

OBSERVATÓRIO DO SOLO

Desenvolvimento e implementação do sistema nacional de avaliação e monitorização da saúde e qualidade do solo: Grelha de monitorização nacional

Índice

1. Introdução	2
2. Densificação da grelha LUCAS.....	3
3. Carta de solos 1:100000	6
4. Distritos de solos	9
5. Bibliografia	15

1. Introdução

A Diretiva de Monitorização dos Solos da União Europeia (DMS) (Direção-Geral do Ambiente, 2023) prevê a definição de distritos de solo (unidades administrativas) e das respetivas Unidades de Solo (unidades de monitorização com um nível mínimo de harmonização, US) como áreas para monitorização e implementação de uma gestão sustentável. A tipologia do solo a nível nacional, combinada com uma ampla diversidade de uso e ocupação do solo, torna muito difícil estabelecer e definir esses limites. É importante salientar que esses distritos devem constituir as unidades básicas de governação para efeitos de gestão do solo e adoção de medidas para cumprir os requisitos estabelecidos na diretiva proposta, especialmente no que diz respeito à monitorização e avaliação da saúde do solo.

A uniformidade do solo dentro das US é crucial para uma gestão sustentável do solo, produtividade a longo prazo e para evitar problemas ambientais. O estudo da variação espacial do estado de fertilidade do solo é essencial para atividades sustentáveis (Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2020). Nas últimas décadas, os avanços registados nas técnicas estatísticas e nas abordagens de modelação permitiram a delimitação precisa de zonas agrícolas usando novos métodos, como aprendizagem automática (*machine Learning*), Sistemas de Informação Geográfica (SIG), deteção remota e geoestatística (Oldoni et al., 2019).

Várias abordagens numéricas foram propostas para a delimitação de US com base nesses dados, nomeadamente, a análise de clusters fuzzy k-means (Mojtaba Zeraatpisheh et al., 2020), o algoritmo de clustering fuzzy c-means e a análise de componentes principais (ACP) (Davatgar et al., 2012). Khosla et al. (2008) mencionaram que as US geralmente são melhor definidas utilizando várias fontes de dados remotos em vez de apenas uma, e Vitharana et al. (2008) notaram que a classificação por ACP e k-means se tornou um método numérico padrão para determinar as US.

No entanto, a seleção da técnica/abordagem apropriada depende dos propósitos para a determinação das US. Estudos anteriores documentaram a aplicação da delimitação de US para sistemas agrícolas. Estes utilizaram várias fontes de dados ambientais e de solo, como fatores pedo-geomorfológicos (Keshavarzi et al., 2019), nutrientes do solo (Jiang et al., 2011) e propriedades intrínsecas do solo (por exemplo, condutividade elétrica, pH, distribuição do tamanho das partículas, matéria orgânica do solo, capacidade de troca catiónica, azoto, fósforo e potássio) (Mojtaba Zeraatpisheh et al., 2020).

A principal razão para o desenvolvimento das US é a delimitação de subáreas homogéneas. No entanto, alguns testes estatísticos, comumente utilizados para

determinar US, como a análise de variância de uma via, apenas consideram propriedades individuais do solo. Kerry et al. (2021) investigaram se as US identificadas usando dados remotos, topográficos e de produtividade eram indicados para gerir vários nutrientes ou propriedades do solo ao mesmo tempo e concluíram que, embora as zonas obtidas pudessem ser usadas para gerir mais do que uma propriedade, não eram verdadeiramente multipropósito e não podiam ser usadas para gerir todas as propriedades simultaneamente.

Assim, é necessário um método dinâmico que possa avaliar as interações das propriedades do solo e várias propriedades do solo em conjunto. A avaliação da qualidade do solo pode ser considerada de forma eficaz para avaliar a qualidade e sustentabilidade dos ecossistemas. Büneemann et al. (2018). consideram a interação de diferentes variáveis (por exemplo, propriedades do solo) e baseiam-se em diferentes bases de referência e limites para classificar o solo em diferentes níveis de qualidade do solo. A avaliação da qualidade do solo pode ser usada como uma estrutura para avaliar a homogeneidade das US delimitadas (de Oliveira et al., 2019). De facto, as US baseadas em áreas com qualidade do solo relativamente homogénea devem ser sustentáveis por mais tempo.

Relativamente à homogeneidade das SU dentro dos distritos de solo, a primeira versão da DMS (Direção-Geral do Ambiente, 2023) sugere o uso do algoritmo geoestatístico Bethel para lidar com (poucas) propriedades do solo e garantir interações das propriedades do solo com um coeficiente de variação inferior a 5% dentro de cada US.

Utilizando estratégias de coparticipação (envolvendo representantes da ciência, tomada de decisão política, cidadãos e outras partes interessadas), pode-se desenvolver uma nova metodologia para a definição de SU, considerando as especificidades do território nacional em termos de diversidade do solo, variação climática, uso e ocupação do solo e sistema agrícola praticado, que são alguns dos fatores a ter em conta na sua definição.

2. Densificação da grelha LUCAS

A DMS requer a realização de medições regulares do solo em amostras recolhidas *in-situ*, com base nos descritores e metodologias relevantes referidos nos Artigos 7 e 8, para apoiar os Estados-Membros (EM) na monitorização da saúde dos solos. A DMS prevê a monitorização e a comunicação obrigatórias do solo. Esta monitorização deve abranger os parâmetros e indicadores necessários e suficientes para avaliar a saúde do solo, sendo estatisticamente representativa, consistente e comparável no espaço e no tempo.

Portugal não dispõe de um sistema deste tipo. Em Portugal, existem alguns dados, dispersos e de difícil acesso, relativos a alguns dos parâmetros para a avaliação do

estado de saúde do solo (e.g., metais pesados, salinização). No entanto, em geral, são fragmentados, incompletos e, na maioria, não harmonizados, utilizando diferentes metodologias realizadas por diferentes laboratórios.

Face ao exposto, conclui-se que atualmente não existe uma monitorização sistemática e abrangente do solo que cubra indicadores significativos para avaliar a relevância das práticas de gestão e das políticas implementadas com vista a uma gestão sustentável. A iniciativa EU Land Use-Cover Area Frame Survey (LUCAS) é o único sistema de monitorização que fornece medições de campo harmonizadas e sistemáticas em Portugal; no entanto, cobre apenas cerca de 470 pontos em todo o continente.

Por conseguinte, é necessário um sistema integrado para monitorizar e avaliar o estado do solo, a sua evolução e as tendências resultantes das práticas de gestão do solo e das políticas implementadas, utilizando indicadores, parâmetros e metodologias homogéneas, em conformidade com o que é recomendado a nível europeu. O Observatório Europeu do Solo foi recentemente lançado de acordo com a Diretiva INSPIRE e em ligação com a comunicação nacional ao abrigo da Diretiva Nitratos e do Regulamento LULUCF, com base na metodologia LUCAS, que será utilizada na implementação da monitorização a integrar no Observatório do Solo.

O Serviço de Estatística da União Europeia (EUROSTAT) faz um levantamento regular do uso e ocupação do solo (Land Use - Land Cover – LULC) e mudanças ao longo do tempo em toda a União Europeia (com base nas decisões 1445/2000/CE do Parlamento Europeu e 22/5/2000 do Conselho, e posteriormente atualizadas pela Decisão 2066/2003/CE), com o objetivo de publicar estatísticas sobre LULC, e meio ambiente também conhecido como o inquérito LUCAS. Desde 2006 que o EUROSTAT organiza este inquérito a cada 3 anos, tendo já sido realizado para os anos 2006, 2009, 2012, 2015 e 2018. Para Portugal foram realizados todos os inquéritos exceto o primeiro, em 2006, com uma amostragem de 476 pontos em todo o país, o que é manifestamente insuficiente para a correta monitorização da saúde do solo e dos resultados da implementação das práticas de gestão.

Os dados das análises ao solo realizadas periodicamente nas parcelas das explorações agrícolas, em produção integrada e em modo de produção biológica, que beneficiam de apoios no âmbito da Política Agrícola Comum, poderiam contribuir para monitorização do estado de saúde de solo das áreas agrícolas do país. Para tal, será necessário garantir a fiabilidade e harmonização dos procedimentos de colheita das amostras, dos métodos analíticos e a recolha de dados num sistema de informação nacional. Esses dados, conjugados com a informação das práticas culturais em cada parcela, que os agricultores são obrigados a registar, permitiria avaliar o impacto das mesmas na saúde do solo.

Para este fim, foi realizada uma análise comparativa entre LUCAS e Ortoimagens e o Mapa Oficial de Uso e Ocupação do Solo (COS), com o Inventário Florestal Nacional (IFN) e com a informação das parcelas de referência identificadas no Sistema de Identificação de Parcelas (SIP). Com isto, complementou-se o sistema nacional de monitorização

LUCAS através da realização de uma campanha piloto em 100 novos pontos localizados no continente português.

Primeiramente foi necessário realizar trabalho de campo para recolha de amostras de solo, onde foram seleccionados aleatoriamente 100 locais ao longo de Portugal Continental (Figura 1) de modo a adensar as 476 amostras já existentes e recolhidas pelo programa LUCAS. As mesmas são recolhidas com dois métodos de amostragens diferentes referidos no Manual de colheita das amostras e de dados no campo (Campanha Piloto), acompanhado de um curso de curta duração lecionado pelo Professor João Coutinho da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro em agosto de 2023.

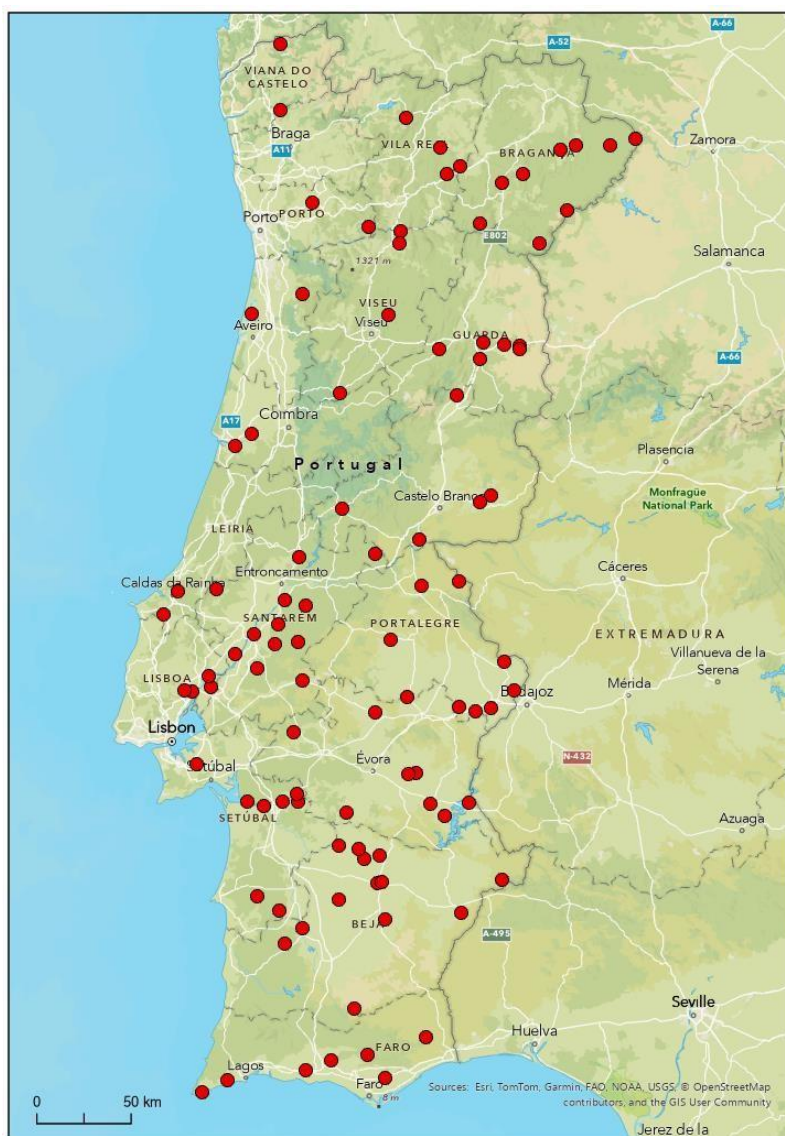


Figura 1 – Novos pontos (100) de amostras de solo LUCAS

As recolhas foram descritas através de uma ficha de campo que foi integrada na base de dados e associadas à respectiva localização (Figura 2).

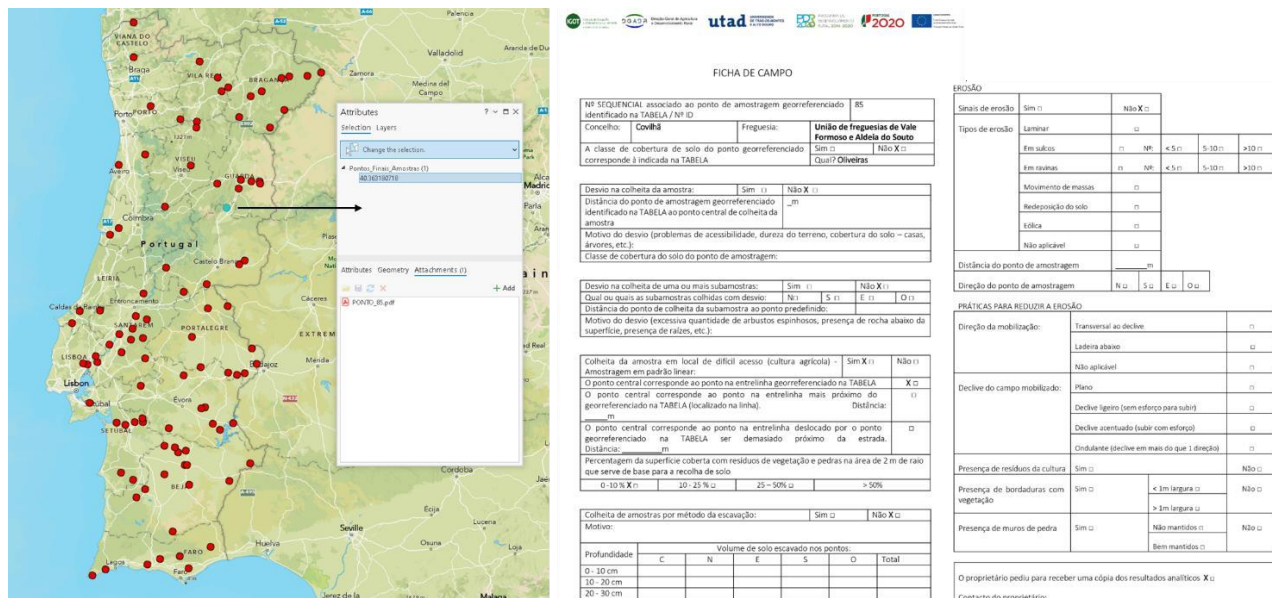


Figura 2 – Base de dados dos novos pontos LUCAS

Após o trabalho de campo, foi necessário realizar a preparação de alguns dados, nomeadamente corrigir erros topológicos das cartas de solos existentes para o Norte de Portugal Continental à escala 1:25000 para unir com a carta de solos já existente para o Sul do país. O mesmo se fez para as cartas existentes à escala 1:100000. Deste modo obter-se uma carta única de solos com a escala de 1:100000.

Na mesma, procedeu-se à transposição dos tipos de solos para o sistema de classificação de solos internacionais, *World Reference Base for Soil Resources* (WRB) da FAO, obtendo-se uma classificação de solos internacional para o território continental.

3. Carta de solos 1:100000

As unidades de solo homogêneas resultantes da interseção de dados categóricos (por exemplo, uso e ocupação do solo, tipos de solo, clima, etc.) serão utilizadas como critérios para homogeneidade. A DMS estabelece que algumas das camadas devem ser do tipo de solo, conforme definido na *World Reference Base for Soil Resources* (WRB). O Mapa de Solos de Portugal (escala de 1:1.000.000) data de 1971 e utiliza um sistema de classificação que não foi atualizado e está desajustado em relação à situação de referência atual. Portanto, foi essencial atualizar este mapa e usar um sistema de classificação universal que se adapte às necessidades presentes e futuras.

Para tal, foi fundamental densificar e melhorar a caracterização das unidades cartográficas de solo em áreas onde as lacunas ou deficiências na sua caracterização são evidentes, respondendo às exigências de unificação e disponibilizando esta informação, através da padronização utilizando o sistema WRB para Recursos de Solos. Esta ação é essencial para fornecer informações unificadas e consistentes, suportadas por uma base cartográfica de referência, a fim de evitar a subjetividade na interpretação do recurso solo, associada ao surgimento de informações separadas sem a qualidade adequada.

O Mapa Geral de Solos deve basear-se numa síntese prévia do relevo e das formações geológicas (ou Litologia, ver Tarefa 2), no Modelo Digital do Terreno (MDT), no Mapa de Ocupação do Solo (COS), no Mapa de Unidades de Paisagem e nos Mapas de Solos existentes (1:100.000 para o Norte e 1:25.000 para o Sul e Centro). A reorganização e síntese da cartografia destas regiões são relativamente facilitadas pelo facto de que a cartografia de solos existente (à escala de 1:100.000) foi realizada no contexto conceptual das unidades de terra, através da delimitação prévia de unidades fisiográficas homogéneas em termos de clima, geologia e relevo.

Neste contexto, para apoiar a diferenciação das unidades cartográficas de solo, foi primeiro necessário delimitar unidades fisiográficas homogéneas à escala de 1:100.000 - para as tornar compatíveis com as restantes regiões do país - baseando-se, em particular, no MDT e na respetiva informação litológica (Figura 3). Ao mesmo tempo, é essencial reorganizar, densificar e reclassificar a informação relativa às classes de solo para permitir a sua integração nas bases cartográficas do MDT (áreas fisiográficas homogéneas). Naturalmente, a reorganização e atualização da informação implica a criação de tabelas de equivalência das classes de solo (a partir da cartografia 1:25.000) e a sua integração num sistema de correspondência com a WRB (Figura 4).

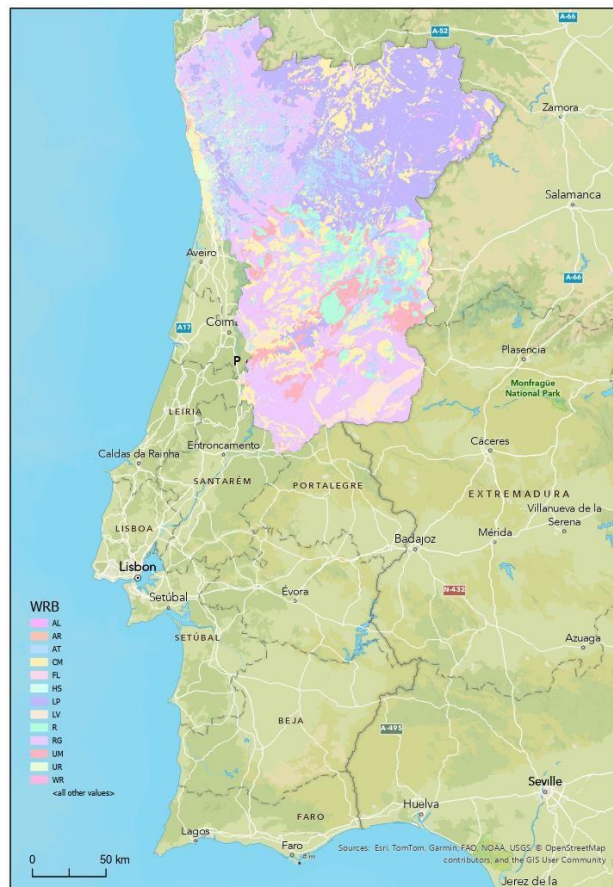


Figura 3 – Reorganização WRB da cartografia 1:100 000

A reorganização e densificação da informação serão necessariamente baseadas na otimização de sistemas de extrapolação através de inferências (McBratney et al., 2002). Neste contexto, a otimização da informação geológica (mais especificamente litológica) torna-se particularmente importante para aumentar a capacidade de estabelecer relações entre esta e as unidades de relevo e, obviamente, as unidades de solo. O sistema de extrapolação a ser desenvolvido será mais rigoroso quanto maior for o rigor da base litológica e do relevo, ou seja, das unidades fisiográficas homogêneas a serem delimitadas.

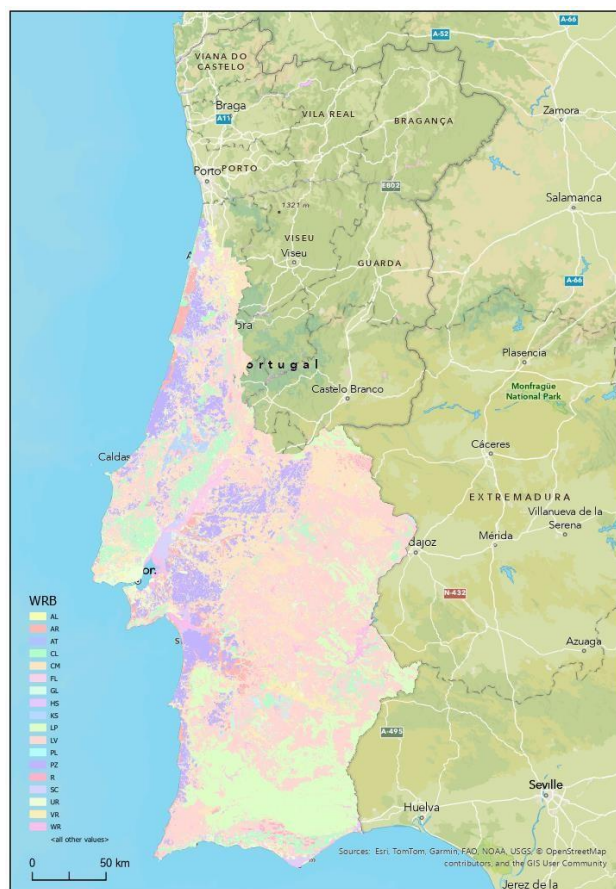


Figura 4 – Reorganização WRB da cartografia 1:25 000

4. Distritos de solos

Cada vez mais os solos são considerados como decisivos no que toca à disponibilização de serviços dos ecossistemas no ambiente terrestre, pelo que são um recurso natural essencial suscetível à degradação rápida e não renovável à escala de tempo de vida humana, sendo que seriam necessários milhares de anos apenas para obter uns centímetros de solo. Os solos fornecem alimentos, mas também fornecem biomassa, fibras e matérias-primas, assim como, também detêm funções de regulação, dos ciclos de água, do carbono e dos nutrientes, que por sua vez possibilita a vida na terra. Um solo é considerado saudável quando integra parte dos objetivos climáticos e de biodiversidade, assim como, objetivos económicos a longo prazo.

Os solos estão sujeitos a diversas ameaças, como, a erosão, a compactação, a diminuição da matéria orgânica, a perda de biodiversidade, a salinização e a impermeabilização.

Uma estratificação/classificação consistente do território em estratos relativamente homogéneos resulta num trabalho comparável do ponto de vista ecológico ambiental.

O EnS (*Environmental Stratification of Europe*) dá uma estratificação apropriada para a Europa tendo em consideração o ambiente biogeofísico (Alterra Report 2281, 2012).

O mapa elaborado para toda a Europa, com a divisão da mesma em unidades de solos à escala 1:5000000, foi elaborado pelo *Federal Institute for Geosciences and Natural Resources* (BGR) em parceria com *Joint Research Center* (JRC, Ispra). O mesmo tem como objetivo suportar mapas elaborados a nível nacional para mais tarde integrar numa base de dados europeia à escala 1:250000. A União Europeia considera que as unidades de solos são unidades geográficas naturais e inter-regionais, organizadas de forma hierárquica, que realizam a maior agregação espacial possível tendo em consideração as tipologias de solo. Devido à escala a que as mesmas foram realizadas, 1:5000000, as fronteiras das regiões são generalizadas, por esse motivo, pretendem remapear à escala 1:250000 para que as delimitações das regiões de solo sejam mais precisas. Para a realização do mapa das regiões de solo na União Europeia foram utilizados dados relativos ao clima, hidrografia, relevo, geologia e vegetação ao nível europeu (European Union, 2023).

A Alemanha, detém uma rede de informações acerca dos solos presentes no território nacional elaborada pela *Federal Institute for Geosciences and Natural Resources* (BGR), a mesma entidade que participou na realização do mapa das regiões de solo para a UE. Esta rede de informação inclui sistemas de informação sobre os solos presentes no país, com o objetivo de produzir informação acessível tanto a nível nacional como internacional. A informação principal da BGR são, bases de dados de mapas, uma base de dados com perfis e dados analíticos sobre os solos e uma compilação de métodos e funções utilizados como base. O principal objetivo da BGR é desenvolver mapas de solo nacionais, assim como, bases de dados que os sustentem, que contenham informação acerca de como se distribuem estes solos e as suas propriedades na Alemanha (BGR, s.d).

Segundo o artigo 4 do capítulo 1 da Diretiva do Parlamento Europeu “Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on Soil Monitoring and Resilience (Soil Monitoring Law)”, os estados membros devem estabelecer distritos de solos ao longo do território sendo que o mínimo que cada estado membro pode estabelecer é correspondente ao número de NUTS 1 que o território em questão tem estabelecido no regulamento nº1059/2003. Para se estabelecer limites geográficos de distritos de solos os estados membros têm de ter em consideração as unidades administrativas já existentes e seguir alguns parâmetros para se obter homogeneidade no território. Os parâmetros a seguir são ter os tipos de solo de acordo com o WRB (*World Reference Base for Soil Resources*), ter em consideração as condições climáticas, utilizar o Alterra Report “Descriptions of the European Environmental Zones and Strata” para se obter as zonas ambientais homogêneas e por fim utilizar a ocupação e uso do solo utilizadas pelo programa LUCAS.

Para esta tarefa, a UE disponibilizou 17 camadas (Tabela 1) de dados (Densidade aparente na camada de 0-10 cm; Densidade aparente na camada de 10-20 cm;

Densidade aparente na camada de 20-30 cm; Capacidade de troca catiónica; Fragmentos grosseiros; Corine Land Cover (CLC); Teor de nitrogénio; Teor de carbono orgânico; pH do solo; Teor de fósforo; Textura do solo; Mapa de erosão do solo RUSLE; Concentração de cobre no solo; Concentração de cádmio no solo; Concentração de mercúrio no solo; Concentração de zinco no solo e Carbonato de cálcio no solo) com uma resolução espacial de 100 m². Neste caso, com exceção do CLC (temos o mapa de uso e ocupação do solo – COS), Portugal não tem dados melhores disponíveis. Existe também a possibilidade de incluir a distribuição da biodiversidade do solo (Köninger et al., 2023). Esta camada está a ser processada pelo Joint Research Centre (JRC) utilizando dados de Observação da Terra (Sentinel 1 e 2, Landsat, etc.), clima (Worldclim) e outros, para mapear a diversidade de bactérias e fungos em toda a UE. No entanto, até agora os resultados são apenas razoáveis (precisão = 0,4 R²).

Tabela 1 – Informação disponível para a primeira fase da modelação de unidades de solo

Camada	Descrição
PT_BD010.tif	Bulk density in the 0-10 cm layer
PT_BD1020.tif	Bulk density in the 10-20 cm layer
PT_BD2030.tif	Bulk density in the 20-30 cm layer
PT_CEC.tif	Cation exchange capacity
PT_CF.tif	Coarse fragments
PT_CLC.tif	Corine Land Cover class
PT_N.tif	Nitrogen content
PT_NUTS0.tif	NUTS0 region
PT_NUTS1.tif	NUTS1 region
PT_NUTS2.tif	NUTS2 region
PT_OC.tif	Organic carbon content
PT_pH.tif	Soil pH
PT_P.tif	Phosphorus content
PT_TXT.tif	Soil texture
PT_RUSLE.tif	RUSLE soil erosion map
PT_Cu.tif	Soil copper concentration
PT_Cd.tif	Soil cadmium concentration
PT_Hg.tif	Soil mercury concentration
PT_Zn.tif	Soil zinc concentration
PT_CaCO3.tif	Soil calcium carbonate

O primeiro passo foi definir as unidades de solo homogéneas resultantes da interseção de dados categóricos (como uso e ocupação do solo, tipos de solo, clima, etc.). Estas unidades são utilizadas para o desenho de monitorização e avaliação estatística da saúde do solo. No entanto, como a Lei de Monitorização dos Solos permite o uso dos

melhores dados disponíveis, utilizaremos a litologia e Unidades Homogéneas de Resposta Climática para criar a malha de polígonos irregulares que servirá de base para o procedimento de modelação. Como os distritos de solo são unidades administrativas ligadas a autoridades e à gestão do solo, será necessário incorporá-los nesta malha, mas a equipa precisará de decidir, em conjunto com a Parceria Portuguesa de Solos (PPS), se a segmentação será feita ao nível NUTS I, II ou III (Figura 5).

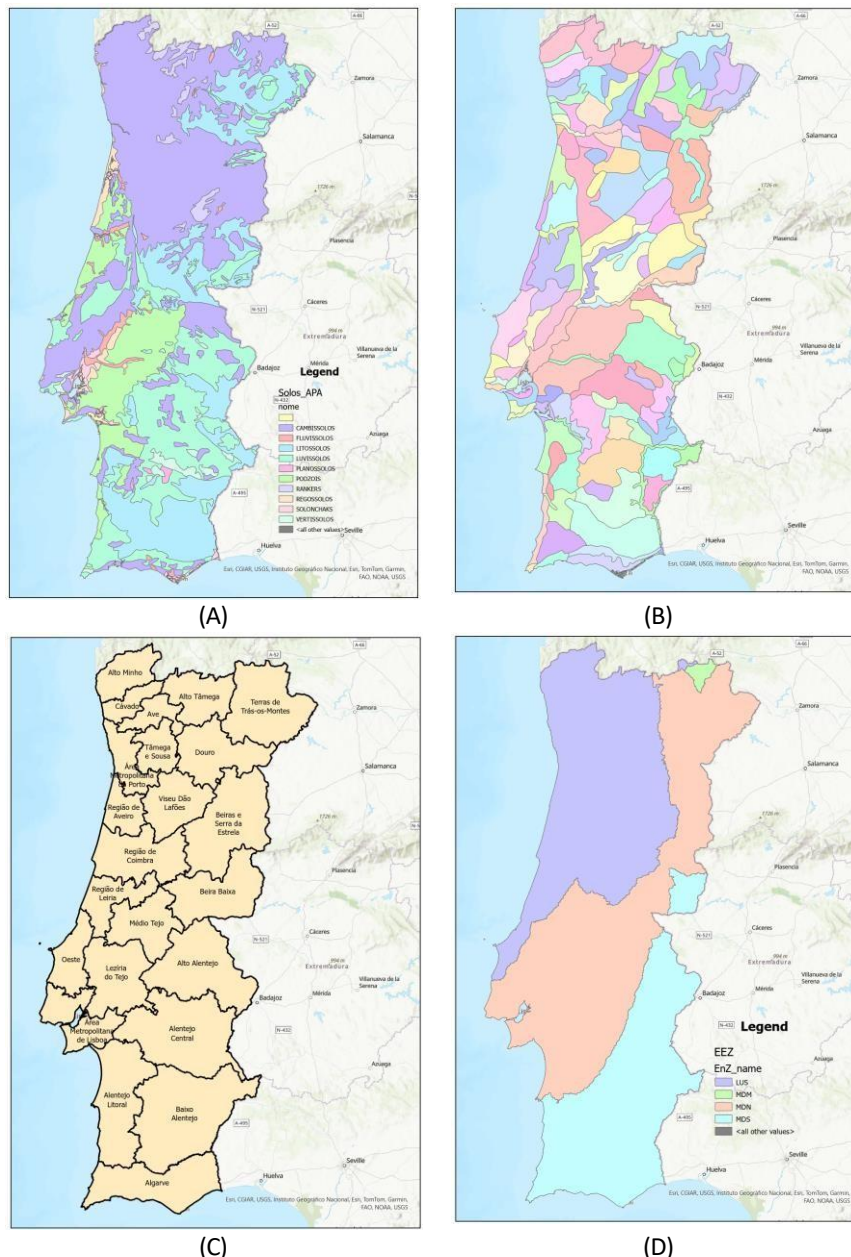


Figura 5 – Unidades categóricas de segmentação territorial: (A) Solos (1:1 000 000), (B) Unidades de paisagem, (C) NUTS III e (D) Zonas ambientais

Para a modelação, testaremos a Análise de Componentes Principais tradicional (Figura 6A) e o Fator de Inflação da Variância (Viana et al., 2021) para reduzir a variância dos dados e a multicolinearidade. Depois disso, os polígonos da malha serão organizados em clusters (zonas de gestão de unidades de solo homogêneas). Vários algoritmos de clustering (M Zeraatpisheh et al., 2022) serão testados (Figura 6B), como DBSCAN (Clustering Espacial Baseado em Densidade de Aplicações com Ruído), Mean Shift, Clustering Hierárquico Aglomerativo, Modelos de Mistura Gaussiana (GMM), Clustering Espectral, Clustering por Picos de Densidade (DPC), OPTICS (Ordering Points To Identify the Clustering Structure), Deep Clustering e X-means.

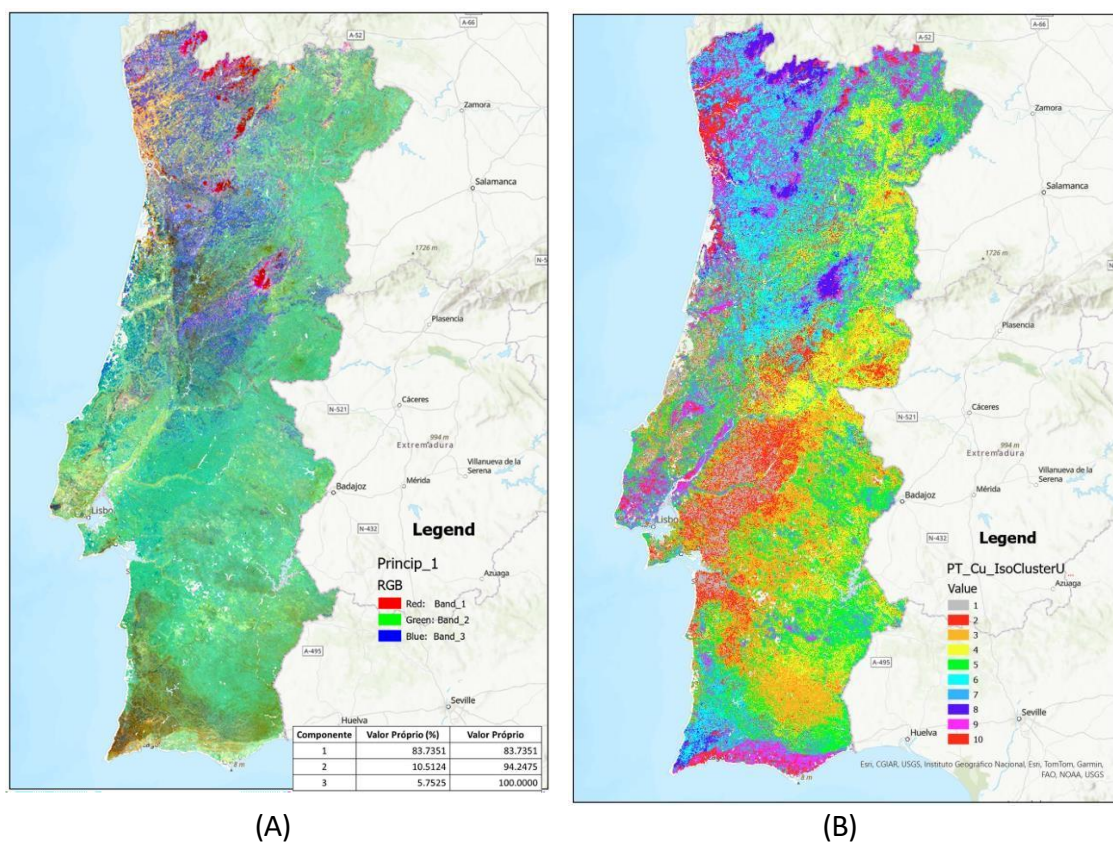


Figura 6 – Agregação e classificação de dados: (A) Análise de componentes principais (ACP), (B) Classificação ISODATA de 10 clusters

A escolha do melhor número de clusters a adotar também poderá ser estimada em função do índice de performance de fuzziness (FPI) e da entropia de partição modificada (MPE). O FPI indica o grau de separação entre as observações e os clusters gerados (Fridgen et al., 2004). A MPE indica o grau de desordem criado entre os clusters. Os seus valores variam entre 0 e 1, e quanto mais próximo de 0, melhor é a divisão dos clusters. A partir da escolha do melhor número de clusters, será elaborado o mapa das zonas de

gestão de unidades de solo e as diferenças significativas entre zonas serão avaliadas através da análise de variância.

A DMS permite integrar as amostras LUCAS nas amostras para monitorização da saúde do solo dentro das unidades de solo homogéneas. Estas amostras podem ser muito importantes, uma vez que as primeiras experiências realizadas em colaboração com o JRC, utilizando o algoritmo Bethel (com um coeficiente de variação de 5%), indicam a necessidade de 6000 amostras para Portugal, sendo que a UE apenas apoia o custo de 20% delas (em discussão na Revisão III da Lei). A Revisão III também permite que os EM tenham alguma liberdade para escolher métodos alternativos. Portanto, outros métodos de ponta serão testados e comparados (Lawrence et al., 2020). Aplicaremos métodos como Amostragem Estratificada em Cluster (e.g., Alocação de Neyman e Estimador de Hansen-Hurwitz), Amostragem de Percurso Aleatório (e.g., Algoritmo de Metropolis-Hastings), Amostragem por Importância (e.g., Algoritmo de Langevin ajustado por Metropolis e métodos de Monte Carlo Sequenciais), Amostragem Adaptativa (e.g., Otimização Bayesiana e Algoritmo de Limite Superior de Confiança), Aprendizagem Ativa (e.g., Query-By-Committee e Amostragem de Incerteza) e Amostragem Preservadora de Privacidade Diferencial (e.g., Mecanismos de Laplace e Exponenciais). A Tabela 2 mostra o resultado de diversas experiências de acordo com diferentes unidades e/ou variáveis.

Tabela 2 – Número de pontos de monitorização de acordo com diferentes parâmetros

Unidades de base	Variáveis	Nº de pontos
Carta de Solos da APA (1:1000000)	PT_BD010, PT_Cu, PT_N, PT_OC, PT_P, PT_pH	395
	PT_CLC_simple, PT_BD010, PT_Cu, PT_N, PT_OC, PT_P, PT_pH	400
Unidades de Paisagem (DGT)	PT_BD010, PT_Cu, PT_N, PT_OC, PT_P, PT_pH	877
	PT_CLC_simple, PT_BD010, PT_Cu, PT_N, PT_OC, PT_P, PT_pH	865
NUTS II	PT_BD010, PT_Cu, PT_N, PT_OC, PT_P, PT_pH	286
	PT_CLC_simple, PT_BD010, PT_Cu, PT_N, PT_OC, PT_P, PT_pH	318
Interseção: NUTS II e Zonas Ambientais	PT_BD010, PT_Cu, PT_N, PT_OC, PT_P, PT_pH	458
	PT_CLC_simple, PT_BD010, PT_Cu, PT_N, PT_OC, PT_P, PT_pH	994

5. Bibliografia

- Alcofarado, M. J., & Matzarakis, A. (2010). Planning with urban climate in different climatic zones. *Geographica*, 57, 5–39.
https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.201057808
- Ballabio, C., Lugato, E., Fernández-Ugalde, O., Orgiazzi, A., Jones, A., Borrelli, P., Montanarella, L., & Panagos, P. (2019). Mapping LUCAS topsoil chemical properties at European scale using Gaussian process regression. *Geoderma*, 355, 113912.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113912>
- Ballabio, C., Panagos, P., & Montanarella, L. (2016). Mapping topsoil physical properties at European scale using the LUCAS database. *Geoderma*, 261, 110–123.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.006>
- Ballabio, C., Panagos, P., Lugato, E., Huang, J.-H., Orgiazzi, A., Jones, A., Fernández-Ugalde, O., Borrelli, P., & Montanarella, L. (2018). Copper distribution in European topsoils: An assessment based on LUCAS soil survey. *Science of The Total Environment*, 636, 282–298. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.268>
- Bunce, R. G. H., Watkins, J. W., Brignall, P., & Orr, J. (1996). A comparison of the environmental variability within the European Union. *Ecological and Landscape Consequences of Land Use Change in Europe*, 82–90.
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Flesskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105–125. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Davatgar, N., Neishabouri, M. R., & Sepaskhah, A. R. (2012). Delineation of site specific nutrient management zones for a paddy cultivated area based on soil fertility using fuzzy clustering. *Geoderma*, 173–174, 111–118.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.12.005>
- de Oliveira, J. F., Mayi, S., Marchão, R. L., Corazza, E. J., Hurtado, S. C., Malaquias, J. V., Tavares Filho, J., Brossard, M., & Guimarães, M. de F. (2019). Spatial variability of the physical quality of soil from management zones. *Precision Agriculture*, 20(6), 1251–1273.
<https://doi.org/10.1007/s11119-019-09639-9>
- Directorate-General for Environment. (2023). Proposal for a Directive on Soil Monitoring and Resilience. https://environment.ec.europa.eu/publications/proposal-directive-soil-monitoring-and-resilience_en
- European Union. (2023). European Data: Soil Regions of the European Union and Adjacent Countries 1:5000000 (WMS). Disponível em:
https://data.europa.eu/data/datasets/f5624c2a-d5be_4810-8d66-c0139d471118?locale=en
- Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR). (s.d). Soil information system FISBo BGR. Disponível em:
https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Boden/Informationsgrundlagen/informationsgrundlagen_node_en.html;jsessionid=68AA1ED251EC6E94EF53A0B011CE8303.internet982
- Fridgen, J. J., Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., Drummond, S. T., Wiebold, W. J., & Fraisse, C. W. (2004). Management Zone Analyst (MZA): Software for Subfield Management Zone Delineation. *Agronomy Journal*, 96(1), 100–108.

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0742319974&partnerID=40&md5=d490d2e15310d5910f097e6e954f9ae5>

- Jiang, H.-L., Liu, G.-S., Wang, R., Liu, S.-D., Han, F.-G., Yang, Y.-F., Ye, X.-F., Zhang, Q.-J., Wang, X.-J., Wang, Z.-H., & Hu, H.-C. (2011). Delineating Site-Specific Quality-Based Management Zones for a Tobacco Field. *Soil Science*, 176(4). https://journals.lww.com/soilsci/fulltext/2011/04000/delineating_site_specific_quality_based_management.8.aspx
- Kerry, R., Ingram, B., & Oliver, M. (2021). Sampling needs to establish effective management zones for plant nutrients in precision agriculture. *Precision Agriculture'21*, 653–660. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-916-9_78
- Keshavarzi, A., Kumar, V., Bottega, E. L., & Rodrigo-Comino, J. (2019). Determining Land Management Zones Using Pedo-Geomorphological Factors in Potential Degraded Regions to Achieve Land Degradation Neutrality. In *Land* (Vol. 8, Issue 6). <https://doi.org/10.3390/land8060092>
- Khosla, R., Inman, D., Westfall, D. G., Reich, R. M., Frasier, M., Mzuku, M., Koch, B., & Hornung, A. (2008). A synthesis of multi-disciplinary research in precision agriculture: site-specific management zones in the semi-arid western Great Plains of the USA. *Precision Agriculture*, 9(1–2), 85–100. <https://doi.org/10.1007/s11119-008-9057-1>
- Königer, J., Ballabio, C., Panagos, P., Jones, A., Schmid, M. W., Orgiazzi, A., & Briones, M. J. I. (2023). Ecosystem type drives soil eukaryotic diversity and composition in Europe. *Global Change Biology*, 29(19), 5706–5719. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/gcb.16871>
- Lawrence, P. G., Roper, W., Morris, T. F., & Guillard, K. (2020). Guiding soil sampling strategies using classical and spatial statistics: A review. *Agronomy Journal*, 112(1), 493–510. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/agj2.20048>
- McBratney, A. B., Minasny, B., Cattle, S. R., & Vervoort, R. W. (2002). From pedotransfer functions to soil inference systems. *Geoderma*, 109(1), 41–73. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00139-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00139-8)
- Metzger, M. J., Bunce, R. G. H., Jongman, R. H. G., Múcher, C. A., & Watkins, J. W. (2005). A climatic stratification of the environment of Europe. *Global Ecology and Biogeography*, 14(6), 549–563. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1466-822X.2005.00190.x>
- Metzger, M. J., Shkaruba, A. D., Jongman, R. H. G., & Bunce, R. G. H. (2012). Descriptions of the European environmental zones and strata (No. 2281). Alterra.
- Mitchell, T. D., Carter, T. R., Jones, P. D., Hulme, M., & New, M. (2004). A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901–2000) and 16 scenarios (2001–2100). *Tyndall Centre for Climate Change Research Working Paper*, 55(0), 25.
- Oldoni, H., Silva Terra, V. S., Timm, L. C., Júnior, C. R., & Monteiro, A. B. (2019). Delineation of management zones in a peach orchard using multivariate and geostatistical analyses. *Soil and Tillage Research*, 191, 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2019.03.008>
- Panagos, P., Ballabio, C., Lugato, E., Jones, A., Borrelli, P., Scarpa, S., Orgiazzi, A., & Montanarella, L. (2018). Potential Sources of Anthropogenic Copper Inputs to European Agricultural Soils. In *Sustainability* (Vol. 10, Issue 7). <https://doi.org/10.3390/su10072380>
- Panagos, P., Jiskra, M., Borrelli, P., Liakos, L., & Ballabio, C. (2021). Mercury in European topsoils: Anthropogenic sources, stocks and fluxes. *Environmental Research*, 201, 111556. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111556>
- Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on Soil Monitoring and Resilience (Soil Monitoring Law). (2023). European Commission,

- 2023/0232. Disponível em: https://environment.ec.europa.eu/publications/proposal-directive-soil-monitoring-and-resilience_en
- Taghizadeh-Mehrjardi, R., Nabiollahi, K., Rasoli, L., Kerry, R., & Scholten, T. (2020). Land Suitability Assessment and Agricultural Production Sustainability Using Machine Learning Models. *Agronomy*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/agronomy10040573>
- Van Eynde, E., Fendrich, A. N., Ballabio, C., & Panagos, P. (2023). Spatial assessment of topsoil zinc concentrations in Europe. *Science of the Total Environment*, 892(February), 164512. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164512>
- Viana, C. M., Santos, M., Freire, D., Abrantes, P., & Rocha, J. (2021). Evaluation of the factors explaining the use of agricultural land: A machine learning and model-agnostic approach. *Ecological Indicators*, 131. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108200>
- Vitharana, U. W. A., Saey, T., Cockx, L., Simpson, D., Vermeersch, H., & Van Meirvenne, M. (2008). Upgrading a 1/20,000 soil map with an apparent electrical conductivity survey. *Geoderma*, 148(1), 107–112. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.09.013>
- Weninger, T., Ramler, D., Bondi, G., Asins, S., O’Sullivan, L., Assennato, F., Astover, A., Bispo, A., Borůvka, L., Buttafuoco, G., Calzolari, C., Castanheira, N., Cousin, I., van den Elsen, E., Foldal, C., Hessel, R., Kadžiulienė, Ž., Kuk, L., Molina, M. J., ... Klimkiewicz-Pawlas, A. (2024). Do we speak one language on the way to sustainable soil management in Europe? A terminology check via an EU-wide survey. *European Journal of Soil Science*, 75(2), e13476. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ejss.13476>
- Zeraatpisheh, M., Bottega, E. L., Bakhshandeh, E., Owliaie, H. R., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Kerry, R., Scholten, T., & Xu, M. (2022). Spatial variability of soil quality within management zones: Homogeneity and purity of delineated zones. *Catena*, 209. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105835>
- Zeraatpisheh, Mojtaba, Bakhshandeh, E., Emadi, M., Li, T., & Xu, M. (2020). Integration of PCA and Fuzzy Clustering for Delineation of Soil Management Zones and Cost-Efficiency Analysis in a Citrus Plantation. *Sustainability*, 12(14). <https://doi.org/10.3390/su12145809>