

Discriminação espacial e temporal de atributos do solo através de análise estatística multivariada: Um caso de estudo em culturas anuais regadas no Sul de Portugal

Spatial and temporal discrimination of soil attributes through multivariate statistical analysis: A case study in irrigated annual crops in South Portugal

Alexandra Tomaz^{1,2,*}, Inês Martins¹, Adriana Catarino¹, Clarisse Mourinha¹, José Dôres¹, Marta Fabião³, Luís Boteta³, João Coutinho⁴, Manuel Patanita^{1,2} e Patrícia Palma^{1,5}

¹ Escola Superior Agrária, Instituto Politécnico de Beja, R. Pedro Soares S/N, 7800-295 Beja, Portugal

² GeoBioTec, NOVA School of Science and Technology, Campus da Caparica, 2829-516 Caparica, Portugal

³ Centro Operativo e de Tecnologia de Regadio, Quinta da Saúde, Apartado 354, 7800-999 Beja, Portugal

⁴ Centro de Química, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Quinta de Prados, 5000-801 Vila Real, Portugal

⁵ Instituto de Ciências da Terra (ICT), Universidade de Évora, 7000-671 Évora, Portugal

(*E-mail: atomaz@ipbeja.pt)

<https://doi.org/10.19084/rca.28414>

RESUMO

Efetou-se o estudo da variabilidade temporal e espacial de variáveis do solo, durante três anos em três parcelas agrícolas com culturas anuais regadas, em duas camadas (0-20 cm e 20-40 cm), recorrendo a Análise Fatorial (FA) e Análise Discriminante (DA). Com a FA agruparam-se os parâmetros observados num menor número de variáveis latentes relacionadas com atributos do solo. A DA foi usada para classificar e identificar os atributos mais influentes na discriminação no tempo e no espaço. A FA realizada para a camada superficial incluiu fatores relacionados com a textura, capacidade de retenção de água e nutrientes, composição química e fertilidade do solo. Na camada subsuperficial, a estrutura fatorial foi semelhante, com quatro fatores relacionados com a textura, composição química, disponibilidade de nutrientes e fertilidade do solo. Os fatores mais influentes na discriminação temporal (datas de amostragem) em ambas camadas foram os relacionados com a composição química. Quanto à diferenciação espacial (parcelas), o fator dominante na camada superficial foi a textura e na camada subsuperficial, a disponibilidade de nutrientes. Os resultados obtidos apresentam potencialidade para a identificação de indicadores de qualidade do solo ou para a avaliação multidimensional e integrada de padrões de variação temporal e espacial de funções do solo resultantes de práticas de gestão ou de processos de degradação.

Palavras-chave: atributos do solo, análise estatística multivariada, análise fatorial, análise discriminante, culturas regadas

ABSTRACT

A study of temporal and spatial variability of soil variables was carried out during three years, in three farm plots with irrigated annual crops, in two layers (0-20 cm and 20-40 cm), using Factor Analysis (FA) and Discriminant Analysis (DA). With FA, the observed parameters were grouped into a smaller number of latent variables related to soil attributes. DA was used to classify and identify the most influential attributes in time and space discrimination. The FA performed for the surface layer included factors related to texture, water and nutrient retention capacity, chemical composition, and soil fertility. In the subsurface layer, the factor structure was similar, with four factors related to texture, chemical composition, nutrient availability, and soil fertility. The most influential factors in temporal discrimination (sampling dates) in both layers were those related to chemical composition. As for the spatial differentiation (plots), the dominant factor in the surface layer was texture and in the sub-surface layer, the availability of nutrients. The results obtained show potential for the determination of soil quality indicators or for the multidimensional and integrated assessment of patterns of temporal and spatial variation of soil functions resulting from management practices or degradation processes.

Keywords: soil attributes, multivariate statistical analysis, factorial analysis, discriminant analysis, irrigated crops

INTRODUÇÃO

O conhecimento das relações entre as práticas culturais e as propriedades do solo pode contribuir para melhor compreender a variabilidade espacial e temporal na produtividade e dos impactos ambientais resultantes dessas práticas (Jagadamma *et al.*, 2008). A complexidade dos processos envolvidos na relação solo-ecossistema dá origem a conjuntos vastos de observações cuja análise implica o uso de ferramentas estatísticas capazes de analisar simultaneamente as variáveis envolvidas. O uso de Análise de Componentes Principais (PCA), Análise Fatorial (FA), Regressão Linear Múltipla (MLR) e/ou Análise Discriminante (DA) tem sido aplicado em variados campos de investigação agrícola (Yeater & Villamil, 2018). Neste trabalho, analisou-se a variabilidade temporal e espacial de parâmetros agronômicos do solo, em três parcelas com culturas anuais regadas, em duas camadas, durante três anos, recorrendo à estatística multivariada (FA e DA), nomeadamente: (i) FA para agrupar os parâmetros observados num menor número de variáveis latentes tradutoras de atributos do solo; (ii) DA para classificar e identificar os atributos dominantes para a discriminação no tempo e no espaço. Esta abordagem integrada e multidimensional pode ser aplicada no desenvolvimento de indicadores de qualidade do solo ou para avaliar padrões de mudança ambiental causada por práticas de gestão agronômica ou outras influências antropogênicas.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo foi desenvolvido entre 2018 e 2020, em três parcelas regadas por *center-pivot* (Pivot 3 (P3), com 13.1 ha, Pivot 4 (P4), com 15.0 ha, e Pivot 5 (P5), com 10.3 ha, localizadas no aproveitamento hidroagrícola Brinches-Enxoé (Alentejo). Em P3 e P5 predominam Cambissolos calcários e Vertissolos crômicos; em P4 os solos são predominantemente Vertissolos pélicos e calcários. Os fertilizantes utilizados foram principalmente formulações contendo azoto (N), fósforo (P₂O₅) e potássio (K₂O) aplicados em fundo, à sementeira (Quadro 1).

Quadro 1 - Dados agronômicos (S - data de sementeira; DTR - dotação total de rega; N - azoto, P2O5 - fósforo e K2O - potássio aplicados; C - data de colheita; Y - Produtividade)

Ano		P3	P4	P5
2018		Girassol	Girassol	Milho
	S	18/04	27/04	18/07
	DTR (mm)	252	461	480
	N (kg/ha)	127	109	202
	P ₂ O ₅ (kg/ha)	34	40	144
	K ₂ O (kg/ha)		12	216
	C	27/08	18/09	17/01
	Y (kg/ha)	3470	4156	5500
2019		Milho	Trevo	Girassol
	S	13/06	20/05	16/05
	DTR (mm)	750	151	357
	N (kg/ha)	253	-	57
	P ₂ O ₅ (kg/ha)	-	88	72
	K ₂ O (kg/ha)	-	-	100
	C	17/11	18/09	15/09
	Y (kg/ha)	11000	1703 kg/ha	3257
2020		Girassol	Cebola	Milho
	S		11/01	15/06
	DTR (mm)	09/03	321	516
	N (kg/ha)	542	113	82
	P ₂ O ₅ (kg/ha)	sem dados de fertilizantes	-	59
	K ₂ O (kg/ha)		-	121
	C	13/08	21/08	15/10
	Y (kg/ha)	8660	26848	9182

Amostragem e parâmetros analisados

As amostragens de solos realizaram-se em 5 datas: T1 e T2, em 2018; T3 e T4, em 2019; T5 em 2020. T1 e T3, realizaram-se no início da campanha de rega; T2, T4 e T5, realizaram-se no final da campanha de rega. Efetuou-se a colheita de amostras compostas, por cada 5 ha, a partir da mistura de subamostras recolhidas em pontos marcados aleatoriamente, em ziguezague (Varenes, 2003). Após colheita, as amostras foram secas ao ar e crivadas com malha de 2mm, para análise dos seguintes parâmetros: textura (areia grossa, areia fina, limo e argila; g/kg) (ISO 11277:2020); capacidade de troca catiónica (CTC), cálcio, magnésio, potássio, sódio e alumínio de troca (cmol₍₊₎/kg) (ISO 11260:2018); pH (H₂O 1:2.5 (p/v)), condutividade elétrica (CE; dS/m) (H₂O 1:2 (p/v)); matéria orgânica (MO; %) (Walkley-Black); azoto Kjeldahl (N; %); fósforo (mg P₂O₅/kg) e potássio (mg K₂O/kg) extraíveis (Egner-Rhiem). As frações granulométricas da terra fina, os catiões de troca e a CTC foram obtidos apenas na primeira amostragem para caracterização inicial das parcelas.

Análises estatísticas

As FA foram conduzidas separadamente para cada camada do solo. Os fatores foram retidos quando apresentaram *eigenvalues* >1, proporção de variância > 10% e contribuição de pelo menos duas variáveis com cargas fatoriais > |0.50|. Os *scores* dos fatores foram usados para a DA, determinando o(s) fator(es) que mais contribui(em) para a diferenciação espacial e temporal. Realizou-se uma Análise Canônica (CCA) e selecionaram-se os coeficientes normalizados da primeira função discriminante para verificar o peso de cada fator na discriminação (Shukla *et al.*, 2006). Todas as análises estatísticas foram realizadas com *Statistica 7*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em P3, os solos apresentaram em qualquer das camadas classe textural franco-argilosa; em P4, franco-argilosa e argilo-limosa; em P5, verificou-se maior variabilidade, quer horizontal quer vertical, ocorrendo as classes texturais franca, franco-argilo-limosa, franco-argilosa e argilo-limosa. A CTC estimada foi muito alta em todas as parcelas (> 50 cmol (+)/kg), em concordância com a natureza argilosa destes solos Vertissolos (Varenes, 2003). Os valores médios dos parâmetros químicos avaliados mostraram que os solos das parcelas são não salinos e apresentaram reação pouco alcalina, baixos teores de MO e reduzidos valores de N total (Quadros 2 e 3). Os valores de P₂O₅ na camada 0-20 cm foram, em média, altos em P3 e P4 a muito altos em P5. Na camada sub-superficial, ocorreram valores um pouco menores e a classe de fertilidade para o P₂O₅ em P4 foi média, mantendo-se nas restantes parcelas. No que respeita ao K₂O, os valores foram, em geral, elevados, correspondendo a classes de fertilidade alta a muito alta. A FA realizada para a camada 0-20cm permitiu extrair quatro fatores (Quadro 4), responsáveis por 75.04% da variância total. O fator 1 apresentou cargas fatoriais com valores absolutos > 0.50 nos teores de areia grossa, areia fina e limo, desta forma associado ao atributo *textura*.

O fator 2 correlacionou-se com o teor de argila e CTC, tratando-se de um fator de *capacidade de retenção de água e nutrientes*. O fator 3 mostrou-se altamente correlacionado com pH, CE e N, associado

Quadro 2 - Valores médios gerais dos parâmetros químicos e agronômicos nas parcelas P3 (n=45), P4 (n=36) e P5 (n=36) (camada 0-20cm)

	pH	CE (dS/m)	MO (%)	N total (%)	P ₂ O ₅ (mg/kg)	K ₂ O (mg/kg)
P3	8.23	0.33	1.27	0.092	169.5	113.4
P4	8.05	0.30	1.24	0.076	146.8	190.6
P5	8.18	0.24	1.55	0.088	328.3	276.6

Quadro 3 - Valores médios gerais dos parâmetros químicos e agronômicos nas parcelas P3 (n=45), P4 (n=27) e P5 (n=36) (camada 20-40cm)

	pH	CE (dS/m)	MO (%)	N total (%)	P ₂ O ₅ (mg/kg)	K ₂ O (mg/kg)
P3	8.29	0.27	1.23	0.084	130.2	94.6
P4	7.99	0.29	1.19	0.069	96.5	147.7
P5	8.19	0.27	1.33	0.073	216.6	176.3

essencialmente à *composição química*. O fator 4, representativo da *fertilidade*, apresentou-se altamente correlacionado com a MO, P₂O₅ e K₂O.

Na camada 20-40 cm, a FA reteve 4 fatores responsáveis por 75.72% da variância total (Quadro 5). A estrutura do modelo fatorial foi a seguinte: fator

Quadro 4 - Cargas fatoriais, *eigenvalues*, percentagem da variância total e percentagem acumulada da variância num modelo de quatro fatores para 11 variáveis na camada 0-20cm (cargas fatoriais de variáveis altamente correlacionadas assinaladas a negrito)

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
pH	0.215	0.043	-0.719	-0.186
CE	0.093	0.111	0.893	0.070
MO	-0.061	-0.195	0.100	-0.542
N total	0.198	0.035	0.753	-0.251
P ₂ O ₅	0.015	0.068	-0.257	-0.799
K ₂ O	-0.323	-0.092	0.073	-0.741
Areia grossa	0.897	-0.259	0.004	0.152
Areia fina	0.943	-0.256	0.053	0.100
Limo	-0.793	-0.527	-0.042	-0.169
Argila	-0.413	0.861	0.001	0.008
CTC	0.008	0.830	0.088	0.183
Eigenv.	2.988	2.224	1.837	1.206
% Var.	27.16	20.22	16.70	10.97
% Var. Acum	27.16	47.38	64.08	75.04

1 altamente correlacionado com % de areia grossa, areia fina, limo e argila, logo, representativo da propriedade *textura* do solo; fator 2 apresentou correlação com CE e N total, relacionando-se com a *composição química*; fator 3 altamente correlacionado com CTC e K₂O, logo, essencialmente representativo da *disponibilidade de nutrientes*; fator 4, apresentou elevada correlação com pH, MO e P₂O₅, ou seja, transpondo o atributo *fertilidade*. A DA realizada com os *scores* fatoriais dos casos para a camada 0-20 cm, indicou o fator 3 (*composição química*) como predominante na variabilidade temporal, com uma *Wilks' Lambda* parcial de 0.597, e o fator 1 (*textura*) como o fator dominante para a variabilidade espacial, apresentando um *Wilks' Lambda* parcial de 0.648. No caso da camada 20-40 cm, a DA revelou preponderância dos fatores 2 (*composição química*) e 3 (*disponibilidade de nutrientes*) na discriminação temporal (*Wilks' Lambda* parcial de 0.358) e espacial (*Wilks' Lambda* parcial de 0.532), respectivamente.

Quadro 5 - Cargas fatoriais, *eigenvalues*, percentagem da variância total e percentagem acumulada da variância num modelo de quatro fatores para 11 variáveis na camada 20-40cm (cargas fatoriais de variáveis altamente correlacionadas assinaladas a negrito)

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
pH	0.195	-0.288	0.241	0.752
CE	0.038	0.863	-0.148	-0.200
MO	0.063	0.363	-0.092	0.562
N total	0.032	0.894	0.124	0.066
P ₂ O ₅	-0.141	-0.211	-0.443	0.594
K ₂ O	-0.464	0.233	-0.695	0.228
Areia grossa	0.929	0.024	-0.275	0.005
Areia fina	0.925	0.041	0.237	0.085
Limo	-0.869	-0.007	-0.099	-0.050
Argila	-0.869	-0.052	0.127	-0.034
CTC	-0.302	0.043	0.758	0.094
Eigenv.	3.614	1.953	1.611	1.152
% Var. Total	32.85	17.75	14.65	10.47
% Var. Acum	32.85	50.60	65.25	75.72

As primeiras funções discriminantes (Y) no tempo obtidas com CAA para as duas camadas, responsáveis por 71.03% e 79.39% da variância total, foram as seguintes: (i) 0-20 cm: $Y = -0.252$ (*Factor 1*) - 0.175

(*Factor 2*) + 0.973 (*Factor 3*) - 0.170 (*Factor 4*); (ii) 20-40 cm: $Y = -0.284$ (*Factor 1*) - 1.012 (*Factor 2*) - 0.319 (*Factor 3*) + 0.081 (*Factor 4*).

Confirmando-se, através dos coeficientes de cada fator, que é o atributo *composição química* aquele que mais influência tem na diferenciação temporal, denotando a influência das práticas culturais, provavelmente, da fertilização, e indiretamente, da disponibilidade de MO, através da variável N total. No caso da variabilidade espacial, obtiveram-se as seguintes primeiras funções discriminantes, responsáveis por 85.52% e 97.92% da variância total: (i) 0-20 cm: $Y = -1.941$ (*Factor 1*) - 0.563 (*Factor 2*) + 0.062 (*Factor 3*) - 0.054 (*Factor 4*); (ii) 20-40 cm: $Y = +0.719$ (*Factor 1*) + 0.284 (*Factor 2*) + 0.964 (*Factor 3*) + 0.554 (*Factor 4*).

O atributo *textura* (fator 1) é preponderante na diferenciação entre parcelas, no caso da camada superficial. Já na camada sub-superficial, esta diferenciação é maioritariamente influenciada pela *disponibilidade de nutrientes* (fator 3). Estes resultados indicam a importância da mineralogia do solo, da presença de argila e da sua estreita relação com a capacidade de troca catiónica na variabilidade espacial encontrada.

CONCLUSÕES

O uso de ferramentas de análise estatística multivariada pode ajudar a compreender melhor a dinâmica temporal e espacial e as relações entre as variáveis e as funções do solo. A FA realizada com dados recolhidos permitiu obter dois modelos similares de quatro fatores relacionados com a *textura*, capacidade de retenção de água e nutrientes, *composição química*, *disponibilidade de nutrientes* e *fertilidade* do solo. Os fatores mais influentes na discriminação temporal e espacial foram a *composição química*, a *textura* e a *disponibilidade de nutrientes*.

AGRADECIMENTOS

O estudo é co-financiado pela União Europeia pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional, incluído no COMPETE 2020 através do projeto Instituto da Ciências da Terra (UIDB/04683/2020;

POCI-01-0145-FEDER-007690), dos projetos Geo-BioTec (UIDB/04035/2020) e Centro de Química (UIDB/00616/2020), financiados pela FCT, e pelo

Fundo Europeu Agrícola de Desenvolvimento Rural através do Grupo Operacional FitoFarmGest (PDR2020-101-030926).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Jagadamma, S.; Lal, R.; Hoelt, R.G.; Nafziger, E.D. & Adee, E.A. (2008) - Nitrogen fertilization and cropping system impacts on soil properties and their relationship to crop yield in the central Corn Belt, USA. *Soil and Tillage Research*, vol. 98, n. 2, p. 120–129. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.10.008>
- Shukla, M.K.; Lal, R. & Ebinger, M. (2006) - Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil and Tillage Research*, vol. 87, n. 2, p. 194–204. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.03.011>
- Varenes, A.D. (2003) - *Produtividade dos Solos e Ambiente*. Escolar Editora.
- Yeater, K. & Villamil, M. (2018) - Multivariate Methods for Agricultural Research. In: Glaz, B. & Yeater, K.M. (Eds.) - *Applied Statistics in Agricultural, Biological, and Environmental Sciences*, p. 371–399). American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc. Crop Science Society of America, Inc.