



Evolução temporal das propriedades químicas dos Calcisols do perímetro de rega do Caia

Dissertação

Curso de Mestrado em Agricultura Sustentável

Maria Beatriz Magno Vivas

Orientador: Prof. José Gama

Elvas, 2025

MARIA BEATRIZ MAGNO VIVAS

Evolução temporal das propriedades químicas dos Calcisols do perímetro de rega do Caia

Dissertação apresentada para obtenção do grau de mestre em
Agricultura Sustentável conferido pelo Instituto Politécnico de
Portalegre.

Orientador: Prof. Doutor José Telo da Gama

Arguente principal: Prof. Doutor Carlos Alexandre

Arguente: Prof. Doutor Francisco Mondragão Rodrigues

Presidente do Júri: Prof. Doutor José Manuel Rato Nunes

Classificação: 16 valores

Escola Superior Agrária de Elvas

2025

Agradecimentos

A elaboração da presente dissertação e finalização do mestrado em Agricultura Sustentável representam o culminar de uma etapa muito importante, de crescimento e desenvolvimento pessoal e profissional.

A sua realização não seria possível sem a colaboração de pessoas e instituições. Assim, quero agradecer a todo o corpo docente da Escola Superior de Biociências de Elvas, que tornou esta experiência possível.

Uma enorme palavra de agradecimento ao professor José Gama que não duvidou em aceitar-me como sua orientanda e que embarcou comigo nesta etapa.

Às mais que amigas, que a escola me proporcionou nestes anos: Margarida Silva e Daniela Afonso; agradeço-vos por todos os momentos que passámos juntas, pelas gargalhadas, pelos medos partilhados e pelas experiências vividas.

Agradeço ainda à minha amiga de longa data, Carolina, que me inspirou, apoiou, ajudou e partilhou comigo esta etapa.

Agradeço com um profundo sentimento aos meus pais e avó, por toda a educação e esforço que fizeram ao longo destes anos. Sempre acreditaram em mim e deram-me força para ultrapassar as adversidades sentidas nesta longa caminhada.

Ao meu irmão, um obrigada especial. Apoiou e acreditou, sempre com palavras sábias e um ombro disponível para me consolar quando necessário.

Para o Ricardo, que lutou comigo, não me deixou desistir e me acompanhou nesta longa etapa, o meu obrigada, com muito amor no coração

Desta forma agradeço a todas as pessoas que de forma direta e indireta contribuíram para esta etapa da minha vida.

Resumo

A presente dissertação teve como principal objetivo avaliar as consequências da intensificação agrícola nos Calcisols localizados no perímetro de rega do Caia, num contexto de clima Mediterrânico semiárido. Para tal, analisou-se a evolução de três parâmetros químicos do solo — matéria orgânica (MO), pH e condutividade elétrica (CE) — ao longo de um período de dez anos (2001/2002 a 2011/2012), comparando áreas de cultivo em regime de sequeiro e de regadio. A metodologia adotada incluiu a recolha de amostras georreferenciadas, com posterior análise em laboratório e subsequente análise estatística para determinar variações significativas. Os resultados evidenciaram que os solos de regadio apresentaram uma redução significativa da MO de 1,76% para 1,62%, reflexo do aumento da mineralização provocada pela humidade e arejamento do solo, combinados com a ausência de técnicas culturais sustentáveis de reposição do carbono orgânico do solo. Por outro lado, os solos de sequeiro demonstraram maior estabilidade nos teores de MO ao longo do tempo (variaram de 1,51% para 1,47%). Relativamente ao pH, verificou-se uma tendência de aumento, particularmente nos solos de regadio, de 7,79 para 7,91, justificada pela presença de bicarbonatos na água de rega e pela alcalinidade inerente aos Calcisols. A CE também aumentou de forma significativa nos solos irrigados, de 0,10 dS.m⁻¹ para 0,16 dS.m⁻¹, sugerindo uma acumulação gradual de sais, embora os valores se mantivessem dentro de limites não salinos. Conclui-se que a intensificação agrícola, através da adoção do regadio, provoca alterações relevantes nas propriedades químicas dos Calcisols. A sua viabilidade a longo prazo dependerá da implementação de práticas culturais sustentáveis, nomeadamente o incremento de matéria orgânica, a monitorização da salinidade e o controlo periódico do solo. Este estudo contribui para um melhor entendimento da resposta dos Calcisols à intensificação agrícola e reforça a importância de estratégias que conciliem produtividade e sustentabilidade.

Palavras-chave: Calcisols; condutividade elétrica; matéria orgânica; pH.

Abstract

The main objective of this dissertation was to assess the consequences of agricultural intensification on Calcisols located within the Caia irrigation perimeter, under a Mediterranean semi-arid climate context. To this end, the evolution of three key soil chemical parameters — organic matter (OM), pH, and electrical conductivity (EC) — was analyzed over a ten-year period (2001/2002 to 2011/2012), comparing areas cultivated under rainfed and irrigated systems. The adopted methodology included the collection of georeferenced soil samples, followed by laboratory analysis and subsequent statistical evaluation to identify significant variations. The results showed a significant reduction in OM content in irrigated soils, from 1,76% to 1,62%, reflecting increased mineralization driven by higher soil moisture and aeration, combined with the lack of sustainable cultural practices to replenish soil organic carbon. Conversely, rainfed soils demonstrated greater stability in OM levels over time (ranging from 1,51% to 1,47%). Regarding pH, an increasing trend was observed, particularly in irrigated soils, from 7,79 to 7,91, justified by the presence of bicarbonates in the irrigation water and the inherent alkalinity of Calcisols. EC also increased significantly in irrigated soils, from 0,10 dS.m⁻¹ to 0,16 dS.m⁻¹, suggesting a gradual accumulation of salts, although values remained within non-saline thresholds. It is concluded that agricultural intensification, through the adoption of irrigation, induces relevant changes in the chemical properties of Calcisols. The long-term viability of this practice will depend on the implementation of sustainable soil management strategies, namely the enhancement of organic matter, salinity monitoring, and regular soil assessment. This study contributes to a better understanding of the response of Calcisols to agricultural intensification and reinforces the importance of strategies that balance productivity with sustainability.

Key words: Calcisols; electrical conductivity; organic matter; pH.

Abreviaturas, Siglas e Acrónimos

ABCaia – Associação de Beneficiários do Caia

°C – Graus Celcius

CE – Condutividade Elétrica

cm – centímetros

dS.m⁻¹ – deciSiemens por metro

g/kg – Grama por quilograma

g/l – Grama por litro

h – Horas

ha – Hectare

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera

km – Quilómetro

mg/L – Miligrama por litro

m³/ha – Metro cúbico por hectare

mm – Milímetros

mS.cm⁻¹ – MilliSiemens por centímetro

PAC – Política Agrícola Comum

T_{máxima} – Temperatura máxima

T_{média} – Temperatura média

T_{mínima} – Temperatura mínima

UE – União Europeia

v/v – Percentagem em volume

% - Percentagem

μm – Micrómetro

Índice Geral

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	iv
Índice Geral.....	vi
Índice de Quadros.....	viii
Índice de Figuras.....	x
1. Introdução e Objetivos.....	1
1.1. Introdução	1
1.2. Objetivos.....	3
2. Revisão Bibliográfica	4
2.1. Calcisols	4
2.2. Efeito do regadio nas características químicas do solo em regiões semiáridas	7
2.2.1. Matéria orgânica do solo.....	8
2.2.2. Condutividade elétrica.....	13
2.2.3. pH.....	16
3. Caracterização da área em estudo.....	20
3.1. Área de estudo	20
3.1.1 Calcisols da área de estudo	22
3.1.2. Evolução da qualidade da água de rega	24
3.1.3. Culturas presentes no perímetro de rega do Caia	24
3.2. Caracterização do clima da região.....	25
4. Material e Métodos.....	30
4.1. Delineamento experimental	30
4.2. Trabalho laboratorial.....	32

4.2.1 Preparação da amostra.....	32
4.2.2 Análises químicas realizadas	32
4.2.2.1. pH _{água}	32
4.2.2.2. Condutividade elétrica	32
4.2.2.3. Matéria Orgânica	32
4.3. Dados climáticos	33
4.4. Análise estatística	33
5. Resultados e Discussão.....	34
6. Conclusões	58
7. Bibliografia.....	60

Índice de Quadros

Quadro 1 - Principais propriedades edáficas dos Calcisols da área de estudo	23
Quadro 2 – Dados climáticos para o ano normal 1991/2020	27
Quadro 3 – Precipitação para o ano normal 1991/2020	28
Quadro 4 – Valores de precipitação, ET0 e Índice de aridez por ano normal, na área de estudo.....	29
Quadro 5 – Valores registados na estação meteorológica da área de estudo para ano normal 1991/2016.....	29
Quadro 6- Evolução do pH de 2001/2002 até 2011/2012 nos Calcisols do perímetro de rega do caia	34
Quadro 7 - Evolução do pH nos solos de sequeiro do perímetro de rega do Caia.....	35
Quadro 8 - Evolução do pH nos solos de regadio do perímetro de rega do Caia	36
Quadro 9 - Evolução dos teores de MO de 2001/2002 até 2011/2012 nos Calcisols do perímetro de rega do caia	37
Quadro 10 – Evolução dos teores de MO nos solos de sequeiro.....	38
Quadro 11 – Evolução dos teores de MO nos solos de regadio	39
Quadro 12 - Evolução dos valores de CE de 2001/2002 até 2011/2012 nos Calcisols do perímetro de rega do caia	40
Quadro 13 - Evolução dos valores de CE nos solos de sequeiro	41
Quadro 14 - Evolução dos valores de CE nos solos de regadio	42
Quadro 15 – Evolução do pH nos Calcisols de sequeiro com Milho.....	44
Quadro 16 – Evolução da CE nos Calcisols de sequeiro com Milho	45
Quadro 17- Evolução da MO nos Calcisols de sequeiro com Milho.....	45
Quadro 18 – Evolução do pH nos Calcisols de sequeiro com Trigo	46
Quadro 19 – Evolução da CE nos Calcisols de sequeiro com Trigo.....	47
Quadro 20 - Evolução da MO nos Calcisols de sequeiro com Trigo.....	47
Quadro 21 – Evolução do pH nos Calcisols de sequeiro com Beterraba.....	49
Quadro 22 – Evolução do pH nos Calcisols de regadio com Beterraba	49
Quadro 23 – Evolução da MO nos Calcisols de sequeiro com Beterraba.....	50
Quadro 24 – Evolução da MO nos Calcisols de regadio com Beterraba	50
Quadro 25 – Evolução da CE nos Calcisols de sequeiro com Beterraba	50
Quadro 26 -Evolução da CE nos Calcisols de regadio com Beterraba.....	51

Quadro 27 – Evolução da CE nos Calcisols de sequeiro com Olival	52
Quadro 28 – Evolução da CE nos Calcisols de regadio com Olival	52
Quadro 29 – Evolução do pH nos Calcisols de sequeiro com Olival	53
Quadro 30 – Evolução do pH nos Calcisols de regadio com Olival.....	53
Quadro 31 – Evolução da MO nos Calcisols de sequeiro com Olival	53
Quadro 32 – Evolução da MO nos Calcisols de regadio com Olival	53
Quadro 33 – Evolução do pH nos Calcisols de regadio com Girassol	55
Quadro 34 – Evolução da CE nos Calcisols de regadio com Girassol.....	56
Quadro 35 – Evolução da MO nos Calcisols de regadio com Girassol	56

Índice de Figuras

Figura 1 - Bacia Mediterrânea.....	4
Figura 2 - Distribuição dos Calcisols na Bacia Mediterrânea	4
Figura 3 - Esquema de rega do Perímetro de Rega do Caia	21
Figura 4 - Solos da área de estudo.....	22
Figura 5 - Evolução da ocupação cultural no perímetro de Rega do Caia.....	25
Figura 6 - Carta Cultura.....	26
Figura 7 - Temperatura média (T _{média}), temperatura mínima (T _{mínima}) e Temperatura máxima (T _{máxima}) para o ano normal 1991/2020.....	27
Figura 8 - Precipitação para o ano normal 1991/2020	28
Figura 9 - Pontos de amostragem para 2001/2002 e 2011/2012	31
Figura 10 – Áreas de sequeiro e regadio ocupada pelas culturas identificadas no Perímetro de Rega do Caia em 2001/2002.....	43
Figura 11 - Áreas de sequeiro e regadio ocupada pelas culturas identificadas no Perímetro de Rega do Caia em 2011/2012.....	43
Figura 12 – Evolução dos parâmetros químicos nos Calcisols com Milho	44
Figura 13 – Evolução dos parâmetros químicos dos Calcisols com Trigo.....	46
Figura 14 – Evolução dos parâmetros químicos dos Calcisols com Beterraba	48
Figura 15 – Evolução dos parâmetros químicos dos Calcisols com Olival.....	51
Figura 16 – Evolução dos parâmetros químicos dos Calcisols com Girassol	55

I. Introdução e Objetivos

I.1. Introdução

O crescimento populacional tem imposto desafios significativos, destacando-se entre eles a necessidade de garantir a segurança alimentar global. Estima-se, portanto, que a produção de alimentos deve aumentar consideravelmente até 2050, acompanhada por uma redução do desperdício alimentar e por alterações nos padrões dietéticos (Al-Agele et al., 2021). Para alcançar esse objetivo, duas abordagens principais têm sido propostas. A primeira consiste na conversão de áreas atualmente inexploradas pelo ser humano em superfícies agrícolas. A segunda abordagem refere-se à intensificação agrícola, a qual visa aumentar a produtividade de áreas agrícolas subutilizadas através da implementação de tecnologias modernas. A primeira abordagem consiste na conversão de áreas pertencentes a ecossistemas naturais, como florestas, savanas ou prados, em superfícies destinadas à agricultura ou à atividade pecuária. Este processo geralmente implica o desmatamento, a drenagem de zonas húmidas ou a remoção da vegetação autóctone, de forma a viabilizar o solo para o cultivo de culturas ou a criação de gado. Embora essa estratégia permita a expansão da área disponível para produção agropecuária, está associada a impactos ambientais expressivos, incluindo a perda de biodiversidade, o aumento das emissões de gases com efeito estufa e a degradação dos serviços ecossistémicos, como a regulação do ciclo hidrológico e a proteção contra a erosão do solo. Para além dos efeitos negativos sobre o meio ambiente, essa prática pode ainda resultar na perda de habitat para inúmeras espécies de fauna e flora, contribuindo assim para o declínio da biodiversidade a nível global, sendo, por isso, frequentemente considerada uma alternativa inaceitável do ponto de vista ambiental (Potapov et al., 2022; Rosa, 2022). A segunda abordagem baseia-se numa estratégia de intensificação agrícola por meio da irrigação, considerando que, nas condições edafo-climáticas típicas da bacia Mediterrânica, a produtividade das culturas é fortemente condicionada pela disponibilidade hídrica, especialmente no caso das culturas de primavera-verão. Enquanto a agricultura de sequeiro depende exclusivamente da precipitação natural, a agricultura irrigada recorre à aplicação artificial de água, viabilizada por infraestruturas hídricas. Este tipo de agricultura apresenta, em média, o dobro da produtividade em relação à agricultura não irrigada,

desempenhando, assim, um papel fundamental na promoção da segurança alimentar (Rosa, 2022; Vammen & Peña, 2022).

A irrigação desempenha um papel essencial na promoção da segurança alimentar, ao contribuir significativamente para o aumento da produtividade agrícola, sobretudo em regiões afetadas por escassez hídrica ou precipitação irregular. Esta prática permite a viabilização do cultivo ao longo de todo o ano, independentemente das condições climáticas sazonais, assegurando uma oferta constante de alimentos. Tal característica é determinante na mitigação da fome e no fortalecimento da resiliência das comunidades face às alterações climáticas (Velasco-Muñoz et al., 2019). De acordo com Fader et al. (2016) e Malamataris et al. (2023), a irrigação na bacia Mediterrânica revela-se crucial para a segurança alimentar, contribuindo para uma maior disponibilidade de alimentos e estabilidade económica. Para além disso, o uso de sistemas de regadio possibilita o cultivo de culturas de maior valor económico e nutricional, promovendo a diversificação alimentar e a melhoria dos níveis de nutrição. A fiabilidade acrescida da produção agrícola por meio da irrigação assume especial importância em países cuja subsistência e abastecimento alimentar dependem fortemente da atividade agrícola (Darko et al., 2015; Jambo et al., 2021).

Em 2017, estimava-se que a área irrigada a nível global correspondia a 275 milhões de hectares, apresentando um crescimento anual de aproximadamente 1,3% (Adeyemi et al., 2017). De acordo com Mehta et al. (2024), esta área atingiu atualmente os 340 milhões de hectares. Apesar deste crescimento, a irrigação é praticada em apenas cerca de 23% da superfície agrícola mundial; no entanto, essa fração é responsável por aproximadamente 45% da produção alimentar global (Khan et al., 2005; Rosa, 2022; Zhao et al., 2021). Projeta-se que, para satisfazer as necessidades alimentares da população até 2050, a produção agrícola deverá aumentar em cerca de 70%, o que implicará um acréscimo no uso da água da ordem dos 50% nos países desenvolvidos e de 16% nos países em desenvolvimento (Velasco-Muñoz et al., 2019). Neste contexto, destaca-se que o setor agrícola é atualmente responsável por cerca de 87% do consumo global de água, dos quais aproximadamente 30% são provenientes de fontes consideradas insustentáveis (Al-Agele et al., 2021; McDermid et al., 2023). Dada a necessidade de expansão da área irrigada para satisfazer a crescente procura alimentar, torna-se fundamental comparar os sistemas de cultivo irrigado e de sequeiro, com o

objetivo de avaliar se a irrigação está associada a maiores perdas nas propriedades químicas do solo (Abakumov et al., 2022).

O estudo dos diferentes tipos de solos, tanto a nível global como em Portugal, assume um papel determinante no planeamento e desenvolvimento sustentável da agricultura. A análise das propriedades edáficas de cada solo permite compreender o seu comportamento agronómico, identificando as suas potencialidades e limitações. Essa compreensão possibilita a seleção e adaptação das culturas mais apropriadas às condições edafoclimáticas de cada região. Neste enquadramento, foi já realizado o levantamento dos tipos de solos existentes no perímetro de rega do Caia, sendo agora necessário aprofundar a análise das suas características edáficas. O presente estudo foca-se especificamente nos Calcisols, não apenas pela sua ampla representatividade na bacia Mediterrânica, mas também pelas suas particularidades edáficas, nomeadamente os elevados teores de cálcio e o pH elevado que os caracterizam (Bontpart, et al., 2024).

1.2. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal consolidar o conhecimento necessário para avaliar a viabilidade da intensificação do uso dos solos numa área representativa do clima Mediterrânico semiárido, através da comparação entre os sistemas de cultivo de sequeiro e regadio. A viabilidade desta intensificação será também analisada com base na evolução de propriedades químicas chave do solo ao longo do tempo. Para além disto, tem também como objetivo o aprofundamento do conhecimento quanto a um tipo de solo e como este evolui num determinado período. Neste sentido, foram definidos os seguintes objetivos específicos para a condução do estudo:

- Caracterização do clima da área de estudo;
- Caracterização do Grupo de Solos de Referência Calcisols;
- Avaliar a evolução de características edáficas químicas chave num período de 10 anos:
 - Matéria orgânica;
 - Condutividade elétrica;
 - pH.
- Determinar a viabilidade da intensificação do solo;
- Comparar sistemas de cultivo (sequeiro vs. regadio).

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Calcisols

O termo Calcisols deriva do latim calx, que significa "lima" ou "cal" e são uma das Referências Principais (Reference Soil Groups) da WRB (World Reference Base for Soil Resources) (FAO, 2015b). Este tipo de solo é um dos mais característicos da bacia Mediterrânea (Figura 1), apresentando uma distribuição predominante em países como Turquia, Síria, Irão e Iraque. Em Portugal, destaca-se a sua ocorrência generalizada nas regiões do Alentejo e Algarve (Figura 2).

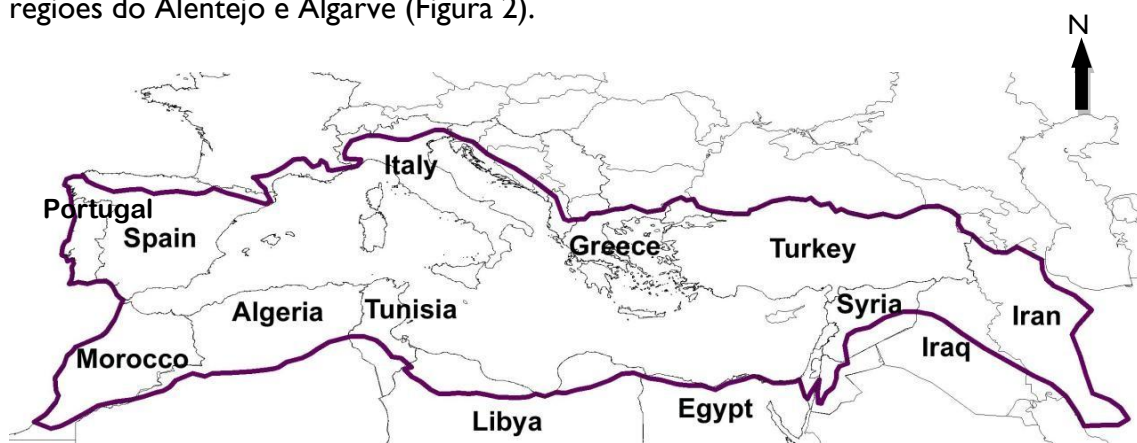


Figura 1 - Bacia Mediterrânea (Rayan et al., 2006)

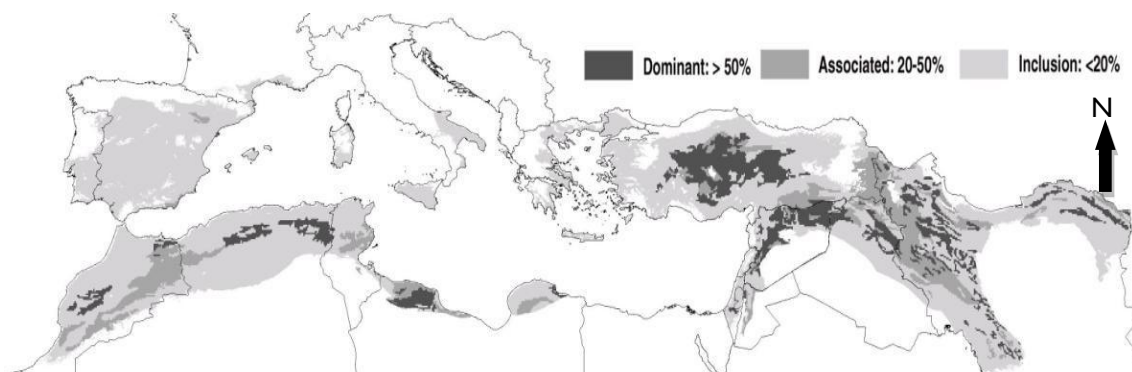


Figura 2 - Distribuição dos Calcisols na Bacia Mediterrânea (Rayan et al., 2006)

Os Calcisols englobam todos os solos que apresentam uma elevada acumulação de carbonatos secundários, geralmente concentrados nos primeiros 100 cm de profundidade. Estes solos caracterizam-se por conter elevados teores de carbonato de cálcio (CaCO_3), frequentemente superiores a 15% (Bolan et al., 2023; Meshram et al., 2023; Turdaliev et al., 2024). Possuem, tipicamente, um horizonte superficial de

coloração pardacenta a pardacenta pálida, com a presença de um horizonte A do tipo ochric e um horizonte B de natureza cámbica ou impregnado com carbonatos de cálcio. A sua textura varia de média a fina e a estrutura tende a ser pouco desenvolvida (Telo da Gama, 2020; Telo da Gama et al., 2019).

A quantificação precisa da extensão destes solos é desafiadora, mas estima-se que a sua área total seja próxima de 1000 milhões de hectares, estando predominantemente localizados em regiões áridas e semiáridas (Akça et al., 2018; Bolan et al., 2023; FAO, 2015a). Estes solos apresentam uma composição que inclui 5% ou mais de carbono orgânico (Quijano et al., 2020). A presença de carbono secundário é comum, e quando ocorre a sua precipitação, pode haver uma melhoria nas características de agregação do solo. No entanto, ainda se sabe relativamente pouco sobre o papel dos carbonatos na estabilização do carbono orgânico, o que, por sua vez, contribui para a estabilização da matéria orgânica, afetando, consequentemente, a estrutura do solo (Quijano et al., 2020).

Nos Calcisols, é comum a presença de vastas áreas ocupadas por gramíneas ou arbustos, frequentemente utilizadas para pastoreio extensivo. Devido à necessidade de irrigação controlada, estes solos favorecem o desenvolvimento de culturas tolerantes à seca, como o girassol (Nunes, 2020). A elevada concentração de cálcio presente nestes solos torna fundamental a introdução de culturas que sejam tolerantes ao cálcio, como o sorgo e diversas culturas forrageiras (Bontpart et al., 2024; Trochon et al., 2023). A produção de trigos de inverno, melão e algodão também é uma prática comum em zonas mediterrânicas onde se encontram esses solos (FAO, 2015a). Segundo a FAO (2015a), foi possível cultivar com sucesso até 20 variedades de hortícolas nestes solos, utilizando fertilização à base de azoto, fósforo, ferro e zinco. Dessa forma, os Calcisols proporcionam elevados rendimentos para cereais e oferecem condições adequadas para o cultivo de vinhas, especialmente castas tintas, e olival (Badía et al., 2022; Cambrollé et al., 2015; FAO, 2015a; Telo da Gama, 2020).

No que diz respeito à irrigação, é essencial tomar precauções específicas, uma vez que os Calcisols tendem a formar rapidamente uma crosta superficial devido ao elevado teor de carbonatos de cálcio. A precipitação desses carbonatos resulta na formação de uma camada petro-cálcica, o que pode dificultar a infiltração de água proveniente da irrigação ou da precipitação, prejudicando, assim, o desenvolvimento das culturas

(Meshram et al., 2023; Trochon et al., 2023). Em vista disso, recomenda-se a irrigação por alagamento em detrimento da irrigação por sulcos, uma vez que o primeiro método contribui para a redução da formação de crostas superficiais (FAO, 2015b). Apesar dessa limitação, os Calcisols possuem boas propriedades de retenção de água, embora apresentem uma transição estrutural abrupta entre camadas, o que pode resultar na ascensão do lençol freático (Telo da Gama, 2020).

Quanto à composição química, os Calcisols apresentam-se com um pH neutro a elevado que vai aumentando com a profundidade, tornando estes solos alcalinos (Bontpart, et al., 2024). Este facto, deve-se à presença de carbonatos de cálcio (CaCO_3) e nalguns casos de magnésio (MgCO_3), que tamponam o pH e mantêm o solo alcalino (Freitas, 2016; Rosa, 2019).

A formação de uma crosta superficial nos Calcisols pode gerar problemas relacionados com a disponibilidade de nutrientes essenciais, como fósforo, ferro, zinco, manganês e cobre, que se tornam menos disponíveis em solos alcalinos, mesmo quando presentes em quantidades suficientes (Pérez-Labrada, 2019; Veloso et al., 2022). Esta limitação pode levar a carências nutricionais nas plantas, resultando em problemas como clorose férrica, além de comprometer o crescimento e os rendimentos das culturas. Para mitigar essas deficiências, recomenda-se a aplicação de fertilizantes quelatados ou foliares que contenham os micronutrientes necessários, uma abordagem comprovada como eficaz na correção de deficiências em solos alcalinos (Janaina, 2024). Adicionalmente, o elevado teor de carbonatos e o pH elevado podem reduzir a atividade microbiana e a decomposição da matéria orgânica, limitando a formação de húmus e, consequentemente, a fertilidade natural do solo. Uma estratégia para superar esses desafios consiste em incrementar os teores de matéria orgânica e promover o uso de biofertilizantes, o que pode ajudar a melhorar as propriedades edáficas desses solos (Veloso et al., 2022).

A condutividade elétrica nestes solos é elevada, refletindo altos níveis de CO_3^{2-} e HCO_3^- , o que está associado a condições de oxidação-redução desfavoráveis e à presença de ferro em formas pouco assimiláveis pelas plantas, assim como o fósforo, manganês, cobre e zinco (Pérez-Labrada et al., 2019; Silva, 2018). O complexo de troca catiônica destes solos encontra-se saturado devido ao excesso de cálcio, sendo

que o conteúdo de matéria orgânica é, geralmente, baixo, variando entre 10,0 e 20,0 g/kg de solo (Telo da Gama, 2020).

Nos Calcisols, as concentrações de azoto são frequentemente baixas, o que torna necessária a aplicação de fertilizantes azotados ao longo do ciclo da cultura, desde a plantação até o pleno desenvolvimento da planta (Meshram, 2023). A aplicação de azoto de cobertura, durante o estágio de crescimento da cultura, tem-se mostrado uma estratégia eficiente para fornecer este nutriente. No entanto, fontes de azoto como amoníaco ou ureia não devem ser aplicadas diretamente à superfície do solo, uma vez que há um risco elevado de perda por volatilização. Em vez disso, recomenda-se a incorporação desses fertilizantes no solo, a fim de minimizar as perdas e melhorar a eficiência da aplicação (Ryan et al., 2006).

Nos Calcisols, a deficiência de fósforo é uma condição comum, sendo necessário o uso de fertilizantes fosfatados, cuja aplicação deve ser ajustada de acordo com as necessidades específicas da cultura (Meshram, 2023). O excesso de fósforo pode causar deficiências nutricionais nas culturas, especialmente de zinco e ferro. Por isso, é recomendável que os fertilizantes fosfatados aplicados nos Calcisols sejam solúveis em água, para garantir uma maior disponibilidade do fósforo para as plantas. Além disso, como mencionado anteriormente, a falta de micronutrientes, em particular zinco e ferro, é frequentemente observada nestes solos (Ryan et al., 2006).

2.2. Efeito do regadio nas características químicas do solo em regiões semiáridas

Na Bacia Mediterrânea, a água é um recurso limitado, tanto em termos absolutos quanto pela distribuição desigual das precipitações, que são concentradas nos meses de inverno, além da alta variabilidade interanual, caracterizada por secas frequentes (Fader et al., 2016). Adicionalmente, a agricultura representa a principal atividade de gestão do solo na região mediterrânea, sendo responsável por aproximadamente 80% do consumo de água na área (Malamataris et al., 2023). Diante disso, é fundamental adotar práticas de irrigação eficientes para garantir o uso sustentável desse recurso escasso.

O conceito de irrigação eficiente é definido como a razão entre o volume de água efetivamente absorvida pela planta e o volume total de água aplicada durante o

processo de irrigação, estando intimamente relacionado ao tipo de abordagem e à tecnologia empregada na irrigação das culturas (Nikolaou et al., 2020). Nesse contexto, e considerando a relação com a sustentabilidade, é fundamental que se passe a adotar, sempre que possível, sistemas de irrigação com eficiência entre 80% e 91%, como é o caso da microirrigação, que tem se mostrado uma alternativa eficiente (Alagele et al., 2021; Borsato et al., 2020; Velasco-Muñoz et al., 2019).

É fundamental adotar práticas adequadas de conservação e gestão do solo para mitigar os impactos da pressão antropogénica e das alterações climáticas, que se têm intensificado na região Mediterrânica. De acordo com Telo da Gama (2020), ao comparar os resultados obtidos por outros investigadores que estudam a bacia Mediterrânica com os resultados alcançados no perímetro de rega do Caia, observa-se que esta área não atende plenamente aos objetivos de sustentabilidade estabelecidos. Esse cenário reforça a importância de continuar a realizar estudos e de adotar práticas agrícolas sustentáveis para alcançar a resiliência necessária diante dos desafios ambientais.

2.2.1. Matéria orgânica do solo

A matéria orgânica do solo (MO) é constituída por biomassa viva e por uma variedade de componentes em diferentes estágios de decomposição, incluindo fragmentos de plantas e animais, microrganismos, raízes mortas e outros resíduos vegetais. Para além destes, engloba também material orgânico dissolvido com dimensão inferior a $0,45 \mu\text{m}$, bem como uma mistura amorfa e complexa de substâncias coloidais orgânicas, genericamente designada por húmus do solo. Este húmus compreende tanto substâncias húmicas como não húmicas (Zandonadi et al., 2014). O húmus representa a principal fonte das propriedades coloidais da matéria orgânica, evidenciando uma capacidade de troca catiónica substancialmente superior à da fração argilosa do solo (Velooso et al., 2022).

Os resíduos culturais, que constituem a principal fonte de matéria orgânica do solo (MO), são classificados com base na sua resistência à decomposição microbiana (Santos, 2022). Os constituintes das paredes celulares, devido à sua predominância estrutural, apresentam maior resistência à degradação por microrganismos do solo, ao

contrário dos conteúdos intracelulares, que se decompõem de forma mais rápida e eficiente (Abakumov et al., 2022).

No solo, os resíduos orgânicos são continuamente decompostos por macro e microrganismos, incluindo minhocas, insetos, protozoários, fungos e bactérias. Este processo inicia-se com a mineralização, fase em que os compostos orgânicos complexos são transformados em formas mais simples e inorgânicas. Posteriormente, ocorre a humificação, durante a qual parte da matéria orgânica é convertida em compostos estáveis e de elevada complexidade, mais resistentes à degradação microbiana (Morão et al., 2017; Veloso et al., 2022).

A fração da matéria orgânica suscetível à mineralização corresponde, aproximadamente, 10 a 20% do total de matéria orgânica presente no solo. Esta fração é composta por biomassa microbiana viva, detritos de pequenas dimensões e substâncias orgânicas não húmicas, como hidratos de carbono simples, açúcares e proteínas. Apesar de representar a menor porção da matéria orgânica total e de ser altamente vulnerável à decomposição microbiana — podendo ser mineralizada em poucos meses —, esta fração desempenha um papel crucial como fonte imediata de nutrientes para as culturas. Além disso, contribui significativamente para a estabilidade dos agregados do solo, promovendo a infiltração da água. A sua degradação acentuada pode, portanto, resultar numa diminuição imediata da produtividade do solo (Santos, 2022).

A fração da matéria orgânica do solo mais recalcitrante à ação microbiana é composta predominantemente por materiais de elevada complexidade estrutural e estabilidade química, destacando-se as substâncias húmicas. Esta fração representa entre 60 a 90% da matéria orgânica total do solo e, devido à sua natureza coloidal, forma complexos organo-minerais estáveis com as partículas de argila, dificultando a sua mineralização. Estas substâncias podem permanecer praticamente inalteradas ao longo de centenas de anos. A elevada capacidade de troca catiónica (CTC) e a capacidade de retenção de água do solo estão fortemente associadas a esta fração da matéria orgânica, contribuindo significativamente para a fertilidade e funcionalidade dos sistemas edáficos (Soares, 2023; Teixeira, 2018; Veloso et al., 2022).

O teor de matéria orgânica do solo é habitualmente expresso em percentagem (massa/massa) e, embora raramente ultrapasse os 5% na camada superficial do perfil edáfico, desempenha um papel fundamental na vitalidade e funcionalidade do solo. A sua presença é determinante para a atividade biológica e para os processos físico-químicos que sustentam a produtividade agrícola. Em contraste, em regiões áridas, onde os teores de matéria orgânica frequentemente se situam abaixo de 1%, o solo tende a comportar-se apenas como um suporte físico para o desenvolvimento vegetal, desprovido das dinâmicas biogeoquímicas essenciais para a sustentabilidade dos ecossistemas agrícolas (Velooso et al., 2022).

Estima-se que, em média, apenas 20 a 40% da matéria orgânica aplicada ao solo se mantenha após um ano, correspondendo a cerca de 2 a 4 toneladas por cada 10 toneladas inicialmente incorporadas. Esta redução deve-se predominantemente à atividade microbiana, responsável pela mineralização da fração mais lábil da matéria orgânica, resultando na libertação de carbono para a atmosfera sob a forma de dióxido de carbono (CO_2), num processo que contribui também para o ciclo global do carbono (Velooso et al., 2022).

A matéria orgânica constitui um parâmetro fundamental nas análises de solo, sendo sistematicamente avaliada devido à sua relevância na dinâmica edáfica. Apesar de existir uma relação direta entre o teor de matéria orgânica do solo e a sua capacidade de disponibilizar azoto (N) às plantas, este indicador não é, habitualmente, integrado de forma quantitativa nas recomendações práticas de fertilização azotada (Ramos, 2023; Velooso et al., 2022).

A classificação dos teores de matéria orgânica nos solos agrícolas é estabelecida em função da sua textura, contemplando uma ampla gama de valores que variam entre percentagens superiores a 6% e inferiores a 0,5% (Velooso et al., 2022).

Em Portugal, os teores de matéria orgânica nos solos cultivados situam-se, em geral, entre níveis baixos a médios, apresentando uma tendência decrescente ao longo do tempo. Esta dinâmica deve-se, em grande medida, às condições climáticas que favorecem a mineralização da matéria orgânica, sendo frequentemente agravada por práticas agrícolas inadequadas que não asseguram a reposição eficaz deste constituinte essencial. Apenas na Região Norte, especialmente em zonas de maior altitude e clima

mais fresco, ou em sistemas de produção intensiva com aplicação recorrente de efluentes pecuários, se verificam teores elevados a muito elevados de matéria orgânica (Santos et al., 2023; Veloso et al., 2022).

O aumento do teor de matéria orgânica no solo proporciona uma série de benefícios, incluindo a melhoria da capacidade de retenção de água e, consequentemente, a disponibilização de água para as plantas. Além disso, contribui para o aperfeiçoamento do arejamento e da estrutura do solo, promovendo a redução da sua massa volúmica aparente. A matéria orgânica também desempenha um papel importante na proteção contra a erosão, por meio da formação de agregados estáveis, e na melhoria da disponibilidade de nutrientes. Este aumento favorece, ainda, a atividade e diversidade microbiana, além de potencializar a capacidade de troca catiónica. Outros benefícios incluem a retenção de elementos prejudiciais, como o alumínio, e a melhoria da capacidade tampão em relação ao pH e à salinização, além do armazenamento de carbono. Assim, o aumento dos níveis de matéria orgânica do solo contribui significativamente para a sua maior resiliência frente às mudanças climáticas (Baveye et al., 2020; Oldfield et al., 2019; Veloso et al., 2022).

As práticas de conservação do solo, como o seu revestimento com espécies vegetais de pequeno porte ou a minimização da intervenção mecânica, são abordagens indiretas que ajudam a mitigar a degradação da matéria orgânica, criando condições favoráveis para manter ou até aumentar os seus teores. Além disso, a gestão adequada dos resíduos das culturas é fundamental, sendo importante maximizar a sua permanência no solo. Quando necessário, deve-se triturá-los para interromper ciclos de possíveis pragas e doenças. De forma direta, os teores de matéria orgânica do solo podem ser incrementados através da aplicação periódica e incorporação de efluentes pecuários e/ou outros materiais orgânicos no horizonte superficial (Veloso et al., 2022).

A matéria orgânica no solo oferece diversas vantagens, no entanto, com a implementação do regadio, observa-se um aumento no uso de fertilizantes, produtos fitossanitários e no número de mobilizações do solo. Este processo, por sua vez, resulta no aumento do arejamento do solo. Esse fator, aliado à temperatura ótima e à maior disponibilidade de humidade, favorece ainda mais a atividade microbiana no solo, acelerando a mineralização da matéria orgânica (Núñez et al., 2022).

O estudo de Francaviglia et al. (2017) analisou 15 locais distribuídos pela Grécia, Itália, Marrocos e Espanha, todos inseridos em contexto de clima mediterrânico. A investigação decorreu ao longo de 20 anos, em solos de textura argilosa e arenosa. Os resultados evidenciaram que o carbono sequestrado no solo era significativamente influenciado pelo tipo de cultura instalada, pela fertilização e pelos diferentes sistemas de cultivo. Verificou-se um impacto negativo das monoculturas e um efeito positivo da rotação de culturas na quantidade de carbono sequestrado. A aplicação de fertilizantes orgânicos também se revelou benéfica neste processo. Em 2018, o mesmo autor demonstrou que o teor de carbono orgânico do solo em parcelas irrigadas era inferior ao observado em parcelas de sequeiro. Por exemplo, numa vinha com cobertura vegetal e sistema de rega instalado, os valores registados foram 1,30 vezes mais baixos quando comparados com os obtidos em solos com pastagem e não irrigados. Este estudo seguiu os mesmos moldes metodológicos do realizado em 2017. Assim, considerando as reduzidas percentagens de matéria orgânica características da bacia Mediterrânica, a irrigação tende a contribuir para a diminuição do teor de matéria orgânica do solo (Singh, 2018).

Os níveis de matéria orgânica, como mencionado anteriormente, são significativamente influenciados pela fertilização das culturas, especialmente com a introdução do regadio. No entanto, os valores variam conforme o tipo de fertilizante utilizado, as quantidades aplicadas, as necessidades específicas da cultura e a reação do solo. No que diz respeito à mobilização do solo, diversos estudos concluíram que, em solos onde se adota uma mobilização mínima ou nenhuma mobilização, a percentagem de matéria orgânica tende a aumentar, mesmo na presença de sistemas de rega. Assim, os estudos indicam que quanto maior a frequência de mobilização do solo, maior será a taxa de mineralização da matéria orgânica (Condrón et al., 2014; Telo da Gama, 2022).

Os estudos de Leogrande et al. (2022) e de Núñez et al. (2022) analisaram as implicações dos sistemas de rega na quantidade de carbono orgânico do solo e concluíram que a influência do regadio depende, em grande medida, do clima e do teor inicial de carbono orgânico presente no solo. Verificou-se que, em zonas semiáridas, os valores de carbono podem aumentar, desde que sejam adotadas práticas adequadas de manejo do solo.

Nunes et al. (2007) desenvolveu o seu estudo no perímetro de rega do Caia, onde foram recolhidas 1428 amostras de solo, à profundidade de 0-20 cm, abrangendo áreas em sequeiro e em regadio. O objetivo foi avaliar, ao longo de 30 anos, os principais parâmetros químicos do solo, com destaque para a matéria orgânica. Os resultados revelaram que os teores de matéria orgânica foram significativamente influenciados pelo sistema cultural, tendo-se verificado uma diminuição ao longo dos anos nas parcelas irrigadas. Esta redução foi atribuída ao aumento da atividade microbiana induzido pela irrigação, que acelerou o processo de mineralização da matéria orgânica.

O estudo de Telo da Gama et al. (2019), realizado no perímetro de rega do Caia, comparou os valores das propriedades químicas do solo registados em 2001/2002 e em 2011/2012, em áreas sob cultivo de sequeiro e de regadio. No que respeita à matéria orgânica, verificou-se uma redução média de 20% no seu teor após a transição do sistema de sequeiro para o de regadio, considerando os quatro tipos de solo analisados. Em particular, nos Calcisols, a matéria orgânica diminuiu 11,52% com a introdução da irrigação, embora esta variação não tenha sido considerada estatisticamente significativa. De forma geral, os autores observaram que os solos em sequeiro apresentavam teores de matéria orgânica superiores aos dos solos irrigados.

2.2.2. Condutividade elétrica

Os sais presentes no solo e na água, quando em excesso, são prejudiciais às culturas, causando reduções mais ou menos significativas na sua produção. Isso ocorre porque as plantas não conseguem absorver água do solo, mesmo quando este está húmido, devido à elevada pressão osmótica da solução do solo. Nesses casos, as plantas apresentam sinais de sede, não conseguindo atingir os níveis de produção que seriam esperados em condições ideais (Hawkins et al., 2017; Mustafa & Ansari, 2024).

A acumulação de sais no solo é frequentemente resultado da utilização contínua de águas de rega com elevados teores de sais, associada a práticas culturais inadequadas para este tipo de situação. A drenagem deficiente do solo e a aplicação excessiva de fertilizantes são as causas mais comuns da salinidade nos solos cultivados. A aplicação excessiva de sais é provavelmente a principal causa da salinidade nas culturas protegidas (Hawkins et al., 2017; Raballo et al., 2014; Siqueira et al., 2014). Quando não é possível misturar as águas para reduzir a sua salinidade, as técnicas mais

adequadas para o uso de águas com salinidade moderada a elevada incluem o uso de culturas pouco sensíveis aos sais, juntamente com a aplicação de dotações de água de rega que evitem a sua acumulação no solo, prática conhecida como fração de lavagem (Duarte & Navarro, 2021; Veloso et al., 2022).

Para que a fração de lavagem seja eficaz, é essencial que o solo tenha boa drenagem, evitando a acumulação de sais na região do perfil explorado pelas raízes. Os sistemas de irrigação localizada, como a irrigação por gotejamento, mostram maior eficiência no uso de águas com elevada condutividade em comparação com os métodos tradicionais. Isso ocorre porque, ao manter o solo constantemente húmido na área ao redor dos gotejadores, a condutividade elétrica dessa região permanece semelhante à da água utilizada na irrigação (Veloso et al., 2022).

A médio prazo, podem surgir problemas graves devido à acumulação de sais nas zonas envolventes do bolbo húmido. No caso da fertirrigação, é essencial considerar a condutividade elétrica dos adubos, para que a soma dos sais da água e dos adubos não resulte em condutividades excessivamente elevadas. Embora diferentes sais originem valores variados de condutividade elétrica, em termos práticos, pode-se considerar que 0,65 g/l de um sal solúvel origina uma condutividade elétrica de 1 mS.cm⁻¹ (Veloso et al., 2022). Assim, a aplicação de 2 g/l de alguns adubos solúveis a uma água de rega com condutividade elétrica inicial de 1 mS.cm⁻¹ pode resultar numa condutividade final de cerca de 4 mS.cm⁻¹, um valor excessivo para muitas culturas. Sendo a lavagem de sais a técnica mais adequada para o controlo da salinidade do solo, é importante que o solo seja protegido da erosão, permitindo que a água das chuvas durante o período outono/inverno se infiltre e ajude na remoção do excesso de sais. A manutenção de uma boa estrutura do solo também é fundamental, e as aplicações de matéria orgânica apresentam grandes vantagens nesse sentido: melhoram a estrutura do solo, promovem uma melhor infiltração da água e reduzem ou evitam escorrências superficiais (Hawkins et al., 2017; Veloso et al., 2022).

É recomendável realizar, periodicamente, a medição da condutividade elétrica do solo quando se utilizam águas com condutividade elétrica moderada a elevada. As amostragens devem abranger todo o perfil cultural, de forma a identificar possíveis zonas de acumulação de sais. Em situações mais críticas, torna-se necessário recorrer a análises mais detalhadas do extrato de saturação do solo, que incluam a determinação

da condutividade elétrica, das bases de troca e do grau de saturação em sódio — especialmente quando a água utilizada apresenta níveis moderados a elevados desse elemento (Pentoś et al., 2021; Veloso et al., 2022).

O estudo de Nunes et al. (2007) avaliou igualmente a evolução da condutividade elétrica do solo ao longo de 30 anos, em sistemas de sequeiro e de regadio, com foco nos Calcisols. Os resultados demonstraram, em primeiro lugar, que os valores registados em ambos os sistemas estavam consideravelmente abaixo dos limites indicados na literatura como restritivos para a prática agrícola. Em segundo lugar, verificou-se que os Calcisols sob regadio apresentavam valores significativamente mais elevados de condutividade elétrica em comparação com os de sequeiro. Foi ainda observada uma tendência crescente da condutividade elétrica com o aumento do tempo de irrigação. O autor atribuiu este fenómeno a duas causas principais: i) a adição gradual de eletrólitos, como o sódio, ao solo através da água de rega; e ii) o uso intensivo de fertilizantes na agricultura de regadio, que contribui para a salinização do solo.

No trabalho de Telo da Gama et al. (2019), outro parâmetro analisado foi a condutividade elétrica do solo. Os autores observaram um aumento dos valores de condutividade elétrica associado à transição do sistema de sequeiro para regadio, justificando este incremento pela acumulação de sais resultante da irrigação. Ao comparar a evolução da condutividade elétrica entre os dois sistemas de cultivo, ao longo dos 10 anos de estudo (2001/2002 a 2011/2012), verificou-se que esta aumentou tanto em solos de sequeiro como de regadio. Segundo os autores, o aumento registado nos solos de sequeiro poderá estar relacionado com o possível impacto das alterações climáticas, enquanto nos solos de regadio, deve-se sobretudo à acumulação de sais promovida pela irrigação. Importa ainda referir que, entre os quatro tipos de solos analisados, os Calcisols foram os que apresentaram o menor aumento nos valores de condutividade elétrica ao longo do período em estudo.

O estudo desenvolvido por Durán et al. (2024), realizado em Calcisols na ilha de Maiorca, abrangeu 24 pontos de amostragem, cada um composto por 10 subamostras recolhidas a uma profundidade de 0–20 cm. Foram analisadas propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos, sob regimes de sequeiro e regadio. Os resultados evidenciaram diferenças significativas entre os dois sistemas de cultivo. Nos solos

sujeitos a regadio, registaram-se valores superiores de condutividade elétrica, o que, segundo os autores, poderá estar associado ao aumento da utilização de fertilizantes neste sistema. No entanto, apesar desse incremento, não foram detetados problemas de salinidade em nenhum dos pontos avaliados, uma vez que os valores de condutividade elétrica variaram entre 0,09 e 0,51 dS.m⁻¹, considerados dentro dos limites adequados para a atividade agrícola.

2.2.3. pH

O pH do solo é um indicador do seu nível de acidez ou alcalinidade, determinado pela concentração de iões de hidrogénio (H⁺) presentes na solução do solo, expressa em gramas por litro (g/L). Esta medição é feita com base na escala de pH, que varia de 0 a 14, sendo que, nos solos, os valores mais comuns situam-se entre 4 e 8,5. Solos com pH inferior a 6,5 são considerados ácidos, enquanto aqueles com pH superior a 7,5 são classificados como alcalinos (Gibson, 2023; McCauley et al., 2017). A determinação do pH é realizada numa suspensão solo/água na proporção de 1:2,5. A escala de pH é logarítmica de base 10, o que significa que um pH de 4,0 representa uma acidez dez vezes superior à de um pH de 5,0 e cem vezes superior à de um pH de 6,0 (Veloso et al., 2022).

O pH é a medida da concentração de iões de hidrogénio (H⁺) na solução do solo, sendo, por isso, expectável que apresente variações ao longo do ano — geralmente com um aumento da concentração no verão e uma diminuição no inverno. Estas flutuações podem ser significativas e resultam de vários fatores, como a absorção preferencial de certos iões pelas plantas, a atividade microbiana e a diluição ou concentração de sais no solo (Veloso et al., 2022; Zhang et al., 2019).

A acidez do solo resulta de processos naturais que ocorrem ao longo do tempo, influenciados pelo clima e pelas características da rocha-mãe. No entanto, as práticas agrícolas adotadas podem intensificar ou atenuar esse fenómeno (Zhang et al., 2019). Em ambientes naturais, a acidificação dá-se de forma lenta e progressiva, enquanto, em áreas cultivadas, o processo tende a acelerar devido à remoção de cátions básicos pelas plantas. Além disso, muitos fertilizantes contribuem para o aumento da acidez do solo, especialmente aqueles que contêm azoto sob forma amoniacal ou orgânica (Veloso et al., 2022).

As plantas apresentam diferentes níveis de sensibilidade à acidez e à alcalinidade do solo, sendo que a maioria das espécies cultivadas tende a desenvolver-se melhor em solos com pH próximo do neutro ou ligeiramente ácido. Do ponto de vista agronómico, conhecer o pH do solo é essencial, uma vez que este fator afeta diretamente a disponibilidade de nutrientes e influencia a atividade de diversos microrganismos com funções fundamentais no ecossistema edáfico. Um exemplo claro são as nitrobactérias, responsáveis pelo processo de nitrificação (Lopes et al., 2020; Neina, 2019).

Em Portugal, os solos apresentam uma grande variabilidade no que respeita aos valores de pH. De forma geral, os valores mais baixos ocorrem em solos formados a partir de rochas ácidas, como o granito e os xistos. Além disso, nas regiões com maior pluviosidade, os solos tendem a ser mais ácidos, devido à intensa lixiviação de catiões básicos, fenómeno que acentua a acidificação natural dos solos (Grou, 2021).

A acidez dos solos observada nas regiões do Minho e da Beira Litoral está principalmente associada à natureza ácida da rocha-mãe, como granitos e xistos, bem como ao elevado índice de pluviosidade, que promove a lixiviação dos catiões básicos. Em contraste, no Sul do país predominam solos neutros ou ligeiramente alcalinos, devido à presença de extensas áreas com rochas de natureza básica, nomeadamente calcárias, e a um regime de precipitação mais reduzido (Veloso et al., 2022).

Os impactos da irrigação no pH do solo variam em função de diversos fatores, como a qualidade da água utilizada, o tipo de solo, a frequência das regas e as práticas agrícolas implementadas. A água de rega com elevados teores de bicarbonatos (HCO_3^-) e carbonatos (CO_3^{2-}), conforme referido no capítulo “Calcsols”, tende a elevar o pH do solo, tornando-o mais alcalino. Este fenómeno é particularmente evidente em regiões semiáridas e áridas, onde as fontes de água apresentam frequentemente elevada salinidade (Alvarez et al., 2024; Duarte & Navarro, 2021). O aumento do pH pode limitar a disponibilidade de certos nutrientes, sobretudo os micronutrientes, podendo provocar “stress” osmótico nas raízes (Ghimire et al., 2020). Para além disso, em sistemas de regadio, a evaporação intensa contribui para a acumulação de sais na superfície do solo, reforçando a tendência para o aumento do pH.

A introdução dos sistemas de rega impulsionou o aumento da utilização de fertilizantes nitrogenados, especialmente os de base amoniacal, como a ureia ou os nitratos de amónio, uma vez que são frequentemente aplicados através da água de rega. Este tipo de fertilização contribui para a redução do pH do solo, dado que durante o processo de nitrificação ocorre a formação de ácidos. Em solos arenosos ou com elevada capacidade de drenagem, a água de rega pode promover a lixiviação de cationes básicos, acentuando a acidificação do solo (Poyen et al., 2018).

As variações sazonais na qualidade da água e nos métodos de irrigação podem provocar oscilações temporárias no pH do solo, sendo estas resultado de fatores climáticos, biológicos e agronómicos. Tais alterações influenciam os processos químicos, físicos e biológicos que regulam o pH do solo.

A variação da humidade do solo, resultante da irrigação e das precipitações, constitui um dos principais fatores de alteração do pH. Durante as estações chuvosas, a lixiviação de cationes como cálcio, magnésio, potássio e sódio, provocada pelo excesso de água, pode reduzir o pH do solo, promovendo a sua acidificação. Em contrapartida, nas estações secas, a evaporação intensa pode concentrar sais na superfície do solo, contribuindo para o aumento do pH, conforme descrito no Decreto-Lei n.º 119/2019 (2019).

As temperaturas mais elevadas durante o verão promovem uma intensificação da atividade microbiana no solo, acelerando a decomposição da matéria orgânica e resultando na libertação de ácidos orgânicos, os quais podem contribuir para a redução do pH. Em contrapartida, durante o inverno, as baixas temperaturas reduzem significativamente a atividade microbiana, diminuindo a taxa de decomposição da matéria orgânica e podendo, assim, estabilizar ou até aumentar o pH do solo (Cao et al., 2021; Solanki et al., 2024; Thoms & Gleixner, 2013).

O estudo de Nunes et al. (2007) verificou que, nos Calcisols, não se registaram diferenças significativas nos valores de pH quando comparados os sistemas de regadio e de sequeiro. No entanto, o autor salientou a importância do tempo de exposição do solo ao regime de regadio, uma vez que se observou um aumento significativo da acidez nos Calcisols ao longo do tempo. Este facto evidencia que, embora os efeitos

imediatos da irrigação possam ser pouco expressivos, a sua influência prolongada pode alterar de forma relevante a reação do solo.

No estudo de Telo da Gama et al. (2019), verificou-se que a mudança do sistema de cultivo de sequeiro para regadio não provocou um aumento significativo no valor médio de pH do solo, que passou de 6,93 em sequeiro para 7,00 em regadio. Analisando especificamente os Calcisols, também se registou um ligeiro aumento do pH, de 7,97 para 8,06, sem impacto estatisticamente significativo. No entanto, ao observar a evolução dos valores de pH por sistema de cultivo, entre 2001/2002 e 2011/2012, constata-se que nos solos de sequeiro o pH se manteve constante, enquanto nos solos de regadio, os Calcisols apresentaram um aumento de 5,10%. Este aumento do pH está fortemente associado à dissolução de carbonatos e ao acréscimo de bicarbonatos introduzidos pela água da rega, sendo, por isso, comum que a irrigação contribua para o aumento do pH em solos calcários como os Calcisols.

O estudo de Durán et al. (2024), descrito no subcapítulo “Condutividade elétrica”, também analisou o pH do solo em condições de sequeiro e de regadio. Os valores obtidos variaram entre 8,0 e 8,5, o que é característico de solos calcários. No entanto, os valores de pH registados foram semelhantes entre os dois sistemas de cultivo, não se verificando diferenças significativas. O autor não avançou com uma explicação para a semelhança dos valores obtidos nos solos de sequeiro e de regadio.

3. Caracterização da área em estudo

3.1. Área de estudo

A área de estudo inclui a utilização hidroagrícola do perímetro de rega do Caia da Associação de Beneficiários do Caia, e a área circundante. O perímetro de rega do Caia, surgiu devido às irregularidades e adversas condições climáticas sentidas no Alentejo, região esta dominada pelos cereais, com baixa produtividade e crises cíclicas de desemprego. Perante este cenário foi criado o Plano de Rega do Alentejo, o qual teve como objetivos o desenvolvimento socioeconómico e a criação de indústrias ligadas à produção agrícola, pecuária e florestal. Desta forma, as obras para a construção da barragem do Caia, tiveram início em 1963 e terminaram em 1967, com a criação da Associação de Beneficiários do Caia em 1968 (ABCaia, 2024).

O perímetro de rega do Caia percorre as margens dos rios Guadiana e Caia e abrange os municípios de Campo Maior e Elvas. Atualmente é possível contabilizar 7240 ha de superfície de área regada, numa extensão de 35 km, a abranger o perímetro de rega do Caia. Tem a capacidade de abastecer as populações de Campo Maior, Elvas, Arronches e Monforte e de fornecer um caudal necessário à rega com uma dotação anual de 6840 m³/ha (ABCaia, 2024; Oliveira et al., 2001).

O perímetro de rega conta com a barragem do Caia, que tem uma área de 1970 ha e uma capacidade de armazenamento de 200 hm³. O sistema de rega caracteriza-se por ser um sistema de rega por gravidade com uma rede de 240 km de canais, dos quais 40,5 km formam os canais principais, enquanto os secundários são compostos por 33,5 km, sendo que os restantes 166 km dizem respeito aos canais terciários (Figura 3) (Telo da Gama, 2020).

No perímetro de rega do Caia existem quatro tipos de áreas que contam com diferentes taxações: Área excluída (usualmente de sequeiro ou de áreas afetadas a valas e canais); Área externa (a partir da albufeira do Caia é realizada a captação de água); Área a título precário (contígua ao perímetro); e Área beneficiada (dentro do perímetro de rega) (Ramalho, 2019).

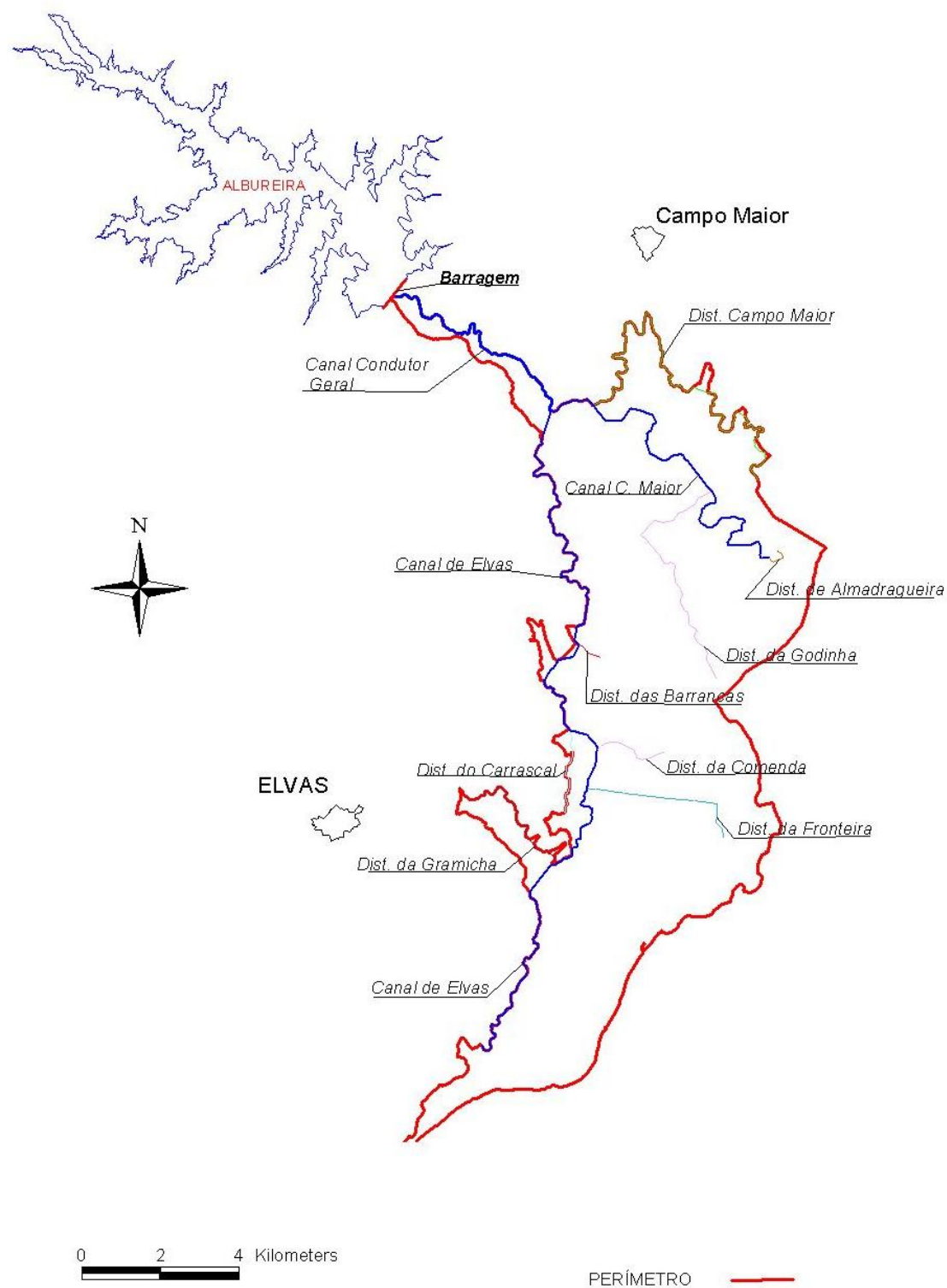


Figura 3 - Esquema de rega do Perímetro de Rega do Caia (ABCaia, 2024)

3.1.1 Calcisols da área de estudo

Os Calcisols do perímetro de rega do Caia foram identificados e classificados no estudo de Nunes (2003). Estes solos representam 18,9% da área de estudo o que equivale a 2342 ha dos cerca de 15030 ha do perímetro de rega do Caia. Estes solos são compostos principalmente de Calcisols Luvic, vérticos e Luvi-Endoleptic. Na Figura 4 é possível analisar a distribuição destes solos ao longo de todo o perímetro de rega do Caia, sendo que no Quadro I se encontram descritos os valores referentes às características edáficas dos Calcisols presentes no perímetro de rega do Caia.

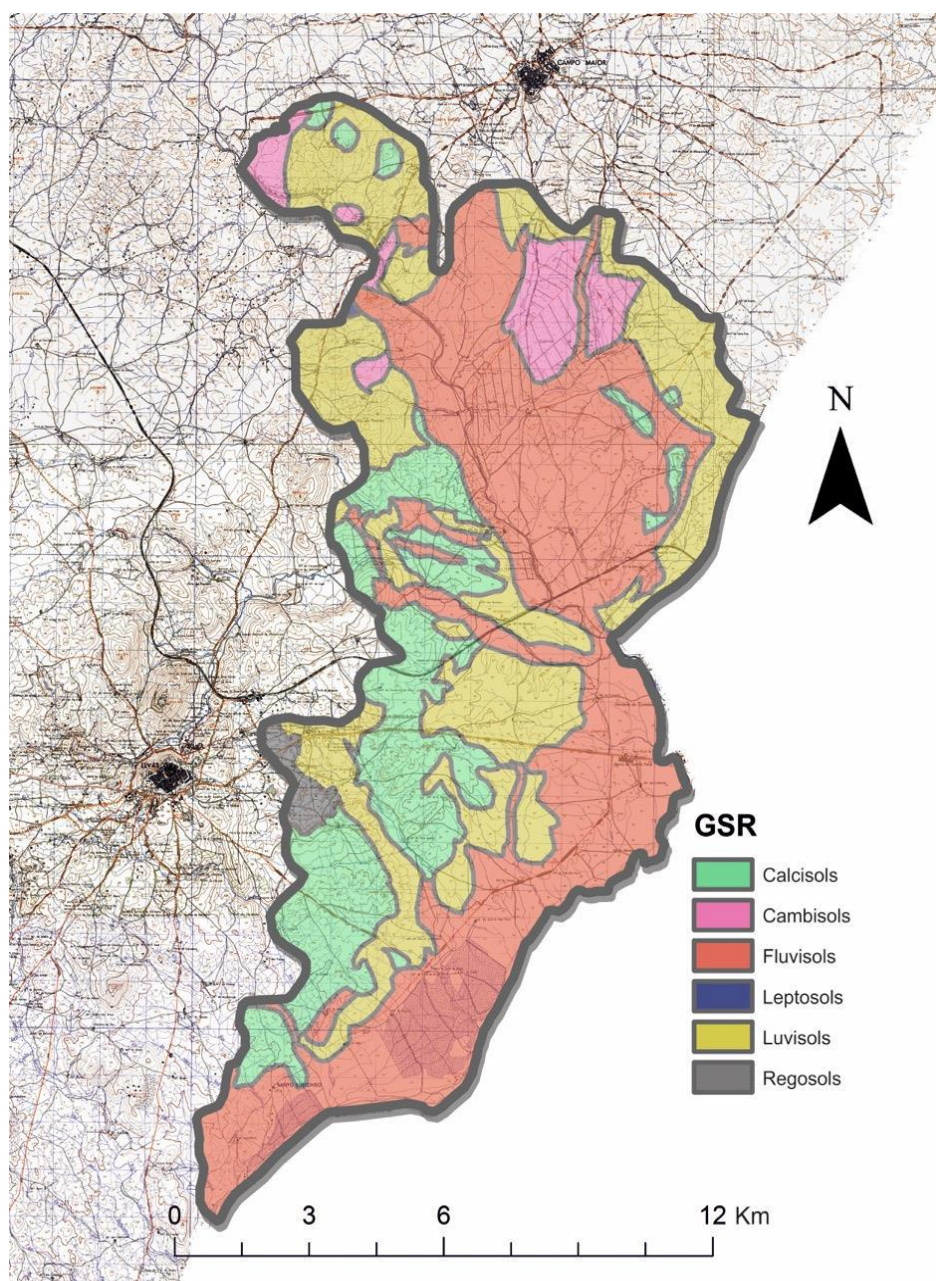


Figura 4 - Solos da área de estudo (Telo da Gama, 2020)

Quadro I - Principais propriedades edáficas dos Calcisols da área de estudo. Adaptado de Telo da Gama (2020)

Solo	prof.	pH (água)	MOS (g kg ⁻¹)	CE (dS m ⁻¹)	C/N	CaCO ₃ (%)	areia (%)	limo (%)	arg. (%)	Ca	Mg	K	Na	CTC	GSB
										(cmol ₍₊₎ Kg ⁻¹)					
Calcisols	0–20	7,44	20,4	0,170	6,94	15,1	50,0	21,0	29,0	11,7	1,18	0,570	0,340	14,8	73,1
	20–50	7,74	12,0	0,122	7,21	15,0	54,0	20,0	26,0	12,9	1,45	0,450	0,400	14,8	78,2
	>50	8,15	3,60	0,112	8,53	24,6	66,0	18,0	16,0	10,8	1,28	0,100	0,450	10,3	78,9

pH: potencial de hidrogénio; MOS: Matéria Orgânica do solo; CE: Condutividade elétrica; C/N: relação carbono/azoto; arg.: argila; CTC: Capacidade de troca catiónica (NH₄OAc (1M) a pH 7,0); GSB: Grau de Saturação de Bases

3.1.2. Evolução da qualidade da água de rega

As características físicas e químicas do solo são significativamente afetadas pelo volume e qualidade da água de rega pelo que é importante que haja um controlo destes parâmetros. No trabalho de Nunes (2003) a água utilizada no perímetro de rega do Caia foi classificada pela FAO como uma água sem restrições no uso agrícola e pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, uma água do tipo “CIS2”, ou seja, com baixa salinidade e sodicidade (Telo da Gama, 2020). Estas características têm-se mantido ao longo dos anos e a classificação não se tem alterado, contudo existiu um aumento de HCO_3^- entre 2001/2002 e 2011/2012. Os Valores passaram de $68,6 \text{ mg L}^{-1}$ para 101 mg L^{-1} , marcando este aumento a transição de níveis baixos para moderados de HCO_3^- presente na água de rega. Para além deste aumento, também foram registados outros como por exemplo: o Ca^{2+} aumentou 21,1% entre 2001/2002 e 2011/2012; o Na^+ registou um aumento de 33,9% entre os mesmos anos; a condutividade elétrica aumentou 18,9%; e o Cl^- registou aumentos de 173% desde 2001 a 2011/2012. Porém, o Mg^{2+} veio contrariar estas tendências, e teve uma diminuição de 0,2222 vezes desde o ano de 2000 até 2011/2012 (Telo da Gama, 2020).

Mais tarde, Nunes et al. (2015) retomaram a análise da qualidade da água no perímetro de rega do Caia e observaram que, ao longo de diversas recolhas realizadas durante um determinado período, o pH tendia a aumentar à medida que se avançava do canal principal para os canais secundários e terciários. Os autores sugeriram que esse fenómeno poderia estar relacionado com a passagem da água por extensas áreas de solos e rochas alcalinas, o que possivelmente contribuiria para o aumento dos valores de pH. No entanto, os resultados obtidos não foram considerados críticos para a qualidade da água.

3.1.3. Culturas presentes no perímetro de rega do Caia

Ao longo dos anos as culturas e o número de área cultivada têm vindo a alterar-se tal como é perceptível na Figura 5 sendo a cultura dominante o olival com um aumento de 968% desde 2002 (com 424 ha) a 2018 (com 4107 ha), sendo a cultura com a maior representatividade na área em estudo. A acompanhar este aumento estão os cereais, em particular a cevada e o tritcale, que aumentaram na área de estudo em 20%. Segundo Telo da Gama (2020), para além do crescimento destas culturas é de destacar

o arroz, as hortícolas, os frutos secos, a colza e as fruteiras, uma vez que tiveram um aumento de área de 2002 para 2018 (Figura 5). A colza, as hortícolas e os frutos secos, começaram a ter uma maior representatividade em 2018. Porém, com estes aumentos de áreas e de representatividade destas culturas outras acabaram por diminuir como foi o caso do milho, do girassol e do tomate.

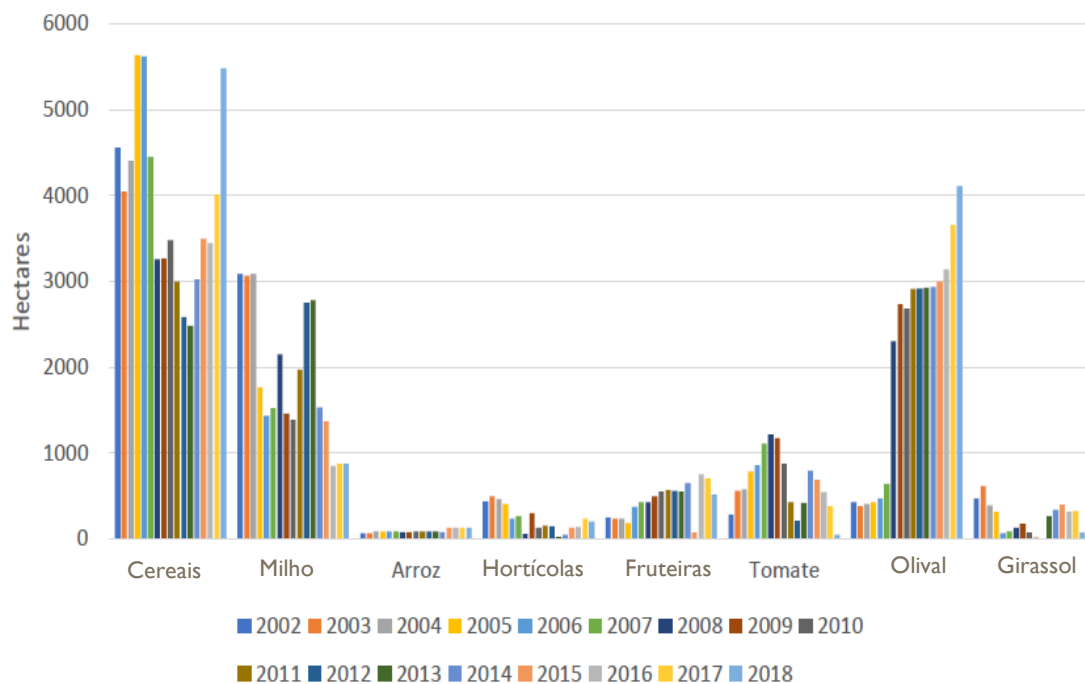


Figura 5 - Evolução da ocupação cultural no perímetro de Rega do Caia (Telo da Gama, 2020)

Atualmente, novas culturas estão a aparecer no perímetro de rega do Caia, como é o caso das figueiras da índia e dos espargos, como é possível verificar na carta cultural de 2021, delineada pela Associação de Beneficiários do Caia (Figura 6).

3.2. Caracterização do clima da região

Segundo a classificação de Köppen a região de Elvas (localização da área de estudo) classifica-se como um clima Csa: clima mediterrânico temperado com verão quente e seco. Ao contrário deste, Thornthwaite classifica o clima de Elvas como C1 b'4 B'2s, significando que o clima é subhúmido seco, com eficiência térmica moderada, mesotérmica a temperada, com excesso moderado de água no inverno.

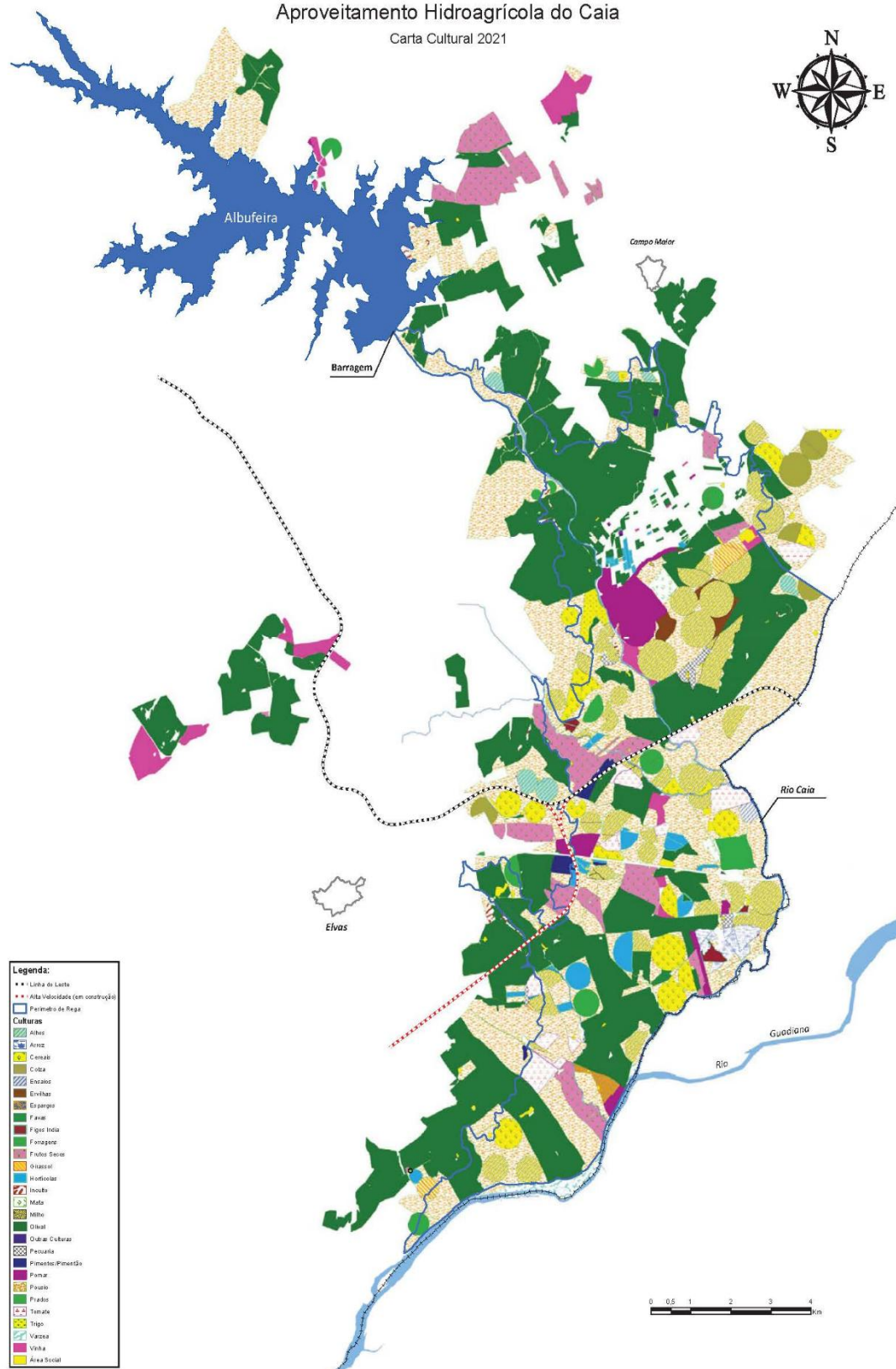


Figura 6 - Carta Cultura (ABCaia, 2024)

No Quadro 2 que apresenta os dados climáticos para a região de Elvas, com os valores normais de 1991/2020, disponibilizados pelo IPMA, é possível verificar que o mês mais quente é o mês de julho com uma temperatura máxima de 34,8°C. Já a temperatura mínima mais elevada é atingida em agosto com 17,1°C. Quanto às temperaturas mais baixas são atingidas no mês de janeiro, em que a temperatura máxima é de apenas 13,9°C, a temperatura mínima é de 4,1°C e a temperatura média de 9,0°C. Esta informação está também descrita na Figura 7 com as curvas das diferentes temperaturas.

Quadro 2 – Dados climáticos para o ano normal 1991/2020 (IPMA)

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
Tmédia	9,0	10,3	13,2	15,2	18,9	23,1	25,8	25,9	22,7	18,2	12,9	9,9	17,1
Tmáxima	13,9	15,9	19,2	21,6	26,0	31,2	34,8	34,6	30,1	24,2	17,9	14,5	23,6
Tmínima	4,1	4,7	7,1	8,8	11,8	15,0	16,8	17,1	15,2	12,3	8,0	5,3	10,5

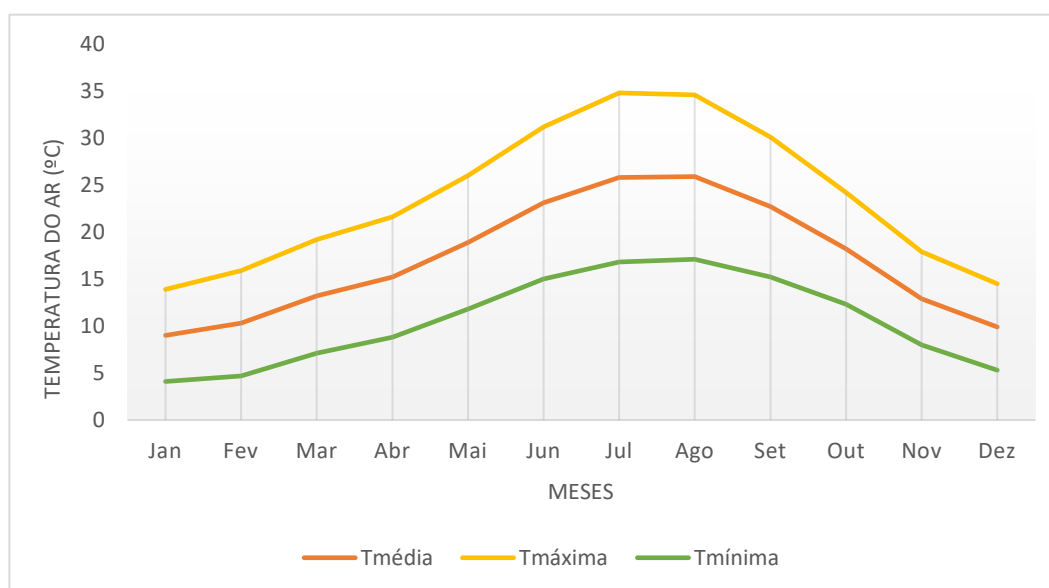


Figura 7 - Temperatura média (Tmédia), temperatura mínima (Tmínima) e Temperatura máxima (Tmáxima) para o ano normal 1991/2020 (IPMA)

Relativamente à precipitação, o valor médio anual é de 534,5 mm (Quadro 3). O mês mais chuvoso é o mês de novembro, com 81,0 mm, seguido dos meses de outubro e dezembro. Quanto ao mês menos chuvoso é de destacar o mês de julho, em que a precipitação é de apenas 1,9 mm (Figura 8).

Quadro 3 – Precipitação para o ano normal 1991/2020 (IPMA)

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
Precipitação (mm)	56,7	48,9	54,2	53,4	41,6	16,8	1,9	5,3	24,6	76,7	81,0	73,3	534,5

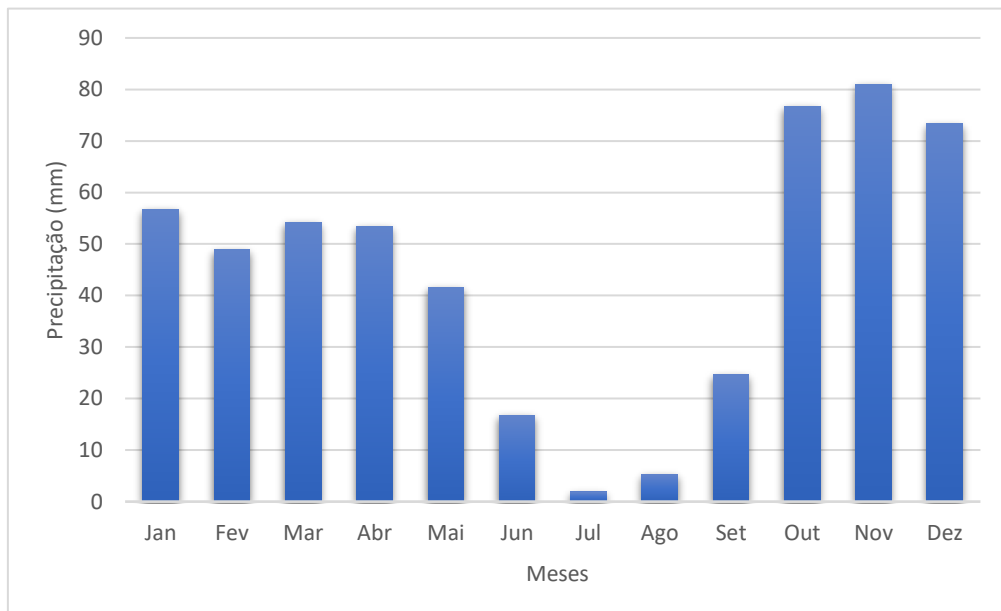


Figura 8 - Precipitação para o ano normal 1991/2020 (IPMA)

A estação meteorológica da Associação de Beneficiários do Caia recolhe mensalmente dados climáticos pelo que permite que seja realizada uma caracterização mais precisa quanto ao clima da área de estudo. Desta forma, foram recolhidos dados mensais desde 1969 até 2016 relativos à: precipitação média, temperatura mínima e máxima médias. Estes dados organizaram-se em médias de 30 anos, que representa um ano normal. Relativamente ao ET₀, os valores foram determinados pela equação de Hargreaves, sendo que os valores de radiação foram obtidos no IPMA.

$$ET_0 = a + b \times \frac{1}{\lambda} \times 0,0023 \times \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} + 17,8 \right) \times \sqrt{T_{max} - T_{min}} \times Ra$$

A precipitação, tendo em conta o Quadro 4, diminuiu cerca de 3,30% desde o início da recolha dos dados, sendo que a ET₀ aumentou 1,10%. O índice de aridez, que se refere à relação entre a precipitação e a evaporação, diminuiu ao longo dos anos de estudo. Apesar disto, apenas se define um clima como semiárido, de acordo com o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, quando o índice de aridez é inferior a 0,500.

Quadro 4 – Valores de precipitação, ET0 e Índice de aridez por ano normal, na área de estudo

Ano normal	Precipitação (mm)	ET0 (mm)	Índice de aridez (%)
1971 2000	482	807	0,600
1981 2010	484	818	0,590
1991 2016	466	816	0,570

O Quadro 5 descreve os valores médios, mensais, apenas para o ano normal de 1991/2016, data elegida para descrever melhor a área de estudo. Assim verifica-se que o valor mais elevado quanto à temperatura máxima é atingido no mês de agosto (34,6°C), ao contrário do descrito anteriormente e demonstrado no Quadro 2, em que julho era o mês mais quente. Quanto ao valor da temperatura máxima mais baixo, este é atingido no mês de janeiro. Relativamente ao valor mais baixo referente à temperatura mínima, este também se regista no mês de janeiro, enquanto o valor de temperatura mínima mais elevado é registado no mês de agosto. A precipitação média é de 466 mm, sendo o mês de outubro onde se registou o valor de precipitação mais elevado (72,7 mm), no lado oposto, o mês com menor precipitação é o de julho (4mm).

Quadro 5 – Valores registados na estação meteorológica da área de estudo para ano normal 1991/2016 (ABCaia)

Mês	Temp. média (°C)	Temp. máxima (°C)	Temp. mínima (°C)	Prec. (mm)	ET0 (mm)
Janeiro	8,90	13,5	4,40	53,0	18,7
Febreiro	10,1	15,0	5,20	39,8	24,3
Março	13,2	18,9	7,60	38,4	51,0
Abril	15,3	21,1	9,40	42,7	63,2
Maio	18,9	25,5	12,3	43,8	93,9
Junho	22,3	29,7	14,8	11,4	123
Julho	26,0	34,5	17,5	1,80	152
Agosto	26,1	34,6	17,6	4,00	131
Setembro	23,0	29,5	16,4	27,6	78,3
Outubro	18,4	23,6	13,1	72,7	40,4
Novembro	12,7	17,2	8,30	71,1	25,3
Dezembro	9,80	14,1	5,60	59,4	15,0
Ano	17,1	23,1	11,0	466	816

4. Material e Métodos

4.1. Delineamento experimental

O presente trabalho foi inicialmente desenvolvido por Nunes (2003), e mais tarde aprofundado por Telo da Gama (2020), que definiu o delineamento experimental, o qual se manteve igual ao longo dos anos e dos diferentes trabalhos realizados no estudo e análise da evolução dos parâmetros químicos e físicos do solo. Desta forma, para localizar os pontos de amostragem e desenvolver o seu trabalho de investigação o autor começou por delimitar a área regada do perímetro de rega do Caia (15 030 ha) nas Cartas Militares de Portugal, com escala de 1:25.000, de 1972. Estas cartas baseiam toda a informação em quadrículas georreferenciadas em vários sistemas de coordenadas. Posto isto, o autor optou por considerar o sistema de coordenadas cartográficas Universal Transversal Mercator (UTM) para localizar as amostras e representar os dados, pelo que se considerou que cada quadrícula representava uma área de 100 ha.

Cada quadrícula, composta por 100 ha, foi dividida em 9 subquadrículas exatamente iguais, onde cada uma delas tinha uma superfície de 11,1 ha, permitindo assim referenciar geograficamente a localização de onde seriam retiradas as amostras.

Caso no campo se observasse que na subquadrícula em questão existia heterogeneidade no que diz respeito ao sistema de cultivo (regadio ou sequeiro), culturas existentes (cereais e olival em sebe) e tipo de solo (diferentes texturas), esta era dividida ao meio, na direção norte-sul, formando-se dois novos polígonos idênticos, com 5,56 ha cada, georreferenciando-se o centro de cada uma deles.

A área em análise estende-se para além do limite do perímetro de rega do Caia, pelo que a área total em estudo foi de 15 030 ha e com um total de 1451 pontos georreferenciados. Foram recolhidas 10 subamostras de solo representativas de cada subquadrícula. Para isto recorreu-se à utilização de uma sonda de aço inoxidável que ia até uma profundidade de 20 cm. Após recolhidas as 10 amostras, estas eram cuidadosamente misturadas de forma a formar uma amostra composta, a qual era devidamente identificada e enviada para o laboratório. Em laboratório, a amostra era

seca ao ar e passada por uma peneira com uma malha retangular de aço inoxidável de 2 mm. Procedimentos estes realizados no ano 2001/2002.

Na segunda fase do estudo, realizado em 2011/2012, os locais de recolha das amostras foram os mesmos de 2001/2002, sendo que cada local, desta vez, foi localizado através de um Sistema de Posicionamento Global (GPS). Neste ano o trabalho foi recompilado de igual forma ao ano de 2001/2002, com a obtenção de 14 280 amostras da superfície do solo. Nesta segunda fase foram registadas as mesmas variáveis relevantes para o estudo observadas em campo: o sistema de cultivo (sequeiro ou regadio); profundidade do solo, pedregosidade; cobertura do solo, textura do solo; nível freático; e drenagem. Em laboratório, as análises realizadas foram com o intuito de se obterem parâmetros químicos como a matéria orgânica, condutividade elétrica e pH, entre outros, parâmetros abordados no presente trabalho.

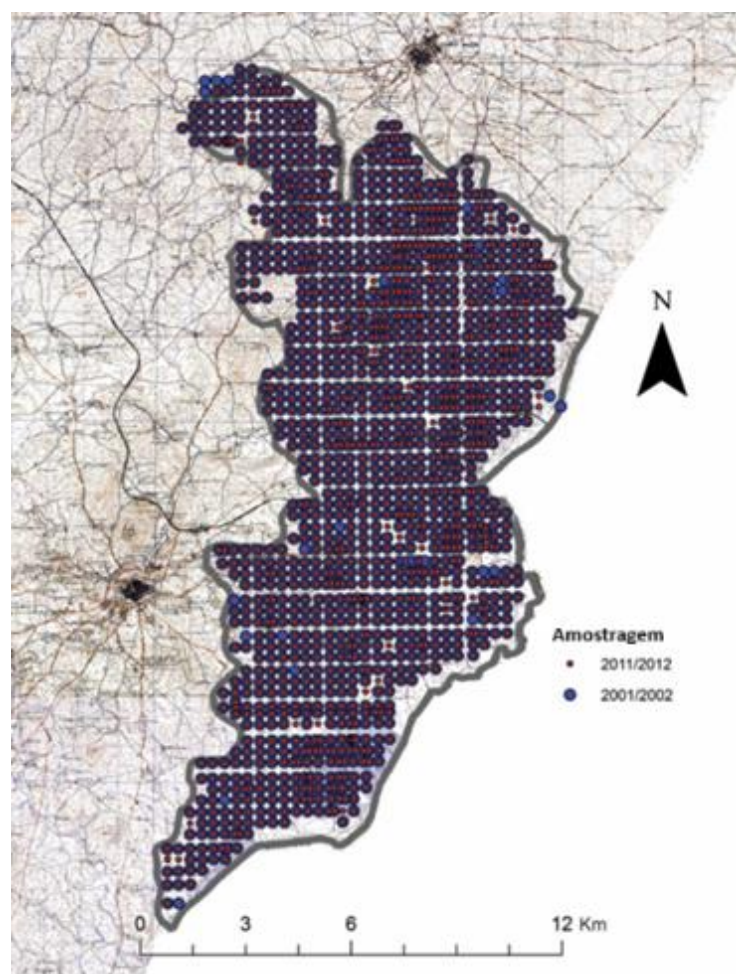


Figura 9 - Pontos de amostragem para 2001/2002 e 2011/2012 (Telo da Gama, 2020)

4.2. Trabalho laboratorial

4.2.1 Preparação da amostra

Em laboratório as amostras sofreram duas fases de secagem, em primeiro lugar foram secas ao ar durante 48h, sendo que posteriormente, numa segunda fase, foram colocadas em estufa a uma temperatura de 65,0°C, até que o seu peso permanecesse constante. Após isto, as amostras passaram por uma peneira que tinha uma malha de aço inoxidável de 2mm, para obtenção do solo peneirado, para posterior análise química.

4.2.2 Análises químicas realizadas

4.2.2.1. pH_{água}

O pH da amostra peneirada foi determinado a partir de uma mistura de água e solo, onde a proporção foi de 1 parte de solo por 5 partes de água (1:5 (v/v)). Para a medição do pH foi utilizado um potenciômetro METROHM 692 pH/Ion Meter.

4.2.2.2. Condutividade elétrica

A condutividade elétrica foi determinada a partir de um extrato aquoso numa proporção de 1 parte de solo por 5 partes de água (1:5 (v/v)), com recurso a um condutímetro.

4.2.2.3. Matéria Orgânica

A matéria orgânica foi determinada através da combustão por via húmida, da quantidade de carbono orgânico total de amostras de solo, pelo método Walkey-Black. Desta forma, recorreu-se ao método de oxidação, por via húmida, do carbono orgânico total com uma solução em excesso de dicromato de potássio 1N, em meio fortemente ácido, durante 30 minutos, sem aquecimento. Foi possível determinar indiretamente o teor de carbono orgânico total pela titulação do excesso de dicromato de potássio não reduzido, com uma solução de sulfato ferroso 1N, usando ácido ortofosfórico como agente complexante dos iões Fe^{3+} e a difenilamina como indicador de oxirredução.

4.3. Dados climáticos

De forma a ser possível caracterizar o clima da região e a área de estudo, foram utilizados os dados climáticos disponibilizados pelo IPMA para o ano normal mais recente: 1991/2020. Para além destes, o presente estudo também recorreu aos dados climáticos recolhidos pela Associação de Beneficiários do Caia, durante o período em análise. A associação recolhe os seus próprios dados numa estação meteorológica localizada numa zona bastante representativa da região: altitude de 208 m, latitude de 38° 53' N, e longitude de 7° 9' O. Para além disto, a estação é automática e pertence à rede de Sistemas Agrometeorológicos para a gestão de Rega no Alentejo (SAGRA) e à rede do Centro Operativo e de Tecnologia de Regadio (COTR).

4.4. Análise estatística

A análise estatística foi realizada com recurso ao Microsoft Excel, através da ferramenta de Análise de Dados, recorrendo à Análise de Variância (ANOVA) de fator único para a comparação de dois grupos independentes já que os dados estão normalmente distribuídos e existe homogeneidade de variâncias entre os grupos.

A tabela ANOVA criada incluiu os seguintes parâmetros:

- Soma dos Quadrados (SQ): total da variabilidade dos dados;
- Graus de Liberdade (gl): associados a cada componente da variância;
- Quadrado médio (QM): valor médio da variância por componente;
- Estatística F: razão entre a variância entre grupos e a variância dentro dos grupos (erro);
- Valor-p (Sig): probabilidade associada à estatística F.

Foi adotado um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Quando o valor-p obtido foi inferior a este limiar, considerou-se que existiam diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos dois grupos.

5. Resultados e Discussão

A evolução do pH dos Calcisols desde o ano 2001/2002 até ao ano 2011/2012 registou diferenças significativas ($p < 0,05$), tendo o valor médio sido de 7,75 e 7,95, respetivamente (Quadro 6).

Quadro 6- Evolução do pH de 2001/2002 até 2011/2012 nos Calcisols do perímetro de rega do caia

SUMÁRIO				
<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
2001/2002	247	1914,30	7,75	0,67
2011/2012	248	1971,02	7,95	0,45

ANOVA					
	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
Entre grupos	4,82	1	4,82	8,54	0,004
Dentro de grupos	278,55	493	0,57		
Total	283,38	494			

No período em estudo existiu um aumento do pH do solo que poderá estar ligado às práticas culturais realizadas, como por exemplo a maior intensificação de aplicação de adubos, ou alterações na qualidade da água da rega, no capítulo anterior verificou-se que a quantidade de bicarbonatos da água está a aumentar. Os bicarbonatos presentes na água de rega quando entram em contacto com o solo podem neutralizar os ácidos presentes no solo, ou seja, reagem com os iões H^+ , o que por consequência faz diminuir a acidez do solo e aumentar o pH do mesmo. Para além disto, este aumento também está ligado às características dos Calcisols (ricos em carbonatos). Posto isto, o estudo realizado por Sgouras et al. (2007) confirmou que a presença de carbonatos de cálcio e a natureza da rocha mãe influenciam significativamente o pH do solo, em especial nos solos mediterrânicos. Os carbonatos de cálcio conseguem neutralizar os iões H^+ (responsáveis pela acidez do solo), pelo que resulta num aumento do pH do solo, tornando-o mais alcalino. A rocha mãe, sendo a origem dos minerais do solo, em zonas mediterrânicas, as mais comuns são: Calcário e dolomite, ambas ricas em calcário. Neste sentido, a rocha-mãe, quando é calcária, também contribui ativamente para um pH elevado, uma vez que vai libertando carbonatos, que por sua vez, como referido, vão neutralizar os iões de H^+ . É particularmente importante esta questão nos

solos mediterrânico uma vez que estão inseridos numa região caracterizada por verões quentes e secos, evaporação alta e chuvas sazonais, pelo que existe pouca lixiviação dos carbonatos, estes acumulam-se e por consequência o pH aumenta.

No Quadro 7 referimos a evolução do pH no período de estudo, contudo são apenas avaliados os valores obtidos nos solos de sequeiro. Após observação do quadro verifica-se que o valor de $p < 0,05$, pelo que é possível concluir que existem diferenças estatisticamente significativas entre os valores de pH obtidos. Estes valores foram de 7,77 e 7,98, em 2001/2002 e 2011/2012, respetivamente, pelo que é possível verificar que o pH aumentou 0,21. Este aumento, nos solos de sequeiro deve-se essencialmente ao tipo de solo no qual o estudo está inserido, Calcisols. Estes solos, tal como referido anteriormente são ricos em carbonatos de cálcio o que naturalmente lhes confere um pH mais elevado, portanto frequentemente alcalino (Bontpart et al., 2024). Como o pH observado foi de 7,77 e 7,98 isto sugere que há uma ligeira tendência de alcalinização ao longo da década. Para além disto, o aumento da aplicação de fertilizantes e a evaporação da água nos solos de sequeiro, podem também traduzir-se em acumulação de sais que acaba por resultar num aumento do valor de pH. Neste sentido, Ortiz et al. (2024) verificou que a aplicação de fertilizantes orgânicos pode influenciar a disponibilidade de nutrientes e a qualidade do solo, sem causar aumentos significativos no pH do solo, contudo estas aplicações têm de ser realizadas de forma controlada.

Quadro 7 - Evolução do pH nos solos de sequeiro do perímetro de rega do Caia

SUMÁRIO				
<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
2001/2002	85	660,70	7,77	0,65
2011/2012	130	1037,98	7,98	0,39

ANOVA					
	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
Entre grupos	2,30	1	2,30	4,69	0,031
Dentro de grupos	104,46	213	0,49		
Total	106,76	214			

Quanto à evolução do pH no período em análise (Quadro 8), nos Calcisols de regadio, não foram detetadas diferenças significativas entre os valores de pH registados, 7,79 e 7,91, valor de $p > 0,05$. Os valores médios de pH registados são ligeiramente alcalinos, o que é característico dos Calcisols, especialmente em áreas irrigadas. A nível

agronómico, a manutenção do pH ao longo de uma década, sugere a estabilidade química no perfil destes solos, o que pode indicar uma boa gestão da rega ou então uma boa capacidade tampão dos solos. De forma a corroborar estes dados é necessário abordar o trabalho desenvolvido por Ortiz et al. (2023) que investigou a fertilidade e a lixiviação do fósforo em solos calcários, irrigados, no nordeste de Espanha. Estes solos caracterizavam-se por apresentarem um pH médio de 8,1 e o autor verificou que a irrigação contribuiu para a manutenção dos níveis elevados de pH, acabando assim por refletir a natureza calcária dos solos e as práticas agrícolas da região.

Quadro 8 - Evolução do pH nos solos de regadio do perímetro de rega do Caia

SUMÁRIO				
<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
2001/2002	143	1113,7	7,79	0,64
2011/2012	118	933,04	7,91	0,53

ANOVA					
	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
Entre grupos	0,92	1	0,92	1,55	0,214
Dentro de grupos	152,62	259	0,59		
Total	153,54	260			

O Quadro 9 descreve os valores médios relativos aos teores de matéria orgânica, em solos de sequeiro e regadio, no período em análise. Observa-se que o valor médio em 2001/2002 era de 1,68%, enquanto em 2011/2012 foi registado um valor de 1,54%, pelo que é possível afirmar que existiu uma diminuição dos teores de matéria orgânica ao longo da década em estudo. O valor de $p < 0,05$, o que nos indica que existem diferenças significativas entre os dados obtidos. A redução da matéria orgânica pode estar relacionada a fatores como as práticas agrícolas intensivas, ou uso contínuo da rega, sem reposição da matéria orgânica e alterações no uso do solo, como é possível verificar nas Figuras 10 e 11. De forma a contrariar estes valores é necessário o recurso, quando aplicável, a fertilizantes orgânicos, a incorporação de detritos culturais e manter o solo coberto, sempre que possível. Neste sentido, o estudo desenvolvido por Aguilera et al. (2018) vai ao encontro dos dados registados no presente estudo, uma vez que este autor analisou a evolução do carbono orgânico do solo (COS) em terras agrícolas ao longo do século XX e início do século XXI (1900-2008), em Espanha. Nesse estudo, o autor indicou que os resultados obtidos demonstraram que

existiu uma diminuição em 17% das concentrações de COS, desde 1993, ano em que se atingiu o pico. O autor atribuiu esta diminuição de COS à intensificação agrícola, à expansão da irrigação e ao aumento das taxas de mineralização devido às alterações climáticas. Numa outra perspetiva, no estudo de Muñoz-Rojas et al. (2012), realizado nos solos mediterrânicos do sul de Espanha, o autor teve por objetivo verificar qual dos vários tipos de solos presentes, incluindo os Calcisols, armazenava maior quantidade de carbono orgânico, até à profundidade de 75 cm. Em primeiro lugar, percebeu que 55% do carbono orgânico do solo está presente nos primeiros 25 cm de solo e de seguida concluiu que os Calcisols eram dos solos, a seguir aos Fluviosols, que apresentavam elevado conteúdo de carbono orgânico do solo armazenado. Os solos com maior quantidade de matéria orgânica eram os solos de florestas e matos, sendo que os solos com menor quantidade de carbono orgânico eram os solos com culturas permanentes, que apresentavam menores stocks nas camadas superficiais.

Quadro 9 - Evolução dos teores de MO de 2001/2002 até 2011/2012 nos Calcisols do perímetro de rega do caia

SUMÁRIO				
<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
2001/2002	247	414,20	1,68	0,24
2011/2012	247	380,97	1,54	0,34

ANOVA					
	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>
Entre grupos	2,24	1	2,24	7,66	0,006
Dentro de grupos	143,57	492	0,29		
Total	145,81	493			

A comparação entre os teores de matéria orgânica no período em análise, em específico nos solos de sequeiro encontra-se demonstrado no Quadro 10. Após análise verifica-se que existiu uma ligeira diminuição dos teores médios de matéria orgânica, no entanto esta diferença não demonstrou ser estatisticamente significativa ($p > 0,05$). Isto indica que em sequeiro e nos Calcisols os níveis de matéria orgânica tendem a manter-se estáveis ao longo do tempo, tendo também em conta as práticas culturais aplicadas neste período e as culturas presentes. Neste sentido, González-Rosado et al. (2022) analisou as concentrações de carbono e a capacidade dos solos o sequestrarem. Este estudo decorreu em solos com diversidade cultural e em solos com olivais, ambos de sequeiro, durante 4 anos, no sul de Espanha. O autor, concluiu

que os primeiros apresentam maior capacidade de sequestro de carbono e maior estabilidade em comparação com o olival. O trabalho de Calero et al. (2023) avaliou a estabilidade do carbono orgânico do solo, em olivais de sequeiro sob sistemas de manejo distintos: solo nu e solo com cobertura vegetal, ambos em Calcisols. O autor verificou que em ambos os sistemas de cultivo os teores de matéria orgânica não variavam drasticamente, o que sugere estabilidade em ambientes mediterrânicos e de sequeiro, contudo nos solos com cobertura vegetal o autor registou um aumento nos teores de carbono orgânico do solo.

Quadro 10 – Evolução dos teores de MO nos solos de sequeiro

SUMÁRIO					
<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
2001/2002	85	128,50	1,51	0,14	
2011/2012	130	191,36	1,47	0,27	
ANOVA					
	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
Entre grupos	0,08	1	0,08	0,37	0,543
Dentro de grupos	46,57	213	0,22		
Total	46,65	214			

Os valores médios relativos aos teores de matéria orgânica nos Calcisols de regadio encontram-se registados no Quadro 11. Após análise verifica-se que o valor de $p < 0,05$, pelo que existem diferenças significativas entre os valores médios obtidos, 1,76% e 1,62%, em 2001/2002 e 2011/2012, respetivamente. Isto demonstra que no período em análise se verificou a diminuição dos teores de matéria orgânica nos solos de regadio, que está ligado: solos de regadio apresentam maiores condições de humidade e arejamento, criando condições ideais à atividade microbiana, o que por sua vez favorece a mineralização da matéria orgânica. De forma a contrariar este fator, é necessário que haja reposição de matéria orgânica, seja com a aplicação de estrume, compostos ou detritos culturais. A natureza intrínseca dos Calcisols, ricos em carbonatos de cálcio, favorece a rápida decomposição da matéria orgânica, uma vez que a atividade microbiana também é intensificada em pH neutro-alcalino (pH característico destes solos). As práticas culturais realizadas neste período também têm influência no teor final de matéria orgânica uma vez que a ausência de rotações com leguminosas e culturas de cobertura leva à menor adição de resíduos vegetais no solo (Laudicina et al., 2010), tal como as mobilizações criam condições à mineralização da

matéria orgânica. Antón et al. (2022), no seu estudo avaliou as alterações no armazenamento de carbono orgânico do solo aquando da transição de sequeiro para regadio, nos Calcisols da Bacia Mediterrânica. Desta forma, o autor concluiu que com a irrigação do milho e do trigo (culturas utilizadas no estudo), existiram aumentos significativos quanto ao carbono orgânico total registado. Para além disto, não registou alterações significativas no tempo médio em que o carbono orgânico permanecia no solo, pelo que o autor concluiu que a sua mineralização não foi afetada pela irrigação, referindo assim que os carbonatos presentes no solo podem ter contribuído para a estabilização do carbono. Tendo em conta estes resultados, Antón et al. (2022) obteve resultados contrários em comparação com aos resultados obtidos no presente estudo. Seguindo esta linha de raciocínio, o autor Balaid et al. (2012) analisou durante 15 anos o impacto da irrigação dos Calcisols da Tunísia com águas residuais tratadas. Este autor concluiu que a irrigação daqueles solos com estas águas resultou num aumento de matéria orgânica e de nutrientes essenciais como azoto e fósforo.

Quadro 11 – Evolução dos teores de MO nos solos de regadio

SUMÁRIO					
<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
2001/2002	143	252,30	1,76	0,27	
2011/2012	117	189,61	1,62	0,41	
ANOVA					
	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
Entre grupos	1,33	1	1,33	3,99	0,047
Dentro de grupos	86,06	258	0,33		
Total	87,39	259			

A condutividade elétrica (CE), também foi analisada nos Calcisols do perímetro de rega do Caia (Quadro 12). Analisando o Quadro 12 verifica-se que as médias registadas em ambos os anos de estudo, se encontram na faixa considerada não salina, $<2 \text{ dS.m}^{-1}$. Apesar disto, a média dos valores da condutividade elétrica aumentou de 2001/2002 para 2011/2012, o valor de $p < 0,05$ pelo que se registaram valores estatisticamente diferentes. Ainda que os valores estejam baixos não deixa de ser necessário continuar a analisar a condutividade elétrica, uma vez que se registou um aumento significativo ao longo de uma década, o que sugere a acumulação de progressiva de sais, que podem estar relacionados com: a qualidade da água de rega; má drenagem da água,

provocando a acumulação de sais na zona radicular; uso excessivo de fertilizantes salinos.

Quadro 12 - Evolução dos valores de CE de 2001/2002 até 2011/2012 nos Calcisols do perímetro de rega do caia

SUMÁRIO				
<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
2001/2002	247	31,46	0,13	0,02
2011/2012	252	39,09	0,16	0,005

ANOVA					
	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
Entre grupos	0,10	1	0,10	9,24	0,002
Dentro de grupos	5,17	497	0,01		
Total	5,27	498			

O Quadro 13 é mais específico quanto aos valores médios de condutividade elétrica registados no período em análise, uma vez que expressa a média obtida apenas nos solos de sequeiro. Após a sua análise verifica-se que a média da condutividade elétrica diminuiu ao longo da década, contudo a ANOVA indicou que essa diferença não é estatisticamente significativa. O valor de $p > 0,05$ pelo que não existem evidências estatísticas suficientes para que seja possível afirmar que as médias são diferentes entre os dois períodos. Sendo os Calcisols caracterizados por apresentarem tendências de acumulação de sais, também são caracterizados por apresentarem uma boa drenagem sob determinados contextos, ou seja, quando não há compactação do solo ou uma camada petrocálcica à superfície, o que nos indica que sob determinadas condições de precipitação, vegetação do solo e uso do mesmo, os sais podem ser lixiviados para as camadas mais profundas e consequentemente diminuir os valores de CE nas camadas superficiais (Lepsch, 2010). As práticas culturais integradas na conservação do solo, como por exemplo cobertura vegetal, menos mobilizações e a adoção de uma agricultura de conservação, aliado a uma alteração no uso da terra, como por exemplo a mudança para culturas com exigências diferentes, como é possível observar nas Figuras 10 e 11, podem ter reduzido a entrada de sais no solo ou aumentado a sua remoção natural (Serrano et al., 2016). O facto de estes solos estarem presentes na bacia mediterrânica, que se caracteriza por invernos chuvosos e verões secos, pode ter afetado os valores registados de CE. Durante o período em análise registaram-se invernos mais chuvosos e uma maior frequência de precipitação o que pode ter

originado a que os sais tenham sido lixiviados para camadas mais profundas, sendo que isto acaba também por estar ligado ao facto de os Calcisols terem uma boa capacidade de drenagem. Tendo em conta a bibliografia observada, os estudos que abordem a evolução da CE em Calcisols de sequeiro, na Bacia Mediterrânica, são em menor número, quando comparado com Calcisols irrigados, pelo que é importante e necessário que aumentem estes estudos uma vez que, apesar de a diminuição na média de valores, não se ter demonstrado significativa, é necessário que os estudos nesta área e nestas características específicas continuem, visto a salinidade do solo ser um parâmetro determinante para as culturas.

Quadro 13 - Evolução dos valores de CE nos solos de sequeiro

SUMÁRIO				
<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
2001/2002	85	15,33	0,18	0,036
2011/2012	131	20,34	0,16	0,004

ANOVA					
	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
Entre grupos	0,03	1	0,032	1,97	0,162
Dentro de grupos	3,53	214	0,016		
Total	3,56	215			

Quanto à condutividade elétrica nos Calcisols de regadio (Quadro 14). É possível concluir que existiu uma diferença estatisticamente significativa entre os valores médios registados em 2001/2002 e 2011/2012, 0,1009 dS.m⁻¹ e 0,1589 dS.m⁻¹, respetivamente, uma vez que o valor de $p < 0,05$. O aumento médio dos valores de CE foi de cerca de 57%, ao longo de uma década, sendo que isto pode indicar uma tendência para a salinização do solo, mesmo que os valores ainda estejam dentro de níveis baixos (< 2 dS.m⁻¹). Este aumento significativo pode estar relacionado com a utilização contínua da água para rega e a qualidade da mesma e/ou com o uso excessivo de fertilizantes. A água utilizada no perímetro de rega do Caia, tal como descrito no Capítulo 3, foi considerada uma água sem restrições no uso agrícola, contudo durante a década em análise o teor de HCO₃⁻ aumentou, tal como a própria condutividade elétrica da água e outros elementos nela presentes (Ca²⁺, Na⁺ e Cl⁻). Desta forma, estes factos permitem explicar o porquê de a CE dos Calcisols ter aumentado no período em análise, sendo que a este fator se alia o facto de estes sais não serem lixiviados. Posto isto, é imprescindível a avaliação contínua da qualidade da

água de rega utilizada no Perímetro de rega do Caia. Belaid et al. (2012) avaliou os efeitos a longo prazo (15 anos) da irrigação dos Cacicisols da Tunísia, tendo em conta três profundidades (0-30 cm; 30-60 cm; e 60-90 cm) de solo distintas, para análise. Posto isto, o autor verificou que existiu um aumento da condutividade elétrica em todas as profundidades, indicando assim uma acumulação de sais provenientes da água utilizada. Mendes & Carvalho (2009) verificaram que as práticas agrícolas, em solos de regadio, também têm influência na condutividade elétrica registada no solo, uma vez que neste estudo os solos nos quais se recorreu à sementeira direta, apresentavam valores mais baixos em comparação com os sistemas convencionais.

Quadro 14 - Evolução dos valores de CE nos solos de regadio

SUMÁRIO				
<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
2001/2002	143	14,43	0,10	0,004
2011/2012	118	18,75	0,16	0,006

ANOVA					
	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
Entre grupos	0,22	1	0,22	47,62	3,972E-11
Dentro de grupos	1,18	259	0,00		
Total	1,40	260			

A Figura 10 evidência a área ocupada pelas culturas e o seu sistema cultural (sequeiro ou regadio) registado no primeiro ano do estudo (2001/2002), no perímetro de rega do Caia. Da análise desta figura é possível concluir que das culturas identificadas destaca-se a beterraba de regadio, com uma área de 1154,4 ha, seguida do milho de sequeiro, com 421 ha, sendo que desta segunda cultura não há registos de áreas em regadio. Para além destas culturas verificou-se também a presença de trigo (de sequeiro e regadio), olival (de sequeiro e regadio) e girassol (apenas registadas áreas de regadio). Com o mesmo intuito, no segundo ano de estudo (2011/2012), e já passados 10 anos, efetuou-se o mesmo registo, no qual se verificou a presença das mesmas culturas, contudo registaram-se alterações a nível de áreas. O olival de sequeiro aumentou de área (Figura 11) de forma exponencial. Esta cultura transitou de 111 ha em 2001/2002 para 832,5 ha em 2011/2012, pelo que em 10 anos o aumento foi de 721,5 ha. Apesar disto, o olival de regadio teve uma diminuição, passando de 166,5 ha para 122,1 ha. Juntamente a esta diminuição de área, está a beterraba tanto

de sequeiro como de regadio, e o milho de sequeiro. A beterraba de regadio em 2011/2012 apresentava 921,3 ha e a beterraba de sequeiro 33,3 ha.

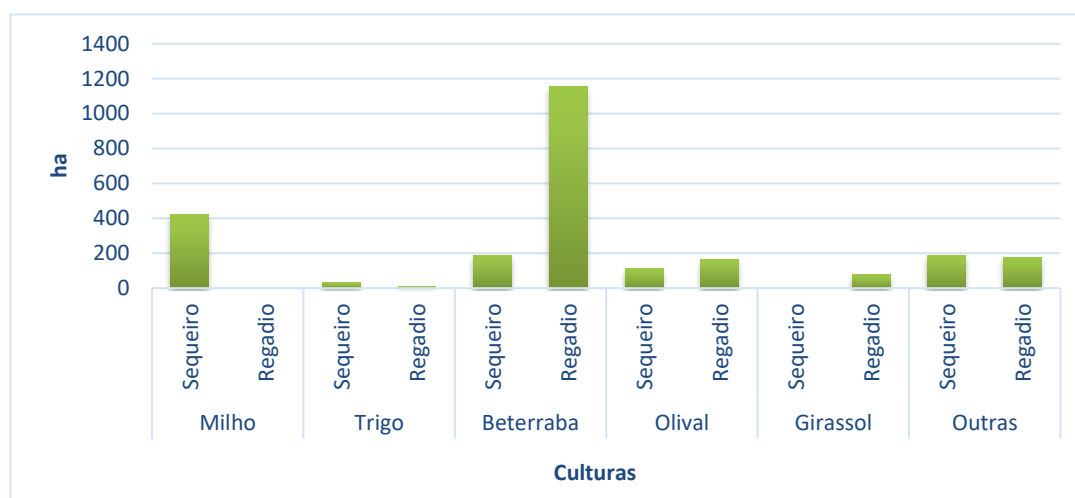


Figura 10 – Áreas de sequeiro e regadio ocupada pelas culturas identificadas no Perímetro de Rega do Caia em 2001/2002

Em 10 anos a beterraba de regadio perdeu 233,1ha e em sequeiro a perda foi de 155,4ha. Relativamente ao milho de sequeiro, no segundo ano de estudo apenas foram registados 188,7 ha, ou seja, menos 232,3 há, quando comparada com o primeiro ano de estudo. Em 2011/2012 também não se registou áreas de milho de regadio. Apesar destas diminuições de áreas, é necessário destacar o trigo de sequeiro e o girassol de regadio, uma vez que aumentaram a sua área. O trigo de sequeiro apresentava inicialmente (em 2001/2002) 33,3 ha e o girassol de regadio 77,7 ha. Em 2011/2012 o trigo passou a ter uma área de 244,2 ha e o girassol de 210,9 ha, pelo que os aumentos de área foram em 210,9 ha e 133,2 ha, respetivamente.

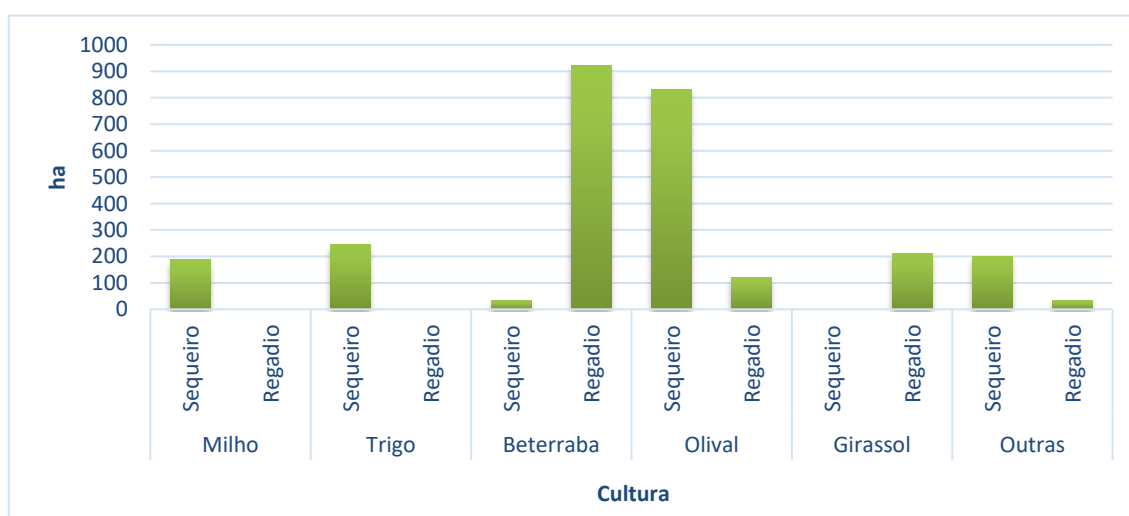


Figura 11 - Áreas de sequeiro e regadio ocupada pelas culturas identificadas no Perímetro de Rega do Caia em 2011/2012

Os valores médios das propriedades químicas dos Calcisols ($\text{pH}_{\text{água}}$, MO, CE), no período em estudo, caracterizados pela presença do milho está expresso na Figura 12.

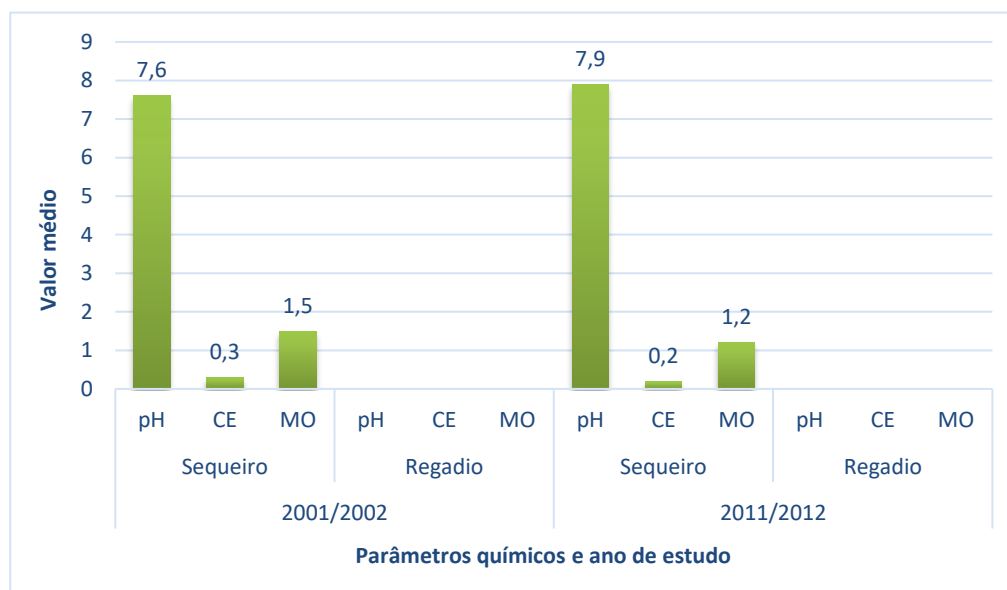


Figura 12 – Evolução dos parâmetros químicos nos Calcisols com Milho

O milho é uma cultura que para o seu ótimo desenvolvimento necessita que a faixa de pH esteja compreendida entre 5,8 e 7 (Veloso et al., 2022), sendo sensível à carência de zinco, magnésio, boro e enxofre. O valor de pH, médio, registado em 2001/2002 foi de 7,6, enquanto em 2011/2012 o valor já foi de 7,9, apesar deste aumento, estatisticamente não demonstrou ser significativo (Quadro 15).

Quadro 15 – Evolução do pH nos Calcisols de sequeiro com Milho

SUMÁRIO				
Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância
2001/2002	38	289,60	7,62	0,76
2011/2012	17	134,92	7,94	0,45

ANOVA					
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P
Entre grupos	1,17	1	1,17	1,75	0,191
Dentro de grupos	35,33	53	0,67		
Total	36,50	54			

Quanto à condutividade elétrica, o milho necessita que os valores sejam $< 2,0 \text{ dS.m}^{-1}$, sendo que nos solos analisados os valores registados foram de $0,3 \text{ dS.m}^{-1}$ e $0,2 \text{ dS.m}^{-1}$, pelo que de acordo com o Quadro 16 esta diferença de valores não é estatisticamente significativa. Por fim, relativamente à matéria orgânica o teor ideal ao desenvolvimento desta cultura encontra-se entre os 2,5% e os 5%.

Quadro 16 – Evolução da CE nos Calcisols de sequeiro com Milho

SUMÁRIO					
Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância	
2001/2002	38	10,14	0,27	0,062	
2011/2012	17	3,45	0,20	0,007	

ANOVA					
	SQ	gl	MQ	F	valor-P
Entre grupos	0,05	1	0,05	1,06	0,309
Dentro de grupos	2,42	53	0,05		
Total	2,47	54			

Nos pontos de amostragem dos Calcisols em estudo, o valor da matéria orgânica diminuiu de 1,5%, em 2001/2002, para 1,2%, em 2011/2012, verificando-se esta diferença de valores estatisticamente significativa. Posto isto, e tendo em conta que os Calcisols se caracterizam por serem ricos em bicarbonatos de cálcio, que por sua vez afetam a disponibilidade de fósforo, zinco e manganês (essenciais ao milho) (Nájera et al., 2015; Ortiz et al., 2023) e por terem, geralmente, baixas percentagens de matéria orgânica, as produções de milho ficam comprometidas. E exemplo disto é o facto de a área de milho desde 2001/2002 até 2011/2012 ter diminuído, visto que os Calcisols não apresentam condições ótimas ao seu desenvolvimento.

Quadro 17- Evolução da MO nos Calcisols de sequeiro com Milho

SUMÁRIO					
Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância	
2001/2002	38	56,20	1,48	0,12	
2011/2012	17	21,18	1,25	0,23	

ANOVA					
	SQ	gl	MQ	F	valor P
Entre grupos	0,64	1	0,64	4,18	0,046
Dentro de grupos	8,08	53	0,15		
Total	8,71	54			

O trigo, sendo também uma cultura arvense, tem o seu ótimo desenvolvimento em solos que se caracterizem por apresentarem um pH compreendido entre os 6,0 e os 7,5 (Velooso et al., 2022), com teores de matéria orgânica a partir de 2% (Dang et al., 2024) e valores de condutividade elétrica abaixo de 1,0 dS.m⁻¹ (Lima et al., 2021). Na Figura 13 é possível observar os valores registados nos pontos de amostragem caracterizados pela presença do trigo.

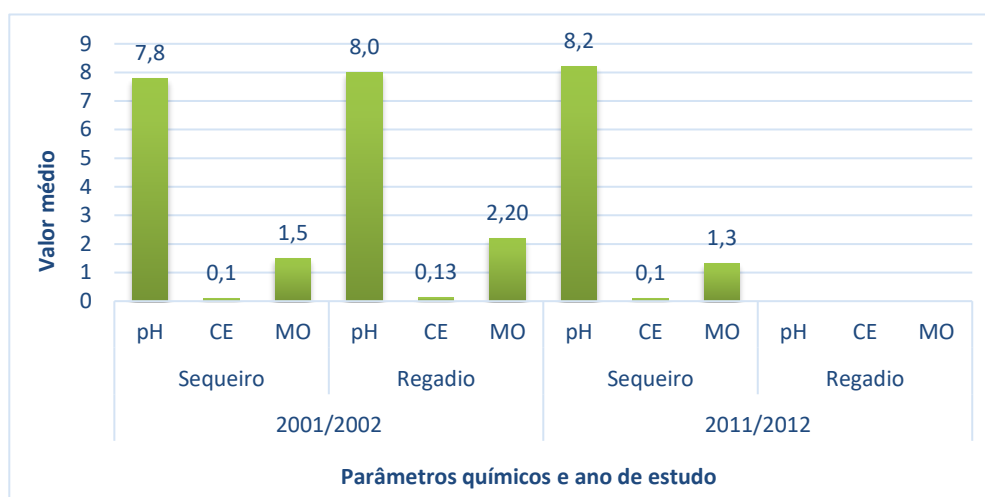


Figura 13 – Evolução dos parâmetros químicos dos Calcisols com Trigo

Verifica-se que o pH aumentou de 7,8 para 8,2, em regime de sequeiro, contudo este aumento não demonstrou ser estatisticamente significativo (Quadro 18). A matéria orgânica diminuiu de 1,5% para 1,3%, apesar disto, de acordo com o Quadro 20, esta diminuição de valor não apresentou ser estatisticamente significativa.

Quadro 18 – Evolução do pH nos Calcisols de sequeiro com Trigo

SUMÁRIO				
Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância
2001/2002	3	23,50	7,83	0,30
2011/2012	22	179,63	8,17	0,06

ANOVA					
	SQ	gl	MQ	F	valor-P
Entre grupos	0,29	1	0,29	3,43	0,077
Dentro de grupos	1,94	23	0,08		
Total	2,24	24			

A condutividade elétrica manteve-se inalterada ($0,10 \text{ dS.m}^{-1}$), ou seja, sem diferenças estatisticamente significativas (Quadro 19). Em regadio, o valor do pH era de 8,0, o da condutividade elétrica de $0,13 \text{ dS.m}^{-1}$ e a matéria orgânica de 2,2%. Posto isto, verifica-se que os Calcisols em 2001/2002 e 2011/2012 não apresentavam condições ótimas ao desenvolvimento do trigo, contudo verificou-se o aumento da área, em sequeiro, de trigo, de 2001/2002 para 2011/2012 (aumentou cerca de 7 vezes) (Figura 10 e 11).

Quadro 19 – Evolução da CE nos Calcisols de sequeiro com Trigo

SUMÁRIO				
<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
2001/2002	3	0,40	0,13	0,002
2011/2012	22	3,23	0,15	0,002

ANOVA					
	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
Entre grupos	0,00	1	0,00	0,31	0,584
Dentro de grupos	0,04	23	0,00		
Total	0,04	24			

Este aumento poderá ter ocorrido devido à valorização dos cereais que se registou no período em análise, na União Europeia (UE), com ajudas e pagamentos por área. Para além disto, o trigo de sequeiro é uma opção viável e de baixo custo, com um risco económico reduzido, requerendo menos investimento, quando comparado a outras culturas, e é totalmente mecanizável (Scandurra et al., 2024). É também uma cultura tolerante ao pH alcalino, mantendo a sua rentabilidade com uma boa preparação do solo e alguma adubação (Zampieri et al., 2020). Além disto, alguns produtores começaram a usar terras antes abandonadas ou subutilizadas — mesmo com pH alto — para cumprir obrigações de manutenção de atividade agrícola, especialmente no contexto da Política Agrícola Comum (PAC). Desta forma, o aumento do pH não foi um fator limitante decisivo e sim uma variável contornável dentro de um cenário mais amplo de economia agrícola e decisões estratégicas (Viana et al., 2021).

Quadro 20 - Evolução da MO nos Calcisols de sequeiro com Trigo

SUMÁRIO				
<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
2001/2002	3	4,50	1,50	0,280
2011/2012	22	28,89	1,31	0,178

ANOVA					
	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
Entre grupos	0,09	1	0,09	0,49	0,490
Dentro de grupos	4,31	23	0,19		
Total	4,40	24			

A beterraba é tolerante a solos alcalinos, uma vez que a faixa de pH mais favorável ao seu desenvolvimento situa-se entre os 6,0 e os 8,0. Para além disto, os teores de matéria orgânica deverão ser > 2% e a CE entre 0,8 e 2,0 dS.m⁻¹, uma vez que é uma

cultura tolerante à salinidade, conseguindo manter a produção de biomassa em condições salinas (Daoud et al., 2003; Puccinelli et al., 2022). É também uma cultura bastante exigente a nível de água, necessitando entre 500 a 700 mm durante o ciclo, pelo que requer uma rega consistente para manter um crescimento e produtividade ótima (Sitompul et al., 2019). Tendo em conta que a precipitação média anual na área de estudo é de 534,5 mm (Quadro 5), verifica-se que este valor não é suficiente para satisfazer plenamente as necessidades hídricas das variedades de beterraba, que requerem mais de 500 mm. É, portanto, neste contexto que o regadio assume um papel fundamental. Esta situação explica o facto de, em 2001/2002, existirem 1154,54 ha de beterraba em regime de regadio, enquanto em sequeiro foram registados apenas 188,7 ha (Figura 10), apesar dos valores de matéria orgânica e condutividade elétrica não estarem na faixa ótima ao desenvolvimento desta cultura (Figura 14).

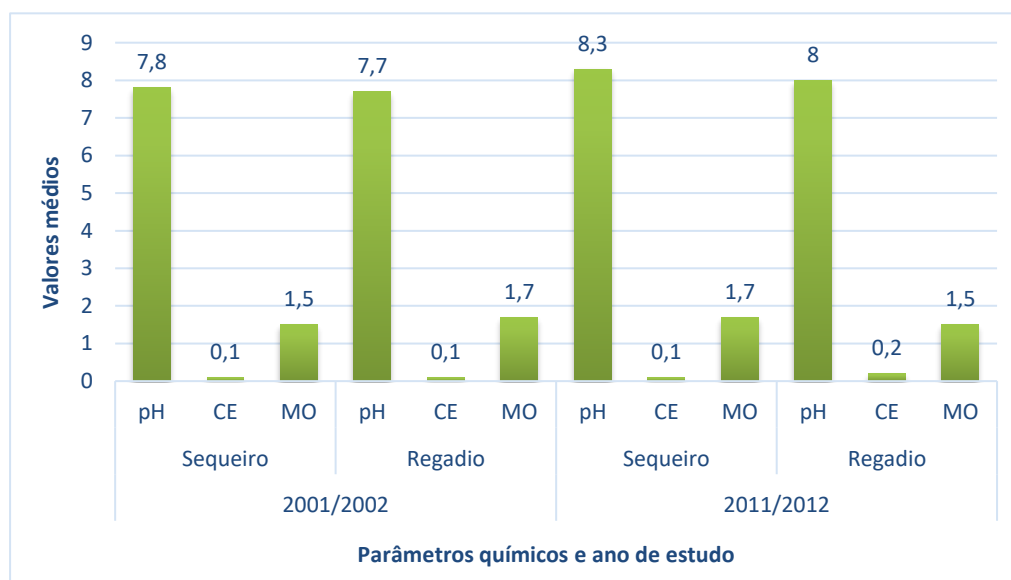


Figura 14 – Evolução dos parâmetros químicos dos Calcisols com Beterraba

Já o pH apresentou valores de 7,8 e 7,7, em sequeiro e regadio, respetivamente (em 2001/2002) (Figura 14). Estes valores permitiram o desenvolvimento desta cultura, uma vez que é tolerante à alcalinidade, pelo que acaba por tolerar a carência de certos nutrientes como zinco, por exemplo. Contudo já é mais sensível à carência de boro e magnésio. Assim, apesar dos valores de matéria orgânica e condutividade elétrica não serem totalmente favoráveis ao desenvolvimento da beterraba, o pH aliado à irrigação permitiu a presença de inúmeros hectares desta cultura em 2001/2002. Para além disto, também é necessário referir que durante a década de 1990 e início da década de 2000 havia incentivos da PAC para culturas industriais como a beterraba sacarina, pelo

que os contratos com as indústrias açucareiras e as ajudas compensavam as possíveis dificuldades técnicas existentes nos solos alcalinos. Observando a Figura 14 no ano de 2011/2012, verificou-se em sequeiro e regadio um aumento do pH, 8,3 e 8,0, respetivamente. Apesar de se ter registado este aumento dos valores de pH durante o período em estudo, este aumento, em sequeiro, não foi estatisticamente significativo (Quadro 21)

Quadro 21 – Evolução do pH nos Calcisols de sequeiro com Beterraba

SUMÁRIO					
<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
2001/2002	17	132,90	7,82	0,604	
2011/2012	3	24,80	8,27	0,001	

ANOVA					
	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
Entre grupos	0,51	1	0,51	0,96	0,341
Dentro de grupos	9,67	18	0,54		
Total	10,18	19			

Em regadio, o aumento demonstrou ter sido estatisticamente significativo (Quadro 22).

Quadro 22 – Evolução do pH nos Calcisols de regadio com Beterraba

SUMÁRIO					
<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
2001/2002	104	799,20	7,69	0,758	
2011/2012	83	661,22	7,97	0,412	

ANOVA					
	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
Entre grupos	3,67	1	3,67	6,07	0,015
Dentro de grupos	111,84	185	0,60		
Total	115,51	186			

Quanto à matéria orgânica, os valores registados foram de 1,7% e 1,5%, em sequeiro e regadio, respetivamente. Verificou-se um aumento do valor no sequeiro (de 2001/2002 para 2011/2012) e uma diminuição no regadio, apesar destas alterações registadas, a nível estatístico não foram obtidas diferenças significativas (Quadro 23 e Quadro 24).

Quadro 23 – Evolução da MO nos Calcisols de sequeiro com Beterraba

SUMÁRIO				
<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
2001/2002	17	26,00	1,53	0,193
2011/2012	3	5,05	1,68	0,345

ANOVA					
	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
Entre grupos	0,06	1	0,06	0,28	0,602
Dentro de grupos	3,79	18	0,21		
Total	3,84	19			

Quadro 24 – Evolução da MO nos Calcisols de regadio com Beterraba

SUMÁRIO				
<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
2001/2002	104	173,70	1,67	0,243
2011/2012	82	125,44	1,53	0,304

ANOVA					
	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
Entre grupos	0,90	1	0,90	3,35	0,069
Dentro de grupos	49,72	184	0,27		
Total	50,62	185			

A condutividade elétrica em sequeiro manteve-se constante, pelo que estatisticamente não foram registadas diferenças, valor de $p > 0,05$ (Quadro 25), e em regadio aumentou para $0,2 \text{ dS.m}^{-1}$, verificando-se este aumento ser estatisticamente significativo, uma vez que o valor de $p < 0,05$ (Quadro 26).

Quadro 25 – Evolução da CE nos Calcisols de sequeiro com Beterraba

SUMÁRIO				
<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
2001/2002	17	1,86	0,11	0,003
2011/2012	3	0,42	0,14	0,000

ANOVA					
	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
Entre grupos	0,00	1	0,00	0,78	0,390
Dentro de grupos	0,05	18	0,00		
Total	0,06	19			

Tendo em conta estes dados e comparando com a Figura 11, verificou-se uma diminuição da área de beterraba no ano 2011/2012 tanto em sequeiro como em regadio. A diminuição em sequeiro deve-se ao já descrito, é uma cultura com elevadas necessidades hídricas, pelo que o seu ótimo desenvolvimento não é atingido. Em regadio a área passou a ser de 921,3 ha. A diminuição da área, em regadio, pode estar ligada a alterações nas ajudas, uma vez que passou a favorecer outras culturas e a competição com culturas mais rentáveis como era o caso do olival e da vinha (Avillez, 2016; Martins, 2012).

Quadro 26 -Evolução da CE nos Calcisols de regadio com Beterraba

SUMÁRIO					
Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância	
2001/2002	104	11,05	0,11	0,004	
2011/2012	83	13,47	0,16	0,004	

ANOVA					
	SQ	gl	MQ	F	valor P
Entre grupos	0,14	1	0,14	33,38	3,164E-08
Dentro de grupos	0,80	185	0,00		
Total	0,95	186			

O olival é uma cultura parcialmente tolerante aos solos alcalinos, tolerando até valores de pH de 8,2, apesar de o ótimo estar na faixa dos 6,0 e 8,0 (Veloso et al., 2022). A matéria orgânica deverá estar acima de 2,0% e a condutividade elétrica <1,5 dS.m⁻¹ (Doğan & Gülser, 2020). Na Figura 15 é possível observar-se os parâmetros químicos registados nos pontos de amostragem com olival.

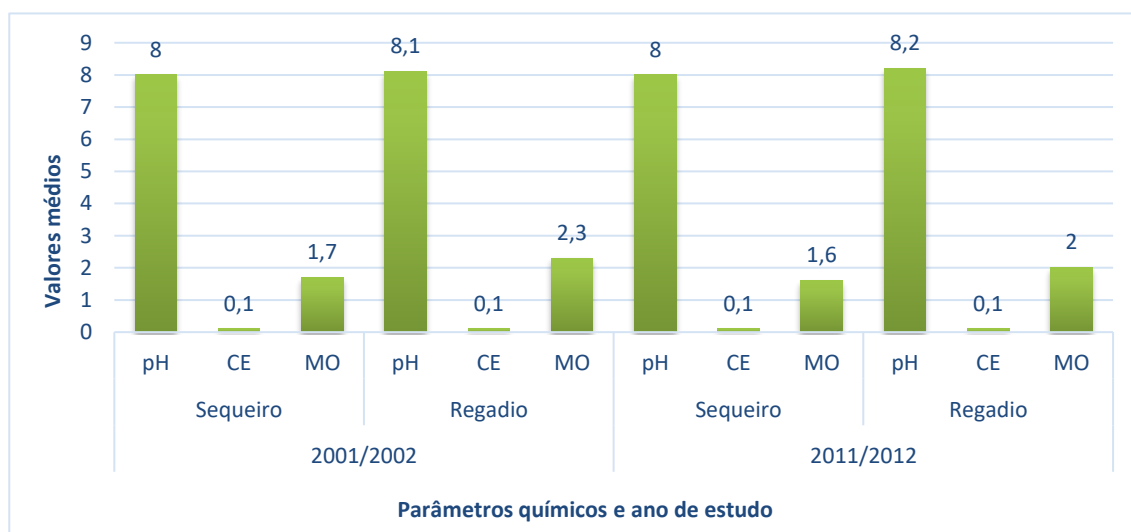


Figura 15 – Evolução dos parâmetros químicos dos Calcisols com Olival

Em 2001/2002 o pH em sequeiro era de 8,0 enquanto em regadio era de 8,1. Estes valores encontram-se dentro do intervalo de desenvolvimento da oliveira. Quanto à matéria orgânica esta era de 1,7% e 2,3%, em sequeiro e regadio, respetivamente, pelo que em regadio o valor estava acima de 2,0%. A condutividade elétrica manteve-se constante entre sistemas de cultivo e entre os anos de estudo – 0,1 dS.m⁻¹, apesar disto, de acordo com os Quadros 27 e 28, os valores observados demonstraram ser estatisticamente diferentes.

Quadro 27 – Evolução da CE nos Calcisols de sequeiro com Olival

SUMÁRIO					
<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
2001/2002	10	0,78	0,08	0,000	
2011/2012	76	11,03	0,15	0,004	

ANOVA					
	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
Entre grupos	0,04	1	0,04	10,41	0,002
Dentro de grupos	0,32	84	0,00		
Total	0,36	85			

Quadro 28 – Evolução da CE nos Calcisols de regadio com Olival

SUMÁRIO					
<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
2001/2002	15	1,30	0,09	0,001	
2011/2012	11	1,33	0,12	0,001	

ANOVA					
	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
Entre grupos	0,01	1	0,01	6,19	0,020
Dentro de grupos	0,03	24	0,00		
Total	0,04	25			

Observando a Figura 10 é possível perceber que em 2001/2002 a área de olival em regadio era superior à área de olival em sequeiro, devendo-se isto ao facto de existir água para regar e as produções dos olivais de regadio serem muitíssimo superiores, quando comparado com os olivais de sequeiro. Em 2011/2012 o pH do solo de sequeiro era de 8,0 (manteve-se constante) e dos solos de regadio era de 8,2. Tendo em conta as alterações de valores registados durante o período em estudo, através do Quadro 29 e do Quadro 30 verifica-se que, em sequeiro e regadio, os valores de pH

registados não foram estatisticamente significativos. Apesar disto, a oliveira continua a tolerar estes valores de pH.

Quadro 29 – Evolução do pH nos Calcisols de sequeiro com Olival

SUMÁRIO					
<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
2001/2002	10	79,60	7,96	0,525	
2011/2012	75	599,01	7,99	0,428	

ANOVA					
	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
Entre grupos	0,01	1	0,01	0,01	0,905
Dentro de grupos	36,37	83	0,44		
Total	36,38	84			

Quadro 30 – Evolução do pH nos Calcisols de regadio com Olival

SUMÁRIO					
<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
2001/2002	15	121,30	8,09	0,216	
2011/2012	11	90,06	8,19	0,053	

ANOVA					
	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
Entre grupos	0,06	1	0,06	0,43	0,516
Dentro de grupos	3,55	24	0,15		
Total	3,61	25			

A matéria orgânica diminuiu nos dois sistemas de cultivo, registando-se 1,6% em sequeiro e 2,0% em regadio, pelo que estes valores se afastam do ótimo. As alterações de valores obtidos durante a década em estudo para o regime de sequeiro e regadio, não foram estatisticamente significativas (Quadro 31 e Quadro 32).

Quadro 31 – Evolução da MO nos Calcisols de sequeiro com Olival

SUMÁRIO					
<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
2001/2002	10	17,00	1,70	0,216	
2011/2012	75	116,67	1,56	0,296	

ANOVA					
	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
Entre grupos	0,18	1	0,18	0,64	0,426
Dentro de grupos	23,84	83	0,29		
Total	24,02	84			

Quadro 32 – Evolução da MO nos Calcisols de regadio com Olival

SUMÁRIO					
<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
2001/2002	15	34,90	2,33	0,438	
2011/2012	11	21,89	1,99	0,562	

ANOVA					
	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
Entre grupos	0,72	1	0,72	1,47	0,238
Dentro de grupos	11,75	24	0,49		
Total	12,47	25			

Apesar destes valores, verificou-se um crescimento da área de olival (Figura 11), principalmente em sequeiro (832,5 ha), enquanto a área de olival de regadio diminuiu (122,1 ha). Ao contrário do que se registou em 2001/2002, em 2011/2012 a maior área de olival era de sequeiro, enquanto no primeiro ano de estudo a maior área era de regadio. Esta inversão de áreas pode ter ocorrido devido ao facto de no Alentejo os custos de eletricidade e água terem subido pelo que os agricultores podem ter preferido investir em sistemas de sequeiro melhorado, como o olival em sebe, que consome entre 2500 a 3000 m³ por ha/ano, significativamente menos do que culturas como o milho, este foi um dos cenários verificados no Alqueva (Dias, 2015; Pinheiro & Oliveira, 2010). Para além disto, a União Europeia (UE) financiou projetos que privilegiavam a agricultura extensiva sustentável, com menor consumo hídrico. Quanto ao aumento exponencial da área de olival de 2001/2002 para 2011/2012, este deveu-se ao facto, de tal como abordado no ponto anterior, existiu favorecimento por culturas mais rentáveis, como o olival. A PAC teve um grande impacto, uma vez que passaram a favorecer culturas extensivas de sequeiro. Para além disso, também é importante referir que neste período a procura por azeite de qualidade aumentou, com a valorização de produtos com denominação de origem e azeites virgens extras (Dentinho, 2010). Posto isto, sugeriram investimentos e exportações de azeite o que incentivou ao cultivo de olival tradicional.

O girassol para atingir o seu ótimo desenvolvimento ao nível dos parâmetros químicos do solo, necessita que o pH edáfico esteja compreendido entre os 6,0 e os 7,5, apesar de tolerar valores até aos 8,2, contudo isto implica que os micronutrientes fiquem menos disponíveis (Veloso et al., 2022). Na matéria orgânica o valor ideal encontra-se entre os 2,5% e 4,0%, apesar de nos Calcisols conseguir desenvolver-se com valores >1,5%. Já a condutividade elétrica deverá ser inferior a 2,5 dS.m⁻¹. Na Figura 16

observam-se os valores dos parâmetros químicos, estudados no presente trabalho, em 2001/2002 e em 2011/2012, nos locais de amostragem caracterizados pela presença do girassol.

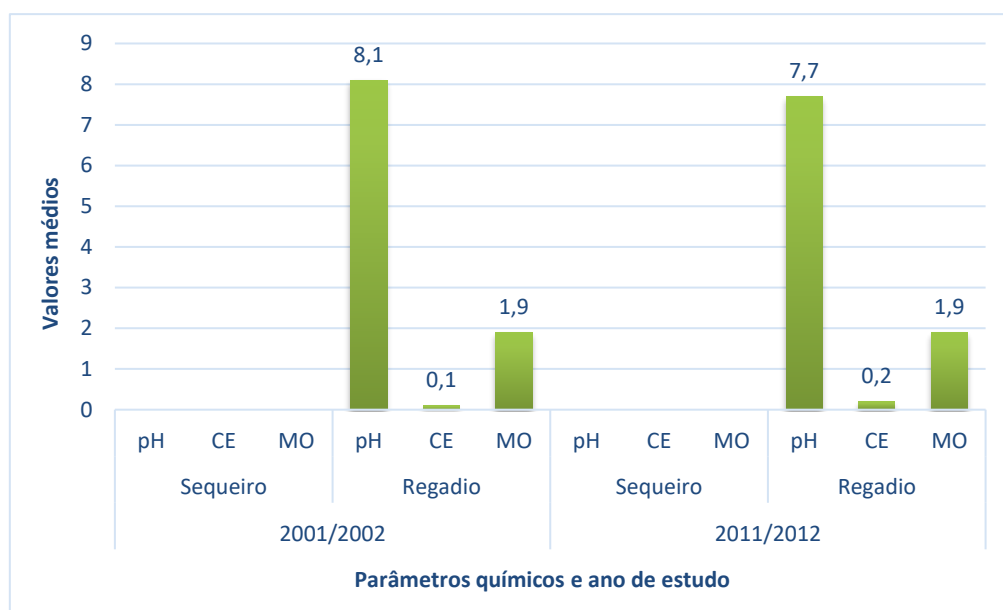


Figura 16 – Evolução dos parâmetros químicos dos Calciols com Girassol

Verificamos que em nenhum dos anos de estudo se registou girassol em sequeiro, no perímetro de rega do Caia, sendo que o pH inicialmente era de 8,1 tendo diminuído no segundo ano de estudo, para 7,7, sendo que esta diminuição, segundo o Quadro 33, não demonstrou ser estatisticamente significativa.

Quadro 33 – Evolução do pH nos Calciols de regadio com Girassol

SUMÁRIO				
Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância
2001/2002	7	56,50	8,07	0,052
2011/2012	19	145,72	7,67	1,092

ANOVA					
	SQ	gl	MQ	F	valor-P
Entre grupos	0,83	1,00	0,83	0,99	0,329
Dentro de grupos	19,98	24,00	0,83		
Total	20,81	25,00			

A matéria orgânica manteve-se constante, pelo que também não foram detetadas diferenças estatisticamente significativas (Quadro 35). Contudo a condutividade elétrica apresentou um ligeiro aumento de 0,1 dS.m⁻¹ para 0,2 dS.m⁻¹, que também não se registou ser estatisticamente significativo, valor de $p > 0,05$ (Quadro 34).

Quadro 34 – Evolução da CE nos Calcisols de regadio com Girassol

SUMÁRIO				
<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
2001/2002	7	0,60	0,09	0,000
2011/2012	19	3,04	0,16	0,014

ANOVA					
	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
Entre grupos	0,03	1	0,03	2,71	0,113
Dentro de grupos	0,25	24	0,01		
Total	0,28	25			

Considerando os valores descritos é possível concluir que os solos do estudo apresentam valores propícios ao desenvolvimento desta cultura, apesar de não se encontrarem os três dentro dos valores ótimos ao desenvolvimento do girassol. Relativamente ao facto de não se ter registado girassol de sequeiro, isto está relacionado com o ciclo de desenvolvimento da cultura, pois apesar de ser uma cultura tolerante à seca, e ser uma cultura de primavera/verão, tem uma fase no seu ciclo que é bastante sensível ao stress hídrico (Giannini et al., 2022). Esta fase crítica ocorre na floração, que decorre no Alentejo, entre os meses de junho e julho. Observando o Quadro 5, é possível verificar que nestes meses a precipitação, na área em estudo foi de 16,8 mm e 1,9 mm (Quadro 5), pelo que não é suficiente ao desenvolvimento do girassol, uma vez que nesta fase o mesmo necessita de 90 mm a 160 mm de água (Debaeke et al., 2017; Tavarini et al., 2022). É neste sentido que se verificou girassol de regadio e não se registou girassol de sequeiro, visto que as condições climáticas da área de estudo não serem ideais ao seu desenvolvimento.

Quadro 35 – Evolução da MO nos Calcisols de regadio com Girassol

SUMÁRIO				
<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
2001/2002	7	13,00	1,86	0,143
2011/2012	19	35,66	1,88	0,704

ANOVA					
	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
Entre grupos	0,00	1	0,00	0,00	0,953
Dentro de grupos	13,52	24	0,56		
Total	13,52	25			

O aumento de área de girassol, em 133,2 ha, registado de 2001/2002 para 2011/2012 (Figura 10 e 11) deveu-se a vários fatores. O girassol sendo uma cultura oleaginosa passou a ter uma maior procura como óleo alimentar e como biodiesel, principalmente

após 2005 com políticas europeias de incentivo aos biocombustíveis e uso na ração animal (Karatasidou et al., 2017; Neupane, 2022). Tal como referido anteriormente a PAC tem um grande impacto na seleção de culturas e aumento de áreas devido aos incentivos, pelo que o girassol não foi exceção, uma vez que incentivou à diversificação de culturas e à rotação cultural, e com ajudas diretas às oleaginosas (Mattas et al., 2015). O girassol passou a poder ser cultivado sem penalização ao contrário de outras culturas mais intensivas. O girassol, quando comparado com outras culturas anuais, como por exemplo o milho, requer menor consumo de água, o que permite reduzir consumos hídricos e gastos energéticos. Desta forma, todos estes fatores interligados permitiram o aumento da área de girassol no período em estudo.

Além das culturas descritas ao longo deste capítulo aquando da recolha de amostras também foram detetadas outras culturas, contudo não foram especificadas uma vez que não tinham representatividade na área em estudo.

6. Conclusões

O presente trabalho permitiu uma análise técnica detalhada dos efeitos da intensificação agrícola sobre os Calcisols no perímetro de rega do Caia, com foco na comparação entre os sistemas de cultivo de sequeiro e regadio ao longo de uma década (2001/2002 a 2011/2012). A avaliação centrou-se em três parâmetros químicos edáficos fundamentais — matéria orgânica (MO), pH e condutividade elétrica (CE) — os quais desempenham um papel determinante na produtividade e sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

Os resultados obtidos demonstram que a transição do sistema de sequeiro para o regadio, embora tenha contribuído para o aumento da disponibilidade hídrica e da estabilidade das culturas, promoveu alterações significativas em algumas propriedades edáficas. Nomeadamente, observou-se uma diminuição estatisticamente significativa dos teores de matéria orgânica nos Calcisols de regadio (1,76% para 1,62%; $p < 0,05$), atribuída à intensificação da mineralização da MO em ambientes mais húmidos e arejados, que favorecem a atividade microbiana. Adicionalmente, a ausência de práticas culturais como a rotação de culturas, adição de resíduos orgânicos e coberturas vegetais contribuiu para a redução da MO no solo, expondo um desafio à sustentabilidade do uso do regadio.

Em contraste, nos sistemas de sequeiro, a variação nos teores de matéria orgânica revelou-se estatisticamente não significativa, apontando para uma maior estabilidade deste parâmetro neste sistema ao longo do período em análise. Este resultado reforça a importância da adaptação das técnicas culturais no regadio, nomeadamente com a integração de estratégias de incremento dos teores de MO e rotação de culturas que promovam a fixação de carbono no solo.

Relativamente ao pH, constatou-se um aumento médio de 7,75 para 7,95 ($p < 0,05$) ao longo do período avaliado. Este aumento foi mais notório nos solos de regadio, sendo associada à presença de bicarbonatos e carbonatos na água de rega, assim como à natureza calcária dos Calcisols. O pH alcalino favorece a solubilização de certos sais e micronutrientes, porém, pode comprometer a disponibilidade de outros, como ferro e zinco, o que influencia o desenvolvimento das culturas. Apesar de o regadio,

apresentar benefícios em termos de produtividade, exige uma gestão criteriosa da fertilidade química, especialmente em solos com elevado conteúdo de carbonatos.

Quanto à condutividade elétrica, observou-se um aumento significativo nos solos de regadio ($0,10 \text{ dS.m}^{-1}$ para $0,16 \text{ dS.m}^{-1}$; $p < 0,05$), refletindo a acumulação progressiva de sais, resultado da aplicação contínua de fertilizantes e da qualidade da água de rega. Apesar dos valores se manterem dentro dos limites considerados não salinos ($< 2 \text{ dS.m}^{-1}$), o crescimento observado alerta para o potencial de salinização a médio/longo prazo, caso não se adotem medidas preventivas, como a drenagem adequada, fração de lavagem e uso racional de fertilizantes. Em contrapartida, nos solos de sequeiro, a variação da CE não foi estatisticamente significativa, embora se tenha registado uma ligeira diminuição dos valores médios, possivelmente associada a invernos mais chuvosos que favoreceram a lixiviação de sais.

De modo geral, os Calcisols demonstraram elevada sensibilidade à intensificação agrícola por regadio, especialmente nas variáveis matéria orgânica e condutividade elétrica. A sua textura média a fina, elevada presença de carbonatos e pH alcalino ajustam o comportamento agronómico do solo, exigindo cuidados específicos nas práticas culturais para mitigar impactos adversos.

Conclui-se que, embora o regadio represente uma estratégia válida para aumentar a produtividade agrícola em regiões mediterrânicas semiáridas, a sua aplicação deve ser acompanhada por práticas culturais sustentáveis. A manutenção ou melhoria da matéria orgânica, o controlo da salinidade e a monitorização contínua do pH são medidas essenciais para garantir a viabilidade a longo prazo da intensificação agrícola nestes contextos edafoclimáticos. Reforça-se, portanto, a importância da gestão integrada do solo e da água, com suporte técnico e monitorização periódica, de forma a assegurar a produtividade das culturas e a conservação dos recursos edáficos.

Em suma, a viabilidade da intensificação do uso dos Calcisols através do regadio depende diretamente do equilíbrio entre aumento da produtividade e conservação dos recursos naturais do solo. Este estudo fornece evidência clara de que o sucesso desta intensificação só será sustentável se for acompanhado de práticas agrícolas que respeitem as especificidades físico-químicas destes solos, promovendo um modelo de agricultura resiliente e adaptado às condições da bacia Mediterrânica.

7. Bibliografia

- Abakumov, E., Yuldashev, G., Darmonov, D., Turdaliev, A., Askarov, K., Khaydarov, M., . . . Davronov, K. (2022). Influence of Mineralized Water Sources on the Properties of Calcisol and Yield of Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plants*, 11(23). doi:<https://doi.org/10.3390/plants11233291>
- ABCaia. (2024). *Associação de Beneficiários do Caia*. <https://www.abcaia.pt/index.php>. Obtido a 16 de outubro de 2024
- Adeyemi, O., Grove, I., Peets, S., & Norton, T. (2017). *Advanced monitoring and management systems for improving sustainability in precision irrigation*. *Sustainability*, 9(3), 353. <https://doi.org/10.3390/su9030353>
- Aguilera, E., Guzmán, G., Álvaro-Fuentes, J., Infante-Amate, J., García-Ruiz, R., García-Ruiz, G., . . . Molina, M. (2018). A historical perspective on soil organic carbon in Mediterranean cropland (Spain, 1900-2008). *Sci Total Environ*, pp. 634-648. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.11.243
- Akça, E., Aydemir, S., Kadir, S., Eren, M., Zucca, C., Günal, H., . . . FitzPatrick, E. (2018). Calcisols and Leptosols. Em *World Soils Book Series* (pp. 139–167). Springer International Publishing. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-64392-2_10
- Al-Agele, H., Nackley, L., & Higgins, C. (2021). *A pathway for sustainable agriculture*. *Sustainability*, 13(8), 4328. <https://doi.org/10.3390/su13084328>
- Alvarez, C., Steinbach, H., Korsakov, H., & Ciarlo, E. (2024). Efecto del riego suplementario sobre las propiedades químicas y físicas edáficas en el sudoeste Bonaerense. *Ciencia del Suelo*, 42(1), pp. 39-49. Obtido em 2024, de <https://ojs.suelos.org.ar/index.php/cds/article/view/813>
- Antón, R., Derrien, D., Urmeneta, H., Heijden, G., Enrique, A., & Virto, I. (2022). Organic Carbon Storage and Dynamics as Affected by the Adoption of Irrigation in a Cultivated Calcareous Mediterranean Soil. *Frontiers in Soil Science*, 2. doi:<https://doi.org/10.3389/fsoil.2022.831775>

- Avillez, F. (2016). Será viável a produção de açúcar de beterraba em Portugal continental? *Público*. <https://www.publico.pt/2016/07/13/economia/noticia/sera-viavel-a-producao-de-acucar-de-beterraba-em-portugal-continental-1738039>.
Obtido em 14 de Março de 2025
- Badía, D., Jiménez, A., Muñoz, M., Martí, C., Ortiz, O., Casanova, J., . . . Echandi, J. (2022). Diversidad edáfica en viñedos de Montesa y Torresalas (DOP Somontano, NE-España). *Revista de Ciências Agrárias*, 45(4), pp. 198-201. doi:<https://doi.org/10.19084/rca.28387>
- Barredo, J., Mauri, A., Caudullo, G., & Dosio, A. (2018). Assessing Shifts of Mediterranean and Arid Climates Under RCP4.5 and RCP8.5 Climate Projections in Europe. *Pure and Applied Geophysics*, 175, pp. 3955–3971. doi:<https://doi.org/10.1007/s00024-018-1853-6>
- Baveye, P., Schnee, L., Boivin, P., Laba, M., & Radulovich, R. (2020). Soil Organic Matter Research and Climate Change: Merely Re-storing Carbon Versus Restoring Soil Functions. *Frontiers in Environmental Science*, 8. doi:<https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.579904>
- Belaid, N., Neel, C., Kallel, M., Ayoub, T., Ayadi, A., & Baudu, M. (2012). Long term effects of treated wastewater irrigation on calcisol fertility: A case study of Sfax-Tunisia. *Agricultural Sciences*, 3(5), pp. 702–713. doi:<http://dx.doi.org/10.4236/as.2012.35085>
- Bolan, N., Srivastava, P., Rao, c., Satyanaraya, P., Anderson, G., Bolan, S., . . . Kirkham, M. (2023). Chapter Two - Distribution, characteristics and management of calcareous soils. *Advances in Agronomy*, 182, pp. 81-130. doi:<https://doi.org/10.1016/bs.agron.2023.06.002>
- Bontpart, B., Weiss, A., Vile, D., Gérard, F., Lacombe, B., Reichheld, J., & Mari, S. (2024). Growing on calcareous soils and facing climate change. *Trends in Plant Science*, 29(12), 1319–1330. [https://www.cell.com/trends/plant-science/fulltext/S1360-1385\(24\)00069-4](https://www.cell.com/trends/plant-science/fulltext/S1360-1385(24)00069-4)
- Borsato, E., Rosa, L., Marinello, F., Tarolli, P., & D’Odorico, P. (2020). Weak and Strong Sustainability of Irrigation: A Framework for Irrigation Practices Under

- Limited Water Availability. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4. doi:<https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00017>
- Calero, J., García-Ruiz, R., Torrús-Castillo, M., Vicente-Vicente, J., & Martín-García, J. (2023). Role of Clay Mineralogy in the Stabilization of Soil Organic Carbon in Olive Groves under Contrasted Soil Management. *Minerals*, 13(1). doi:<https://doi.org/10.3390/min13010060>
- Cambrollé, J., García, J., Ocete, R., Figueroa, M., & Cantos, M. (2015). Evaluating tolerance to calcareous soils in *Vitis vinifera* ssp. *sylvestris*. *Plant Soil*, 396, pp. 97-107. doi:<https://doi.org/10.1007/s11104-015-2576-4>
- Cao, R., Yang, W., Chang, C., Wang, Z., Wang, Q., Li, H., & Tan, B. (2021). Differential seasonal changes in soil enzyme activity along an altitudinal gradient in an alpine-gorge region. *Applied Soil Ecology*, 166. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104078>
- Condon, L., Hopkins, D., Gregorich, E., & Black, A. (2014). Long-term irrigation effects on soil organic matter under temperate grazed pasture. *European Journal of Soil Science*, 65(5). doi:[10.1111/ejss.12164](https://doi.org/10.1111/ejss.12164)
- Dang, H., Sun, R., She, W., Hou, S., Li, X., Chu, H., . . . Wang, Z. (2024). Updating soil organic carbon for wheat production with high yield and grain protein. *Field Crops Research*, 317. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109549>
- Daoud, S., Koyro, H., & Harrouni, M. (2003). Salinity tolerance of *Beta vulgaris* ssp. *maritima*. Part I. Biomass production and osmotic adjustment. *Cash Crop Halophytes: Recent Studies*, 38, pp. 41-49. doi:https://doi.org/10.1007/978-94-017-0211-9_4
- Darko, R., Yuan, S., Hong, L., Liu, J., & Yan, H. (2016). Irrigation, a productive tool for food security – a review. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*, 66(3), 191–206. <https://doi.org/10.1080/09064710.2015.1093654>
- Debaeke, P., Casadebaig, P., Flenet, F., & Langlade, N. (2017). Sunflower crop and climate change: vulnerability, adaptation, and mitigation potential from case-studies in Europe. *Oil- and protein-crops and climate change*, 24(1). doi:<https://doi.org/10.1051/ocl/2016052>

- Decreto de Lei nº 119/2019. (2019). *Diário da República*, pp. 21-44. Obtido em 15 de maio de 2025, <https://files.diariodarepublica.pt/lis/2019/08/15900/0002100044.pdf>
- Dentinho, J. (2010). "Produzimos os melhores azeites do mundo". *Jornal de negócios*. https://www.jornaldenegocios.pt/mais/conferencias/azeite/detalhe/quotproduzimos_os_os_melhores_azeites_do_mundoquot? Obtido em 17 de Abril de 2025
- Dias, C. (2015). Custo da água em Alqueva faz do olival a cultura mais acessível. *Público*. https://www.publico.pt/2015/08/21/local/noticia/custo-da-agua-em-alqueva-faz-do-olival-a-cultura-mais-acessivel-1705566?utm_ Obtido em 12 de abril de 2025
- Doğan, B., & Gülser, C. (2020). Soil quality assessment for olive groves areas of Menderes District, Izmir-Turkey. *Eurasian Journal of soil science*(9), pp. 298-305. doi:<https://doi.org/10.18393/ejss.758380>
- Duarte, A., & Navarro, A. (2021). Efeitos ambientais da agricultura de regadio. *Revista da Associação Portuguesa de Horticultura*(140), pp. 43-46. Obtido em 2025, de <http://hdl.handle.net/10400.11/8862>
- Durán, G., Sacristán, D., Farrús, E., & Vadell, J. (2024). Towards defining soil quality of Mediterranean calcareous agricultural soils: Reference values and potential core indicator set. *International Soil and Water Conservation Research*, 12(1), pp. 145-155. doi:<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.06.001>
- Fader, M., Shi, S., Bloh, W., Bondeau, A., & Cramer, W. (2016). *Mediterranean irrigation under climate change: More efficient irrigation needed to compensate for increases in irrigation water requirements*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(2), 953–973. <https://doi.org/10.5194/hess-20-953-2016>
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2015a). *Status of the world's soil resources: Technical summary*. Rome: FAO. ISBN 978-92-5-108698-8. https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/newsroom/docs/FAO-world-soils-report-SUMMARY.pdf
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2015b). *World reference base for soil resources 2014*. Report No. SWSR). FAO. ISBN 978-92-5-

109004-6. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/bcdecec7-f45f-4dc5-beb1-97022d29fab4/content>

- Feki, S., Belaid, N., Zouari, K., Trabelsi, R., Benhmid, R., & Nasser, W. (2025). Assessment of the response of calcareous soils to 27 years vs. 16 years of irrigation with treated wastewater: a case study in Eastern Tunisia. *Environmental Earth Sciences*, 84(9). doi:10.1007/s12665-025-12233-0
- Francaviglia, R., Bene, C., Farina, R., & Salvati, L. (2017). Soil organic carbon sequestration and tillage systems in the Mediterranean Basin: a data mining approach. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 107, pp. 125–137. Obtido em 2025, de <https://link.springer.com/article/10.1007/s10705-016-9820-z>
- Francaviglia, R., Ledda, L., & Farina, R. (2018). Organic Carbon and Ecosystem Services in Agricultural Soils of the Mediterranean Basin. *Sustainable Agriculture Reviews* 28, pp. 183–210. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-90309-5_6
- Freitas, L. (2016). *Utilização da biotecnologia para a estabilização de solos: Precipitação de CaCO₃ por via enzimática. Influência do tipo de solo*. Dissertação, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil.
- Gama, J. (2020). *Impactos del riego en las propiedades químicas de suelos mediterráneos - un caso de estudio en el perímetro de riego del Caia (Portugal)*. Tese de Doutoramento, Universidade de Extremadura.
- Ghimire, L., Kadyampakeni, D., & Vashisth, T. (2020). Effect of Irrigation Water pH on the Performance of Healthy and Huanglongbing-affected Citrus. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 145(5), pp. 318–327. doi:<https://doi.org/10.21273/JASHS04925-20>
- Giannini, V., Mula, L., Roggero, P., & Patteri, G. (2022). Interplay of irrigation strategies and sowing dates on sunflower yield in semi-arid Mediterranean areas. *Agriculture Water Manegement*, 260. doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107287>

- Gibson, M. (2023). *Understanding soil pH*. PennState Extension. <https://extension.psu.edu/understanding-soil-ph>
- González-Rosado, M., Parras-Alcántara, L., Aguilera-Huertas, J., & Lozano-García, B. (2022). Crop Diversification Effects on Soil Aggregation and Aggregate-Associated Carbon and Nitrogen in Short-Term Rainfed Olive Groves under Semiarid Mediterranean Conditions. *Horticulturae*, 8(7). doi:<https://doi.org/10.3390/horticulturae8070618>
- Grou, S. (2021). *pH do solo*. Nutrição Vegetal. <https://sergiogrou.pt/2021/10/ph-do-solo/>. Obtido a 12 de dezembro de 2024
- Hawkins, E., Fulton, J., & Port, K. (2017). Using Soil Electrical Conductivity (EC) to Delineate Field Variation. *Agriculture and Natural Resources*. Obtido em 2025, de https://ohioline.osu.edu/factsheet/fabe-565?utm_source
- Jambo, Y., Alemu, A., & Tasew, W. (2021). *Impact of small-scale irrigation on household food security: Evidence from Ethiopia*. *Agriculture & Food Security*, 10(21). <https://doi.org/10.1186/s40066-021-00294-w>
- Janaina. (2024). *Uso de quelatos na agricultura*. Obtido em 23 de maio de 2025, de [comnagro:https://comnagro.com.br/uso-de-quelatos-na-agricultura/?utm_source](https://comnagro.com.br/uso-de-quelatos-na-agricultura/?utm_source=comnagro)
- Karatasiou, E., Papanikolaou, C., & Makrantonaki, S. (2017). Biodiesel production from sunflower in Greece. *MOJ Civil Engineering*, 2(3), pp. 108-111. doi:[10.15406/mojce.2017.02.00036](https://doi.org/10.15406/mojce.2017.02.00036)
- Khan, S., Tariq, R., Yuanlai, C., & Blackwell, J. (2005). Can irrigation be sustainable? *Agricultural Water Management*, 80, pp. 87–99. doi:[10.1016/j.agwat.2005.07.006](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.006)
- Laudicina, V., Badalucco, L., & Palazzolo, E. (2010). Effects of compost input and tillage intensity on soil microbial biomass and activity under Mediterranean conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 47, pp. 63–70. doi:<https://doi.org/10.1007/s00374-010-0502-8>
- Leogrande, R., Pedrero, F., Nicolas, E., Vitti, C., Lacolla, G., & Stellacci, A. (2022). Reclaimed Water Use in Agriculture: Effects on Soil Chemical and Biological

- Properties in a Long-Term Irrigated Citrus Farm. *Agronomy*, 12(6). doi:<https://doi.org/10.3390/agronomy12061317>
- Lepsch, I. (2010). *Formação e Conservação dos Solos* (2º ed.). Oficinas de Textos. ISBN 978-85-7975-008-3. <https://pt.scribd.com/document/723726982/2010-LEPSCH-Formacao-e-Conservacao-Dos-Solos-2%C2%AAEdicao>.
- Lima, V., Gracia-Romero, A., Rezzouk, F., Diez-Fraile, M., Araus-Gonzalez, I., Kamphorst, S., . . . Araus, J. (2021). Comparative Performance of High-Yielding European Wheat Cultivars Under Contrasting Mediterranean Conditions. *Frontiers in Plant Science*(12). doi:<https://doi.org/10.3389/fpls.2021.687622>
- Lopes, C., Valente, G., Santos, C., Rodrigues, N., Mariano, D., & Okumura, R. (2020). Uso do pH do solo como indicador da qualidade do solo em sistema de pastejo rotacionado. Em *Extensão Rural em Foco: Apoio à Agricultura Familiar, Empreendedorismo e Inovação* (Vol. 2, pp. 267-272). doi:10.37885/200600486
- López-Pérez, M., Espinoza-Acosta, J., & Pérez-Labrada, F. (2023). Iron nutrition management in calcisol soils as a tool to mitigate chlorosis and promote crop quality – An overview. *Journal of Applied Biology & Biotechnology*, 12(1), pp. 17-29. doi:10.7324/JABB.2024.157536
- Malamataris, D., Tsavdaridou, A., Banti, D., Malliaras, A., Karalis, A., Theocharis, N., ... Mazaris, A. (2023). Water–ecosystems–food nexus security achievement in the context of climate change: The case study of an agricultural Mediterranean Basin, Greece. *Research Ideas and Outcomes*, 9, e116070. <https://doi.org/10.3897/rio.9.e116070>
- Martins, I. (2012). Beterraba sacarina está de volta? *Vida Rural*. <https://www.vidarural.pt/producao/beterraba-sacarina-esta-de-volta/> Obtido em 16 de maio de 2025
- Mattas, K., Tsakiridou, E., Michailidis, A., & Karelakis, C. (2015). *Sunflower: A high value crop?* (Working Paper No. 232466) Aristotle University of Thessaloniki, Agricultural Economics. <https://ideas.repec.org/p/ags/grauwp/232466.html> Obtido em 17 de março de 2025

- McCauley, A., Jones, C., & Olson-Rutz, K. (2017). *Soil pH and organic matter* (Nutrient Management Module No. 8). Montana State University Extension. <https://apps.msuextension.org/publications/pub.html?sku=4449-8>. Obtido em 12 de março de 204
- McDermid, S., Nocco, M., Parker, P., Keune, J., Pokhrel, Y., Jain, M., . . . Yokohata, T. (2023). Irrigation in the Earth system. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4, pp. 435–453. doi:<https://doi.org/10.1038/s43017-023-00438-5>
- Mehta, P., Siebert, S., Kummu, M., Deng, Q., Ali, T., Marston, L., ... Davis, K. (2024). *Half of twenty-first century global irrigation expansion has been in water-stressed regions*. *Nature Water*, 2, 254–261. <https://doi.org/10.1038/s44221-024-00206-9>
- Mendes, J., & Carvalho, M. (2009). Controlo da salinidade do solo com recurso à sementeira directa. *Revista de Ciências Agrárias*, 32(1), pp. 362-369. doi:<https://doi.org/10.19084/rca.15678>
- Meshram, N., Singare, P., & Kausadikar, H. (2023). *Calcareous soil and their management – A review*. *Agriculture*, 3(4), 1–6. <https://doi.org/10.31018/jans.v3i4.2582>
- Morão, P., Pereira, B., Zecchin, M., & Trigo, J. (2017). Decomposição de matéria orgânica vegetal e animal: um estudo comparativo. *XXV Congresso de Iniciação Científica da UNICAMP*. doi:10.19146/pibic-2017-78530
- Muñoz-Rojas, M., Jordán, A., Zavala, L., De la Rosa, D., Abd-Elmabod, S., & Anaya-Romero, M. (2012). Organic carbon stocks in Mediterranean soil types under different land uses (Southern Spain). *Solid Earth*, 3(2), pp. 375–386. doi:<https://doi.org/10.5194/se-3-375-2012>
- Mustafa, R., & Ansari, A. (2024). Comprehensive analysis of soil electrical conductivity: an experimental and machine learning approach. *Discover Civil Engineering*, 1(82). doi:<https://doi.org/10.1007/s44290-024-00086-8>
- Nájera, F., Tapia, Y., Baginsky, C., Figueroa, V., Cabeza, R., & Salazar, O. (2015). *Evaluation of soil fertility and fertilisation practices for irrigated maize (Zea mays L.) under Mediterranean conditions in Central Chile*. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15(1), 89–97. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162015005000008>

- Neina, D. (2019). The Role of Soil pH in Plant Nutrition and Soil Remediation. *Applied and Environmental Soil Science*. doi:<https://doi.org/10.1155/2019/5794869>
- Neupane, D. (2022). Biofuels from Renewable Sources, a Potential Option for Biodiesel Production. *Bioengineering*, 10(1). doi:10.3390/bioengineering10010029
- Nikolaou, G., Neocleous, D., Christou, A., Kitta, E., & Katsoulas, N. (2020). Implementing Sustainable Irrigation in Water-Scarce Regions under the Impact of Climate Change. *Agronomy*, 10(8). doi:<https://doi.org/10.3390/agronomy10081120>
- Nunes, J. (2003). *Los suelos del perímetro regable del Caia (Portugal) - tipo, fertilidad e impacto del riego en sus propiedades químicas*. Tese de Doutoramento, Universidade da Extremadura.
- Nunes, J. (2020). *Fertilidade para cultura do girassol*. Obtido em 2025, de Agrolink: https://www.agrolink.com.br/culturas/girassol/informacoes-da-cultura/nutricao/fertilidade-para-cultura-do-girassol_438051.html?utm_source=chatgpt.com
- Nunes, J., Lopez-Piñero, A., Albarrán, A., Muñoz, A., & Coelho, J. (2007). Changes in selected soil properties caused by 30 years of continuous irrigation under Mediterranean conditions. *Geoderma*, 139(3-4), pp. 321-328. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.02.010>
- Nunes, J., Loures, L., Loures, A., Piñeiro, A., & Albarran, A. (2015). *Characterization and soil mapping of the Caia Irrigation Perimeter*. *International Journal of Geology*, 9, 59–63. <https://www.naun.org/main/NAUN/geology/2015/a162004-087.pdf>. Obtido em 13 de maio de 2024
- Núñez, A., Cotrufo, M., & Schipanski, M. (2022). Irrigation effects on the formation of soil organic matter from aboveground plant litter inputs in semiarid agricultural systems. *Geoderma*, 416. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115804>
- Oldfield, E., Bradford, M., & Wood, S. (2019). Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields. *SOIL*, 5(1), pp. 15–32. doi:<https://doi.org/10.5194/soil-5-15-2019>

- Oliveira, P., Perdigão, A., Morgado, P., & Rocha, J. (2001). *Aplicação dos sistemas de informação geográfica na gestão da água: O caso do Aproveitamento Hidroagrícola do Caia*. <http://hdl.handle.net/10451/58185>. Obtido em 15 de outubro de 2024
- Ortiz, C., Pierotti, S., Molina, M., & Bosch-Serra, À. (2023). Soil Fertility and Phosphorus Leaching in Irrigated Calcareous Soils of the Mediterranean Region. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(1376). doi:<https://doi.org/10.1007/s10661-023-11901-7>
- Ortiz, C., Yagüe, M., Valdez, A., Molina, M., & Bosch-Serra, À. (2024). Sustainability of Organic Fertilizers Use in Dryland Mediterranean Agriculture. *agriculture*, 14(8). doi:<https://doi.org/10.3390/agriculture14081301>
- Pentoś, K., Pieczarka, K., & Serwata, K. (2021). The Relationship between Soil Electrical Parameters and Compaction of Sandy Clay Loam Soil. *Agriculture*, 11(2). doi:<https://doi.org/10.3390/agriculture11020114>
- Pérez-Labrada, F., Benavides-Mendoza, A., Juárez-Maldonado, A., Solís-Gaona, S., & González-Morales, S. (2019). Organic acids combined with Fe-chelate improves ferric nutrition in tomato grown in calcisol soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20, pp. 673–683. doi:<https://doi.org/10.1007/s42729-019-00155-3>
- Pinheiro, A., & Oliveira, I. (2010). *Custo da Água nos Pequenos Regadios Individuais do Alentejo*. Universidade de Évora, Departamento de Economia, Évora. Obtido 12 de maio de 2025, de <http://hdl.handle.net/10174/8473>
- Potapov, P., Turubanova, S., Hansen, M., Tyukavina, A., Zalles, V., Khan, A., ... Cortez, J. (2022). Global maps of cropland extent and change show accelerated cropland expansion in the twenty-first century. *Nature Food*, 3, 19–28. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00429-z>
- Poyen, F., Kundu, P., & Ghosh, A. (2018). pH Control of Untreated Water for Irrigation. *Journal of The Institution of Engineers (India)*, 99(2), pp. 1-8. doi:[10.1007/s40030-018-0297-4](https://doi.org/10.1007/s40030-018-0297-4)
- Puccinelli, M., Carmassi, G., Botrini, L., Bindi, A., Rossi, L., Fierro-Sañudo, J., ... Incrocci, L. (2022). Growth and mineral relations of *Beta vulgaris* var. *cicla* and *Beta vulgaris* ssp. *maritima* cultivated hydroponically with diluted seawater and low nitrogen

level in the nutrient solution. *Horticulturae*, 8(7), 638.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae8070638>

Quijano, L., Kuhn, N., & Navas, A. (2020). Effects of interrill erosion on the distribution of soil organic and inorganic carbon in different sized particles of Mediterranean Calcisols. *Soil and Tillage Research*, 196.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104461>

Raballo, M., Bernardi, C., & Inamasu, Y. (2014). *Condutividade elétrica aparente do solo*. In A. C. de C. Bernardi, J. de M. Naime, A. V. de Resende, L. H. Bassoi, & R. Y. Inamasu (Eds.), *Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar* (pp. 48–57). Embrapa.
<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1003692/1/BERNARDI48.pdf>. Obtido a 18 de novembro de 2024

Ramalho, M. (2019). *O Aproveitamento hidroagrícola do Caia: Caracterização, evolução e gestão da água. Soluções de gestão da rega aplicada a casos de estudo*. Relatório de estágio - Mestrado, Escola Superior de Biociências de Elvas, Elvas.

Ramos, S. (2023). *Matéria orgânica do solo*. Sátiro Ramos.
<https://www.satiroramos.com/materia-organica-do-solo/>. Obtido a 25 de novembro de 2024

Rosa, J.6 (2019). *Biotechnology em solos: Efeito da precipitação de CaCO_3 por via enzimática no comportamento de uma areia siltosa* [Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra]. Estudo Geral, Universidade de Coimbra.
<https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/93575/1/Biotechnology%20em%20solos.%20Efeito%20da%20precipita%C3%A7%C3%A3o%20de%20CaCO3%20por%20via%20enzim%C3%A1tica%20no%20comportamento%20de%20uma%20areia%20siltosa.pdf>

Rosa, L. (2022). Adapting agriculture to climate change via sustainable irrigation: biophysical potentials and feedbacks. *Environmental Research Letters*, 17(6).
doi:10.1088/1748-9326/ac7408

Ryan, J., Pauw, E., Gomez, H., & Mrabet, R. (2006). *Dryland Agriculture* (2° ed.). American Society of Agronomy. doi:10.2134/agronmonogr23.2ed.c15

- Santos, I., Figueiredo, T., & Fonseca, F. (2023). Influência da matéria orgânica na estabilidade de agregados do solo em áreas de matos após fogo controlado, NE Portugal. *Revista de Ciências Agrárias*, 46(1), pp. 14-19. doi:<https://doi.org/10.19084/rca.33877>
- Santos, J. (2022). *Estudo da Quantidade e Qualidade da Matéria Orgânica sob Diferentes Usos do Solo*. Dissertação, Escola Superior Agrária de Bragança, Bragança.
- Scandurra, A., Corinzia, S., Caruso, P., Cosentino, S., & Testa, G. (2024). Productivity of Wheat Landraces in Rainfed and Irrigated Conditions under Conventional and Organic Input in a Semiarid Mediterranean Environment. *Agronomy*, 14(10). doi:<https://doi.org/10.3390/agronomy14102338>
- Seager, R., Osborn, T., Kushnir, Y., Simpson, I., Nakamura, J., & Liu, H. (2019). Climate Variability and Change of Mediterranean-Type Climates. *Journal of Climate*, 32(10), pp. 2887–2915. doi:<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0472.1>
- Serrano, J., Shahidian, S., & Silva, J. (2016). Spatial variability and temporal stability of apparent soil electrical conductivity in a Mediterranean pasture. *Precision Agriculture*, 18, p. Precision Agriculture. doi:<https://doi.org/10.1007/s11119-016-9460-y>
- Sgouras, I., Tsadilas, C., Barbayiannis, N., & Danalatos, N. (2007). *Physicochemical and mineralogical properties of red Mediterranean soils from Greece*. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 38(5–6), 695–711. <https://doi.org/10.1080/00103620701220593>
- Silva, I., García, K., Díaz, M., Rodríguez, H., & Soto, R. (2018). Caracterización físicoquímica de un Calcisol bajo diferentes sistemas de uso de suelo en el noreste de México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(49). doi:<https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i49.153>
- Singh, B. (2018). Are nitrogen fertilizers deleterious to soil health? *Agronomy*, 8(4), 48. <https://doi.org/10.3390/agronomy8040048>
- Siqueira, G., Dafonte, J., Lema, J., Armesto, M., & Silva, Ê. (2014). Using soil apparent electrical conductivity to optimize sampling of soil penetration resistance and to

- improve the estimations of spatial patterns of soil compaction. *ScientificWorldJournal*, 2014, 269480. <https://doi.org/10.1155/2014/269480>
- Sitompul, S., Roviq, M., & Riedo, E. (2019). Growth and betacyanin content of beetroots (*Beta vulgaris* L.) under water deficit in a tropical condition. *Agrivita, Journal of Agricultural Science*, 41(3), 491–503. <https://doi.org/10.17503/agrivita.v41i3.2264>
- Soares, M. (2023). *Matéria orgânica e a importância para o solo*. *Campo & Negócios*. <https://revistacampoenegocios.com.br/materia-organica-e-a-importancia-para-o-solo/>. Obtido em 22 de outubro de 2024
- Solanki, A., Gurjar, N., Sharma, S., Wang, Z., Kumar, A., Solanki, M., . . . Kashyap, B. (2024). Decoding seasonal changes: Soil parameters and microbial communities in tropical dry deciduous forests. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1258934. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1258934>
- Tavarini, S., Mantino, A., & Angelini, L. (2022). Assessing land suitability to sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivation in Tuscany using APSIM to predict yield potential and stability. In A. Dalla Marta, C. Maucieri, & D. Ventrella (Eds.), *Proceedings of the 51st National Conference of the Italian Society for Agronomy – Agriculture and food availability in 2050* (pp. 274–275). Società Italiana di Agronomia. <https://hdl.handle.net/11568/1161948>
- Teixeira, N. (2018). *Matéria orgânica dos ácidos húmicos beneficia o solo*. *Revista Campo & Negócios*. <https://revistacampoenegocios.com.br/materia-organica-dos-acidos-humicos-beneficia-o-solo/>. Obtido em 18 de novembro de 2024
- Telo da Gama, J. (2020). *Impactos del riego en las propiedades químicas de suelos mediterráneos: un caso de estudio en el perímetro de riego del Caia (Portugal)* [Tese de doutoramento, Universidad de Extremadura].
- Telo da Gama, J., Nunes, J., Loures, L., Piñeiro, A., & Vivas, P. (2019). Assessing spatial and temporal variability for some edaphic characteristics of Mediterranean rainfed and irrigated soils. *Agronomy*, 9(3), 132. <https://doi.org/10.3390/agronomy9030132>

- Thoms, C., & Gleixner, G. (2013). *Seasonal differences in tree species' influence on soil microbial communities. Soil Biology and Biochemistry*, 66, 239–248. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.05.018>
- Trochon, B., Bustillo, V., Caner, L., Pasquet, S., Suc, V., Granouillac, F., . . . Guirresse, M. (2023). *Main water pathways in cultivated clayey calcisols in molassic hills in southwestern France: Toward spatialization of soil waterlogging. Vadose Zone Journal*, 22(5), e20272. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20272>
- Turdaliev , A., Yuldashev, G., Khaydarov, M., Abdukhakimova, K., Muratova, R., Azimov, Z., . . . Abakumov , E. (2024). Irrigation-Initiated Changes in Physicochemical Properties of the Calcisols of the Northern Part of Fergana Valley. *applied sciences*, 14(3). doi:<https://doi.org/10.3390/app14135762>
- Vammen, K., & Peña, E. (2022). *Water and climate: Global environmental sustainability and the current state in a developing country, Nicaragua. Frontiers in Water*, 4, 975102. <https://doi.org/10.3389/frwa.2022.975102>
- Velasco-Muñoz, J. F., Aznar-Sánchez, J. A., Batlles-de la Fuente, A., & Fidelibus, M. D. (2019). *Sustainable irrigation in agriculture: An analysis of global research. Water*, 11(9), 1758. <https://doi.org/10.3390/w11091758>
- Veloso, A., Sempiterno, C., Calouro, F., Rebelo, F., Pedra, F., Castro, I., . . . Fernandes, R. (2022). *Manual de fertilização das culturas (3.ª ed., pp. 1–320). Oeiras, Portugal: Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária, I.P. – INIAV. ISBN 978-972-579-063-2*https://www.inia.pt/images/publicacoes/livros-manuais/Manual_Fertilizacao_das_culturas.pdf
- Viana, C., Freire , D., Abrantes, P., & Rocha , J. (2021). Evolution of Agricultural Production in Portugal during 1850–2018: A Geographical and Historical Perspective. *Land*, 10(8). doi:<https://doi.org/10.3390/land10080776>
- Voltr, V., Menšík, L., Hlisenkovský, L., Hruška, M., Pokorný, E., & Pospíšilová, L. (2021). The Soil Organic Matter in Connection with Soil Properties and Soil Inputs. *Agronomy*, 11(4). doi:<https://doi.org/10.3390/agronomy11040779>
- Zampieri, M., Toreti, A., Ceglar, A., Naumann, G., Turco , M., & Tebaldi , C. (2020). Climate resilience of the top ten wheat producers in the Mediterranean and the

Middle East. *Regional Environmental Change*, 20(41).
doi:<https://doi.org/10.1007/s10113-020-01622-9>

Zandonadi, D., Santos, M., Medici, L., & Silva, J. (2014). Ação da matéria orgânica e suas frações sobre a fisiologia de hortaliças. *Horticultura Brasileira*, 32(1), pp. 14-20.
doi:<https://doi.org/10.1590/S0102-05362014000100003>

Zhang , Y., Wu , W., & Liu, H. (2019). Factors affecting variations of soil pH in different horizons in hilly regions. (J. Canário, Ed.) *PLoS One*, 14(6).
doi:<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218563>

Zhao, J., Zhang, X., Yang, Y., Zang, H., Yan, P., Meki, M., . . . Zeng, Z. (2021). Alternative cropping systems for groundwater irrigation sustainability in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 250.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106867>