suscetibilidade. Conhecendo e compreendendo estes padrões espacio-temporais, as áreas em risco poderão vir a ser facilmente identificadas. Se, por outro lado, padrões de resiliência forem identificados, poder-se-á desenhar sistemas agro-florestais eficientes ou de reflorestação, de modo a mitigar os impactos da desertificação nas comunidades biológicas e humanas.

Na Secção 5, a existência de apenas uma espécie foi considerada. No entanto, os algoritmos deverão ser capazes de analisar como conjuntos de espécies interagem no processo de desertificação. Poderão haver espécies que cooperem, sinergeticamente, para a mitigação dos efeitos ou até reversão de desertificação? Deixamos várias questões como esta em aberto ao longo da proposta de projeto. Questões que poderão ser respondidas utilizando o *state-of-the-art* em *Machine Learning*, criando potencialmente uma referência valiosa para a monitorização, análise das causas e prevenção da desertificação no mundo.

References

- [1] United Nations. *Background - Desertification Day*. United Nations. URL: <https://www.un.org/en/observances/desertification-day/background>.
- [2] United Nations. "Report of the United Nations Conference on Environment and Development". In: *Rio de Janeiro I* (June 1992 1992).
- [3] ECA. "Combating desertification in the EU: a growing thread in need for more action". In: *European Court of auditors* 33 (33 2018).
- [4] Lúcio do Rosario. "Indicadores de Desertificação para Portugal Continental". In: *DGRF - Direcção Geral dos Recursos Florestais* (2004).
- [5] Monia Santini et al. "A multi-component GIS framework for desertification risk assessment by an integrated index". In: *Applied Geography* 30 (3 2010). ISSN: 01436228. DOI: 10.1016/j.apgeog.2009.11.003.
- [6] Ebru Gül and Melda Dölarslan. "Distribution and importance of some endemic astragalus I. Species in semi-arid environmentally sensitive areas: A case study from northern turkey". In: *Cerne* 27 (1 2021). ISSN: 01047760. DOI: 10.1590/01047760202127012559.
- [7] David F. Frazão et al. "Cistus ladanifer (Cistaceae): a natural resource in Mediterranean-type ecosystems". In: *Planta* 247 (2 2018). ISSN: 14322048. DOI: 10.1007/s00425-017-2825-2.
- [8] *Combating land degradation through reforestation*. UNEP-WCMC. URL: <https://www.unep-wcmc.org/en/news/combating-land-degradation-through-reforestation>.
- [9] Paulo Godinho-Ferreira, Anamaria Azevedo, and Francisco Rego. "Carta da Tipologia Florestal de Portugal Continental". In: *Silva Lusitana* 13 (1 2005).
- [10] Carla S.S. Ferreira et al. "Soil degradation in the European Mediterranean region: Processes, status and consequences". In: *Science of the Total Environment* 805 (2022). ISSN: 18791026. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150106.
- [11] Claudio Heitor. *Seca E Desertificação em portugal - IPMA*. July 2020. URL: <https://www.confagri.pt/seca-desertificacao-portugal-ipma/>.
- [12] Helmut Geist. *The causes and progression of desertification*. 2017. DOI: 10.4324/9781315240855.
- [13] A. Sepehr et al. "Quantitative assessment of desertification in south of Iran using MEDALUS method". In: *Environmental Monitoring and Assessment* 134 (1-3 2007). ISSN: 01676369. DOI: 10.1007/s10661-007-9613-6.
- [14] HELMUT J. GEIST and ERIC F. LAMBIN. "Dynamic Causal Patterns of Desertification". In: *BioScience* 54 (9 2004). ISSN: 0006-3568. DOI: 10.1641/0006-3568(2004)054[0817:dcpod]2.0.co;2.
- [15] J. Grunblatt, W. K. Ottichilo, and R. K. Sinange. "A GIS approach to desertification assessment and mapping". In: *Journal of Arid Environments* 23 (1 1992). ISSN: 01401963. DOI: 10.1016/s0140-1963(18)30543-3.
- [16] Yansui Liu, Jay Gao, and Yanfeng Yang. "A Holistic Approach Towards Assessment of Severity of Land Degradation Along the Great Wall in Northern Shaanxi Province, China". In: *Environmental monitoring and assessment* 82 (Apr. 2003), pp. 187–202. DOI: 10.1023/A:1021882015299.
- [17] David Mouat et al. "Desertification Evaluated Using an Integrated Environmental Assessment Model". In: *Environmental Monitoring and Assessment* 48 (Nov. 1997), pp. 139–156. DOI: 10.1023/A:1005748402798.
- [18] Li Fang et al. "Sandy desertification change and its driving forces in western Jilin Province, North China". In: vol. 136. 2008. DOI: 10.1007/s10661-007-9693-3.
- [19] A. Gad and I. Lotfy. "Use of remote sensing and GIS in mapping the environmental sensitivity areas for desertification of Egyptian territory". In: *eEarth Discussions* 3 (2 2008). DOI: 10.5194/eed-3-41-2008.
- [20] J. Hill et al. "Mediterranean desertification and land degradation. Mapping related land use change syndromes based on satellite observations". In: *Global and Planetary Change* 64 (3-4 2008). ISSN: 09218181. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2008.10.005.

- [21] Massimo Dragan et al. "Application and validation of a desertification risk index using data for Lebanon". In: *Management of Environmental Quality* 16 (Aug. 2005), pp. 309–326. DOI: 10.1108/14777830510601190.
- [22] Achim Röder et al. "Trend analysis of Landsat-TM and -ETM+ imagery to monitor grazing impact in a rangeland ecosystem in Northern Greece". In: *Remote Sensing of Environment* 112 (June 2008), pp. 2863–2875. DOI: 10.1016/j.rse.2008.01.018.
- [23] Adel Shalaby and Ryutaro Tateishi. "Remote sensing and GIS for mapping and monitoring land cover and land-use changes in the Northwestern coastal zone of Egypt, Appl". In: *Applied Geography* 27 (Jan. 2007), pp. 28–41. DOI: 10.1016/j.apgeog.2006.09.004.
- [24] Ding Huo-ping, Chen Jian-ping, and Wang Gong-wen. "A model for desertification evolution employing GIS with cellular automata". In: 2009. DOI: 10.1109/ICCMS.2009.39.
- [25] Javier Ibáñez, Jaime Martínez Valderrama, and Juan Puigdefábregas. "Assessing desertification risk using system stability condition analysis". In: *Ecological Modelling* 213 (2 2008). ISSN: 03043800. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2007.11.017.
- [26] Ulf Helldén. "A coupled human-environment model for desertification simulation and impact studies". In: *Global and Planetary Change* 64 (3-4 2008). ISSN: 09218181. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2008.09.004.
- [27] Javier Ibañez, Jaime Martinez, and Susanne Schnabel. "Desertification due to overgrazing in a dynamic commercial livestock–grass–soil system". In: *Ecological Modelling - ECOL MODEL* 205 (July 2007), pp. 277–288. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2007.02.024.
- [28] Luca Salvati, Marco Zitti, and Tomaso Ceccarelli. "Integrating economic and environmental indicators in the assessment of desertification risk: A case study". In: *Applied Ecology and Environmental Research* 6 (Aug. 2007).
- [29] K.R. Sasikala and M. Petrou. "Generalised fuzzy aggregation in estimating the risk of desertification of a burned forest". In: *Fuzzy Sets and Systems* 118 (Feb. 2001), pp. 121–137. DOI: 10.1016/S0165-0114(99)00064-0.
- [30] Remus Prăvălie, Cristian Patriche, and Georgeta Bandoc. "Quantification of land degradation sensitivity areas in Southern and Central Southeastern Europe. New results based on improving DISMED methodology with new climate data". In: *Catena* 158 (2017). ISSN: 03418162. DOI: 10.1016/j.catena.2017.07.006.
- [31] Jaume Fons-Esteve and Ferran Páramo. *Mapping sensitivity to desertification (DISMED) Final report*. 2003.
- [32] Carapeto, André. *Flora-On: occurrence data of the flora of mainland Portugal*. pt. 2016. DOI: 10.15468/GI6AUM. URL: <http://www.gbif.org/dataset/7fe3eb5c-42bd-49d7-a30b-82c353ef6575>.



*“Seguros à terra
com garras de bronze,
os sobreiros sonham
impossíveis rumos.”*

Armando Rodrigues