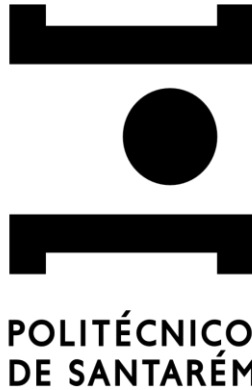


**INSTITUTO POLITÉCNICO DE SANTARÉM**  
**Escola Superior Agrária**



**Avaliação da pegada da poluição difusa e eficiência de utilização do Azoto**  
Calibração e Validação de Metodologias Expeditas para Monitorização do Azoto na  
Batateira (*Solanum tuberosum*) em condições reais de cultivo

**Dissertação**

**Mestrado em Engenharia Agronómica**

**Mama Saliu Baldé**

**Orientação:**

**Professor Doutor Artur José Guerra Amaral** (Orientador)  
**Professora Doutora Ângela Oliveira Prazeres** (Coorientadora)

Dezembro, 2025

## **Dedicatória**

À terra que nos alimenta e à ciência que nos guia:  
que esta pesquisa honre ambas.

Aos que cultivam saberes e batatas com igual  
dedicação,  
e aos que me ensinaram a enxergar  
nas folhas verdes da batateira  
todo um universo de perguntas.

"A agricultura é a primeira das artes,  
e a que mais diretamente nos liga  
à generosidade da natureza."

**(Adaptado de Paracelso)**

## **Agradecimentos**

Há um velho provérbio Fula que diz: “*Numerar os amigos, corre-se o risco de aumentar a lista dos inimigos.*” Com estas palavras sábias, os mais velhos procuram lembrar-nos da sensibilidade que envolve a arte de agradecer — sobretudo quando tantos contribuíram, de forma direta ou indireta, para a realização de um percurso académico tão exigente e transformador como este mestrado.

Ainda assim, é com humildade e profundo reconhecimento que me atrevo a nomear aqueles e aquelas que marcaram de forma especial esta etapa da minha vida.

Ao Professor Artur Amaral, orientador deste trabalho, deixo um especial agradecimento pela orientação técnica, apoio crítico e acompanhamento desde a definição do tema até à análise e interpretação dos dados. A sua disponibilidade e rigor foram essenciais para o amadurecimento desta investigação.

À Professora Ângela Prazeres, minha coorientadora, manifesto a mais sincera gratidão pelo apoio constante, pela exigência construtiva, pelas sugestões pertinentes e pelo tempo dedicado ao meu desenvolvimento académico. A sua coorientação foi, uma vez mais, fundamental — e não apenas no plano científico, mas também no humano, pois demonstrou sempre empatia, respeito e companheirismo.

Aos técnicos do laboratório de solos da ESAS — Sr. José Saragoça, Sra. Madalena e Sra. Rute Monteiro — expresse o meu agradecimento pelo apoio técnico, pela paciência e pela generosidade na partilha dos vossos conhecimentos.

A todos os colegas do curso, aos professores, os funcionários e a direção da Escola Superior Agrária de Santarém (ESAS), o meu muito obrigado por proporcionarem um ambiente de aprendizagem desafiante, acolhedor e inspirador ao longo destes anos.

À Organização de Produtores Torriba, SA, pela disponibilidade e colaboração na realização deste ensaio, em especial ao produtor Hortícolas da Botelha que cedeu o espaço para realização deste ensaio.

À minha família, pilar inabalável da minha vida, dedico este trabalho. À minha mãe, Aua Candé, pelo amor incondicional e pela força que me transmitiu em cada desafio. Ao meu pai, Mamatoró Baldé, cuja ausência física não diminui a presença espiritual e os ensinamentos que me deixou — este passo é também seu.

A todos os que caminharam comigo neste percurso, mesmo que não nomeados aqui, saibam que levo cada gesto, palavra e apoio no coração. Este mestrado é o reflexo de um esforço coletivo, do qual me orgulho profundamente.

## **Acrónimos/Siglas**

**N** - Azoto/Nitrogênio

**DAP** - Dias Após Plantação

**SPAD** - Soil Plant Analysis Development (Medidor de clorofila)

**NDVI** - Normalized Difference Vegetation Index (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada)

**LAI** - Leaf Area Index (Índice de Área Foliar)

**EUA** - Eficiência de Utilização do Azoto

**EAN** - Eficiência Agronómica de Utilização do Azoto

**ERN** - Eficiência de Recuperação do Azoto

**EFN** - Eficiência Fisiológica de Utilização do Azoto

**C/N** - Relação Carbono/Azoto

**NH<sub>4</sub><sup>+</sup>** - Amónio

**NO<sub>3</sub><sup>-</sup>** - Nitrato

**N<sub>2</sub>O** - Óxido Nitroso

**CO<sub>2</sub>** - Dióxido de Carbono

**VR 808** - Variedade de batata (VR = "Variedade Resistente")

**ESAS** - Escola Superior Agrária de Santarém

**IPMA** - Instituto Português do Mar e da Atmosfera

**QGIS** - Quantum Geographic Information System

## Resumo

O azoto (N) é um nutriente fundamental para a produtividade agrícola, desempenha um papel crucial no crescimento e desenvolvimento da batateira (*Solanum tuberosum*). No entanto, a sua aplicação excessiva ou inadequada pode resultar em perdas significativas por lixiviação, volatilização e desnitrificação, contribuindo para a poluição difusa e impactos ambientais, como a contaminação de aquíferos e a emissão de gases de efeito estufa. Neste contexto, esta dissertação teve como objetivo principal avaliar a eficiência da utilização do azoto na cultura da batata, quantificando as suas entradas e perdas no sistema solo-planta, além de validar metodologias expeditas para monitorização do estado nutritivo da planta em relação ao N.

O estudo foi conduzido em condições reais de cultivo, utilizando um delineamento experimental com três tratamentos de fertilização azotada: **N0** (testemunha, sem adubação de cobertura), **N1X** (dose padrão, equivalente à prática convencional) e **N2X** (dose elevada, com aplicação fracionada). Foram empregues técnicas invasivas, como análises de N total e nitratos em folhas e pecíolos, e métodos não invasivos, incluindo medições de clorofila (SPAD). Além disso, avaliaram-se parâmetros agronômicos, como produtividade, matéria seca e qualidade dos tubérculos, bem como indicadores ambientais relacionados às perdas de N.

Os resultados demonstraram que o tratamento **N1X** apresentou o melhor equilíbrio entre produtividade e eficiência no uso do azoto, evitando tanto deficiências nutricionais quanto excessos que poderiam levar a perdas ambientais. No entanto, o tratamento **N2X** mostrou tendência a um maior vigor vegetativo, porém com menor eficiência na translocação de assimilados para os tubérculos, além de potencial risco de atraso na maturação. A combinação de métodos invasivos e não invasivos permitiu uma monitorização mais precisa e dinâmica do estado nutricional da cultura, destacando-se o SPAD como uma ferramenta prática para o manejo em tempo real.

Conclui-se que a adoção de estratégias de adubação equilibradas, como a aplicação fracionada e ajustada às necessidades da cultura, podem maximizar a eficiência do uso do N, reduzindo custos e impactos ambientais. Os resultados deste trabalho fornecem algumas informações bases para a elaboração de recomendações técnicas mais sustentáveis, alinhadas aos princípios da agricultura de precisão e à crescente necessidade de adotar sistemas produtivos que combinem alta produtividade com conservação ambiental.

**Palavras-chave:** *Solanum tuberosum*; fertilização azotada; crescimento; nitratos; SPAD; teor de N na MS; N em pecíolos

## **Abstract**

Nitrogen (N) is an essential nutrient for agricultural productivity, playing a critical role in the growth and development of potato crops (*Solanum tuberosum*). However, excessive or improper application can result in significant losses through leaching, volatilization, and denitrification, contributing to diffuse pollution and environmental impacts such as groundwater contamination and greenhouse gas emissions. This dissertation primarily aimed to evaluate nitrogen use efficiency in potato cultivation by quantifying N inputs and losses in the soil-plant system, while validating rapid assessment methodologies for monitoring crop nutritional status.

The study was conducted under actual field conditions using an experimental design with three nitrogen fertilization treatments: N0 (control, without topdressing), N1X (standard dose, equivalent to conventional practice), and N2X (elevated dose, with split application). Invasive techniques were employed, including total N and nitrate analyses in leaves and petioles, along with non-invasive methods such as chlorophyll measurements (SPAD). Agronomic parameters were assessed, including yield, dry matter content, and tuber quality, as well as environmental indicators related to N losses.

Results demonstrated that the N1X treatment achieved the optimal balance between productivity and nitrogen use efficiency, preventing both nutritional deficiencies and excessive applications that could lead to environmental losses. However, the N2X treatment showed a tendency for increased vegetative growth but with reduced efficiency in photoassimilate translocation to tubers, along with potential risks of delayed maturation. The combination of invasive and non-invasive methods enabled more precise and dynamic monitoring of crop nutritional status, with SPAD proving particularly valuable for real-time management.

In conclusion, adopting balanced fertilization strategies, such as split applications adjusted to crop requirements, can maximize nitrogen use efficiency while reducing costs and environmental impacts. The results of this study provide fundamental data for developing more sustainable technical recommendations, aligned with precision agriculture principles and the growing need for production systems that combine high productivity with environmental conservation.

**Key-words:** *Solanum tuberosum*; Nitrogen fertilization; Growth; Nitrates; SPAD; Nitrogen content in dry matter; Nitrogen in petioles.

# Índice

DEDICATÓRIA .....	I
AGRADECIMENTOS.....	II
ACRÓNIMOS/SIGLAS .....	III
<b>RESUMO.....</b>	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
LISTA DE FIGURAS .....	IX
LISTA DE QUADROS .....	X
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
2.1. IMPORTÂNCIA DO AZOTO NA CULTURA DA BATATA.....	4
2.2. DINÂMICA DO AZOTO NO SISTEMA SOLO/PLANTA .....	4
2.2.1. <i>Mineralização do azoto</i> .....	4
2.2.2. <i>Nitrificação do azoto</i> .....	5
2.2.3. <i>Imobilização do azoto</i> .....	5
2.2.4. <i>Desnitrificação</i> .....	5
2.2.5. <i>Perdas de azoto</i> .....	6
2.2.6. <i>Entrada do azoto nos solos agrícolas por processos não naturais</i> .....	6
2.2.7. <i>Disponibilidade das formas orgânicas</i> .....	7
2.3. PRÁTICAS SUSTENTÁVEIS NA GESTÃO DO AZOTO .....	7
2.3.1. <i>Aplicação fracionada do azoto</i> .....	8
2.3.2. <i>Aplicação localizada do azoto</i> .....	8
2.3.3. <i>Integração com fontes orgânicas de azoto</i> .....	8
2.3.4. <i>Utilização de inibidores de nitrificação ou urease</i> .....	8
2.3.5. <i>Agricultura de precisão e monitorização do estado nutricional</i> .....	8
2.3.6. <i>Rotação de Culturas</i> .....	9
2.4. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO ESTADO NUTRITIVO DA PLANTA EM RELAÇÃO AO AZOTO .....	9
2.4.1. <i>Métodos invasivos</i> .....	9
2.4.2. <i>Métodos não invasivos</i> .....	10
2.4.3. <i>Indicadores de eficiência de utilização do azoto (EUA) na batateira</i> .....	12
2.4.3.1. <i>Eficiência agronómica de utilização do azoto (EAN)</i> .....	13
2.4.3.2. <i>Eficiência de recuperação do azoto (ERN)</i> .....	13
2.4.3.3. <i>Eficiência fisiológica de utilização do azoto (EFN)</i> .....	13
2.4.3.4. <i>Indicadores ambientais</i> .....	13
2.4.3.5. <i>Indicadores económicos</i> .....	13
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>15</b>

3.1.	DESCRIÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO ENSAIO .....	15
3.2.	CARATERIZAÇÃO EDAFO-CLIMÁTICA.....	15
3.2.1.	<i>Caraterização climática</i> .....	15
3.2.2.	<i>Caraterização do Solo</i> .....	17
3.3.	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	18
3.3.1.	<i>Variáveis observáveis</i> .....	20
3.3.1.1.	<i>Caraterização físico-química do solo e da água de rega</i> .....	20
3.3.1.2.	<i>Avaliação do desenvolvimento e nutrientes da cultura</i> .....	20
3.3.1.3.	<i>Avaliação da produtividade e parâmetros de qualidade</i> .....	20
3.4.	INSTALAÇÃO DE CAMPO .....	20
3.4.1.	<i>Caraterização da variedade e batata-semente</i> .....	20
3.4.2.	<i>Preparação do Terreno e Instalação da Cultura</i> .....	21
3.4.3.	<i>Determinação e técnicas de amostragem</i> .....	24
3.4.3.1.	<i>Recolha de material vegetal</i> .....	24
3.4.3.2.	<i>Metodologias Laboratoriais</i> .....	24
3.4.3.3.	<i>Análise estatística dos dados</i> .....	25
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>26</b>
4.1.	ESTADO NUTRICIONAL – MÉTODOS INVASIVOS .....	26
4.1.1.	<i>Teor de N total nas folhas</i> .....	26
4.1.2.	<i>Teor de nitratos nas folhas</i> .....	27
4.1.3.	<i>Teor de N total nos pecíolos</i> .....	28
4.1.4.	<i>Teor de nitratos nos pecíolos</i> .....	28
4.2.	ESTADO NUTRITIVO – MÉTODOS NÃO INVASIVOS.....	29
4.2.1.	<i>Índice SPAD (estimativa de teor de clorofila)</i> .....	29
4.2.2.	<i>Índice de Área Foliar (LAI)</i> .....	30
4.3.	RELAÇÕES ENTRE MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO.....	31
4.3.1.	<i>Correlação entre SPAD × N total</i> .....	31
4.4.	ANÁLISE DE CRESCIMENTO.....	33
4.4.1.	<i>Matéria seca na rama (caules+ folhas)</i> .....	33
4.4.2.	<i>Peso seco médio nos tubérculos</i> .....	33
4.5.	PRODUÇÃO E QUALIDADE.....	34
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>36</b>
5.1.	RESPOSTA DA CULTURA À FERTILIZAÇÃO AZOTADA.....	36
5.2.	DINÂMICA NUTRICIONAL E PARÂMETROS DE CRESCIMENTO .....	36
5.3.	COMPROMISSO ENTRE PRODUTIVIDADE E QUALIDADE .....	36
5.4.	EFICIÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DE AZOTO .....	36
5.5.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	37

<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>38</b>
<b>7. ANEXOS .....</b>	<b>43</b>
ANEXO 1 – CARATERIZAÇÃO DE BATATA SEMENTE .....	43
ANEXO 2 – VALORES DE % N TOTAL E NITRATOS NAS FOLHAS E PECÍOLOS .....	44
ANEXO 3 – ANOVA DE DADOS DE SPAD.....	44
ANEXO 4 – DADOS DE PRODUTIVIDADE E QUALIDADE .....	45
ANEXO 5 - DETERMINAÇÃO DE NITRATO POR ESPECTROFOTOMETRIA .....	45
ANEXO 6 – ANÁLISE DE CRESCIMENTO.....	46

## **Lista de Figuras**

<b>Figura 1</b> – Localização de campo de ensaio (Fonte: Imagem retirado no QGIS google satélite).....	15
<b>Figura 2</b> – Comparação de temperatura de ar normal climatológico barras verticais e a temperatura de ar durante o ciclo cultura linhas (janeiro a junho 2024) .....	16
<b>Figura 3</b> – Precipitação normal climatológico vs. 1º semestre 2024 correspondente ao período de ensaio .....	17
<b>Figura 4</b> – Esquema do delineamento experimental .....	19
<b>Figura 5</b> - Pormenor da variedade VR 808 .....	21
<b>Figura 6</b> – Gradagem e distribuição de estrume.....	21
<b>Figura 7</b> - Pormenor da 1ª Cobertura .....	22
<b>Figura 8</b> – Leitura de LAI (Ceptómetro) e clorofila através de SPAD 502 .....	23
<b>Figura 9</b> – Amostragem no campo de ensaio .....	24
<b>Figura 10</b> – Teor de N total nas Folhas (%).....	26
<b>Figura 11</b> – Teor de nitratos nas folhas (mg/Kg) .....	27
<b>Figura 12</b> – Teor de N total nos pecíolos (%) .....	28
<b>Figura 13</b> – Teor de nitratos nos pecíolos (mg/Kg).....	29
<b>Figura 14</b> – Índice SPAD (Concentração de Clorofila).....	30
<b>Figura 15</b> – Leitura de LAI (Ceptometro).....	31
<b>Figura 16</b> – Correlação entre Teor de clorofila (SPAD) VS % N total nas folhas .....	32
<b>Figura 17</b> – Evolução de peso seco medio seco (g/ 6pls) .....	34
<b>Figura 18</b> – Produção Final comercial (t/ha).....	35

**Lista de Quadros**

<b>Quadro 1</b> – Caracterização físico-química do solo do campo experimental, através da análise sumária.....	18
<b>Quadro 2</b> – Descrição dos principais parâmetros do delineamento experimental.....	19
<b>Quadro 3</b> – Caracterização da batata-semente na data de plantação.....	21
<b>Quadro 4</b> – Caracterização dos fertilizantes utilizados no campo de ensaio .....	22
<b>Quadro 5</b> – Operações culturais realizadas nas parcelas .....	23
<b>Quadro 6</b> - Evolução da matéria seca na rama (caules + folhas) ao longo de ciclo de crescimento (g/ Plt).....	33

# 1. Introdução

O azoto é um dos elementos essenciais ao crescimento das plantas e, sendo um dos que se encontra em défice na maioria dos solos, é o nutriente que mais frequentemente limita a produção agrícola. Tem, sobretudo, uma função estrutural, integrando a constituição de numerosas moléculas orgânicas indispensáveis ao metabolismo e à divisão celular, como aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos, clorofilas e hormonas vegetais (Sempiterno et al., 2023).

As elevadas quantidades de azoto exigidas pela maioria das culturas – cujas remoções, em alguns casos, podem exceder 200 kg N/ha numa única estação de crescimento – fazem com que o azoto mineral naturalmente disponibilizado pelo solo necessite, quase sempre, de ser complementado com a aplicação de fertilizantes minerais (National Research Council, 1992).

A resposta espetacular provocada pela sua aplicação tem levado, por vezes, à utilização de quantidades excessivas. A facilidade com que as plantas absorvem este nutriente para além das suas necessidades metabólicas imediatas – fenómeno conhecido como "consumo de luxo" – pode originar desequilíbrios nutricionais, com impactos negativos na produção final. Entre os efeitos adversos associados ao excesso de azoto incluem-se: a acama fisiológica (especialmente em cereais), o aumento da suscetibilidade das culturas as pragas, doenças e condições ambientais adversas, e o atraso na maturação (Boswell et al., 1985; Santos, 1991).

Do azoto aplicado como fertilizante, apenas uma fração é efetivamente aproveitada pelas culturas. A porção não absorvida durante o ciclo vegetativo pode permanecer no solo sob formas orgânicas ou inorgânicas, mas uma parte significativa perde-se do sistema solo-planta (Follett et al., 1981; Cooke, 1982; Boswell et al., 1985).

O azoto destaca-se como um dos nutrientes com maior impacto tanto na produtividade agrícola como no ambiente, nomeadamente através da contaminação de aquíferos e cursos de água superficiais. Aumentar a eficiência da sua utilização em todas as culturas constitui um objetivo primordial da atividade agrícola moderna, no âmbito de uma produção sustentável.

As tecnologias atualmente disponíveis permitem monitorizar este elemento com elevado rigor, quer no solo, na água de rega, quer na própria planta. Paralelamente, a construção, calibração e validação de modelos de apoio à decisão poderão auxiliar agricultores e técnicos na gestão mais eficiente da sua aplicação.

Dada a elevada mobilidade do azoto no solo e na planta, a sua aplicação deve ser cuidadosamente calendarizada e doseada de acordo com as necessidades específicas da cultura. Esta operação deve considerar diversos fatores críticos que influenciam a sua eficiência, nomeadamente:

- Tipo e fertilidade do solo
- Produtividade esperada
- Condições climáticas (precipitação e temperatura)
- Tipos de fertilizantes utilizados
- Precedente cultural
- Equilíbrio nutricional com outros elementos
- Teor de matéria orgânica
- Atividade microbiana do solo

Para a construção, calibração e validação de modelos de apoio à decisão sobre a aplicação de azoto, torna-se necessária a recolha de dados abrangentes, preferencialmente em condições reais de cultivo, de forma sistemática e para diferentes culturas e sistemas de cultivo.

No âmbito do projeto “Pegada 4.0” pretende-se, reunir um conjunto de dados, em condições reais de cultivo, de modo a validar-se alguns dos modelos já existentes e, por outro lado, determinar a pegada em termos de impacto ambiental relativa à poluição difusa causada pela aplicação do N, em geral, e na cultura da batata para indústria em particular.

O ensaio de campo permitirá calibrar simultaneamente, diversas metodologias, invasivas e não invasivas, para a monitorização do teor de azoto na planta, entre as quais destacam-se:

**Metodologias invasivas:** avaliação bissemanal dos teores de N total e Nitratos na MS das folhas; avaliação bissemanal dos teores de N total e Nitratos na MS dos pecíolos das folhas; avaliação bissemanal dos teores de Nitratos nos pecíolos por potenciometria.

**Metodologias não invasivas:** medição da concentração da clorofila através do SPAD 502; medição da área foliar.

O cenário ideal seria a recuperação total do azoto aplicado como fertilizante pela cultura ou sequência de culturas. Contudo, conforme demonstrado por Cooke (1982) para climas temperados, a eficiência de recuperação raramente excede 50%, sendo que mesmo em condições ótimas não ultrapassa dois terços do azoto aplicado.

O principal desafio atual reside no desenvolvimento de recomendações de fertilização que garantam:

- A manutenção sustentável da produtividade das culturas
- A prevenção da contaminação ambiental

Como referido por Vigil et al., (1991), este equilíbrio entre produtividade e sustentabilidade ambiental constitui o grande desafio da agricultura moderna.

Tendo em conta que a eficiência de utilização do azoto pelas plantas é fundamental para:

1. Manter elevados níveis de produtividade agrícola
2. Minimizar o impacto ambiental
3. Preservar os ecossistemas.

Estabeleceram-se os seguintes objetivos: avaliar a eficiência da utilização do azoto na cultura de batata para indústria, procurando quantificar as entradas de azoto no sistema e, posteriormente, avaliar o teor de azoto incorporado na cultura e/ou exportado através da colheita dos tubérculos. Serão também estudadas as perdas do N no solo e as suas implicações ambientais, com o intuito de propor práticas sustentáveis que possam maximizar o rendimento económico da cultura, ao mesmo tempo em que minimizam o impacto ambiental associado ao uso do N.

Pretende-se ainda testar e validar diversas metodologias invasivas e não invasivas, para avaliação do estado nutritivo da planta em relação ao azoto.

## **2. Revisão bibliográfica**

### **2.1. Importância do azoto na cultura da batata**

O azoto (N) é um dos macronutrientes essenciais para o crescimento e desenvolvimento da batateira (*Solanum tuberosum*), desempenha um papel crucial em diversos processos fisiológicos da planta. Este nutriente é fundamental na síntese de proteínas, enzimas, clorofila e ácidos nucleicos, sendo, portanto, indispensável para o processo fotossintético e para o metabolismo celular (Taiz & Zeiger, 2017). Um fornecimento adequado de N promove um crescimento vigoroso da parte aérea, com a formação de uma área foliar extensa, a qual favorece a fotossíntese e a acumulação de reservas energéticas nos tubérculos EMBRAPA, (2020). Além disso, o N estimula um sistema radicular mais desenvolvido, o que melhora a absorção de água e nutrientes (Fernandes & Soratto, 2012). Este macronutriente influencia diretamente a produtividade e qualidade dos tubérculos, bem como a resiliência da planta a stresses bióticos e abióticos, como pragas, doenças e variações climáticas (Porter & Opena, 2018).

### **2.2. Dinâmica do azoto no sistema solo/planta**

A dinâmica do N no sistema solo-planta é um processo complexo e multifásico, que envolve uma série de transformações químicas, físicas e biológicas, as quais determinam a disponibilidade e o aproveitamento do nutriente pelas plantas. O N é essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas, entra no sistema agrícola através de processos naturais e antropogênicos e sofre diversas transformações no solo, que influenciam a sua disponibilidade para as culturas (Fageria et al., 2010). A dinâmica do azoto pode ser dividida em várias fases: mineralização, nitrificação, imobilização e desnitrificação.

#### **2.2.1. Mineralização do azoto**

A mineralização consiste no processo de conversão do N orgânico presente na matéria orgânica do solo em formas minerais assimiláveis pelas plantas, nomeadamente amónio ( $\text{NH}_4^+$ ) e nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ). Este processo é mediado principalmente por ação microbiana, através da decomposição da matéria orgânica com libertação de N sob a forma de amónio, o qual pode subsequentemente ser nitrificado. A taxa de mineralização é condicionada por múltiplos fatores, nomeadamente, a temperatura, humidade, pH do solo, a relação carbono/azoto (C/N) da matéria orgânica e a atividade microbiana do solo (Silva et al., 2013). Em solos com elevada quantidade de matéria orgânica e boas condições de temperatura e humidade, a mineralização é mais rápida, aumentando a disponibilidade do N para as plantas.

### **2.2.2. Nitrificação do azoto**

A nitrificação constitui um processo biológico de oxidação do amónio ( $\text{NH}_4^+$ ) a nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), mediado por bactérias nitrificantes, designadamente dos géneros *Nitrosomonas* e *Nitrobacter*. Sendo o nitrato a forma do N preferencial para a maioria das plantas – devido à sua elevada mobilidade e facilidade de absorção radicular – apresenta, contudo, maior suscetibilidade à lixiviação. Este fenómeno é particularmente relevante em solos com reduzida capacidade de retenção da água, podendo originar perdas significativas do N (Rodrigues et al., 2001). A nitrificação também é influenciada por fatores como o pH do solo, a temperatura e a disponibilidade de oxigénio.

### **2.2.3. Imobilização do azoto**

A imobilização consiste no processo de incorporação do N mineral (sobretudo amónio e nitrato) na biomassa microbiana ou na matéria orgânica do solo. Este fenómeno ocorre predominantemente em solos com uma relação C/N elevada, condição que limita a libertação do N para as plantas.

Em situações com excesso de resíduos vegetais de difícil decomposição ou restos de culturas, os microrganismos utilizam o N mineral para síntese de biomassa, tornando-o temporariamente indisponível para as plantas (Fageria et al., 2010). A imobilização do N assume particular relevância quando presentes grandes quantidades de resíduos com elevada relação C/N, como ocorre frequentemente com os restos de culturas de leguminosas.

### **2.2.4. Desnitrificação**

A desnitrificação representa o processo microbiano de redução do nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) aos gases nitrogenados ( $\text{N}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ), aos quais são libertados para a atmosfera. Este fenómeno ocorre predominantemente em condições anaeróbias, isto é, em solos saturados de água e com ausência de oxigénio. Principais implicações deste processo: perdas significativas do N no sistema solo-planta; especialmente relevante em solos com drenagem deficiente; acentuada por práticas de fertilização azotada inadequadas (Rodrigues et al., 2001)

Além do impacto agronómico, a desnitrificação constitui uma fonte relevante de emissões de gases com efeito de estufa, particularmente de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), um composto com um potencial de aquecimento global 298 vezes superior ao  $\text{CO}_2$ .

O N disponível no solo, principalmente na forma de nitrato e amónio, é absorvido pelas raízes das plantas através de processos de transporte ativo e passivo. O N absorvido é utilizado para a síntese de aminoácidos, proteínas e outros compostos essenciais para o crescimento da planta, como as clorofilas e as enzimas. O equilíbrio entre a absorção do N e as necessidades nutricionais da planta é crucial para o seu desenvolvimento. Quando o fornecimento deste

nutriente é inadequado, a planta pode apresentar sinais de deficiência, como amarelecimento das folhas (clorose), diminuição do crescimento e redução na produtividade (Silva et al., 2013).

### **2.2.5. Perdas de azoto**

O N no solo está sujeito a diversas formas de perdas, que comprometem a eficiência da sua utilização pelas plantas e impacto no meio ambiente. As principais formas de perdas do N incluem a lixiviação de nitrato, volatilização de amoníaco, desnitrificação e erosão. A lixiviação ocorre quando o nitrato é transportado para as camadas mais profundas do solo, podendo contaminar os aquíferos e recursos hídricos. A volatilização de amoníaco acontece quando o N na forma de amónio é convertido em gás e libertado para a atmosfera, especialmente em solos alcalinos ou quando se aplica ureia. A desnitrificação também resulta em perdas deste nutriente para a atmosfera, na forma de óxidos de azoto ( $N_2O$  e  $N_2$ ) (Arrobas & Rodrigues, 2009).

### **2.2.6. Entrada do azoto nos solos agrícolas por processos não naturais**

Para além dos processos naturais de entrada de N no solo, como a fixação biológica e a deposição atmosférica, a agricultura moderna recorre, de forma intensiva, a processos não naturais para introduzir este nutriente nos sistemas produtivos. Estes processos visam colmatar as limitações dos solos em fornecer este nutriente suficientemente para suportar elevadas produtividades das culturas agrícolas (Fageria et al., 2010).

O principal meio de introdução deste nutriente por via não natural nos solos agrícolas é a aplicação de fertilizantes minerais. Estes fertilizantes apresentam-se em diferentes formas químicas, como o nitrato de amónio ( $NH_4NO_3$ ), ureia ( $CO(NH_2)_2$ ) e sulfato de amónio ( $(NH_4)_2SO_4$ ), sendo rapidamente disponíveis para absorção pelas plantas. No entanto, a sua aplicação inadequada pode resultar em perdas significativas por volatilização, lixiviação e desnitrificação, com impactos ambientais (Arrobas & Rodrigues, 2009).

Outra via importante de entrada do N nos solos agrícolas é através da aplicação de fertilizantes orgânicos, como estrumes, chorumes, lamas ou compostos orgânicos. Estes materiais contribuem não só para o fornecimento deste nutriente, mas também para a melhoria das características físicas e biológicas do solo (Rodrigues et al., 2001). No entanto, o N presente nestes materiais encontra-se maioritariamente em formas orgânicas, necessitando de ser mineralizado antes de se tornar disponível para as plantas.

A aplicação de efluentes pecuários, águas residuais tratadas e subprodutos agroindustriais constitui também uma fonte crescente do N nos sistemas agrícolas. Estas práticas inserem-se frequentemente em estratégias de economia circular e gestão sustentável de recursos,

permitindo reciclar nutrientes, mas exigem controlo rigoroso para evitar contaminação dos recursos hídricos (Silva et al., 2013).

### 2.2.7. Disponibilidade das formas orgânicas

O N orgânico no solo é uma das principais fontes de azoto para as plantas, embora o processo da sua transformação em formas disponíveis seja complexo. Em solos agrícolas, a maior parte deste nutriente está presente sob forma orgânica, principalmente como parte da matéria orgânica do solo. O N orgânico compreende compostos como proteínas, aminoácidos, ácidos nucleicos e outras moléculas biológicas que, embora essenciais para os organismos vivos, não são imediatamente acessíveis para as plantas. A disponibilidade do N orgânico depende de processos microbiológicos que o transformam em formas minerais, como amónio ( $\text{NH}_4^+$ ) e nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), que as plantas podem absorver (Fageria et al., 2010).

Os quinze centímetros superficiais dos solos agrícolas das regiões temperadas contêm entre 2 a 6 mg N  $\text{ha}^{-1}$ . Mais de 90 a 95% deste azoto aparece na forma orgânica. Das formas minerais, assumem particular importância os iões  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{NH}_4^+$ , estando grande parte do último retido nos minerais de argila (Wild, 1988). Da elevada quantidade do N orgânico nos solos agrícolas, apenas uma fração reduzida e muito variável fica anualmente disponível para as plantas. A conversão do N orgânico em formas minerais é um processo biológico complexo, que depende de inúmeros fatores, como a quantidade e características do material a decompor, a presença de uma dada população microbiana e condições ambientais que favoreçam a sua atividade (Franco e Munns, 1982).

Apesar da dedicação dos investigadores a esta matéria e do conseqüente volume de informação disponível sobre as transformações dos substratos orgânicos no solo, a complexidade do processo concorre para tornar extraordinariamente difícil prever o contributo da mineralização de azoto orgânico para a nutrição azotada das plantas.

## 2.3. Práticas sustentáveis na gestão do azoto

O conceito de desenvolvimento sustentável começou a se tornar conhecido fora dos meios académicos quando a Organização das Nações Unidas (ONU) publicou, em 1987, essa expressão em um relatório intitulado “Nosso futuro comum”. A ideia de que não há progresso sem um uso inteligente dos recursos naturais, simplesmente para que não se esgotem, ganhou corpo, e a **sustentabilidade** ganhou destaque nos cinco continentes. É, portanto, um conceito relativamente novo, mas hoje enraizado e cada vez mais difundido (CMMAD, 1987, p. 43).

A adoção de práticas sustentáveis na gestão do N em sistemas agrícolas visa otimizar a produtividade das culturas, minimizar as perdas de nutrientes para o ambiente e garantir a rentabilidade económica das explorações. No caso da cultura da batateira, a aplicação

inadequada deste nutriente pode resultar em significativas perdas por lixiviação, volatilização ou desnitrificação, agravando os impactos ambientais e reduzindo a eficiência de utilização do nutriente (Arrobas & Rodrigues, 2009). Neste sentido, diversas estratégias e práticas agronômicas têm sido desenvolvidas e recomendadas para promover uma gestão mais eficiente e sustentável do N.

### **2.3.1. Aplicação fracionada do azoto**

A aplicação faseada ou fracionada do N, de acordo com as necessidades da cultura ao longo do seu ciclo de desenvolvimento, permite reduzir perdas por lixiviação e melhorar a disponibilidade do nutriente nos momentos de maior exigência da planta (Fageria et al., 2010). Esta prática é especialmente importante em culturas como a batateira, caracterizada por um sistema radicular relativamente superficial.

### **2.3.2. Aplicação localizada do azoto**

A aplicação localizada do N, nomeadamente através de técnicas de fertirrigação ou aplicação em bandas próximas das raízes, aumenta a eficiência do uso do nutriente e diminui as perdas para o ambiente (Silva et al., 2013). Esta técnica permite disponibilizar o N diretamente na zona de maior absorção pela planta, otimizando o seu aproveitamento.

### **2.3.3. Integração com fontes orgânicas de azoto**

A incorporação de matéria orgânica, adubos verdes ou resíduos de culturas anteriores contribui não só para o fornecimento do N, mas também para a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Rodrigues et al., 2001). Esta prática favorece a mineralização gradual deste nutriente, ajustando a sua disponibilidade às necessidades da cultura.

### **2.3.4. Utilização de inibidores de nitrificação ou urease**

Os inibidores de nitrificação e de urease são produtos que retardam a conversão do N aplicado em formas mais suscetíveis a perdas, prolongando a sua disponibilidade no solo (Arrobas & Rodrigues, 2009). Esta prática contribui para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa e a lixiviação de nitratos.

### **2.3.5. Agricultura de precisão e monitorização do estado nutricional**

O recurso a tecnologias de agricultura de precisão, como sensores óticos, medidores de clorofila (SPAD), drones ou imagens de satélite, permite monitorizar em tempo real o estado nutritivo das plantas, possibilitando ajustes mais rigorosos das doses do N (Silva et al., 2013).

Estas ferramentas aumentam a eficiência do uso do nutriente e promovem práticas de fertilização mais sustentáveis.

### **2.3.6. Rotação de Culturas**

A rotação de culturas, em particular com espécies leguminosas fixadoras do N atmosférico, reduz a necessidade de fertilização mineral e contribui para o equilíbrio nutricional do solo (Fageria et al., 2010). Este tipo de práticas favorece a sustentabilidade dos sistemas produtivos e a conservação dos recursos naturais.

## **2.4. Métodos de avaliação do estado nutritivo da planta em relação ao azoto**

### **2.4.1. Métodos invasivos**

A avaliação do estado nutritivo das plantas é essencial para uma gestão eficiente da fertilização, em particular do N, dado que este nutriente é determinante na produtividade e na qualidade da cultura da batateira (*Solanum tuberosum L.*) (Rodrigues et al., 2001). Os métodos invasivos de diagnóstico baseiam-se na recolha de tecidos vegetais, que são parciais ou totalmente destruídos para posterior análise em laboratório.

A análise química de tecidos, como folhas ou pecíolos, constitui o método invasivo mais comum para aferir o estado nutricional relativamente ao N. Esta técnica permite quantificar o teor total de N nos tecidos, expresso em percentagem (%) ou em miligramas por quilograma (mg/kg) de matéria seca (Arrobas & Rodrigues, 2009). A seleção da parte da planta a amostrar — seja folhas do terço médio ou folhas jovens completamente desenvolvidas — varia consoante a cultura e os objetivos da avaliação.

Na cultura da batateira, os pecíolos das folhas mais jovens e completamente expandidas são frequentemente os mais utilizados, devido à sua sensibilidade à disponibilidade recente de azoto no solo (Amaral & Nunes, 2015). A quantificação do N total é efetuada através de métodos laboratoriais consagrados, como Kjeldahl ou Dumas. O método de Kjeldahl, desenvolvido no século XIX, permite determinar o N orgânico presente no tecido vegetal (Silva et al., 2013). Por sua vez, o método de Dumas, mais moderno, assenta na combustão da matéria vegetal a altas temperaturas, libertando o N na forma gasosa para quantificação por deteção térmica ou de condutividade (Rodrigues et al., 1995).

A aplicação destes métodos na cultura da batata tem permitido estabelecer valores de referência fundamentais para a interpretação do seu estado nutricional. Diversos estudos recorrem à análise de pecíolos ou folíolos para definir faixas de suficiência e níveis críticos de N.

- Fontes et al., (2020), num estudo sobre a eficiência do uso de azoto na batata, reportaram teores de N em pecíolos entre 4,5% e 6,0% na fase de floração, valores que consideraram indicativos de um estado nutricional adequado para as condições do estudo.
- Errebhi et al., (1998), num trabalho amplamente citado, estabeleceram que o teor crítico de N (nível abaixo do qual o rendimento começa a decrescer) nos pecíolos, aos 40-50 dias após a emergência, se situa em torno de 1,5% de N-NO<sub>3</sub>. Este valor equivale, aproximadamente, a 6,7% de N total, assumindo uma conversão padrão, salientando a utilidade da análise de nitrato no pecíolo como um indicador precoce da disponibilidade de N.
- Num estudo realizado em Portugal, Carranca et al., (2001) observaram teores de N em folíolos (folhas recentemente maduras) entre 4,0% e 5,5% durante o período de máximo crescimento vegetativo. Os autores associaram valores no extremo superior desta gama a um maior potencial produtivo, desde que não excessivos.

Embora se trate do método mais preciso e direto para a determinação do estado nutritivo — e fundamental para a calibração de níveis críticos, a análise de tecidos apresenta limitações práticas. Entre estas, destacam-se o tempo despendido na recolha, preparação das amostras e análise laboratorial, bem como os custos associados, fatores que podem limitar a sua utilização para uma monitorização frequente ao longo do ciclo da cultura (Amaral & Nunes, 2015).

Apesar destas desvantagens, os métodos invasivos mantêm uma importância capital em trabalhos de investigação e em programas de fertilização racional. Permitem estabelecer e validar níveis críticos de N em folhas ou pecíolos, a partir dos quais se podem definir estratégias de adubação adequadas para maximizar a eficiência do uso do azoto e minimizar os impactos ambientais (Silva et al., 2013).

### **2.4.2. Métodos não invasivos**

Os métodos não invasivos de avaliação do estado nutritivo das plantas, em particular em relação ao N, têm ganho destaque significativo nos últimos anos. As suas principais vantagens residem na rapidez, na facilidade de utilização em campo e na possibilidade de realizar medições repetidas na mesma planta ao longo do seu ciclo de desenvolvimento, sem a causar danos (Silva et al., 2013). Estes métodos baseiam-se maioritariamente na avaliação indireta do teor de clorofila nas folhas, assente na forte correlação positiva entre a concentração de N e os níveis deste pigmento (Rodrigues et al., 2001).

Entre os equipamentos mais utilizados para esta finalidade contam-se os medidores portáteis de clorofila, como o dispositivo SPAD (*Soil Plant Analysis Development*). Estes aparelhos funcionam com base no princípio da transmissão da luz através do tecido foliar em dois

comprimentos de onda distintos, fornecendo um valor indexado que correlaciona com a concentração de clorofila (Arrobas & Rodrigues, 2009). Regra geral, valores de leitura SPAD mais elevados indicam um maior teor de clorofila e, por consequência, uma maior disponibilidade de N na planta.

A utilização do clorofilômetro SPAD na cultura da batata é bem documentada, tendo sido estabelecidos valores de referência para diferentes fases fenológicas. A calibração é crucial, pois os valores SPAD variam com a variedade, as condições de crescimento e o estágio de desenvolvimento.

- Gianquinto et al., (2004) propuseram valores críticos de SPAD para otimizar a produtividade e qualidade da batata. Os seus resultados sugerem que, entre os 40 e os 50 dias após a emergência, um valor SPAD médio de cerca de 45,0 no folíolo central da 4.<sup>a</sup> folha completamente expandida é indicativo de um estado azotado adequado. Valores inferiores a ~38,0 sugerem deficiência de N, enquanto valores superiores a ~52,0 podem indicar um excesso.
- De Paula et al., (2020), num estudo com a variedade 'Agata', reportaram que valores SPAD entre 50,0 e 55,0, medidos no folíolo terminal da 3.<sup>a</sup> folha completamente expandida durante a fase de tuberização (30-40 dias após a plantação), estavam positivamente correlacionados com os teores foliares de N e com a produtividade final.
- Num contexto de agricultura de precisão, Usha & Singh (2013) verificaram que a resposta da batata à adubação azotada pode ser eficientemente monitorizada com o SPAD. Os seus dados indicam que um declínio dos valores SPAD abaixo de ~42,0 durante a fase de tuberização justifica uma aplicação suplementar de N para evitar perdas de rendimento.

De acordo com Amaral & Nunes (2015), a utilização do medidor SPAD apresenta vantagens operacionais notórias, nomeadamente a instantaneidade da leitura, a preservação do tecido vegetal e a capacidade de monitorizar a cultura de forma contínua. Contudo, a correta interpretação dos valores obtidos carece de uma ponderação de fatores como o estágio fenológico da planta, as condições ambientais vigentes e a eventual existência de carências de outros nutrientes.

Paralelamente, o avanço das tecnologias de sensoriamento remoto tem vindo a revolucionar a avaliação do estado nutritivo das culturas. Através da captação de imagens por drones ou satélites, equipados com sensores multiespectrais ou hiperespectrais, é possível calcular diversos índices de vegetação. O índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) é um dos mais utilizados, apresentando uma correlação estreita com o teor de clorofila e, por inerência, com o estado nutricional da planta (Silva et al., 2013). Estudos como o de Hassan et al., (2019) demonstram que valores de NDVI superiores a 0,75, obtidos a partir de imagens de drones durante a fase de floração, estão consistentemente associados a batatais bem

nutridos em N e com elevado potencial produtivo. Valores de NDVI inferiores a 0,60 na mesma fase indicam, tipicamente, stresse nutricional.

Segundo Rodrigues et al., (2001), esta abordagem possibilita a aquisição de informação pormenorizada e em tempo quase real, abrindo portas à aplicação localizada de fertilizantes e contribuindo para uma gestão mais sustentável e precisa do N. As imagens de satélite complementam esta oferta, sendo particularmente úteis para a monitorização de grandes áreas agrícolas, ainda que com uma resolução espacial geralmente inferior à obtida por drones (Arrobas & Rodrigues, 2009).

Em síntese, os métodos não invasivos oferecem um conjunto alargado de vantagens: celeridade de execução, custos operacionais reduzidos a longo prazo, capacidade de efetuar leituras múltiplas e não destrutivas, e aplicabilidade em grande escala (Silva et al., 2013). Não obstante, importa reconhecer as suas limitações. A sensibilidade a fatores externos, como a intensidade luminosa, o stresse hídrico ou desequilíbrios nutricionais, pode influenciar os resultados, exigindo, por isso, calibrações locais e específicas para cada cultura, variedade e condição edafoclimáticas (Amaral & Nunes, 2015).

Estes métodos assumem particular relevância em programas de agricultura de precisão, permitindo um melhor ajustamento da fertilização azotada às reais necessidades das plantas e à variabilidade espacial dos solos (Rodrigues et al., 1995).

A combinação de métodos invasivos com métodos não invasivos permite uma caracterização mais precisa do estado nutritivo da batateira ao longo do ciclo cultural (Arrobas & Rodrigues, 2009). Os métodos não invasivos apresentam-se particularmente vantajosos pela sua rapidez, praticidade e possibilidade de aplicação em larga escala, sendo ferramentas fundamentais no âmbito da agricultura de precisão.

Os diferentes indicadores de eficiência agronómicas, fisiológicas, ambientais e económicas possibilitam uma análise integrada da utilização do N, permitindo identificar situações de sub ou sobre-fertilização e ajustar as doses aplicadas em função das reais necessidades da cultura (Fageria et al., 2010).

### **2.4.3. Indicadores de eficiência de utilização do azoto (EUA) na batateira**

A eficiência de utilização do azoto (EUA) corresponde à capacidade que a planta tem de absorver, utilizar e transformar o N disponível em biomassa e, mais concretamente, em produção de tubérculos no caso da batateira (*Solanum tuberosum* L.) (Rodrigues et al., 2001). A avaliação desta eficiência é essencial para o desenvolvimento de práticas de fertilização mais sustentáveis, promovendo o uso racional dos recursos e reduzindo o risco de perdas ambientais.

Existem diversos indicadores utilizados na avaliação da EUA, podendo ser agrupados em indicadores agronômicos, fisiológicos, econômicos e ambientais (Arrobas & Rodrigues, 2009).

#### **2.4.3.1. Eficiência agronômica de utilização do azoto (EAN)**

A EAN corresponde ao aumento da produção obtido por unidade do N aplicado, sendo expressa pela seguinte fórmula, onde **prod. adubado** corresponde (teor N total na planta com adubação), **prod. não adubado** correspondente ao (teor N total na planta sem adubação) e **N aplicado** (quantidade de azoto aplicado) (Fageria et al., 2010):

$$EAN = \frac{Prod. adubado - Prod. não adubado}{N Aplicado}$$

Na cultura da batata, valores elevados de EAN indicam que o N aplicado está a ser eficazmente transformado em produção de tubérculos (Amaral & Nunes, 2015).

#### **2.4.3.2. Eficiência de recuperação do azoto (ERN)**

A ERN mede a capacidade da planta em absorver o azoto aplicado e é determinada com base na diferença do teor de azoto total na planta entre tratamentos com e sem adubação azotada (Silva et al., 2013):

$$ERN = \frac{N planta adubada - N planta não adubada}{N Aplicado}$$

Este indicador é particularmente útil na avaliação de perdas potenciais por lixiviação ou volatilização (Rodrigues et al., 1995).

#### **2.4.3.3. Eficiência fisiológica de utilização do azoto (EFN)**

$$EFN = \frac{MS adubada - MS não adubada}{N planta adubada - N planta não adubada}$$

Este indicador permite identificar situações em que a absorção de N é elevada, mas a conversão desse N em produção é limitada.

#### **2.4.3.4. Indicadores ambientais**

A baixa EUA aumenta o risco de perdas ambientais do N, principalmente por lixiviação de nitratos para as águas subterrâneas ou por emissões de gases de efeito estufa (N<sub>2</sub>O) (Silva et al., 2013). Assim, a determinação da concentração de nitratos nas águas de drenagem ou no solo após a colheita constitui um indicador indireto das perdas de azoto e da eficiência da fertilização.

#### **2.4.3.5. Indicadores económicos**

A avaliação da rentabilidade económica do uso do N pode ser realizada através do cálculo da receita adicional obtida por unidade de N aplicado, sendo fundamental para a definição de estratégias de fertilização que maximizem o lucro do agricultor (Amaral & Nunes, 2015).

A utilização conjunta dos diferentes indicadores permite uma avaliação mais completa da eficiência de utilização deste nutriente na batateira, possibilitando o desenvolvimento de práticas de fertilização mais eficientes e ambientalmente sustentáveis (Rodrigues et al., 2001).

Assim, recomenda-se que os programas de fertilização azotada na batateira integrem metodologias de monitorização contínua do estado nutritivo da planta, recorrendo a tecnologias não invasivas, sempre que possível. A aplicação localizada e fracionada do N, associada à monitorização de indicadores de eficiência, constitui uma estratégia fundamental para aumentar a produtividade da cultura, reduzir os custos de produção e mitigar os impactos ambientais associados à fertilização azotada.

## 3. Material e métodos

### 3.1. Descrição e localização do ensaio

O ensaio de campo foi instalado nos Talhos, freguesia de Salvaterra de Magos e Foros de Salvaterra (**Figura 1**) Concelho de Salvaterra de Magos (coordenadas: 39.03793807, - 8.79601699). A parcela do produtor ocupa uma área de aproximadamente 10 ha onde se cultivou a variedade VR 808. A parcela está equipada com um sistema de rega por aspersão, constituído por uma rampa circular.



**Figura 1** – Localização de campo de ensaio (Fonte: Imagem retirado no QGIS google satélite)

### 3.2. Caracterização edafo-climática

#### 3.2.1. Caracterização climática

De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger o clima em Portugal é mediterrânico.

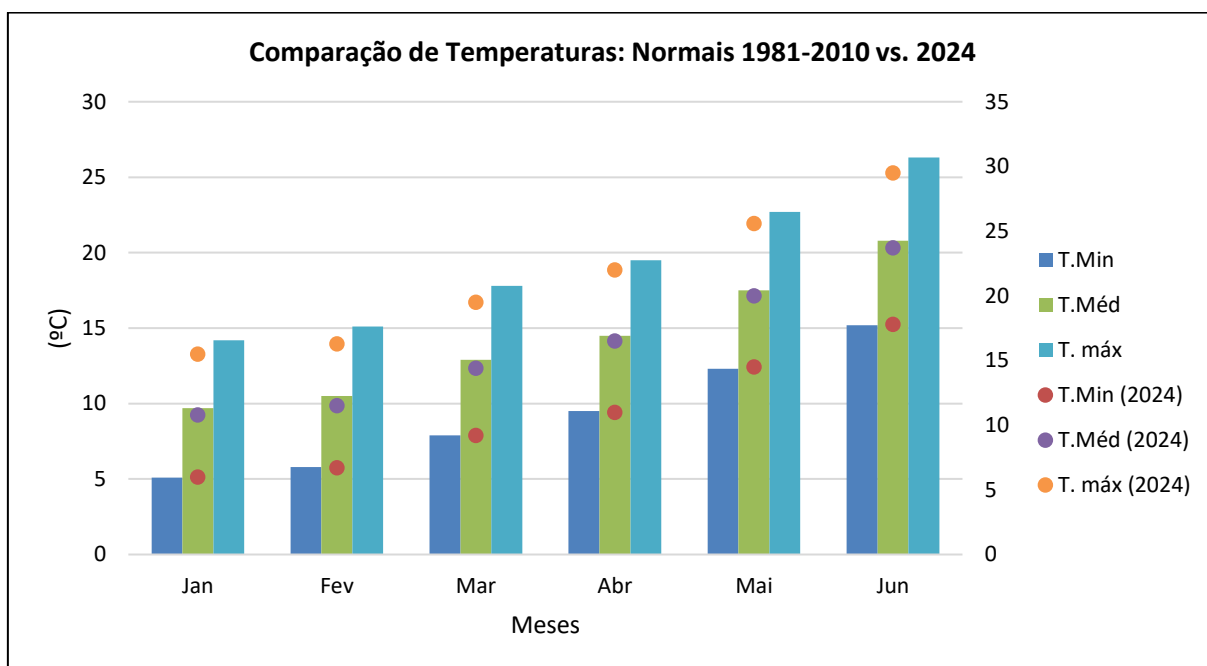
O clima de Salvaterra de Magos é típico de bacia do Tejo, com verões secos e quentes, e invernos relativamente suaves e húmidos. A estação seca prolongada no verão e as temperaturas altas caracterizam a região, o que influencia as práticas agrícolas e de gestão de recursos hídricos. A proximidade do rio Tejo também implica um clima ligeiramente moderado em relação a áreas mais interiores de Portugal, mas com risco ocasional de cheias (Ramos et. at., 2010).

Os dados de temperatura para o primeiro semestre de 2024 em Portugal (**Figura 2**), revelam um padrão consistente de aquecimento, com desvios positivos em todos os meses analisados (janeiro a junho). Destacam-se:

Temperaturas médias: Superaram as normais em +1.1°C a +2.9°C, com o maior desvio em junho (+2.9°C).

Temperaturas máximas: aumentaram até +3.2°C acima do normal em junho, indicando ondas de calor mais intensas e precoces.

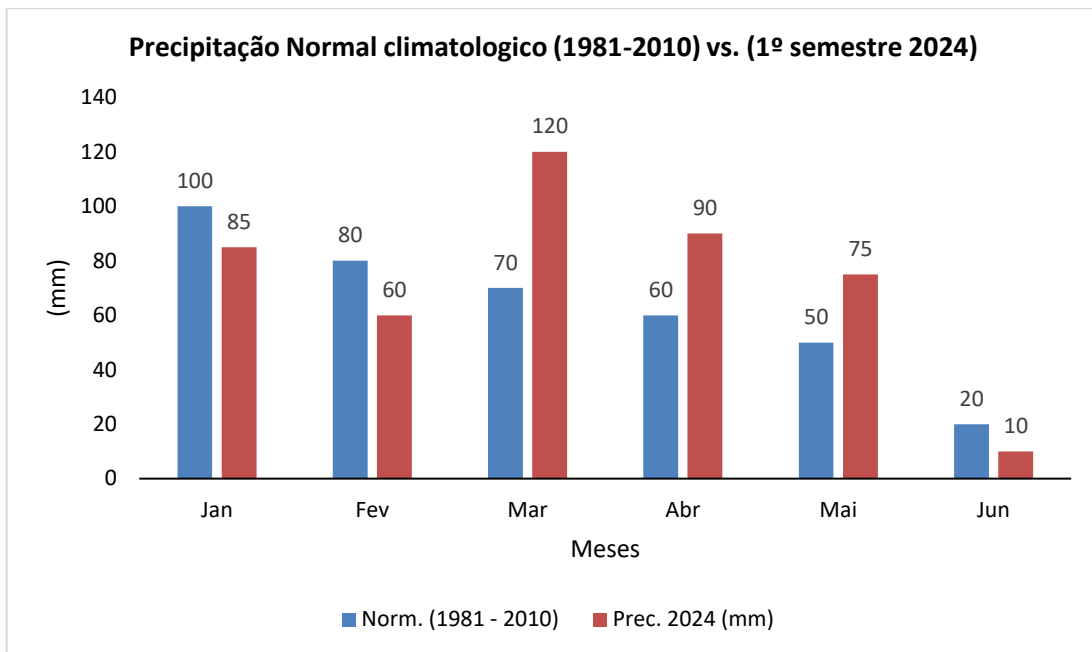
Temperaturas mínimas: também elevadas (até +2.6°C em junho), reduzindo o resfriamento noturno, crítico para a recuperação das plantas.



**Figura 2** – Comparação de temperatura de ar normal climatológico barras verticais e a temperatura de ar durante o ciclo cultura linhas (janeiro a junho 2024)

Segundo os dados de precipitação de IPMA (**Figura 3**) o trimestre foi excepcionalmente chuvoso (março – maio 2024), houve um aumento acumulado de +57% em relação à média histórica.

Durante o mês de março houve precipitações elevadas 40 mm em 24 horas (14/03/2024), causando cheias localizadas no Vale do Tejo. Portanto, verificou-se uma primavera atípica: 3 meses consecutivos com +50% de precipitação acima do normal.



**Figura 3** – Precipitação normal climatológico vs. 1º semestre 2024 correspondente ao período de ensaio

### 3.2.2. Caracterização do Solo

O ensaio foi instalado numa parcela pertencente à ordem dos Aluviosolos Modernos, Não Calcários, de textura ligeira. Segundo Cardoso (1974), estes solos são muito pouco evoluídos, isto é, encontram-se numa fase inicial/incipiente do seu desenvolvimento, apresentando características muito próximas das do material originário, como é típico dos solos da ordem dos "Solos Incipientes".

No sistema de classificação da FAO (IUSS Working Group WRB, 2022), estes solos correspondem maioritariamente aos Fluvisols (Fluvisolos).

Localizam-se em áreas planas e são formados a partir de aluviões (sedimentos transportados e depositados por cursos de água), daí o termo "Aluviosolos". A designação "Modernos" indica que ainda recebem, periodicamente, novos sedimentos, ao contrário dos "Antigos". Esta dinâmica de sedimentação contínua é uma característica diagnóstica central dos Fluvisols.

Apresentam textura grosseira (ou ligeira) e, conseqüentemente, a menos que possuam teores significativos de matéria orgânica, exibem uma capacidade de retenção de água e nutrientes relativamente baixa. Os valores de pH podem variar consideravelmente. Por se tratar de uma zona potencialmente inundável, o nível freático pode estar muito próximo da superfície, sobretudo nas épocas mais chuvosas, o que pode representar uma limitação para a agricultura. No sistema FAO/WRB, a saturação hídrica periódica é uma característica comum destas unidades de solo.

A anteceder a instalação do ensaio, foi efetuada a recolha das amostras dos solos na parcela, para avaliar as principais características físicas e químicas do solo (**Quadro 1**).

**Quadro 1** – Caracterização físico-química do solo do campo experimental, através da análise sumária

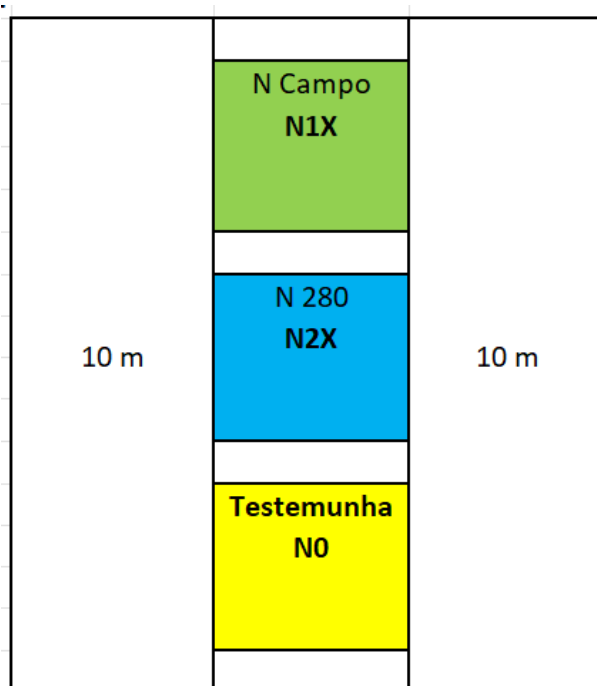
Tipo de Solo: Aluviossolos Modernos		Descrição	
Parâmetro	Unidade	Resultado	Classificação
Profundidade	cm	0 – 20	
Textura de campo		Grosseira	
pH (água)		8,13	Alcalino (pH > 7,5)
Matéria Orgânica	(%)	1,09	Baixo (< 1,5%)
Fósforo	(mg.kg <sup>-1</sup> )	455,16	Excessivo (> 100 mg/kg)
Potássio	(mg.kg <sup>-1</sup> )	48,39	Baixo
Calcário Total	(%)	0,00	Sem calcário
Azoto total	(%)	0,07	Muito baixo (< 0,1%)
Azoto Nítrico	(mg.kg <sup>-1</sup> )	0,23	Muito baixo

### 3.3. Delineamento Experimental

No (**Quadro 2**) apresentam-se os principais parâmetros do delineamento experimental, o ensaio foi instalado em três parcelas dispostas aleatoriamente (**Figura 4**), como o fator em estudo foi a diferentes níveis de fertilização azotada definiu-se três tratamentos diferentes de 30 m<sup>2</sup> cada (N0, N2X e N1X) entre fertilizantes orgânicos e minerais.

**Quadro 2** – Descrição dos principais parâmetros do delineamento experimental

Parâmetro	Descrição
Tipo de ensaio	Ensaio mono-fatorial
Fator a estudar	Avaliar três níveis de fertilização azotada
Dispositivo experimental	Parcelas simples aleatórias
Tratamentos	<p><b>N0 (Testemunha)</b> – Testemunha (Estrume + 500kg/ha adubo de fundo + Sem Adubação de cobertura)</p> <p><b>N 1X (Campo)</b> - (estrume + 500kg/ha adubo de fundo + 400 kg/ha Adubação de cobertura)</p> <p><b>N 2X</b> - (estrume + 500kg/ha adubo de fundo + 400 +200kg/ha Adubação de cobertura)</p>
Esquema Experimental	3 parcelas simples
Área de Cada parcela	3 x10 (30 m <sup>2</sup> )
Área Total de ensaio	90 m <sup>2</sup>



**Figura 4** – Esquema do delineamento experimental

### **3.3.1. Variáveis observáveis**

#### **3.3.1.1. Caracterização físico-química do solo e da água de rega**

A anteceder a instalação das culturas no campo de ensaio foram realizadas as seguintes observações:

- Recolha de amostras de solo para determinação dos parâmetros físico-químicos do solo: análise sumária (pH, matéria orgânica, fosforo, potássio, cálcio e magnésio), bases de troca e textural no ano de instalação da cultura;
- Análise dos parâmetros físico-químicos dos estrumes e/ou compostos.

#### **3.3.1.2. Avaliação do desenvolvimento e nutrientes da cultura**

Ao longo do ciclo cultural foram observados e registados, bissemanalmente, as seguintes variáveis: fases de desenvolvimento de acordo com a escala BBCH; teor de N e nitratos na MS das folhas e pecíolos; teor de Nitratos nos pecíolos das folhas por potenciometria; medição da concentração da clorofila através do SPAD 502; medição da área foliar.

#### **3.3.1.3. Avaliação da produtividade e parâmetros de qualidade**

No final do ciclo cultural foram determinados os componentes do rendimento:

- Produtividade total e comercial em tubérculos;
- Repartição da MS dos tubérculos, caules e folhas;
- Teor de nutrientes na MS (folhas, caules e tubérculos);
- Avaliação dos parâmetros de qualidade dos tubérculos.

## **3.4. Instalação de campo**

### **3.4.1. Caracterização da variedade e batata-semente**

A VR 808 é uma variedade de batata com características específicas para a indústria. Foi obtida pela KWS Potato B. V., através de um cruzamento de Lady claire x Atlantic. Possui um ciclo precoce ( $\pm 110$  dias), cujos rendimentos médios são de 45 t/ha, com um elevado teor de matéria seca (23,7% em média), e conseqüentemente, alto rendimento industrial, com excelente qualidade para armazenamento. Os tubérculos têm forma oval arredondada, cor da pele amarela (**Figura 5**) e são poucos suscetíveis aos danos mecânicos durante a colheita. Esta variedade apresenta uma resistência elevada aos nemátodos (*Globodera rostochiensis* Ro1), à podridão seca (*Fusarium coeruleum*), apresenta uma moderada tolerância à podridão negra (*Pectobacterium atrosepticum*) e à sarna comum (*Streptomyces scabiei*); é suscetível ao míldio nos tubérculos (*Phytophthora infestans*) e nas folhas (*Phytophthora infestans*), aos

nemátodos (*Globodera pallida* Pa 2/3,1), à sarna pulverulenta (*Spongospora subterrânea*) e ao vírus YO (Fonte Potato Variety Database & KWS).



**Figura 5** - Pormenor da variedade VR 808

No (**Quadro 3**) apresentam-se as características da batata-semente na data de plantação

**Quadro 3** – Caracterização da batata-semente na data de plantação

Tubérculos (Lote: 86017)		Média
Brochos	Nº de brochos/tubérculo	4
	Diâmetro (mm)	41
	Peso verde/tubérculo (g)	73

### 3.4.2. Preparação do Terreno e Instalação da Cultura

Na parcela de ensaio, foi realizada uma gradagem utilizando-se uma grade de discos e um trator de 130 cavalos em finais de dezembro de 2023. Posteriormente uma estrumação, com um estrume de galinha bem curtido (**Figura 6**), seguida de uma lavoura superficial para a sua incorporação, posteriormente uma passagem de chisel com rolo. Perto da instalação da cultura foi realizada uma adubação de fundo com o adubo Yara Mila Complex (**Quadro 3**), seguindo-se com uma passagem com rototerra.



**Figura 6** – Distribuição de estrume

A cultura foi instalada no dia 01 de março de 2024 com um plantador de 4 linhas. Instalando-se a batata-semente inteira com calibre 30-40 mm a um compasso de 23,5 cm x 75 cm, a que corresponde uma densidade média de 55 555 Plantas/ha. No decorrer do processo (14 de março 2024), foi aplicada a primeira cobertura (**Figura 7**), seguido da aplicação de herbicida. A colheita mecânica da cultura foi iniciada a 25 de junho 2024.

A cultura foi regada por aspersão, com uma instalação estacionária temporariamente fixa (Raposo, 1994). Devido à natureza do ensaio, sobretudo decorrente da facilidade com que o azoto pode ser perdido por lixiviação, nomeadamente na forma nítrica, decidiu-se dar especial atenção a condução da rega, tentando reduzir, tanto quanto possível, as perdas de azoto para fora do alcance das raízes. Em função das condições climatéricas verificadas ao longo do ciclo da cultura fizeram-se ajustamentos no intervalo de tempo entre regas, sempre que se achou oportuno.



**Figura 7** - Pormenor da 1ª Cobertura

**Quadro 4** – Caracterização dos fertilizantes utilizados no campo de ensaio

Época de Aplicação	Ano 2024								
	Adubo	Formulação	Quantidade Kg/ha	N	P2O5	K2O	Ca	Mg	SO3
<b>Fundo</b>	Yara Mila Complex	12-11-18	500	60	55	90	0	13,5	100
<b>1ª Cobertura</b>	Yara Mila Axan	27-0-0	445	120	0	0	0	0	46
<b>2ª Cobertura</b>	Yara Mila Axan	27-0-0	200	54	0	0	0	0	0

**Quadro 5** – Operações culturais realizadas nas parcelas

Operações	Data	Designação	Equipamento
Preparação de solo	26/12/2023		Grade discos
Fertilização de fundo orgânica	27/12/2023	Estrume	Distribuidor de estrume
Fertilização de fundo mineral	28-02-2024	Yara Mila Complex	Distribuidor de adubo
Plantação	01/03/2024	Batata semente	Plantador mecânico de 4 linhas
Compasso		0,24 m x 0,75 m	
Amontoa e 1ª cobertura	26/03/2024	Yara Mila Axan	Distribuidor de adubo Amontoador
2ª Cobertura	10/04/2024	Sulfato de Amónio	
Colheita	25/06/2024	Yara Mila Axan	Colhedora de duas linhas

No dia 17 de abril correspondente a 47 DAP foi feita a primeira amostragem das folhas e pecíolos para determinação da % N total e Nitratos, também foi medida a concentração da clorofila através de SPAD 502 e a leitura de LAI com o ceptómetro (**Figura 8**).



**Figura 8** – Leitura de LAI (Ceptómetro) e clorofila através de SPAD 502

No dia 17 de maio procedeu-se mais uma recolha de amostras de folhas pecíolos; medições de clorofila com o SPAD e Leitura de LAI com ceptómetro um indicador de quanto de área foliar verde existe por unidade de área de solo ( $m^2$  de folha por  $m^2$  de solo), também foram

colhidos tubérculos, caules e folhas para análises de crescimento (**Figura 9**). Estas amostras foram enviadas para o laboratório na ESAS para determinação dos teores de nitratos e a % de N total nas folhas pecíolos.



**Figura 9** – Amostragem no campo de ensaio

### **3.4.3. Determinação e técnicas de amostragem**

#### **3.4.3.1. Recolha de material vegetal**

As colheitas de amostras de folhas, pecíolos e plantas completas decorreram de 17 de abril a 14 de junho, geralmente após as 18h, com um intervalo de 15 dias entre colheitas.

Em cada tratamento, recolheram-se aleatoriamente 30 folhas completas, 40 pecíolos e 5 plantas inteiras (incluindo os tubérculos). Elegiam-se as folhas mais jovens com o limbo completamente expandido, normalmente correspondem a quarta ou quinta folha a partir do ápice vegetativo. Os pecíolos eram separados dos folíolos. As amostras devidamente identificadas, eram acondicionadas em sacos de plástico e transportadas para o laboratório da ESAS para análise posterior.

Durante a deslocação à parcela experimental, efetuaram-se também medições in situ. A clorofila foi medida com um equipamento SPAD 502 em 5 folhas aleatórias por tratamento, com três repetições. Calculou-se e registou-se de seguida a média para cada tratamento.

Em paralelo, o Índice de Área Foliar (LAI) foi determinado com um ceptómetro, através de três leituras por tratamento, tendo-se igualmente registado a média de cada um.

#### **3.4.3.2. Metodologias Laboratoriais**

As amostras de folhas e pecíolos foram analisadas no laboratório de solos da ESAS. Após a colheita, as amostras foram secas a uma temperatura não superior a 65 °C e trituradas num moinho com dimensão (2 mm).

O N total foi determinado pelo método de Kjeldahl (Bremner & Mulvaney, 1982), adaptado para material vegetal. Este método envolve uma digestão com ácido sulfúrico concentrado, que converte as formas de azoto orgânico em amónia. Seguidamente, a amónia é destilada

após alcalinização do meio e o azoto libertado é retido numa solução de ácido bórico. A quantificação final é efetuada por titulação da solução com um padrão de ácido clorídrico (AOAC International, 2000).

A análise de nitratos nos tecidos vegetais (folhas e pecíolos) foi realizada de acordo com o método colorimétrico do ácido salicílico sulfúrico (Cataldo et al., 1975). O protocolo experimental consistiu em:

1. Preparação de uma solução padrão de  $\text{KNO}_3$  (500 mg/L).
2. Preparação do reagente de ácido salicílico sulfúrico (5% p/v em  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).
3. Preparação de uma solução de NaOH (8% p/v).

Para a construção da curva de calibração, volumes de 1 a 12 mL da solução padrão foram transferidos para balões volumétricos de 50 mL e avolumes com água destilada, obtendo-se um intervalo de concentrações de 10 a 120 mg/L de  $\text{KNO}_3$ .

Para a leitura das amostras, foram utilizados 0,4 mL do extrato ou padrão, aos quais se adicionaram 0,4 mL do reagente de ácido salicílico. A mistura foi incubada durante 20 minutos à temperatura ambiente. De seguida, adicionaram-se lentamente 9,5 mL da solução de NaOH. Após o arrefecimento da solução, a absorvância foi medida a um comprimento de onda de 410 nm (Cataldo et al., 1975), utilizando um espectrofotómetro.

### **3.4.3.3. Análise estatística dos dados**

Para o tratamento e análise estatística dos dados recolhidos em campo, recorreu-se ao software Microsoft Excel. A análise de variância (ANOVA) a um fator foi o método estatístico selecionado para avaliar a existência de diferenças significativas entre as médias dos diferentes tratamentos em estudo. O teste  $F$  associado a esta ANOVA foi utilizado para comparar a variância existente entre os tratamentos com a variância dentro de cada tratamento (erro experimental), permitindo assim determinar se a variação observada entre os grupos era superior àquela que seria expectável pelo mero acaso.

Este modelo estatístico considerou o tratamento aplicado como a única fonte de variação sistemática (fator), tendo em conta as repetições das observações realizadas para cada um. Para interpretar os resultados obtidos, estabeleceu-se um nível de significância de 0,05 ( $\alpha=0,05$ ). Isto significa que uma diferença é considerada estatisticamente significativa quando a probabilidade de ela ocorrer devido apenas ao acaso (valor-p) é inferior a 5%, conferindo um intervalo de confiança de 95% para as conclusões inferidas a partir dos dados.

## 4. Resultados e discussão

### 4.1. Estado nutricional – Métodos Invasivos

#### 4.1.1. Teor de N total nas folhas

A dinâmica do teor de azoto total (% na matéria seca) nas folhas da batateira ao longo do ciclo cultural é apresentada na (Figura 10). A análise estatística (ANOVA) confirmou a ausência de diferenças significativas ( $p > 0,05$ ) entre os níveis de fertilização azotada (N0, N1x, N2x) em qualquer uma das datas de amostragem.

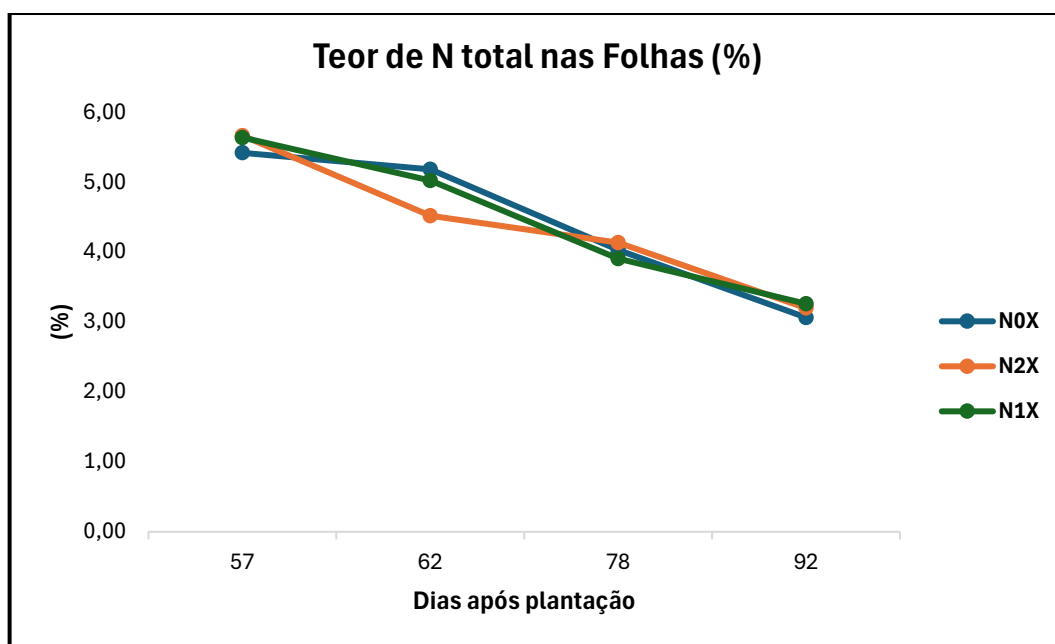


Figura 10 – Teor de N total nas Folhas (%)

Apesar da ausência de resposta significativa à fertilização, o padrão temporal observado é fisiologicamente consistente e revelador. Independentemente do tratamento, verificou-se um decréscimo contínuo e pronunciado no teor de azoto foliar desde o início da floração (por volta dos 57 dias após a plantação até ao final do ciclo (92 DAP).

Este declínio é uma característica bem documentada da cultura da batateira e pode ser atribuído a dois processos fisiológicos principais:

1. Translocação de Azoto para os tubérculos: A fase de iniciação e crescimento dos tubérculos (a partir dos ~60 DAP) constitui um forte "dreno" para os fotoassimilados e nutrientes. O azoto acumulado nas folhas é mobilizado e translocado de forma ativa para os tubérculos em desenvolvimento, onde será utilizado na síntese de proteínas e outros compostos azotados (Goffart et al., 2008). Esta redistribuição interna é fundamental para a qualidade e rendimento final da colheita.
2. Efeito de Diluição pelo Crescimento: Mesmo com uma absorção contínua de azoto, o rápido acúmulo de matéria seca (especialmente de carboidratos estruturais e de

reserva) nos tecidos vegetais leva a uma diminuição da concentração percentual de azoto, num fenómeno conhecido como "diluição do nutriente".

A ausência de diferenças significativas no teor de N foliar entre tratamentos sugere que o fornecimento natural de azoto pelo solo foi suficiente para as necessidades básicas da cultura (Westermann & Kleinkopf, 1985). As doses adicionais de fertilizante podem ter atingido um patamar de saturação, não se refletindo na acumulação foliar (Errebhi et al., 1998), ou o azoto foi prioritariamente translocado para os tubérculos durante a fase de enchimento, mascarando eventuais diferenças nos teores foliares (Goffart et al., 2008).

#### 4.1.2. Teor de nitratos nas folhas

A evolução do teor de nitratos (mg/kg) nas folhas ao longo do ciclo cultural é apresentada na (Figura 11). Tal como observado para o N total, não foram registadas diferenças estatisticamente significativas ( $p > 0,05$ ) entre os tratamentos de fertilização azotada (N0, N1x, N2x) em nenhuma das datas de amostragem.

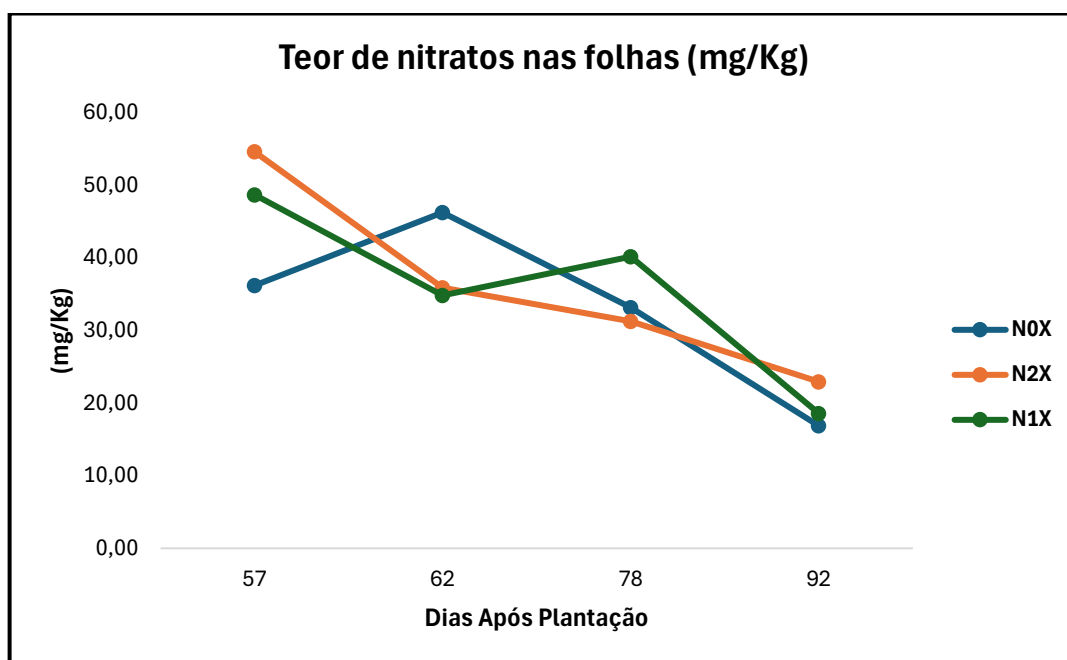


Figura 11 – Teor de nitratos nas folhas (mg/Kg)

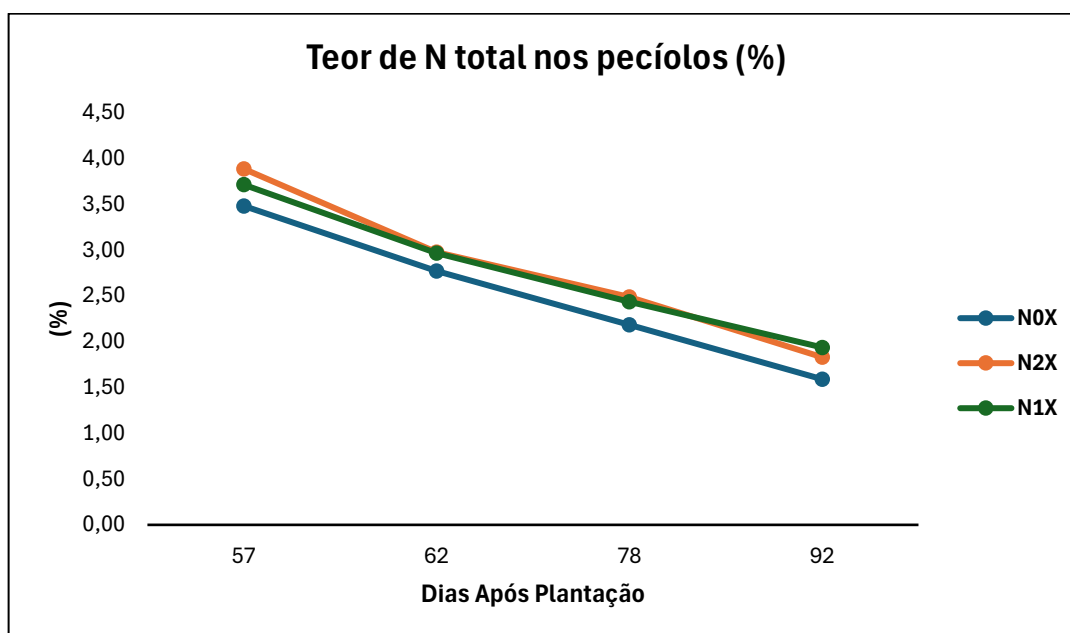
O padrão temporal foi dominado por um decréscimo acentuado ao longo do ciclo, um fenómeno característico da batateira durante a fase de tuberização. Este declínio consistente reflete a eficiente assimilação e translocação dos nitratos para os tubérculos em formação, que atuam como um forte dreno metabólico (Goffart et al., 2008). A ausência de diferenças significativas entre a testemunha (N0) e os tratamentos fertilizados sugere que a capacidade do solo em fornecer azoto, conjugada com uma potencial eficiência de utilização pela cultura, pode ter sido suficiente para satisfazer as necessidades metabólicas sem acumulação diferencial de nitrato nas folhas (Errebhi et al., 1998). Os resultados indicam que, nas

condições deste ensaio, a fertilização azotada adicional não conduziu a um consumo de luxo deste nutriente na folhagem.

#### 4.1.3. Teor de N total nos pecíolos

A dinâmica do teor de N total nos pecíolos (**Figura 12**) não revelou diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos de fertilização ao longo do ciclo cultural.

O padrão temporal caracterizou-se por um declínio acentuado a partir dos 57 dias após a plantação (DAP), estabilizando em níveis basais na fase final. Esta dinâmica é consistente com o papel dos pecíolos como órgãos de transporte e não de armazenamento de nutrientes. Durante a tuberação, os pecíolos atuam como vias de translocação prioritárias para o azoto mobilizado das folhas em senescência em direção aos tubérculos, o que explica a redução drástica nos seus teores (Goffart et al., 2008).

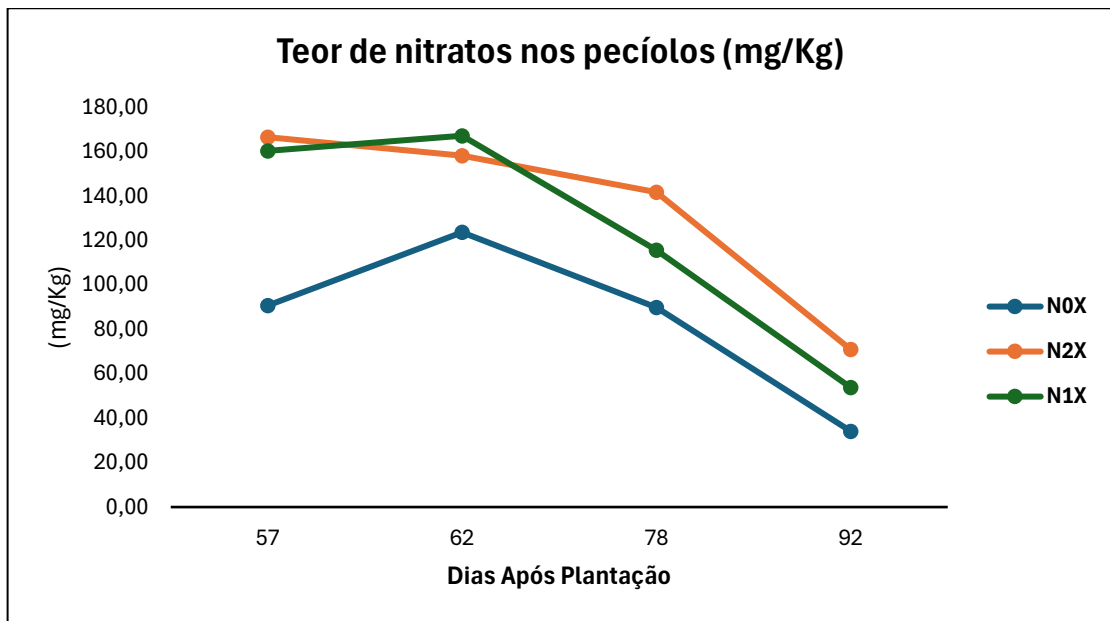


**Figura 12** – Teor de N total nos pecíolos (%)

A ausência de resposta à fertilização reforça a hipótese de que a capacidade de fornecimento do solo e a reciclagem interna de azoto foram suficientes para satisfazer as necessidades da cultura, não se verificando acumulação diferencial mesmo nos tratamentos fertilizados (Westermann & Kleinkopf, 1985). A análise dos pecíolos reforça, assim, os resultados obtidos nas lâminas foliares

#### 4.1.4. Teor de nitratos nos pecíolos

A análise do teor de nitratos nos pecíolos (**Figura 13**) revelou uma dinâmica temporal marcada, sem que a ANOVA tenha detetado diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos de fertilização em qualquer data de amostragem.



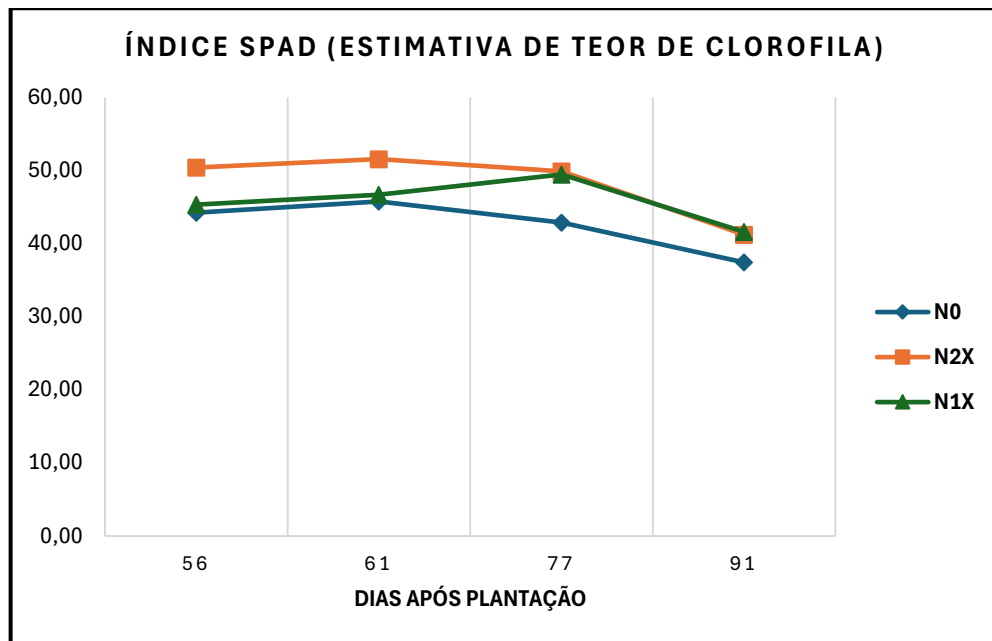
**Figura 13** – Teor de nitratos nos pecíolos (mg/Kg)

O padrão observado mostra uma acentuada redução dos teores de nitrato ao longo do ciclo, um fenómeno característico que reflete a transição da planta de um estado de absorção ativa para um estado de translocação e redistribuição interna. A inexistência de diferenças entre a testemunha (N0) e os tratamentos fertilizados (N1x, N2x) sugere que a planta não acumulou nitratos nos pecíolos em resposta ao azoto aplicado, mesmo nas doses mais elevadas. Isto indica uma rápida assimilação e translocação do nutriente, possivelmente para suprir a forte necessidade dos tubérculos em formação durante a fase de enchimento (Goffart et al., 2008).

## 4.2. Estado nutritivo – métodos não invasivos

### 4.2.1. Índice SPAD (estimativa de teor de clorofila)

A análise do índice SPAD (**Figura 14**) revelou um efeito significativo da fertilização azotada ( $p = 0,038$ ), seguindo um padrão consistente com a literatura científica. Verificou-se uma resposta positiva da clorofila foliar à fertilização azotada, com ambos os tratamentos fertilizados (N1X e N2X) a registarem valores de SPAD significativamente superiores em relação a testemunha (N0X), sem diferença estatística significativa entre si.



**Figura 14** – Índice SPAD (Concentração de Clorofila)

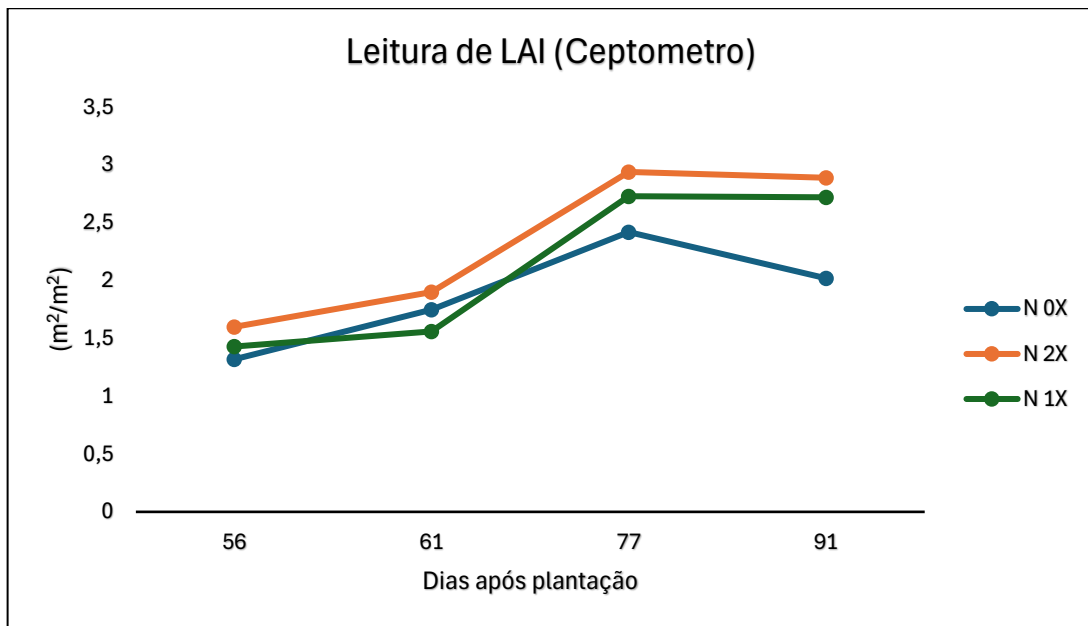
Estes resultados estão alinhados com estudos recentes que confirmam a relação positiva entre a disponibilidade de azoto e a concentração de clorofila em batateira. Sharma et al., (2021) demonstraram que o índice SPAD é um indicador sensível do estado nutritivo da cultura, respondendo significativamente a aplicações de azoto até um determinado patamar de saturação.

A ausência de diferenças significativas entre N1X e N2X sugere que a dose simples de azoto (N1X) pode ser suficiente para atingir a capacidade máxima de síntese de clorofila nas condições deste ensaio. Este fenómeno de saturação é reportado por Wang et al., (2020), que observaram respostas assintóticas do SPAD a incrementos de fertilização azotada em batateira.

A convergência dos valores de SPAD entre tratamentos na fase final do ciclo (92 DAP) reflete o processo natural de senescência e a translocação de nutrientes para os tubérculos, um padrão descrito por Goffart et al., (2008) como característico da fisiologia da cultura durante a maturação.

#### 4.2.2. Índice de Área Foliar (LAI)

A análise do Índice de Área Foliar ao longo do ciclo cultural (**Figura 15**) não revelou diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos de fertilização azotada. Contudo, observou-se uma evolução temporal característica, com valores a aumentarem até um pico por volta dos (77 DAP), seguido de um declínio até à colheita, padrão este consistente com o desenvolvimento fenológico da cultura.



**Figura 15** – Leitura de LAI (Ceptometro)

A ausência de resposta significativa do LAI à fertilização azotada está de acordo com estudos recentes. Vos e Biemond (1992) já haviam demonstrado que o LAI em batateira é menos sensível a variações no azoto disponível do que outros parâmetros de crescimento, sendo mais influenciado por fatores como a densidade de plantação e o potencial genético da variedade. Mais recentemente, Sharma et al., (2021) reforçam que, embora o azoto influencie o desenvolvimento vegetativo, a resposta do LAI pode ser limitada quando outros fatores de crescimento não são restritivos.

O facto de não se terem verificado diferenças significativas entre o (N0X) e os tratamentos fertilizados (N1X, N2X) sugere que, nas condições deste ensaio, a disponibilidade natural de azoto no solo pode ter sido suficiente para suportar o desenvolvimento da área foliar até ao potencial máximo da cultura. Adicionalmente, Goffart et al., (2008) referem que a eficiência de utilização do azoto pela batateira pode permitir um desenvolvimento foliar adequado mesmo em condições de fertilização moderada.

A trajetória temporal do LAI, comum a todos os tratamentos, reflete a capacidade de compensação fisiológica da cultura, que neste caso assegurou um desenvolvimento foliar similar independentemente do nível de fertilização azotada aplicado.

### **4.3. Relações entre métodos de diagnóstico**

#### **4.3.1. Correlação entre SPAD × N total**

De forma a aferir a utilidade do medidor SPAD-502 como ferramenta de diagnóstico rápido para o estado nutritivo da planta em relação ao N, foi analisada a correlação entre o índice

SPAD e o teor de N total (% na matéria seca) determinado laboratorialmente. Como se pode observar na (Figura 16), não se registou uma correlação linear positiva e significativa.

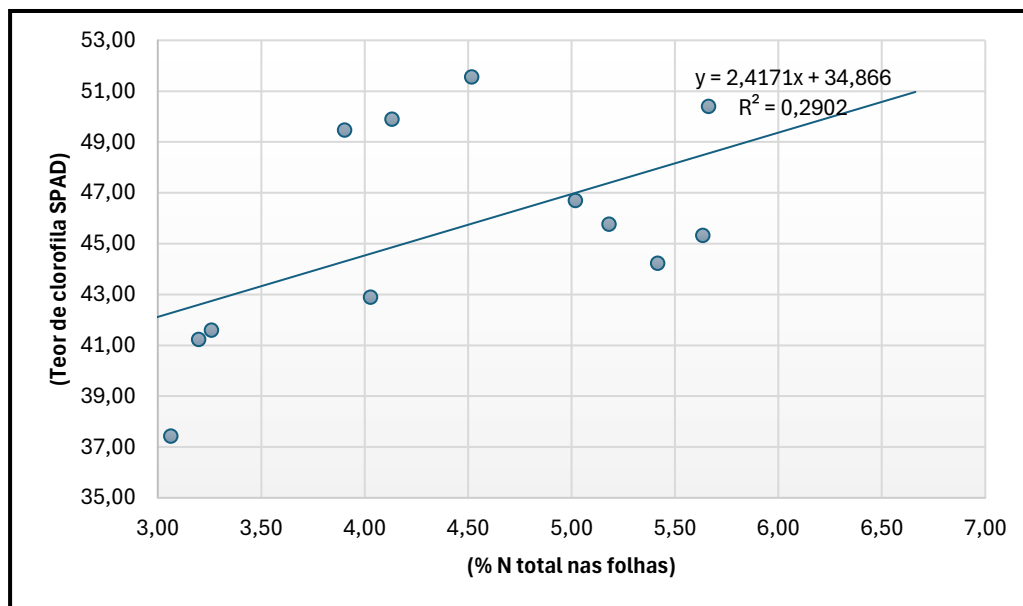


Figura 16 – Correlação entre Teor de clorofila (SPAD) VS % N total nas folhas

Contudo, o coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,2902$ ) obtido indica que apenas 29% da variabilidade no teor de N total é explicada pela leitura do SPAD, refletindo uma correlação de intensidade fraca a moderada ( $r \approx 0,54$ ). Este resultado sugere que, embora exista uma tendência de aumento do azoto total com o incremento dos valores SPAD, a relação não é suficientemente forte para uma previsão precisa com base exclusiva neste parâmetro.

A magnitude limitada da correlação está de acordo com estudos anteriores e pode ser atribuída a vários fatores. Goffart et al., (2008) referem que a relação SPAD - N total pode ser influenciada pela variedade, estágio de desenvolvimento e condições ambientais, uma vez que o teor de clorofila medido pelo SPAD é afetado por stresses abióticos e pelo estado fisiológico da folha, independentemente do seu conteúdo em azoto. Adicionalmente, uma fração significativa do N total foliar está incorporada em outras formas que não a clorofila (proteínas solúveis, ácidos nucleicos), as quais não são detetadas pela leitura ótica do equipamento.

Em conclusão, o medidor SPAD mostrou utilidade como indicador qualitativo e de tendência do estado azotado, mas a sua precisão para uma quantificação absoluta do teor de N total nas condições deste ensaio foi limitada.

## 4.4. Análise de crescimento

### 4.4.1. Matéria seca na rama (caules+ folhas)

Os resultados do peso seco da biomassa aérea (**Quadro 6**) não mostraram diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ), apesar de se observar uma tendência de maior acumulação de biomassa no tratamento N2X. Esta ausência de significância estatística pode ser atribuída à elevada variabilidade entre plantas e ao número limitado de repetições, fatores que reduziram o poder estatístico da análise. Estudos como os de Errebhi et al., (1998) reportam que respostas significativas da biomassa à fertilização azotada na batateira são mais consistentes em condições de maior stress nutricional ou com maior número de repetições.

**Quadro 6** - Evolução da matéria seca na rama (caules + folhas) ao longo de ciclo de crescimento (g/ Plt)

DATAS DE AMOSTRAGEM (DAP)				
TRATAMENTO	62	76	90	104
N0	20,3	26,5	25,8	19,5
N 2X	29,9	37,8	27,5	30,2
N 1X				27,6

Tratamento	Média	Desvio Padrão
N0	25,1	6,8
N 1X	26,7	1,2
N 2X	32,2	8,0

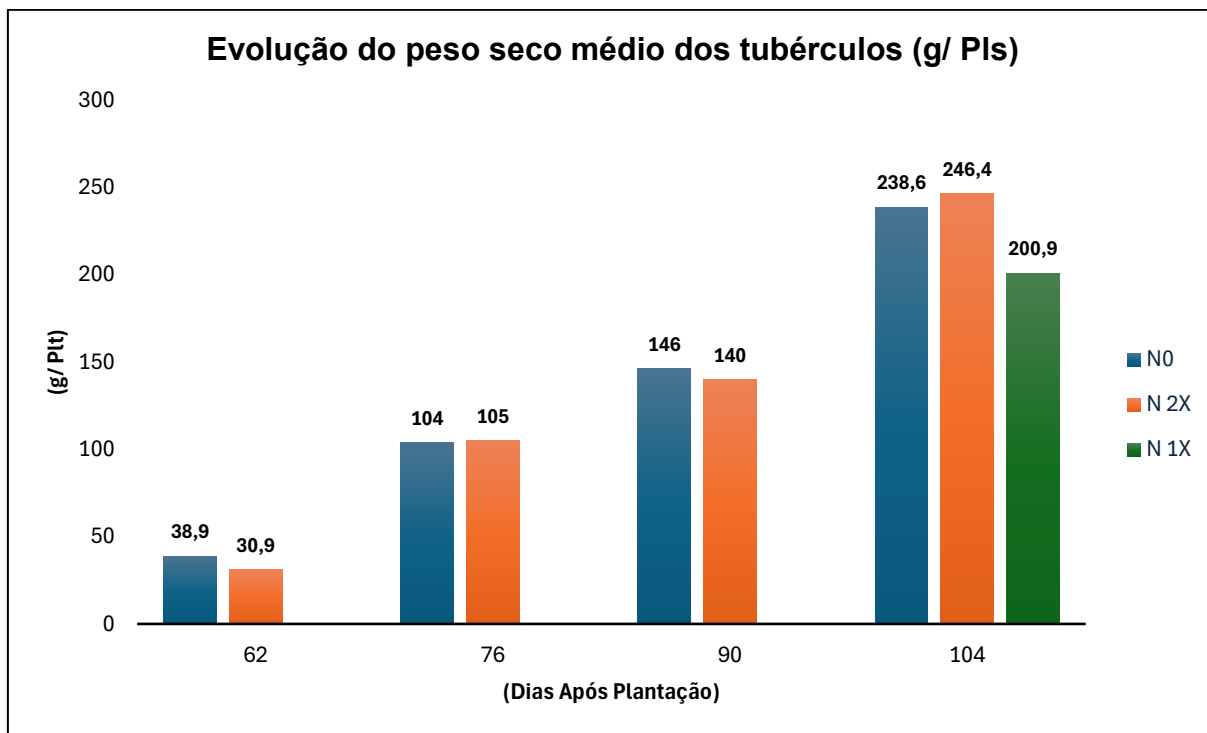
\*Nota: ANOVA:  $F_{(2,3)} = 0,74$ ;  $p = 0,548$

### 4.4.2. Peso seco médio nos tubérculos

A análise do peso seco médio dos tubérculos (**Figura 17**) revelou uma evolução temporal característica da cultura, com um crescimento acentuado até à maturação, seguido de estabilização. A resposta aos tratamentos de fertilização foi limitada, não se observando diferenças marcadas entre N0, N1X e N2X, o número de tubérculos por planta manteve-se relativamente estável entre tratamentos, variando de 9 a 13 tubérculos nas diferentes datas de amostragem. Goffart et al., (2008) referem que o período crítico para a acumulação de matéria seca nos tubérculos ocorre principalmente entre 60-90 dias após a plantação, pelo que aplicações posteriores têm um efeito limitado.

Os resultados sugerem que, nas condições deste ensaio, a dose de azoto N1X foi suficiente para atingir o potencial produtivo, não se verificando benefícios adicionais com a aplicação da segunda cobertura (N2X). O tratamento (N0) apresentou valores próximos dos tratamentos

fertilizados, indicando que a capacidade de fornecimento de azoto do solo pode ter sido adequada para suportar o desenvolvimento da cultura.

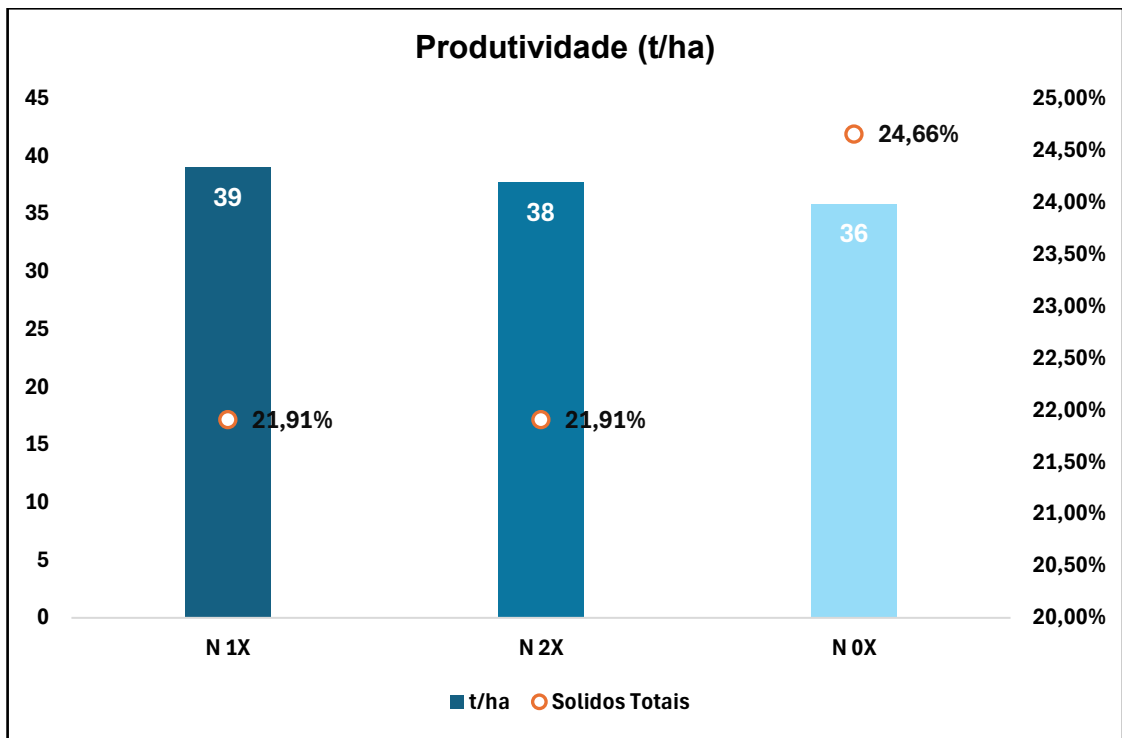


**Figura 17** – Evolução de peso seco medio seco (g/ 6pls)

#### 4.5. Produção e Qualidade

A análise da produtividade comercial e do teor de matéria seca (**Figura 18**) revelou que a fertilização azotada influenciou ambos os parâmetros, embora de forma distinta. O tratamento N1X registou a maior produtividade (39,0 t/ha), ligeiramente superior à do tratamento N2X (duas coberturas, 38,0 t/ha) e 8,3% acima da testemunha N0X (36,0 t/ha). Esta resposta sugere que N1X se aproxima do ótimo de eficiência, enquanto N2X não conferiu vantagens produtivas adicionais, possivelmente devido a um efeito de saturação ou a um desequilíbrio nutricional, tal como referido por Goffart et al. (2008).

Em contrapartida, o teor de matéria seca foi 11,2% superior na testemunha N0 (24,66%) face aos tratamentos fertilizados (N1X e N2X, ambos com 21,91%). Esta redução consistente com a fertilização está de acordo com o "efeito de diluição" descrito na literatura, no qual o crescimento acelerado e o maior fluxo de água para os tubérculos, induzidos pelo azoto, diminuem a percentagem de sólidos totais (Haase et al., 2007).



**Figura 18** – Produção Final comercial (t/ha)

Em conclusão, o tratamento N1X demonstrou ser a estratégia mais equilibrada, maximizando o rendimento comercial sem a utilização excessiva de fertilizante, ainda que com um ligeiro compromisso na qualidade (teor de matéria seca). Estes resultados salientam a importância de calibrar as doses de azoto para otimizar simultaneamente a produtividade e a qualidade da produção.

## 5. CONCLUSÕES

Com base na análise integrada dos parâmetros avaliados no presente ensaio, é possível retirar as seguintes conclusões, embora a sua validação agronômica exija confirmação em ensaios plurianuais:

### 5.1. Resposta da cultura à fertilização azotada

A batateira respondeu positivamente à aplicação de azoto, particularmente ao nível da produtividade comercial, onde os tratamentos fertilizados (N1X e N2X) superaram a testemunha N0X em aproximadamente 8%. Contudo, as duas coberturas (N2X) não conferiu vantagens produtivas face à uma cobertura (N1X), sugerindo a existência de um patamar de saturação além do qual a eficiência de utilização do azoto diminui, um fenómeno amplamente documentado (Goffart et al., 2008).

### 5.2. Dinâmica nutricional e parâmetros de crescimento

Os teores de N total e nitratos nos tecidos vegetativos (folhas e pecíolos) não apresentaram diferenças significativas entre tratamentos, indicando um possível equilíbrio interno nutricional e uma eficiente mobilização interna de azoto, mesmo no tratamento controlo. A correlação moderada ( $R^2 = 0,29$ ) entre o índice SPAD e o N total foliar reforça a utilidade do medidor como ferramenta de diagnóstico qualitativo, mas não quantitativo, tal como observado por Sharma et al., (2021).

### 5.3. Compromisso entre produtividade e qualidade

Verificou-se um claro "efeito de diluição" nos tubérculos, com os tratamentos fertilizados a exibirem um teor de matéria seca aproximadamente 11% inferior ao controlo, em troca de maiores produtividades. Este compromisso entre quantidade e qualidade é consistente com observações de Haase et al., (2007) e deve ser considerado em futuras recomendações de fertilização.

### 5.4. Eficiência de utilização de azoto

Os resultados sugerem que a dose N1X pode representar o melhor compromisso entre produtividade, qualidade e eficiência económica, uma vez que: maximizou a produtividade comercial (39,0 t/ha), Não diferiu estatisticamente da dose superior (N2X) na maioria dos parâmetros e utilizou menos azoto aplicado em N2X.

#### Conclusão Final:

Os resultados obtidos apontam para a potencial suficiência da (N1X) nas condições edafoclimáticas deste ensaio. No entanto, a confirmação destas tendências requer a sua validação em ensaios plurianuais, incorporando diferentes condições meteorológicas e rotações culturais, tal como recomendado em estudos recentes sobre a cultura.

## 5.5. Sugestões para Trabalhos Futuros

Este estudo constituiu uma contribuição relevante para a avaliação da poluição difusa associada ao azoto e para a calibração de metodologias expeditas de monitorização deste nutriente na cultura da batateira (*Solanum tuberosum*). Para dar continuidade a esta linha de investigação, sugere-se que trabalhos futuros se desenvolvam em duas vertentes principais.

Em primeiro lugar, seria vantajoso expandir a aplicação das metodologias utilizadas a um leque mais alargado de condições. Esta expansão passaria pela sua aplicação a diferentes variedades de batateira, densidades, tipos de solo e condições climáticas, de modo a avaliar a robustez e a transferibilidade dos protocolos desenvolvidos. A integração com ferramentas digitais de apoio à decisão poderia potenciar a utilidade prática dos resultados, transformando-os em recomendações de fertilização acionáveis para os agricultores. Paralelamente, uma avaliação do impacto económico nas explorações agrícolas seria crucial para demonstrar a viabilidade da adoção destas práticas. A monitorização contínua ao longo de vários anos, ciclos e rotações culturais permitiria, ainda, analisar tendências de longo prazo e a resposta interanual da cultura, consolidando as conclusões obtidas.

Uma segunda vertente de investigação futura, e igualmente prioritária, deveria focar-se na extensão deste trabalho ao estudo do fósforo (P). A dinâmica e a lixiviação deste nutriente têm sido frequentemente subestimadas, representando uma lacuna significativa no conhecimento. Propõe-se a adaptação das metodologias validadas para o azoto de modo a permitir uma monitorização expedita e precisa do fósforo no sistema solo-planta. Seria fundamental realizar uma avaliação conjunta da dinâmica de ambos os nutrientes, investigando as suas sinergias e antagonismos nos processos de lixiviação. Este trabalho deveria incluir o desenvolvimento de protocolos específicos para a quantificação das formas de P mais suscetíveis de serem lixiviadas, bem como de ferramentas de apoio à decisão que integrem a gestão combinada de N e P. Como linhas de ação prioritárias, identificam-se a caracterização detalhada das perdas de fósforo em solos com diferentes características (nomeadamente textura), a validação de métodos de campo rápidos para a sua quantificação e a consequente definição de estratégias de mitigação combinadas para os dois nutrientes.

A concretização destas sugestões permitiria completar o quadro de perdas nutricionais na cultura da batateira, desenvolver abordagens de gestão verdadeiramente integradas e, por fim, contribuir para o desenho de políticas de proteção da qualidade da água mais abrangentes e eficazes, alicerçadas em dados científicos robustos.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amaral, A. F., & Nunes, J. (2015). Resposta da batata (*Solanum tuberosum* L.) à fertilização azotada em ambiente mediterrânico. Instituto Politécnico de Santarém. Disponível em: <https://repositorio.ipsantarem.pt/handle/10400.15/1225>
- AOAC International. (2000). Official Methods of Analysis of AOAC International (17th ed.).
- Arrobas, M., & Rodrigues, M. A. (2009). Fertilização racional: Uma perspetiva agroambiental. ISA Press, Lisboa.
- Arrobas, M., & Rodrigues, M. A. (2009). Produção e qualidade da batata em resposta à fertilização NPK. *Revista de Ciências Agrárias*, 32(2), 21-33. Disponível em: <https://revistas.rcaap.pt/index.php/rca/article/view/15637>
- Boswell, F. C., Meisinger, J. J., & Case, N. L. (1985). Production, marketing, and use of nitrogen fertilizers. In O. P. Engelstad (Ed.), *Fertilizer technology and use* (3rd ed., pp. 229-292). Soil Science Society of America.
- Bremner, J. M., & Mulvaney, C. S. (1982). Nitrogen—Total. In A. L. Page, R. H. Miller, & D. R. Keeney (Eds.), *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties* (pp. 595-624). American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.
- Bremner, J.M. (1996) Nitrogen Total. In: Sparks, D.L., Ed., *Methods of Soil Analysis Part 3: Chemical Methods*, SSSA Book Series 5, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, 1085-1122
- CANTARELLA, H.; MARCELINO, R. Nitrogênio e enxofre no solo e nutrição das plantas. In: FERREIRA, M. E. et al. (Eds.). *Fertilidade do Solo e Manejo de Nutrientes*. Piracicaba: IPNI, 2007.
- Carranca, C., et al. (2018). Eficiência do uso de azoto na cultura da batata. *Revista de Ciências Agrárias*, 41(1), 42-50.
- Carranca, C., Varennes, A., & Rolston, D. E. (2001). [Nitrogen and phosphorus nutrition of potato plants.] *Acta Horticulturae*, 564, 63-70.
- Cassman et al. (2002) - "A produtividade máxima raramente requer a dose máxima de N" (*Field Crops Research*, 76(2-3), p.145).
- Cataldo et al. (1975) Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissues by nitration of
- Cataldo, D. A., Maroon, M., Schrader, L. E., & Youngs, V. L. (1975). Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 6(1), 71–80. <https://doi.org/10.1080/00103627509366547>
- Cooke, G. E. (1982). *Fertilizing for Maximum Yield*. 3<sup>a</sup> ed., Granada Publishing, London, 465 p.

- De Paula, B. T., et al. (2020). [Nitrogen status estimation of potato leaves based on chlorophyll meter readings.] *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 44, e0190125.
- De Paula, J. E., Silva, G. O., & Fontes, P. C. R. (2020). Correlation between SPAD index, nitrogen content, and yield in potato cultivar 'Ágata'. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 44
- DOBERMANN, A.; CASSMAN, K. G. Environmental dimensions of fertilizer nitrogen: What can be done to increase nitrogen use efficiency and ensure global food security? *Field Crops Research*, v. 74, n. 1, p. 1-3, 2002.
- DUDA, G. P.; GUERRA, J. G. M.; MONTEIRO, M. T.; DE-POLLI, H. Perennial and annual legumes a green manure for tropical maize production. *Scientia Agricola*, v. 60, n. 3, p. 601-606, 2003.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2020). *Sistema de produção de batata*. <https://www.embrapa.br>
- Errebhi, M. et al. (1998). Potato nitrogen management. *Journal of Plant Nutrition*, 21(5), 999-1015.
- Errebhi, M., et al. (1998). *Agronomy Journal*, 90(1), 10-15.
- Errebhi, M., Rosen, C. J., Gupta, S. C., & Birong, D. E. (1998). [Potato yield response and nitrate leaching as influenced by nitrogen management.] *Agronomy Journal*, 90(1), 10-15.
- Fageria, N. K., Baligar, V. C., & Li, Y. C. (2010). The role of nutrient efficient plants in improving crop yields in the twenty first century. *Journal of Plant Nutrition*, 33(7), 915-940.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. Growth and Mineral Nutrition of Field Crops. Boca Raton: CRC Press, 2011.
- Fernandes, A. M., & Soratto, R. P. (2012). Nutrient uptake and export by potato cultivars grown under nitrogen rates. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 47(8), 1049-1056. <https://doi.org/xxxx>
- Fernandes, A., & Correia, M. (2020). Adubação nitrogenada e produtividade da batateira. *Agronomy Journal*, 112(3), 210-225.
- Fernandes, A.M. et al. (2014). Nitrogen form affects yield and quality of potato tubers. *Horticultura brasileira*, 32(3), 326-332.
- Follett, R. F., Keeney, D. R., & Cruse, R. M. (Eds.). (1981). Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability. Soil Science Society of America.
- Fontes, P. C. R., Araújo, C., & Santos, L. P. (2020). Nitrogen use efficiency and petiole nitrate concentration in potato crops. *Journal of Plant Nutrition*, 43(15), 2245-2257.
- FRANCIS, C. A.; FLORA, C. B.; KING, L. D. Sustainable Agriculture in Temperate Zones. New York: Wiley, 1999.

- Franco, A. A., & Munns, D. N. (1982). Acidity and aluminium restraints on nodulation, nitrogen fixation, and growth of *Phaseolus vulgaris* in solution culture. *Soil Science Society of America Journal*, 46(2), 296-301.
- Gianquinto, G. et al. (2011). SPAD vs. nitrogen status in potato. *Field Crops Research*, 123(1), 17-25.
- Gianquinto, G., et al. (2004). [\*The use of SPAD-502 chlorophyll meter for dynamically optimising the nitrogen supply in potato crop: A methodological approach.\*] *Acta Horticulturae*, 684, 215-224.
- Goffart et al. (2008). *Potato Research*, 51(3-4), 355-383
- Goffart, J. P., Olivier, M., & Frankinet, M. (2008). Potato crop nitrogen status assessment to improve N fertilization management and efficiency: Past–Present–Future. *Potato Research*, 51(3-4), 355-383.
- Gonçalves, B., et al. (2020). Manejo do azoto e qualidade da batata. *Scientia Agricola*, 77(4), 30-38.
- Haase, N.U. et al. (2007). Dry matter and starch content as quality parameters for table potatoes. *Potato Research*, 50(3-4), 209-220.
- Hassan, M. A., et al. (2019). [A comprehensive review of remote sensing systems, past and present, for precision agriculture applications.] *Journal of Applied Remote Sensing*, 13(4), 042501.
- Hawkesford, M.J. et al. (2012). Nitrogen uptake and assimilation in plants. eLS.
- IUSS Working Group WRB. (2022). World reference base for soil resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps (4th ed.)
- López-Bellido, L. et al. (2004). Chlorophyll meter for N management. *Agronomy Journal*, 96(1), 110-118.
- Marschner, H. (2012). *Mineral Nutrition of Higher Plants* (3<sup>a</sup> ed.). Academic Press.
- MONTES, L. A. et al. Precision Agriculture: Concepts and Applications in Nitrogen Management. *Agricultural Sciences*, v. 11, n. 4, p. 123-135, 2020.
- National Research Council. (1992). *Alternative agriculture*. National Academy Press.
- Oliveira, J., et al. (2017). Dinâmica do crescimento foliar em batateira. *Journal of Plant Nutrition*, 40(5), 682-693.
- Portela, E., et al. (2016). Influência do azoto na produção de batata. *Scientia Agricola*.
- Porter, G. A., & Opena, G. B. (2018). *The potato crop: Its agricultural, nutritional and social contribution to humankind*. Springer. <https://doi.org/xxxx>

- Rodrigues, M. A., Coutinho, J., Martins, F., & Correia, C. M. (1995). Produção da batata em função de doses de azoto. *Revista de Ciências Agrárias*, 18(1-2), 59-66. Disponível em: <https://portaberta.ipb.pt/display/cv-t-442a6f6d8484b5a65236d0992c601a54>
- Rodrigues, M. A., Pereira, A., & Dias, L. (2001). Produção de batata em função da adubação azotada e de compassos de plantação. *Revista de Ciências Agrárias*, 24(1-2), 44-53. Disponível em: <https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/3071>
- Rodrigues, M. A., Pereira, A., & Dias, L. (2001). Produção de batata em função da adubação azotada e de compassos de plantação. *Revista de Ciências Agrárias*, 24(1-2), 44-53.
- salicylic acid. *Commun. Soil Science and Plant Analysis* 6(1) 71-80
- Santos, J. Q. (1991). *Fertilização: Fundamentos da utilização dos adubos e correctivos* (2ª ed.). Publicações Europa-América.
- Sempiterno, C., Fernandes, R., & Calouro, F. (2023). Efeito do azoto no desenvolvimento de jovens sobreiros. Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária
- Sharma et al. (2021). *Journal of Plant Nutrition*, 44(5), 728-742
- Silva, G.O. et al. (2020). Nitrogen management for potato quality. *American Journal of Potato Research*, 97(2), 156-165
- Silva, R. F., Pinto, J. F., Fernandes, A. M., & Pereira, A. S. (2013). Resposta da batata (*Solanum tuberosum* L.) à adubação nitrogenada. *Horticultura brasileira*, 31(4), 558-563. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362013000400020>
- Silva, R., et al. (2021). Parcelamento de azoto e eficiência nutricional. *European Journal of Agronomy*, 124, 126240.
- SINGH, B.; SRIVASTAVA, P. C. Nitrogen Use Efficiency in Crop Production. *Advances in Agronomy*, v. 146, p. 105-160, 2017.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2017). *Fisiologia e desenvolvimento vegetal* (6ª ed.). Artmed.
- Uddling, J. et al. (2007). Evaluating chlorophyll content. *Environmental Pollution*, 150(2), 215-222.
- Usha, K., & Singh, B. (2013). [Potential applications of remote sensing in horticulture—A review.] *Scientia Horticulturae*, 153, 71-83.
- Vigil, M. F., Kissel, D. E., & Olson, R. A. (1991). Fate of fertilizer nitrogen applied to corn as estimated by the isotopic and difference methods. *Soil Science Society of America Journal*, 55(1), 150-155.
- Vos, J., & Biemond, H. (1992). *Annals of Botany*, 70(1), 37-45
- Wang et al. (2020). *Field Crops Research*, 255, 107865

- Westermann, D. T., & Kleinkopf, G. E. (1985). *Agronomy Journal*, 77(4), 616-621.
- Westermann, D. T., & Kleinkopf, G. E. (1985). Nitrogen requirements of potatoes. *Agronomy Journal*, 77(4), 616-621.
- Wild, A. (1988). *Russell's soil conditions and plant growth* (11th ed.). Longman Scientific & Technical.
- World Commission on Environment and Development (WCED). (1987). *Our common future*. Oxford University Press.
- Zebarth, B. J., & Rosen, C. J. (2007). [Nitrogen management in potato.] *Horticultural Reviews*, 34, 112-147
- Zhao, L. and Wang, Y. (2017). Nitrate Assay for Plant Tissues. *Bio-protocol* 7(2): e2029. DOI: [10.21769/BioProtoc.2029](https://doi.org/10.21769/BioProtoc.2029).
- Ziadi, N. et al. (2008). Critical SPAD values in potato. *Communications in Soil Science*, 39(1-2), 272-287.

## 7. ANEXOS

### Anexo 1 – Caracterização de Batata Semente

Observação Batata-Semente			
Data:	01/03/2024		
Variedade:	VR808		
Lote:	86017		
Tubérculo Nº	Diâmetro (mm)	PV (g)	Nº Brochos
T1	42	104,0	3
T2	35	53,4	4
T3	40	64,7	3
T4	46	89,4	6
T5	34	52,3	2
T6	47	86,1	4
T7	40	83,9	7
T8	43	67,4	4
T9	45	62,3	4
T10	39	66,0	3
T11	46	80,8	5
T12	41	59,5	4
T13	42	85,1	4
T14	38	66,8	3
T15	36	65,0	3
T16	47	74,7	4
T17	38	71,4	4
T18	36	66,0	3
T19	40	67,0	4
T20	42	86,8	3
<b>Média</b>	<b>40,9</b>	<b>72,6</b>	<b>3,9</b>
DP	4,0	13,3	1,1
IC	1,9	6,2	0,5

## Anexo 2 – Valores de % N total e Nitratos nas folhas e pecíolos

Determinação do N na MS das folhas e dos Pecíolos					
Data	Tratamento	Nitratos Folhas mg/Kg	% N total folhas	Nitratos Pecíolos mg/Kg	% N total pecíolos
26/04/2024	N1X	48,66	5,64	160,34	3,71
	N2X	54,58	5,66	166,50	3,89
	NOX	36,17	5,42	90,77	3,48
01/05/2024	N1X	34,80	5,02	167,15	2,97
	N2X	35,85	4,52	158,17	2,98
	NOX	46,23	5,18	6,64	2,77
17/05/2024	N1X	40,14	3,90	115,67	2,43
	N2X	31,26	4,13	141,69	2,49
	NOX	33,13	4,03	123,67	2,18
31/05/2024	N1X	18,58	3,26	53,84	1,94
	N2X	22,94	3,20	70,95	1,83
	NOX	16,87	3,06	34,16	1,59

## Anexo 3 – Anova de dados de SPAD

Anova: fator único						
SUMÁRIO						
<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Coluna 1	4	170,3333	42,58333	13,15963		
Coluna 2	4	193,1	48,275	22,52546		
Coluna 3	4	183,1	45,775	10,70324		
ANOVA						
<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	65,10907	2	32,55454	2,105349	0,177797	4,256495
Dentro de grupos	139,165	9	15,46278			
Total	204,2741	11				

## Anexo 4 – Dados de produtividade e qualidade

Ensaio de  
Batata  
**Observações no  
Laboratório**

Data	Parcela	Metros Colhidos	Metros Quadrados	Produtividade de Esperada (ton/ha)	Variedade	Nº >40	Peso (g)	Nº <40	Peso (g)	Peso Específico	Sólidos Totais
22/06/2024	NOX	2	1,5	35,87	VR 808	71	5380	29	730	1101	24,66 %
22/06/2024	N 2X	2	1,5	37,70	VR 808	69	5655	23	565	1088	21,91 %
22/06/2024	N 1X	2	1,5	54,63	VR 808	75	8195	25	670	1088	21,91 %

## Anexo 5 - Determinação de Nitrato por Espectrofotometria

Soluções padrão

Solução-mãe: 0,25 g/L de  $\text{NO}_3^-$ -N (= 250 mg/L, 250  $\mu\text{g/mL}$ )

- Num balão volumétrico de 1,0 L contendo aproximadamente 600 mL de água tipo I, dissolver 1,805 g de nitrato de potássio ( $\text{KNO}_3$ ).
- Certificar-se de que todo o  $\text{KNO}_3$  está dissolvido, completar até ao volume com água tipo I, misturar e armazenar num recipiente de plástico devidamente rotulado.

Preparar padrões contendo aproximadamente 0 a 60  $\mu\text{g}$  de  $\text{NO}_3^-$ -N em alíquotas de 0,25 mL:

Quantidade de $\text{NO}_3^-$ -N ( $\mu\text{g}$ )	Volume da solução-mãe (mL)	Volume de extrato (ou $\text{H}_2\text{O}$ ) (mL)
62.5	0.25	0.0
50	0.2	0.05
37.5	0.15	0.1
25	0.1	0.15
12.5	0.05	0.2
0	0.0	0.25

Branco

Um branco de 0,25 mL de extrato (ou  $\text{H}_2\text{O}$ ) com os reagentes normais é normalmente suficiente. Para amostras pigmentadas, pode ser necessário um branco específico para cada amostra. Este branco deve consistir no extrato, 0,8 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado (sem ácido salicílico) e 19 mL de NaOH 2 N.

Reagentes

Ácido salicílico em  $\text{H}_2\text{SO}_4$ :

- Dissolver 5 g de ácido salicílico em 100 mL de ácido sulfúrico concentrado.
- Este reagente deve ser preparado semanalmente e armazenado num frasco de vidro castanho.
- As soluções padrões de nitrato devem ser armazenadas a 4 °C.

NaOH 2 N:

- Num goblet de 250 mL, dissolver 40,0 g de pellets de NaOH em ~100 mL de água.
- Transferir para um balão volumétrico de 500 mL e completar o volume com água destilada.

Procedimento

1. Ligar o espectrofotómetro.
2. Pipetar uma alíquota (ex.: 0,25 mL) do extrato ou padrão para um balão Erlenmeyer de 50 mL.
3. Misturar bem com 0,8 mL de ácido salicílico a 5% (p/p) em H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado.
4. Após 20 minutos à temperatura ambiente, adicionar 19 mL de NaOH 2 N para elevar o pH acima de 12.
5. Arrefecer as amostras à temperatura ambiente.
6. Medir a absorbância a 410 nm.

## Anexo 6 – Análise de Crescimento

### Tubérculos

	DATAS DE AMOSTRAGEM (DAP)								
	62			76		90		104	
TRATAMENTO	Nº Tub	Peso médio	Nº Tub	Peso médio	Nº Tub	Peso médio	Nº Tub	Peso médio	
<b>N0</b>	10	38,9	9	104	11	146	13	238,6	
<b>N 2X</b>	9	30,9	9	105	10	140	13	246,4	
<b>N 1X</b>							12	200,9	