



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA-UFU
INSTITUTO DE QUÍMICA

Felipe Cerqueira Marcassa

DETERMINAÇÃO DE AMÔNIA VOLATILIZADA DE SOLOS
FERTILIZADOS COM FOTÔMETRO UV-VIS PORTÁTIL E DE
BAIXO CUSTO

Uberlândia – MG

Julho 2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA-UFU
INSTITUTO DE QUÍMICA

Felipe Cerqueira Marcassa

DETERMINAÇÃO DE AMÔNIA VOLATILIZADA DE SOLOS
FERTILIZADOS COM FOTÔMETRO UV-VIS PORTÁTIL E DE
BAIXO CUSTO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Química do Instituto de Química da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Química.

Área de concentração: Química Analítica

Orientação: Prof. Dr. João Flávio da
Silveira Petrucci

Uberlândia – MG

Julho 2026

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

M313 Marcassa, Felipe Cerqueira, 1997-
2026 DETERMINAÇÃO DE AMÔNIA VOLATILIZADA DE SOLOS
FERTILIZADOS COM FOTÔMETRO UV-VIS PORTÁTIL E DE BAIXO
CUSTO [recurso eletrônico] / Felipe Cerqueira Marcassa. - 2026.

Orientador: João Flávio da Silveira Petrucí.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Química.
Modo de acesso: Internet.
DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2026.615>
Inclui bibliografia.

1. Química. I. Petrucí, João Flávio da Silveira, 1984-, (Orient.). II.
Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Química.
III. Título.

CDU: 54

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Química
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 5I - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4385 - www.cpgquimica.iq.ufu.br - cpgquimica@ufu.br



ATA

Programa de Pós-Graduação em:	Química				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 423, PPGQUI				
Data:	Trinta e um de julho de dois mil e vinte e seis	Hora de início:	9h	Hora de encerramento:	11:00h
Matrícula do Discente:	12422QMI002				
Nome do Discente:	Felipe Cerqueira Marcassa				
Título do Trabalho:	“DETERMINAÇÃO DE AMÔNIA VOLATILIZADA DE SOLOS FERTILIZADOS COM FOTÔMETRO UV-VIS PORTÁTIL E DE BAIXO CUSTO”				
Área de concentração:	Química				
Linha de pesquisa:	Instrumentação Analítica e Preparo de Amostras				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	“Construção de plataformas ópticas portáteis, versáteis e de baixo custo para sensoriamento de vapores e gases em diferentes atmosferas”				
<u>ODS</u> 13	ODS 13 - Ação contra a mudança global do clima: tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos.				

Reuniu-se, por webconferência, link: meet.google.com/krg-uqkt-inc, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Química, assim composta pelos professores doutores: **Sidnei Gonçalves da Silva**, da Universidade Federal de Uberlândia; **Rodrigo Sequinel**, da Universidade Federal do Paraná/UFPR; e **João Flávio da Silveira Petrucci**, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, **Dr. João Flávio da Silveira Petrucci**, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O discente compromete-se a acatar as sugestões de correção da banca examinadora e depositar a versão final da dissertação no repositório da UFU em até 30 (trinta) dias.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.



Documento assinado eletronicamente por **João Flávio da Silveira Petrucci, Usuário Externo**, em 31/07/2026, às 11:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **RODRIGO SEQUINEL, Usuário Externo**, em 31/07/2026, às 11:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sidnei Gonçalves da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 04/08/2026, às 09:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7344364** e o código CRC **92A65CEF**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Denise Silene Cerqueira Marcassa e Luciano Treviso Marcassa e aos meus avós José Marcassa e Alice Treviso Marcassa por todo esforço e apoio para que eu pudesse realizar meus sonhos, sem vocês nada disso seria possível. Agradeço também a minha irmã por todo o companheirismo. Amo muito vocês. A minha namorada Layane Resende Coutinho por estar ao meu lado durante essa etapa da minha vida. Obrigado por tudo.

Aos meus professores que me passaram seus conhecimentos e me possibilitaram chegar onde cheguei, em especial, ao meu orientador Prof^o. Dr^o. João Flávio da Silveira Petrucci pela orientação, paciência e dedicação durante o desenvolvimento das atividades de pesquisa, auxiliando e sanando todas as dúvidas. Só tenho a agradecer.

As minhas amigadas, em especial as que Uberlândia me proporcionou, pelo companheirismo, ajuda e apoio durante toda minha jornada. Sem vocês todo o processo teria sido muito mais difícil.

A Adfert, por me fornecer tempo, estrutura e todo conhecimento necessário para que esse trabalho fosse possível.

Por fim, agradeço à UFU e ao Instituto de Química por terem me dado à chance e as ferramentas necessárias para que eu pudesse chegar ao final deste ciclo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

RESUMO

O crescimento contínuo da população mundial tem ampliado a demanda por sistemas de produção de alimentos mais eficientes. No Brasil, o setor agrícola enfrenta desafios relevantes para atender aos mercados interno e externo, especialmente em função da limitação de áreas disponíveis para cultivo. Nesse contexto, a utilização de fertilizantes nitrogenados se destaca como uma estratégia amplamente adotada para elevar a produtividade, uma vez que fornece nutrientes essenciais ao desenvolvimento vegetal. Entre esses insumos, a ureia ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) figura como uma das principais fontes de nitrogênio empregadas na agricultura. Após sua aplicação ao solo, a ureia é rapidamente hidrolisada pela ação da enzima urease, resultando na formação de amônia gasosa e bicarbonato. Esse processo reduz a eficiência do fertilizante, aumenta os custos de produção e pode ocasionar impactos ambientais negativos, sobretudo em razão da volatilização da amônia. Diante desse cenário, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um método analítico portátil capaz de quantificar a amônia volatilizada em solos fertilizados, por meio de amostragem ativa e medições fotométricas realizadas diretamente em campo. O procedimento experimental consistiu na coleta do ar contendo NH_3 por borbulhamento em uma solução de ácido sulfúrico com alaranjado de metila, utilizando-se um fluxo de $50 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$. As medidas de absorbância foram realizadas com um fotômetro portátil produzido por impressão 3D, equipado com um LED de comprimento de onda de 490 nm, um sensor de luz digital e uma bomba de ar, integrados a um microcontrolador Arduino. O método apresentou comportamento linear na faixa de 0 a $3,0 \times 10^{-6} \text{ mol de NH}_3$, considerando um tempo de coleta de 20 minutos. Além disso, sua aplicação permitiu a quantificação da amônia volatilizada ao longo de quatro dias, com coletas realizadas a cada 24 horas após a incorporação do fertilizante ao solo. Como forma de validação do procedimento de amostragem, foi conduzido um ensaio paralelo no laboratório de Assistência Técnica da Adfert. Nesse ensaio, a quantificação da amônia proveniente da volatilização da ureia no solo foi realizada por titulação da solução obtida a partir de papéis filtro empregados na captura do analito.

Palavras-chave: Ureia, Volatilização, Amônia, Espectrofotômetro UV-Vis.

ABSTRACT

The continuous growth of the world population has increased the demand for more efficient food production systems. In Brazil, the agricultural sector faces significant challenges in meeting both domestic and international markets, especially due to the limitation of available land for cultivation. In this context, the use of nitrogen fertilizers stands out as a widely adopted strategy to increase productivity, as it provides essential nutrients for plant development. Among these inputs, urea ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) is one of the main sources of nitrogen used in agriculture. After its application to the soil, urea is rapidly hydrolyzed by the action of the enzyme urease, resulting in the formation of gaseous ammonia and bicarbonate. This process reduces fertilizer efficiency, increases production costs, and may cause negative environmental impacts, mainly due to ammonia volatilization. Given this scenario, the present work proposes the development of a portable analytical method capable of quantifying volatilized ammonia in fertilized soils through active sampling and measurements carried out directly in the field. The experimental procedure consisted of collecting air containing NH_3 by bubbling it through a sulfuric acid solution with methyl orange, using a flow rate of $50 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$. Absorbance readings were performed using a portable photometer produced by 3D printing, equipped with a 490 nm wavelength LED, a digital optical sensor, and an air pump, all integrated into an Arduino microcontroller. The method showed linear behavior in the range of 0 to $3.0 \times 10^{-6} \text{ mol}$ of NH_3 , considering a collection time of 20 minutes. In addition, its application allowed the quantification of volatilized ammonia over four days, with collections carried out every 24 hours after fertilizer incorporation into the soil. As a form of validation of the sampling procedure, a parallel test was conducted in the Technical Assistance laboratory of Adfert. In this test, the quantification of ammonia resulting from urea volatilization in the soil was performed by titration of the solution obtained from filter papers used to capture the analyte.

Keywords: Urea, Volatilization, Ammonia, UV-Vis Spectrophotometer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Estrutura molecular da Ureia	16
Figura 2:	Reação entre amônia e ftaldialdeído na presença de sulfito	21
Figura 3:	Sistema de captação de amônia volatilizada	21
Figura 4:	Reações para determinar amônia na metodologia do Lodge	23
Figura 5:	Projeto 3D do protótipo de fotômetro UV-Vis portátil. A) Tampa do fotômetro que contém os componentes como bomba de ar, controle de vazão, led, sensor e vial. B) Caixa do fotômetro para armazenar a placa digital PWM Arduino UNO, a protoboard e a fiação.....	24
Figura 6:	Figura 6. Placa Digital PWM Arduino UNO com o sensor, bomba de ar e o LED conectados. A) Placa digital PWM Arduino UNO. B) Bomba de ar. C) Sensor TSL 2561. D) LED de 465 nm. E) Protoboard.....	25
Figura 7:	Espectro de absorção no UV-VIS da solução de ácido sulfúrico com indicador alaranjado de metila.....	38
Figura 8:	Fórmula para conversão de lux em absorbância.....	39
Figura 9:	Curva de calibração feita no protótipo de fotômetro portátil	40
Figura 10:	Resultado do teste 1 de volatilização feito a partir da titulação do filtro contendo NH ₃	43
Figura 11:	Resultado do teste 2 de volatilização feito a partir da titulação do filtro contendo NH ₃	43
Figura 12:	Resultado do teste 3 de volatilização feito a partir da titulação do filtro contendo NH ₃	44
Figura 13:	Resultado do teste 4 de volatilização feito a partir da titulação do filtro contendo NH ₃	44
Figura 14:	Béquero contendo solo umedecido e ureia.....	46
Figura 15:	Resultado do teste 5 de volatilização feito a partir do protótipo de fotômetro portátil. Corresponde ao teste 1	47
Figura 16:	Resultado do teste 6 de volatilização feito a partir do protótipo de fotômetro portátil. Corresponde ao teste 2	48

Figura 17:	Resultado do teste 7 de volatilização feito a partir do protótipo de fotômetro portátil. Corresponde ao teste 3	49
Figura 18:	Resultado do teste 8 de volatilização feito a partir do protótipo de fotômetro portátil. Corresponde ao teste 4	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Amônia volatilizada ao decorrer do tempo em ureia pura e ureia + NBPT.....	18
Tabela 2:	Distribuição relativa das espécies nitrogenadas em diferentes faixas de pH	28
Tabela 3:	Alteração de absorbância da solução ácida com verde de bromocresol com adição de NH_4OH	31
Tabela 4:	Alteração de absorbância da solução ácida com alaranjado de metila com adição de NH_4OH	32
Tabela 5:	Alteração de absorbância da solução ácida com verde de bromocresol com adição de NH_4OH 10 vezes diluída	33
Tabela 6:	Alteração de absorbância da solução ácida com alaranjado de metila com adição de NH_4OH	34
Tabela 7:	Alteração de absorbância da solução ácida com os indicadores com adição de NH_4OH 20 vezes diluída.....	35
Tabela 8:	Absorbância da solução ácida com alaranjado de metila com adição de NH_4OH após diluição em 5,0 ml de água	37
Tabela 9:	Quantidade de mol em cada solução utilizada na curva de calibração	39

LISTA DE ABREVIações E TERMOS

NBPT	N-butil tiofosfórico triamida
P.A.	Para Análise
UV-Vis	Ultravioleta-Visível
Adfert	Empresa do setor privado voltada para produção de aditivos de fertilizantes

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. REFERÊNCIAL BIBLIOGRÁFICO.....	13
2.1. Agronomia no Brasil.....	13
2.2. Fertilizantes.....	15
2.3. Aditivos de fertilizantes.....	17
2.4. Volatilização da amônia.....	19
2.5. Métodos analíticos para amostragem e determinação de amônia.....	21
3. OBJETIVOS	23
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	23
4.1. Materiais e Reagentes.....	23
4.1.1. <i>Solução aquosa de amônia</i>	23
4.2. Equipamentos e Softwares.....	24
4.1.2. <i>Autodesk Inventor Professional 2025</i>	24
4.1.3. <i>Arduino IDE</i>	24
4.1.4. <i>Espectrofotômetro UV-Vis</i>	24
4.1.5. <i>Protótipo de um Fotômetro UV-Vis Portátil</i>	25
4.3. Amostragem do solo.....	26
4.3.1. <i>Coleta e preparo do solo</i>	26
4.1.3. <i>Capacidade de campo</i>	26
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
5.1. Princípio do método.....	27
5.2. Definição do ácido e da faixa de pH	29
5.3. Espectro de absorção do indicador.....	37
5.4. Curva de calibração.....	38
5.5. Teste de capacidade de campo.....	41
5.6. Teste de Volatilização – Método Titulação.....	41
5.7. Teste de Volatilização – Método Proposto.....	45
5.8. Comparação dos métodos	50
6. CONCLUSÕES	52
REFERÊNCIAS.....	52
ANEXO I	55

1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento acelerado da população mundial ao longo do século XX, a produção de alimentos passou a ocupar posição central nas discussões globais. Esse cenário se deve, principalmente, às limitações das áreas disponíveis para cultivo, o que exige o desenvolvimento de estratégias mais eficientes capazes de aumentar a produtividade por unidade de área (BUAINAIN, ALVES, SILVEIRA, NAVARRO, 2014). No Brasil, a produção de grãos e cereais desempenha papel fundamental no abastecimento dos mercados interno e externo. Entretanto, além das restrições territoriais, o setor agrícola enfrenta desafios relacionados às variações climáticas ao longo do ciclo produtivo, ao controle de pragas e à necessidade de conservação ambiental (RONCON, 2011).

Entre as estratégias adotadas para elevar a produtividade agrícola em áreas limitadas, destaca-se o uso de fertilizantes minerais, especialmente os nitrogenados, como a ureia. A adição desses insumos ao solo pode resultar em incrementos significativos no rendimento das culturas, podendo dobrar a produção em comparação a áreas sem adubação adequada. Isso ocorre porque o nitrogênio é um elemento essencial ao desenvolvimento vegetal, e sua disponibilidade no solo, na forma reativa, pode ser limitada. Os fertilizantes minerais podem ser classificados segundo diferentes critérios, como método de produção, número de nutrientes, forma física, tipo de combinação e modo de ação (REETZ, 2017).

Apesar de seus benefícios, o uso de fertilizantes nitrogenados apresenta limitações importantes, sendo a principal delas a perda de nitrogênio para a atmosfera por meio da volatilização da amônia. Esse processo ocorre, sobretudo, devido à hidrólise da ureia catalisada pela enzima uréase presente no solo. Uma alternativa para minimizar essas perdas é a utilização de aditivos incorporados à ureia, como a N-butil tiofosfórico triamida (NBPT), que atua inibindo a atividade da uréase. Dessa forma, reduz-se a volatilização da amônia e aumenta-se a permanência do nitrogênio no solo, tornando-o disponível para absorção pelas plantas (BORGES, 2021). Além disso, para garantir maior eficiência, é fundamental considerar fatores como época e método de aplicação, que devem ser ajustados conforme o tipo de solo, as condições climáticas e a cultura cultivada (REELTZ, 2017).

A ureia destaca-se como a principal fonte de nitrogênio utilizada no Brasil, sobretudo devido ao seu menor custo por unidade de nutriente em comparação a outros fertilizantes nitrogenados (TASCA; ERNANI; ROGERI; GATIBONI; CASSOL, 2011). No entanto, quando aplicada na superfície do solo, está suscetível à rápida hidrólise, resultando na liberação de amônia (NH_3) para a atmosfera. Esse fenômeno pode ocasionar perdas significativas, variando entre 17% e 60% do nitrogênio aplicado (SOUZA, 2012). A intensidade dessas perdas é influenciada por diversos fatores, como a presença de matéria orgânica, elevadas doses de fertilizante e altas temperaturas (TASCA; ERNANI; ROGERI; GATIBONI; CASSOL, 2011).

A amônia liberada para a atmosfera representa um importante problema ambiental. Trata-se de um poluente relevante, pois participa da formação de material particulado fino ($\text{MP}_{2,5}$) e contribui para a geração de óxido nitroso (N_2O), um gás de efeito estufa (FELIX; CARDOSO, 2012). Além disso, o excesso de amônia no ambiente pode provocar impactos como a redução da biodiversidade, alterações no pH de corpos d'água, devido à sua alta solubilidade, e o aumento da concentração de nitrogênio em águas superficiais, favorecendo processos de eutrofização (GARCIA; CARDOSO; SANTOS, 2013).

A emissão de amônia ocorre tanto por fontes naturais quanto antrópicas, incluindo atividades agrícolas e processos bioquímicos no solo. Diante disso, diversas metodologias foram desenvolvidas para sua amostragem e quantificação (FELIX; CARDOSO, 2012). Diante desse panorama, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver um método analítico para a determinação de amônia gasosa proveniente da volatilização em solos fertilizados, utilizando amostragem ativa, reação colorimétrica e medições de absorbância realizadas por meio de fotômetro portátil, podendo, assim, avaliar a eficiência de aditivos inibidores de volatilização aplicados em ureia.

2. REFERÊNCIAL BIBLIOGRÁFICO

2.1. AGRONOMIA NO BRASIL

Com o crescimento da população brasileira e mundial nas últimas décadas, a demanda por alimentos tem aumentado de forma significativa. Esse cenário intensifica a preocupação com a produção agrícola, especialmente diante da limitação das áreas disponíveis para cultivo. O desenvolvimento rural, sob a ótica da política territorial, passa a incorporar novos usos do espaço, como atividades industriais e o turismo rural. No Brasil, país de dimensões continentais, essa abordagem nem sempre encontra respaldo no

campesinato, sendo muitas vezes associada a políticas de redução da pobreza vinculadas às dinâmicas do agronegócio (BUAINAIN, ALVES, SILVEIRA, NAVARRO, 2014).

A agricultura brasileira exerce papel central na produção de grãos e cereais, com capacidade de atender tanto o mercado interno quanto o externo, favorecida pela grande extensão de terras agricultáveis. Ainda assim, a atividade agrícola depende de fatores que introduzem riscos à produção, como as variações climáticas ao longo do ciclo das culturas. A qualidade e a disponibilidade do solo também influenciam diretamente o rendimento, assim como a necessidade de controle de pragas (RONCON, 2011).

Em Minas Gerais, que ocupou a quinta posição entre os maiores produtores agrícolas em 2021 segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, a agricultura tem relevância econômica expressiva. O estado se destaca pela produção de café, milho e culturas do complexo soja, com crescimento de 49% em relação ao mesmo período de 2021 (AGÊNCIA MINAS). No Triângulo Mineiro, o município de Uberlândia apresentou forte expansão a partir dos anos 2000, consolidando-se como importante polo de exportação de grãos, especialmente soja. Esse avanço está associado à especialização produtiva das regiões, direcionada ao atendimento da demanda global por alimentos, além da incorporação de maquinários e insumos que contribuíram para a modernização do setor e aumento da produtividade (SILVA, 2022).

A valorização do dólar, com alta de cerca de 27% a partir de 2021, contribuiu para o aumento das receitas com exportações agrícolas. Dados do CEPEA indicam que, em 2021, o setor superou 120 bilhões de dólares em exportações, valor 18% maior que o registrado em 2020 (ADAMI, 2021). Informações do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento mostram que, nos seis primeiros meses de 2022, o agronegócio brasileiro alcançou 79,32 bilhões de dólares, estabelecendo um recorde para o período.

O aumento das exportações pode influenciar a disponibilidade de alimentos no mercado interno, refletindo nos preços e ampliando preocupações relacionadas à segurança alimentar. Durante a pandemia de Covid-19, houve agravamento desse quadro no Brasil, com impacto direto nos indicadores do Mapa da Fome da Organização das Nações Unidas. Segundo o Segundo Inquérito Nacional sobre Insegurança Alimentar no Contexto da Pandemia de Covid-19, cerca de 14 milhões de brasileiros passaram a viver em situação de insegurança alimentar, totalizando aproximadamente 33,1 milhões de pessoas nessa condição (GUEDES, 2022).

2.2. FERTILIZANTES

Diante das limitações relacionadas à disponibilidade de áreas cultiváveis, da crescente demanda por alimentos e da priorização das exportações, torna-se necessário adotar estratégias que aumentem a eficiência da produção agrícola. Nesse contexto, destaca-se o uso de fertilizantes minerais, especialmente os nitrogenados, como a ureia. A aplicação desses insumos permite elevar significativamente a produtividade, podendo resultar em produção aproximadamente duas vezes maior na mesma área, além de reduzir a necessidade de abertura de novas áreas para cultivo (REETZ, 2017).

Com o avanço dos padrões de vida ao longo do tempo, a demanda por alimentos, energia e fibras tende a crescer, enquanto a disponibilidade de terras produtivas se torna mais restrita. Projeções da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) indicam que a produção agrícola deverá ser cerca de 60% maior em 2050, em comparação a 2005. Nesse cenário, o uso eficiente e sustentável dos fertilizantes e do solo assume papel central para garantir produtividade e qualidade dos alimentos. Diversos fertilizantes minerais foram desenvolvidos com o objetivo de suprir as necessidades nutricionais das culturas e complementar os nutrientes já presentes no solo, podendo ser classificados conforme o método de produção, número de nutrientes, forma física, tipo de combinação e modo de ação (REETZ, 2017).

Quanto à origem, fertilizantes podem ser classificados como naturais, quando obtidos diretamente da natureza ou submetidos a processamento mínimo, ou sintéticos, quando produzidos por processos industriais. Em relação à composição, são considerados simples quando fornecem um único nutriente e compostos quando apresentam dois ou mais. Também podem se apresentar em diferentes formas físicas, como sólidos (com diferentes granulometrias) e líquidos (soluções ou suspensões). Misturas físicas de fertilizantes simples ou multinutrientes são denominados fertilizantes mistos, enquanto fertilizantes complexos resultam de combinações químicas entre nutrientes, como ocorre com sulfatos de amônio. Quanto ao modo de ação, podem ser de liberação rápida, quando solúveis em água e prontamente disponíveis, ou de liberação lenta, quando dependem de transformações para se tornarem assimiláveis pelas plantas (REETZ, 2017).

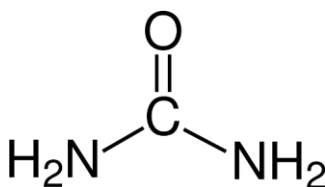
A aplicação adequada de fertilizantes garante o fornecimento equilibrado dos nutrientes essenciais ao desenvolvimento das culturas ao longo do seu ciclo. A deficiência de qualquer nutriente atua como fator limitante ao crescimento vegetal, o que torna a má

gestão da adubação uma causa frequente de perdas produtivas (REELTZ, 2017). Entre os nutrientes essenciais, o nitrogênio (N) se destaca por ser um dos mais exigidos pelas plantas e, frequentemente, o mais limitante. Ele integra moléculas fundamentais, como proteínas, citocromos, ácidos nucleicos e enzimas, além de compor a molécula de clorofila, desempenhando papel direto nos processos de divisão e expansão celular. A deficiência de nitrogênio compromete o desenvolvimento da área foliar e reduz a taxa fotossintética, impactando negativamente a produtividade das culturas (MARTINS, 2013).

Apesar de sua importância, o nitrogênio no solo está sujeito a diferentes mecanismos de perda. Entre eles, destacam-se a desnitrificação, processo no qual bactérias convertem nitratos em gases como N_2 e N_2O ; a lixiviação, em que formas solúveis, como o nitrato (NO_3^-), são transportadas pela água; e a volatilização, foco deste estudo, que depende de fatores como o pH do solo e está frequentemente associada à aplicação de ureia (MARTINS, 2013).

De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), a ureia ($CO(NH_2)_2$) é a principal fonte de nitrogênio reativo utilizada em fertilizantes. Esse composto pode ser encontrado em diferentes formas comerciais, como pérolas ou grânulos, variando conforme o tamanho das partículas. Com teor de aproximadamente 46% de nitrogênio, apresenta vantagens logísticas relacionadas ao transporte, armazenamento e aplicação. Do ponto de vista químico, a ureia pode ser considerada a diamida do ácido carbônico, sendo constituída por átomos de carbono, oxigênio, nitrogênio e hidrogênio (DOMINGOS, 2018). A figura 1 representa a estrutura molecular da ureia:

Figura 1. Estrutura molecular da Ureia



Fonte: O autor.

Além do elevado teor de nitrogênio, a ureia apresenta características que favorecem seu amplo uso na agricultura, como o baixo custo de produção, transporte, armazenamento e aplicação. Soma-se a isso sua alta solubilidade em água, o baixo

potencial corrosivo e a facilidade de mistura com outros insumos, o que amplia sua versatilidade no manejo agrícola.

Apesar dessas vantagens, a ureia também possui limitações relevantes. Entre elas, destaca-se a elevada higroscopicidade, ou seja, a tendência de absorver umidade do ar, o que pode comprometer sua qualidade durante o armazenamento. Outra limitação importante está relacionada à sua suscetibilidade à volatilização. Em condições de maior umidade, a ureia sofre decomposição e, ao entrar em contato com a enzima uréase presente no solo e na matéria orgânica, é rapidamente hidrolisada, formando carbonato de amônio ($(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$). Esse processo reduz a eficiência do fertilizante, uma vez que parte do nitrogênio deixa de permanecer disponível para as plantas.

O aumento da concentração de carbonato de amônio no solo contribui para a elevação do pH, criando condições que favorecem a volatilização da amônia (NH_3). Como consequência, ocorrem perdas de nitrogênio para a atmosfera, o que impacta negativamente o aproveitamento do nutriente pelas culturas (MARTINS, 2013).

2.3. ADITIVOS DE FERTILIZANTES

A utilização de aditivos em fertilizantes constitui uma das principais estratégias adotadas no Brasil para aumentar a eficiência agrônômica e reduzir perdas de nutrientes, como a volatilização do nitrogênio presente na ureia na forma de amônia. Esses aditivos podem atuar por diferentes mecanismos. Um deles envolve a formação de uma barreira física ao redor dos grânulos, controlando sua dissolução no solo; a duração desse efeito depende da espessura e da composição do revestimento, podendo se estender por dias ou até meses. Outra abordagem baseia-se em modificações químicas que interferem nos processos biológicos do solo, favorecendo a absorção dos nutrientes pelas plantas. Nesse caso, destacam-se os inibidores de nitrificação e os inibidores de uréase, que atuam reduzindo a atividade microbiana responsável pelas transformações do nitrogênio (REELTZ, 2017).

A perda de nitrogênio associada ao uso da ureia representa um dos principais entraves à sua eficiência, conforme discutido anteriormente. Com o objetivo de minimizar esse problema, diversos compostos têm sido estudados para controlar a liberação do nitrogênio ou inibir a ação da enzima uréase, reduzindo as perdas por volatilização. Entre eles, o mais utilizado é o inibidor de uréase N-butil tiofosfórico triamida (NBPT) (BORGES, 2021). A incorporação desse tipo de aditivo permite que o nitrogênio permaneça

disponível no solo por mais tempo, sobretudo na região próxima às raízes, favorecendo sua absorção pelas plantas e reduzindo perdas quando comparado à aplicação de ureia sem tratamento. A eficiência desses fertilizantes modificados está diretamente relacionada às condições de uso. Fatores como tipo de solo, clima e cultura influenciam o desempenho dos aditivos, o que torna necessário ajustar tanto a época quanto o método de aplicação para cada situação específica (REELTZ, 2017). A Tabela 1 apresenta a comparação da quantidade de amônia volatilizada entre ureia sem tratamento e ureia tratada com NBPT, ambas aplicadas em solo sem irrigação.

Tabela 1: Amônia volatilizada ao decorrer do tempo em ureia pura e ureia + NBPT

Tempo (dias)	NH ₃ volatilizado (kg.ha ⁻¹)	
	Ureia sem tratamento	Ureia + NBPT
0	9,20	7,99
2	14,42	9,87
4	18,28	8,54
6	17,93	8,98
8	21,97	8,46
10	22,71	9,99

Fonte: Adaptado de Espindula (2010)

A definição da dosagem adequada de fertilizantes deve considerar, antes de tudo, a quantidade de nutrientes extraída pela cultura ao longo do seu ciclo. Para isso, é fundamental a realização de análises químicas do solo, que permitem avaliar sua capacidade de fornecer nutrientes de forma equilibrada. Esse critério é especialmente relevante para elementos exigidos em maiores quantidades pelas plantas, como potássio, fósforo e nitrogênio (LOPES, 1998).

O local de aplicação também exerce influência direta na eficiência da adubação. Os fertilizantes podem ser aplicados a lanço, incorporados ao solo no pré-plantio, utilizados em cobertura, aplicados via foliar ou de forma localizada na superfície. A escolha do método depende de diversos fatores, incluindo o tipo de nutriente, a tecnologia empregada na formulação do fertilizante, as condições de manejo e os aspectos socioeconômicos do produtor, além das características específicas do insumo utilizado.

Outro ponto importante diz respeito ao momento de aplicação. A época adequada está relacionada à disponibilidade de nutrientes nos períodos de maior demanda da cultura, o

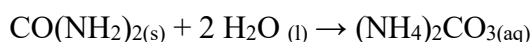
que ocorre em diferentes fases do seu desenvolvimento. Quando a aplicação é realizada no momento correto, reduz-se a possibilidade de transformações químicas que tornem os nutrientes indisponíveis, além de minimizar perdas para o ambiente.

A adoção conjunta de práticas adequadas de dosagem, local e época de aplicação permite sincronizar a oferta de nutrientes com a demanda das plantas e com as condições ambientais. Esse alinhamento contribui para o aumento da eficiência do uso dos fertilizantes e para a melhoria do desempenho produtivo das culturas (BORGES, 2021).

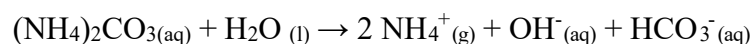
2.4. VOLATILIZAÇÃO DA AMÔNIA

A ureia é o fertilizante nitrogenado mais utilizado no Brasil, principalmente em razão do menor custo por unidade de nitrogênio quando comparada a outras fontes desse nutriente (TASCA; ERNANI; ROGERI; GATIBONI; CASSOL, 2011). Quando aplicada na superfície do solo, sem incorporação, torna-se suscetível à hidrólise enzimática, processo que pode resultar na liberação de amônia (NH_3) para a atmosfera. Como esse composto é volátil, as perdas de nitrogênio podem variar entre 17% e 60% do total aplicado (SOUZA, 2012).

A hidrólise da ureia, cuja fórmula é $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, é catalisada pela enzima uréase presente no solo, levando à formação de carbonato de amônio $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ (TASCA; ERNANI; ROGERI; GATIBONI; CASSOL, 2011). Esse processo está diretamente relacionado à redução da eficiência do fertilizante, uma vez que parte do nitrogênio é perdida antes de ser absorvida pelas plantas.



O carbonato de amônio formado apresenta baixa estabilidade no solo e se decompõe rapidamente, originando íons hidroxila (OH^-), bicarbonato (HCO_3^-) e amônio (NH_4^+). Essa transformação promove o aumento do pH na região próxima ao grânulo do fertilizante, criando condições que favorecem a volatilização da amônia (ROCHETTE, MACDONALD, ANGERS, CHANTIGNY, GASSER, BERTRAND, 2009).



Após a aplicação da ureia no solo, a volatilização da amônia é influenciada por diversos fatores. Entre os principais, destacam-se a presença de matéria orgânica, a umidade intermediária do solo, a aplicação de doses elevadas de nitrogênio, temperaturas

elevadas e valores de pH mais altos, que favorecem a conversão e liberação de NH_3 para a atmosfera (TASCA; ERNANI; ROGERI; GATIBONI; CASSOL, 2011).

Além do uso de aditivos, como aqueles à base de N-butil tiofosfórico triamida (NBPT), a forma de aplicação da ureia também interfere diretamente nas perdas. Quando o fertilizante é incorporado ao solo ou aplicado em maior profundidade, a volatilização tende a ser reduzida, uma vez que o contato com a atmosfera diminui e o nitrogênio permanece por mais tempo em formas menos suscetíveis à perda (TRIVELIN; OLIVEIRA; VITTI; GAVA; BENDASSOLLI, 2002).

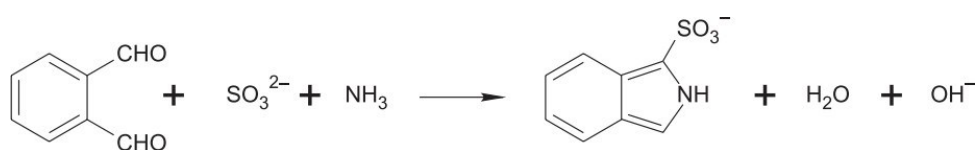
A amônia é reconhecida como um poluente de grande relevância, por atuar como precursora na formação de material particulado fino e por contribuir para a geração de óxido nitroso, um importante gás de efeito estufa. O aumento das concentrações de N_2O na atmosfera está associado a alterações no equilíbrio climático, intensificando processos relacionados às mudanças climáticas (FELIX; CARDOSO, 2012). A presença de amônia na atmosfera também está relacionada a outros impactos ambientais. Entre eles, destaca-se a perda de biodiversidade, decorrente do transporte desses compostos pelo ar e sua deposição em diferentes ecossistemas. Além disso, devido à sua alta solubilidade, a amônia pode alterar o pH de águas naturais, elevando a disponibilidade de nitrogênio nesses ambientes. Esse enriquecimento pode desencadear processos de eutrofização em águas superficiais, comprometendo a qualidade ambiental e o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos (GARCIA; CARDOSO; SANTOS, 2013).

2.5. MÉTODOS ANALÍTICOS PARA AMOSTRAGEM E DETERMINAÇÃO DE AMÔNIA

A amônia é emitida para a atmosfera a partir de diferentes fontes, tanto naturais quanto antrópicas, incluindo atividades agrícolas e processos bioquímicos que ocorrem no solo. Em razão de sua relevância na química atmosférica, diversos métodos analíticos têm sido desenvolvidos para sua determinação. Um dos principais desafios na quantificação de amônia está relacionado ao risco de contaminação. Esse composto pode estar presente no ar, na respiração humana e até na água utilizada no preparo de soluções, o que pode comprometer a confiabilidade dos resultados. Por essa razão, cuidados rigorosos são necessários durante os procedimentos experimentais, incluindo a destilação da água no próprio dia de uso, de modo a minimizar interferências e garantir maior precisão nas análises (FELIX; CARDOSO, 2012).

Felix e Cardoso desenvolveram um método fluorimétrico para a determinação de NH_3 no ar, em que o analito é coletado por meio de filtros de celulose impregnados com ácido oxálico. Após a etapa de amostragem, o íon amônio retido é solubilizado, permitindo a adição dos reagentes necessários para a reação analítica. O método baseia-se na reação do íon amônio com o o-ftaldialdeído e o íon sulfito, resultando na formação de um composto fluorescente, cuja intensidade de emissão está relacionada à concentração de amônia presente na amostra. A Figura 2 ilustra o mecanismo dessa reação (FELIX; CARDOSO, 2012).

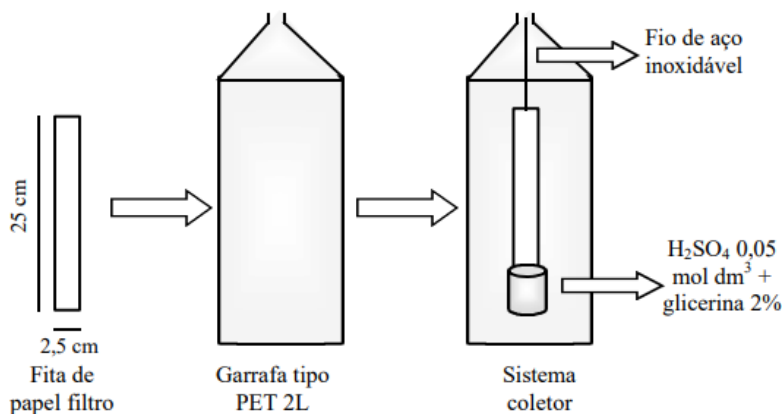
Figura 2: Reação entre amônia e ftaldialdeído na presença de sulfito



Fonte: Felix e Cardoso (2012)

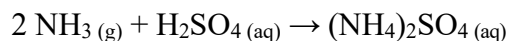
A amônia gasosa pode ser amostrada por meio do uso de soluções ou substratos impregnados com ácido sulfúrico e glicerina, conforme ilustrado na Figura 3 (TASCA; ERNANI; ROGERI; GATIBONI; CASSOL, 2011). Nesse procedimento, o papel filtro impregnado é posicionado no interior de uma garrafa tipo PET de 2 L, previamente adaptada com a base cortada. A estrutura é então colocada sobre o solo contendo o fertilizante, de modo a permitir que a amônia volatilizada entre em contato com o papel filtro. Ao reagir com o ácido sulfúrico presente no substrato, a amônia é convertida em sulfato de amônio, possibilitando sua posterior quantificação.

Figura 3: Sistema de captação de amônia volatilizada



Fonte: Marsola, Miyazawa, Pavan e Chaves (2000)

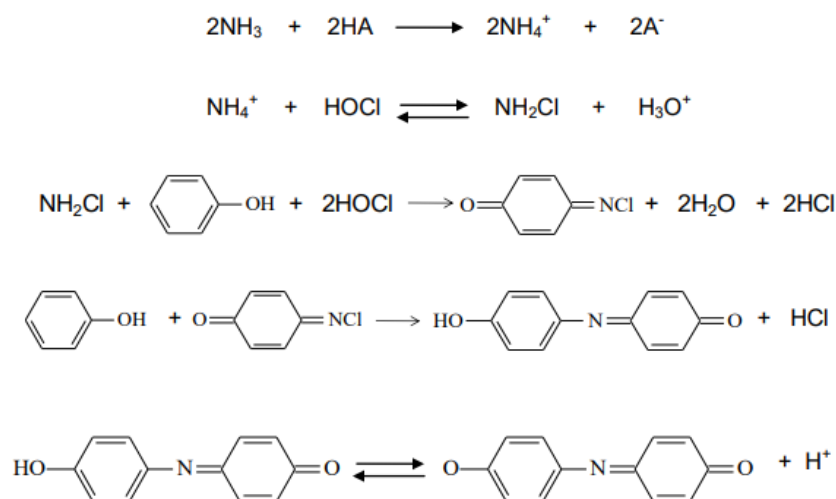
Nesse processo, a glicerina atua como agente umectante, contribuindo para manter a solução úmida por um período mais prolongado, o que favorece a eficiência da captura da amônia. Sua função é exclusivamente física, não participando diretamente das reações químicas envolvidas no procedimento analítico (MARSOLA; MIYAZAWA; PAVAN; CHAVES, 2000).



Outro procedimento emprega essa mesma abordagem de coleta para posterior determinação da concentração de amônia. As amostragens são realizadas em intervalos de 2, 4, 6, 8, 13, 18, 23 e 28 dias, sendo a quantificação conduzida por arraste de vapor em aparelho semi-micro Kjeldahl (TASCA; ERNANI; ROGERI; GATIBONI; CASSOL, 2011). O método de Kjeldahl baseia-se na determinação do nitrogênio a partir do sal formado, o sulfato de amônio $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$. Após o tratamento com ácido bórico, realiza-se a titulação da solução, permitindo quantificar o teor de nitrogênio presente na amostra (ARAÚJO, 2019).

Lodge propõe um método alternativo para a determinação de NH_3 no ar atmosférico. Nesse procedimento, a amônia é coletada por borbulhamento em uma solução de ácido sulfúrico, formando sulfato de amônio, conforme descrito anteriormente. Para evitar interferências, a amostra passa previamente por um sistema de pré-filtragem, que remove possíveis contaminantes (LODGE, 1989). Após a coleta, a solução é submetida a tratamento com ácido hipocloroso e, em seguida, são adicionados hipoclorito de sódio, fenol e hidróxido de sódio (NaOH). Como resultado dessas reações, forma-se o composto indofenol, que apresenta forte absorção em 630 nm. A quantificação é realizada por meio de medidas espectrofotométricas, relacionando a absorbância à concentração de amônia presente na amostra (Figura 4). Durante o processo, o nitroprussiato de sódio é empregado como catalisador, acelerando a formação do produto (LODGE, 1989).

Figura 4: Reações para determinar amônia na metodologia do Lodge



Fonte: Lodge (1989)

Além dos métodos já mencionados, a captura da amônia também pode ser realizada utilizando solução de ácido bórico. Nesse caso, o analito é posteriormente determinado por titulação reversa com ácido sulfúrico padronizado, permitindo a quantificação do nitrogênio presente na amostra (RAIJ; ANDRADE; CANTARELLA; QUAGGIO, 2001).

3. OBJETIVOS

Diante desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver um método analítico para a determinação de amônia proveniente da volatilização em solos fertilizados. A proposta baseia-se em amostragem ativa, seguida de alteração do pH e mudança de cor do indicador e medições de absorbância realizadas por meio de um fotômetro portátil. Essa abordagem possibilita a avaliação da eficiência de aditivos inibidores de uréase aplicados à ureia.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1. MATERIAIS E REAGENTES

4.1.1. Solução aquosa de amônia

Para a realização dos ensaios em soluções aquosas contendo íons amônio, utilizou-se água destilada recém-preparada, hidróxido de amônio P.A. (NH_4OH) ($\text{pK}_a = 9,25$), ácido sulfúrico P.A. ($\text{pK}_{a1} = -3,0$ e $\text{pK}_{a2} = 1,99$), ácido bórico ($\text{pK}_a = 9,24$), ácido oxálico ($\text{pK}_{a1} = 1,25$ e $\text{pK}_{a2} = 4,27$) e hidróxido de sódio, além dos indicadores alaranjado de metila ($\text{pK}_a = 3,47$), verde de bromocresol ($\text{pK}_a = 4,66$) e violeta cristal ($\text{pK}_a = 0,8$).

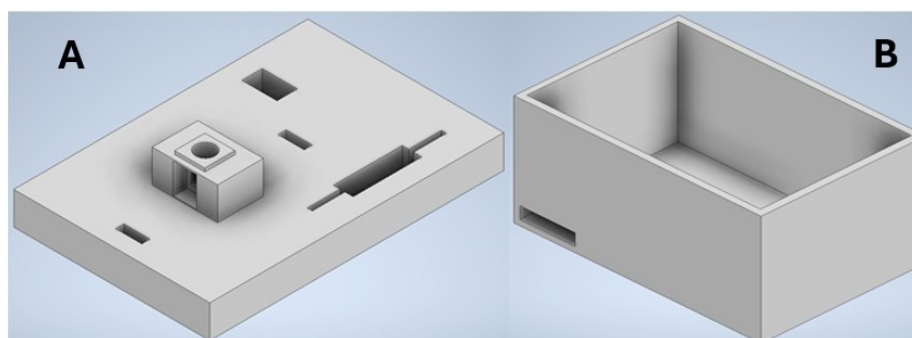
Foram empregadas micropipetas de diferentes volumes e balões volumétricos de 10,0 mL, garantindo a adequada medição e preparo das soluções para os experimentos.

4.2. EQUIPAMENTOS E SOFTWARES

4.2.1. Autodesk Inventor Professional 2025.

O protótipo do fotômetro portátil, destinado à realização de medidas de absorvância e compatível com frascos do tipo “vial” de 2 mL utilizados em HPLC, foi modelado no software Autodesk Inventor Professional 2025, conforme ilustrado na Figura 1. As peças projetadas foram posteriormente fabricadas por meio de impressão 3D, utilizando a impressora modelo Bambulab A1.

Figura 5: Projeto 3D do protótipo de fotômetro UV-Vis portátil. A) Tampa do fotômetro que contém os componentes como bomba de ar, controle de vazão, led, sensor e vial. B) Caixa do fotômetro para armazenar a placa digital PWM Arduino UNO, a protoboard e a fiação.



Fonte: O autor.

4.2.2. Arduino IDE

A operação do LED, do sensor de luz digital TSL2561 e da bomba de ar do protótipo foi realizada por meio do software Arduino IDE (versão 1.8.19). Para o controle desses periféricos, foram utilizadas e adaptadas as bibliotecas Adafruit 2561, destinada ao sensor de luz, e Blink, empregada no acionamento do LED e da bomba de ar. O código completo encontra-se disponível no anexo ao final deste trabalho.

4.2.3. Espectrofotômetro UV-Vis

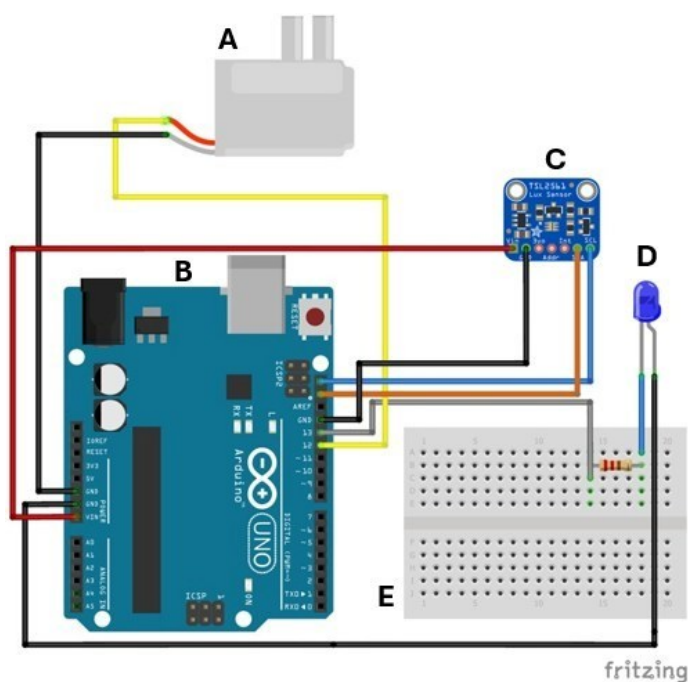
Para as medições de absorvância da solução ácida contendo o indicador empregado na determinação de amônia em meio aquoso, utilizou-se um espectrofotômetro de absorção molecular UV-Vis Shimadzu, modelo UV-1201. Esse

equipamento foi empregado na definição da diluição adequada da solução de hidróxido de amônio utilizada na construção da curva de calibração, além de fornecer uma curva de referência para comparação com os resultados obtidos pelo protótipo desenvolvido. Também foi utilizado o espectrofotômetro UV-Vis Shimadzu, modelo UV-2600i para a obtenção do espectro de absorção do indicador adotado no estudo.

4.2.4. Protótipo de um fotômetro portátil

Para as medidas de absorbância no método aplicado à quantificação de amônia, utilizou-se um fotômetro portátil composto por um sensor de luz digital modelo TSL 2561, um LED posicionado a 180° em relação ao detector e uma bomba de ar, todos integrados a uma placa Arduino UNO. O LED, com emissão em 465 nm, foi conectado à placa por meio de um protoboard e associado a um resistor adequado, assegurando o funcionamento correto do componente. A representação esquemática do sistema (Figura 6) foi elaborada no software Fritzing. A placa Arduino UNO, do tipo Digital PWM, permaneceu conectada ao computador por meio de um cabo USB 2.0 AWM 2725. O fluxo de ar gerado pela bomba foi ajustado por uma válvula previamente calibrada com o auxílio de um rotâmetro.

Figura 6. Placa Digital PWM Arduino UNO com o sensor, bomba de ar e o LED conectados. A) Placa digital PWM Arduino UNO. B) Bomba de ar. C) Sensor TSL 2561. D) LED de 465 nm. E) Protoboard



Fonte: O autor.

4.3. AMOSTRAGEM DO SOLO

4.3.1. COLETA E PREPARO DO SOLO

A plataforma desenvolvida foi aplicada na quantificação da amônia volatilizada após a aplicação de fertilizantes em amostras de solo. Para isso, o solo foi previamente coletado em uma área rural com elevada cobertura vegetal, priorizando locais com presença de gramíneas e outras espécies vegetais. A coleta foi feita em uma faixa de espessura do solo de 0 a 10 cm.

Após a coleta, o solo foi submetido à secagem natural à sombra, em recipiente limpo, visando reduzir a umidade da amostra. Em seguida, o material seco foi peneirado em malha de 16 mesh (1,18 mm), sendo removidos fragmentos de maior granulometria, como pedras e resíduos vegetais.

O solo peneirado foi homogeneizado por meio da técnica de quarteamento, obtendo-se subamostras representativas destinadas aos diferentes ensaios experimentais. Foram preparadas amostras de 400,0 g para os ensaios de referência por titulação, 200,0 g para os ensaios iniciais utilizando o protótipo de fotômetro portátil, 400,0 g para os ensaios subsequentes utilizando o protótipo e 50,0 g para a determinação da capacidade de campo do solo.

4.3.2. CAPACIDADE DE CAMPO

A capacidade de campo do solo foi determinada com o objetivo de estabelecer a quantidade de água a ser adicionada às amostras utilizadas nos ensaios de volatilização de amônia. O procedimento consistiu na determinação da massa de água retida pelo solo após drenagem livre, permitindo estimar a umidade correspondente à capacidade de campo e, posteriormente, corrigir proporcionalmente o volume de água a ser utilizado nas diferentes massas de solo empregadas nos experimentos.

Inicialmente, um papel de filtro recortado no diâmetro do fundo de um frasco plástico perfurado foi posicionado de forma a recobrir completamente sua base. O conjunto formado pelo frasco perfurado contendo o papel de filtro e um papel de filtro adicional de maior dimensão foi pesado em balança analítica, sendo essa massa registrada como massa do conjunto sem solo.

Em seguida, o frasco perfurado foi acomodado no interior de outro recipiente plástico de mesmo tamanho, porém sem perfurações, e foram adicionados 50,0 g de solo seco previamente quarteado. A amostra foi umedecida com água potável, utilizando uma

pisseta, até o momento em que se observou a primeira gota de água percolando para o recipiente inferior.

Após cessar completamente a drenagem, o frasco perfurado contendo o solo foi retirado do recipiente inferior, invertido sobre o papel de filtro de maior dimensão e mantido em repouso por 24 horas. Decorrido esse período, o conjunto constituído pelo frasco perfurado, papel de filtro, solo úmido e papel de filtro externo foi novamente pesado, obtendo-se a massa do conjunto com solo.

Conforme apresentado na fórmula 1, a massa de solo úmido foi calculada pela diferença entre a massa do conjunto com solo e a massa do conjunto sem solo.

Fórmula 1: Cálculo da massa de solo úmido

$$m_{\text{conjunto com solo}} - m_{\text{conjunto sem solo}} = m_{\text{solo+água retida}}$$

Na sequência, a massa de água retida foi obtida pela diferença entre a massa do solo úmido e a massa inicial de solo seco (50,0 g), conforme a fórmula 2:

Fórmula 2: Cálculo da massa de água retida

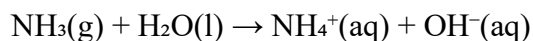
$$m_{\text{solo+água retida}} - m_{\text{solo}} = m_{\text{água retida}}$$

Com base na massa de água retida em 50,0 g de solo, calculou-se proporcionalmente a quantidade de água necessária para as massas de solo utilizadas nos ensaios de volatilização de amônia (200,0 g e 400,0 g). Posteriormente, a quantidade de água adicionada em todos os experimentos correspondeu a 70% da capacidade de campo, visando manter condições adequadas de umidade para a atividade microbiológica e as transformações do nitrogênio, sem promover o encharcamento do solo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. PRINCÍPIO DO MÉTODO

O método analítico proposto baseia-se na alteração de cor de um indicador ácido-base, provocada pela solubilização da amônia em meio aquoso e alteração do pH. Esse processo promove o aumento do pH da solução devido à formação de íons hidroxila (OH^-), conforme representado a seguir:



À medida que a concentração de NH_3 aumenta, o equilíbrio químico se desloca no sentido da formação dos produtos, elevando o pH da solução. Embora haja formação simultânea de NH_4^+ e OH^- , o sistema não permanece neutro. Isso ocorre porque a amônia atua como base fraca, consumindo prótons da água e gerando excesso de OH^- na solução.

O comportamento desse sistema pode ser compreendido a partir do equilíbrio ácido-base entre NH_4^+ e NH_3 , cujo pKa é aproximadamente 9,25. De acordo com a equação de Henderson-Hasselbalch, em pH inferior ao pKa predomina a espécie protonada (NH_4^+), enquanto em pH superior ocorre predomínio da amônia molecular (NH_3). No ponto em que $\text{pH} = \text{pKa}$, ambas as espécies encontram-se em concentrações equivalentes. Assim, à medida que o pH aumenta acima de 9,25, a fração de NH_3 cresce rapidamente, favorecendo sua permanência na forma livre.

$$\text{pH} = \text{pKa} + \log\left(\frac{[\text{NH}_4^+]}{[\text{NH}_3]}\right)$$

A distribuição relativa das espécies nitrogenadas em diferentes faixas de pH pode ser observada na Tabela 2.

Tabela 2: Distribuição relativa das espécies nitrogenadas em diferentes faixas de pH

Faixa de pH	Espécie predominante	Característica do sistema
pH < 7	NH_4^+	Predomínio da forma protonada
pH entre 7 e 9	$\text{NH}_4^+ > \text{NH}_3$	Início da formação de NH_3 livre
pH ~ 9,2	$\text{NH}_4^+ \sim \text{NH}_3$	Região de equilíbrio entre as espécies
pH entre 10 e 11	$\text{NH}_3 > \text{NH}_4^+$	Predomínio crescente de amônia livre
pH > 11	NH_3	Amônia praticamente totalmente desprotonada

Fonte: O autor

No método desenvolvido, a amônia não permanece em meio alcalino. Após sua volatilização, ela é absorvida por uma solução ácida, onde ocorre sua protonação. Dessa forma, a quantidade de NH_3 absorvida reduz a acidez da solução, promovendo aumento gradual do pH. Essa variação é monitorada por meio de um indicador ácido-base, cuja mudança de cor depende do equilíbrio entre suas formas protonada (HIn) e desprotonada (In^-).

Os indicadores ácido-base operam com base nesse equilíbrio entre as formas ácida (HIn) e básica (In^-), sendo a coloração dependente da proporção entre essas espécies. Quando a forma ácida predomina em pelo menos dez vezes sobre a forma básica, observa-

se a cor característica da espécie protonada. De forma análoga, quando a razão HIn/In^- é inferior a 0,1, predomina a cor da forma desprotonada. Entre esses limites encontra-se a faixa de transição do indicador, na qual ambas as espécies coexistem em proporções significativas (FERNANDES; BARRETO; BATISTA; PETRUCI, 2023).

Essa faixa de transição está diretamente relacionada ao pK_a do indicador, ocorrendo, em geral, entre $pK_a \pm 1$. Assim, pequenas variações de pH próximas ao pK_a promovem alterações significativas na razão entre HIn e In^- , resultando em mudanças intensas de cor e, conseqüentemente, elevada sensibilidade analítica. Fora dessa região, a predominância de apenas uma das espécies reduz significativamente a resposta do sistema.

A quantificação da amônia fundamenta-se na Lei de Beer-Lambert, segundo a qual a absorbância é diretamente proporcional à concentração da espécie absorvente. Como as formas HIn e In^- apresentam diferentes propriedades espectrais, a alteração da razão entre essas espécies, provocada pelo aumento do pH decorrente da absorção da amônia, resulta em uma variação proporcional da absorbância em um comprimento de onda específico. Entretanto, essa relação linear é observada apenas quando o sistema opera na faixa de transição do indicador, onde pequenas variações de pH produzem mudanças significativas na composição do equilíbrio ácido-base.

Com base nesses princípios, foram avaliados três indicadores ácido-base com diferentes valores de pK_a e intervalos de transição: violeta cristal 0,1% ($pK_a \approx 0,8$; faixa de transição entre pH 0 e 2), alaranjado de metila 0,1% ($pK_a \approx 3,5$; faixa de transição entre pH 3,1 e 4,4) e verde de bromocresol 0,1% ($pK_a \approx 4,7$; faixa de transição entre pH 3,8 e 5,4). Considerando que a solução absorvedora empregada foi ácido sulfúrico, um ácido forte ($pK_{a1} \approx -3$ e $pK_{a2} \approx 2$), esperava-se que a absorção da amônia promovesse aumento gradual do pH a partir de valores inicialmente muito ácidos. Dessa forma, indicadores cujo pK_a se aproximasse do pH atingido durante a absorção da amônia tenderiam a apresentar maior sensibilidade e melhor resposta analítica, justificando sua avaliação no desenvolvimento do método.

5.2. DEFINIÇÃO DO ÁCIDO E DA FAIXA DE pH

Inicialmente, para definir a faixa de pH mais adequada ao método, foram avaliados três indicadores com diferentes faixas de transição de pH: violeta cristal 0,1% (pH 1–2), alaranjado de metila 0,1% (pH 3–4) e verde de bromocresol 0,1% (pH 4–5).

O indicador violeta cristal foi inicialmente descartado porque seu intervalo de transição ocorre em valores de pH muito baixos. Nessas condições, a mudança de cor acontecia apenas pelo contato com o ar, o que comprometia a estabilidade do sistema e inviabilizava sua aplicação no método.

Nos ensaios com alaranjado de metila e verde de bromocresol, foram preparadas soluções acidificadas para ajustar o pH próximo aos respectivos pontos de viragem. Utilizaram-se ácido sulfúrico, ácido bórico e ácido oxálico, com valores de pH ajustados inicialmente para 3,5 e 4,5. Esses valores foram escolhidos considerando as faixas de viragem do alaranjado de metila (pH 3–4) e do verde de bromocresol (pH 4–5).

Após o ajuste do pH, foram realizados testes de sensibilidade dos indicadores utilizando hidróxido de amônio P.A. (NH_4OH). Para cada indicador, prepararam-se três soluções acidificadas na proporção 30:1 entre ácido e indicador: (i) ácido sulfúrico, (ii) ácido bórico e (iii) ácido oxálico. Em seguida, adicionaram-se alíquotas de 10,0 μL de NH_4OH .

As medições de absorbância foram realizadas em espectrofotômetro UV-Vis de bancada. As leituras iniciaram em 0,0 μL de NH_4OH , com incrementos sucessivos de 10,0 μL a cada medição. Os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas 3 e 4.

Para o indicador verde de bromocresol, as leituras foram realizadas no comprimento de onda de 450 nm. Para o alaranjado de metila, utilizou-se o comprimento de onda de 490 nm nas medições de absorbância.

Tabela 3: Alteração de absorbância da solução ácida com verde de bromocresol com adição de NH_4OH

Quantidade da solução de NH_4OH (μL)	Quantidade de solução de NH_4OH (mol)	ABSORBÂNCIA		
		Ácido Oxálico	Ácido Bórico	Ácido Sulfúrico
0	0	0,263	0,179	0,225
10	0,31545	0,255	0,040	0,036
20	0,6309	0,245	0,040	0,036
30	0,94635	0,235	0,040	0,036
40	1,2618	0,217	0,040	0,036
50	1,57725	0,195	0,040	0,036
60	1,8927	0,160	0,040	0,036
70	2,20815	0,097	0,040	0,036
80	2,5236	0,043	0,040	0,036
90	2,83905	0,043	0,040	0,036
100	3,1545	0,043	0,040	0,036

Fonte: O autor

Tabela 4: Alteração de absorbância da solução ácida com alaranjado de metila com adição de NH_4OH

Quantidade da solução de NH_4OH (μL)	Quantidade de solução de NH_4OH (mol)	ABSORBÂNCIA		
		Ácido Oxálico	Ácido Bórico	Ácido Sulfúrico
0	0	0,871	0,694	0,932
10	0,31545	0,864	0,694	0,664
20	0,6309	0,861	0,694	0,663
30	0,94635	0,852	0,694	0,662
40	1,2618	0,801	0,694	0,662
50	1,57725	0,769	0,692	0,660
60	1,8927	0,755	0,691	0,656
70	2,20815	0,754	0,687	0,654
80	2,5236	0,753	0,687	0,651
90	2,83905	0,751	0,687	0,649
100	3,1545	0,750	0,687	0,649

Fonte: O autor

Após a realização dos testes, verificou-se que as soluções contendo ácido oxálico apresentaram efeito tamponante para ambos os indicadores, sem variação significativa da absorbância. Esse comportamento indica a ausência de alterações relevantes no pH até a adição de aproximadamente 1,26 mol de NH_4OH . Em razão da baixa sensibilidade observada, já que seriam necessárias quantidades consideravelmente maiores de NH_4OH para promover alterações no pH, o uso do ácido oxálico foi descartado no método proposto.

Após o ensaio inicial, foi realizado um novo teste utilizando solução de NH_4OH mais diluída. Para cada indicador, prepararam-se duas soluções acidificadas na proporção

de 30:1 entre ácido e indicador, sendo uma contendo ácido sulfúrico e outra contendo ácido bórico. Em seguida, adicionaram-se alíquotas de 10,0 μL de NH_4OH . As medições de absorbância foram realizadas em espectrofotômetro UV-Vis de bancada, iniciando-se em 0,0 μL e com incrementos sucessivos de 10,0 μL a cada leitura. Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5: Alteração de absorbância da solução ácida com verde de bromocresol com adição de NH_4OH 10 vezes diluída

Quantidade da solução de NH_4OH (μL)	Quantidade de solução de NH_4OH (mol)	ABSORBÂNCIA	
		Ácido Bórico	Ácido Sulfúrico
0	0	0,181	0,223
10	0,031545	0,040	0,217
20	0,06309	0,040	0,214
30	0,094635	0,040	0,208
40	0,12618	0,040	0,174
50	0,157725	0,040	0,036
60	0,18927	0,040	0,036
70	0,220815	0,040	0,036
80	0,25236	0,040	0,036
90	0,283905	0,040	0,036
100	0,31545	0,040	0,036

Fonte: O autor

Tabela 6: Alteração de absorbância da solução ácida com alaranjado de metila com adição de NH_4OH

Quantidade da solução de NH_4OH (μL)	Quantidade de solução de NH_4OH (mol)	ABSORBÂNCIA	
		Ácido Bórico	Ácido Sulfúrico
0	0	0,701	0,998
10	0,031545	0,687	0,739
20	0,06309	0,687	0,701
30	0,094635	0,687	0,700
40	0,12618	0,687	0,699
50	0,157725	0,687	0,694
60	0,18927	0,687	0,691
70	0,220815	0,687	0,687
80	0,25236	0,687	0,686
90	0,283905	0,687	0,686
100	0,31545	0,687	0,679

Fonte: O autor

Após os ensaios, verificou-se que o ácido bórico não era adequado para aplicação no método, devido à baixa estabilidade do pH. Além da variação significativa observada quando a solução era exposta ao ar, o ácido bórico apresenta caráter de ácido fraco, com baixa liberação de íons H^+ em solução aquosa. Essa característica reduz sua capacidade de manter o meio suficientemente acidificado e favorece alterações no equilíbrio ácido-base ao longo do tempo. Como consequência, tornava-se necessária a correção frequente do pH antes de cada utilização, comprometendo a reprodutibilidade e a estabilidade do procedimento experimental.

Em seguida, avaliou-se uma solução de NH_4OH diluída vinte vezes, com objetivo de verificar a sensibilidade do método. Para cada indicador, foram preparadas soluções acidificadas na proporção de 30:1 entre ácido e indicador, utilizando ácido sulfúrico. Posteriormente, adicionaram-se alíquotas de 10,0 μL de NH_4OH . As leituras de absorbância foram realizadas em espectrofotômetro UV-Vis, iniciando em 0,0 μL e com incrementos de 10,0 μL a cada medida. Os resultados obtidos encontram-se apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Alteração de absorbância da solução ácida com os indicadores com adição de NH_4OH 20 vezes diluída

Quantidade da solução de NH_4OH (μL)	Quantidade de solução de NH_4OH (mol)	ABSORBÂNCIA	
		Verde de bromocresol	Alaranjado de metila
0	0	0,226	1,012
10	0,0031545	0,224	0,909
20	0,006309	0,222	0,779
30	0,0094635	0,220	0,709
40	0,012618	0,219	0,709
50	0,0157725	0,218	0,708
60	0,018927	0,214	0,706
70	0,0220815	0,210	0,704
80	0,025236	0,197	0,701
90	0,0283905	0,105	0,700
100	0,031545	0,044	0,698

Fonte: O autor

Após os ensaios, concluiu-se que o verde de bromocresol não era adequado para aplicação no método. Seu ponto de viragem mais elevado exigia o uso de soluções ácidas

com pH relativamente alto, dificultando o ajuste das condições experimentais. Além disso, o indicador apresentou menor absortividade quando comparado ao alaranjado de metila. Enquanto o verde de bromocresol exibiu mudança de coloração apenas após a adição de 0,02 mol da solução de NH_4OH diluída vinte vezes, o alaranjado de metila respondeu com apenas 0,009 mol, evidenciando maior sensibilidade e melhor desempenho analítico para o método proposto.

Após a definição do ácido sulfúrico e do indicador alaranjado de metila, realizaram-se testes com diferentes diluições de NH_4OH , com o objetivo de identificar a faixa em que a absorbância apresentasse comportamento linear em relação à concentração. Foram avaliadas soluções diluídas entre 30 e 240 vezes, sendo a diluição de 240 vezes a que apresentou a relação linear esperada.

Para verificar a linearidade, minimizar efeitos associados às diferentes diluições e padronizar o volume final em todas as medições, prepararam-se dez soluções contendo ácido e indicador. A essas soluções foram adicionados volumes crescentes de NH_4OH diluído 240 vezes, variando de 10,0 μL a 100,0 μL . Após a adição do NH_4OH , cada solução foi completada com água destilada até atingir o volume final de 5,0 mL. Em seguida, registraram-se os valores de absorbância das soluções obtidas, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8: Absorbância da solução ácida com alaranjado de metila com adição de NH_4OH após diluição em 5,0 ml de água.

Quantidade da solução de NH_4OH (μL)	Quantidade de solução de NH_4OH (mol)	ABSORBÂNCIA
		Ácido Sulfúrico
0	0	0,175
10	$3,15 \times 10^{-8}$	0,171
20	$6,31 \times 10^{-8}$	0,169
30	$9,46 \times 10^{-8}$	0,165
40	$1,26 \times 10^{-7}$	0,162
50	$1,58 \times 10^{-7}$	0,156
60	$1,89 \times 10^{-7}$	0,153
70	$2,21 \times 10^{-7}$	0,149
80	$2,52 \times 10^{-7}$	0,144
90	$2,84 \times 10^{-7}$	0,141
100	$3,15 \times 10^{-7}$	0,140

Fonte: O autor

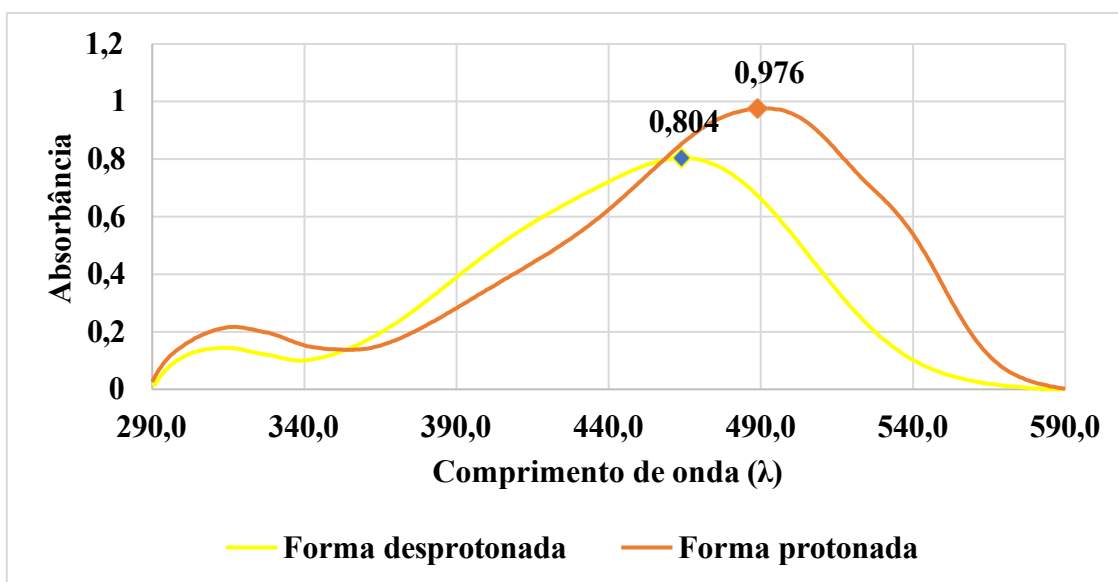
Observou-se que a absorbância aumentou proporcionalmente ao número de mols de NH_4OH , confirmando a linearidade do método e a adequação da diluição empregada. Além disso, verificou-se uma redução da absorbância associada ao efeito de diluição após a adição de água.

5.3. ESPECTRO DE ABSORÇÃO DO INDICADOR

Após a avaliação de sensibilidade de cada sistema ácido/indicador em função da adição de NH_4OH , o espectro de absorbância da solução de ácido sulfúrico contendo o indicador, com o objetivo de confirmar o comprimento de onda a ser utilizado na

construção da curva de calibração e, dessa forma, selecionar o LED adequado para o fotômetro portátil. O espectro foi registrado tanto antes quanto após o ponto de viragem do indicador. Os espectros das soluções do indicador antes e depois da adição de NH_4^+ são apresentados na figura 7.

Figura 7: Espectro de absorção no UV-VIS da solução de ácido sulfúrico com indicador alaranjado de metila.



Fonte: O autor

O comprimento de onda de maior absorbância para a forma protonada do indicador foi de 490 nm, valor já utilizado nos testes preliminares. Para a forma desprotonada, o máximo de absorbância ocorreu em 465 nm. Portanto, monitorar a variação de absorbância em um destes máximos de absorção é uma estratégia adequada para relacionar o sinal com a concentração do analito. Esse é um parâmetro importante também para auxiliar na escolha do LED como fonte de radiação do fotômetro portátil

5.4. CURVA DE CALIBRAÇÃO

A próxima etapa do trabalho foi a construção da curva de calibração utilizando soluções padrão de hidróxido de amônio. Para isso, foram preparadas 11 soluções, sendo uma solução branco e dez soluções contendo concentrações crescentes de NH_4OH . Cada concentração foi estabelecida a partir da adição sucessiva de alíquotas de 10,0 μL da solução de NH_4OH diluída 240 vezes, seguindo o procedimento adotado na etapa de definição do ácido e do indicador. Dessa forma, adicionaram-se 10,0 μL na primeira solução, 20,0 μL na segunda, e assim sucessivamente até a décima solução. As quantidades de mol presentes em cada solução encontram-se apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9: Quantidade de mol em cada solução utilizada na curva de calibração.

Concentração de da solução de NH_4OH (mol.L^{-1})	Número de mols de NH_4OH
0,015	$3,0 \times 10^{-7}$
0,030	6×10^{-7}
0,045	9×10^{-7}
0,060	$1,2 \times 10^{-6}$
0,075	$1,5 \times 10^{-6}$
0,090	$1,8 \times 10^{-6}$
0,105	$2,1 \times 10^{-6}$
0,120	$2,4 \times 10^{-6}$
0,135	$2,7 \times 10^{-6}$
0,150	$3,0 \times 10^{-6}$

Fonte: O autor

Após o preparo das soluções, procedeu-se à obtenção da curva de calibração. Para cada ponto, retirou-se uma alíquota de 20,0 μL de cada solução, a qual foi adicionada a 1,0 mL da solução de ácido com indicador previamente preparada na proporção de 30:1.

As medições foram realizadas utilizando o protótipo de fotômetro portátil equipado com LED de 465 nm, comprimento de onda correspondente à solução após o ponto de viragem do indicador. Cada ponto da curva foi preparado em triplicata, e cada medição foi realizada com 10 replicatas, com o objetivo de garantir maior precisão e reprodutibilidade aos resultados obtidos.

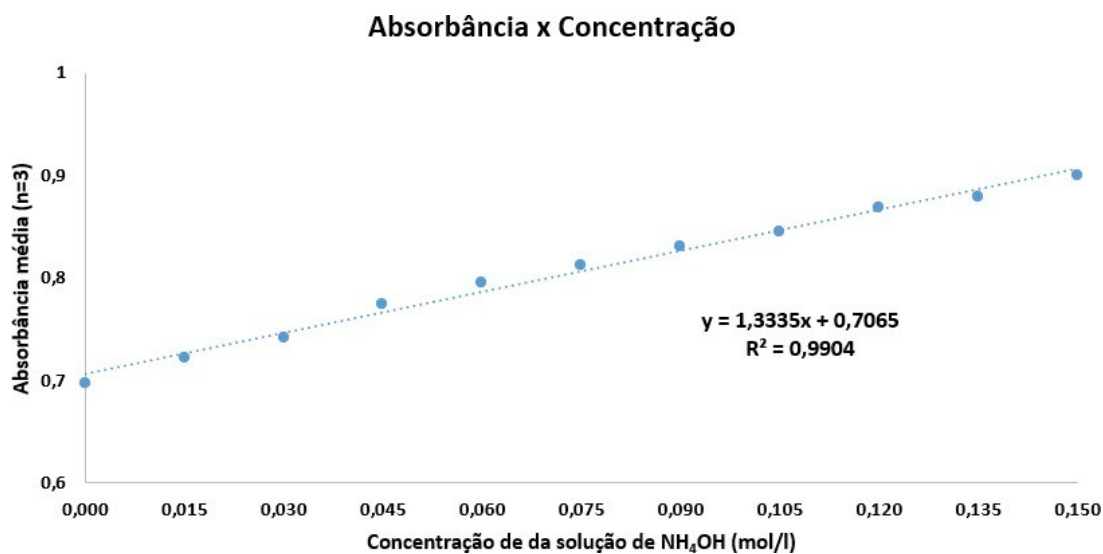
O fotômetro fornece os resultados em lux, unidade relacionada à intensidade luminosa detectada pelo sensor. Para a conversão desses valores em absorbância, utilizou-se a equação apresentada na Figura 8.

Figura 8: Fórmula para conversão de lux em absorbância

$$A = -\log\left(\frac{LUX (Amostra)}{LUX (Água)}\right)$$

O valor de branco obtido preliminarmente, utilizando água, foi de 17.401 lux, sendo utilizado nos cálculos de conversão para absorvância. A curva de calibração resultante está apresentada na Figura 9.

Figura 9: Curva de calibração feita no protótipo de fotômetro portátil



Após o preparo da curva, verificou-se que ela apresenta boa linearidade, com $r^2 > 0,99$. Além disso, os valores de absorvância obtidos foram semelhantes aos registrados no espectrofotômetro de bancada, reforçando a confiabilidade e a validade dos resultados.

Os parâmetros de limite de detecção e quantificação foram calculados utilizando as fórmulas 3 e 4.

Fórmula 3: Cálculo do limite de detecção

$$LD = 3,3 \times \frac{\alpha}{S}$$

α = Desvio padrão do coeficiente linear da equação
S = Coeficiente angular da curva de calibração

Fórmula 4: Cálculo do limite de quantificação

$$LQ = 10,0 \times \frac{\alpha}{S}$$

α = Desvio padrão do coeficiente linear da equação
S = Coeficiente angular da curva de calibração

Após os cálculos de limite de detecção e limite de quantificação, obteve-se os seguintes resultados: $LD = 0,018 \text{ mol L}^{-1}$ e $LQ = 0,055 \text{ mol L}^{-1}$.

5.5. TESTE DE CAPACIDADE DE CAMPO

A utilização de 70% da capacidade de campo foi adotada por representar uma condição de umidade suficiente para favorecer a hidrólise da ureia e a atividade microbológica, sem promover saturação do solo. Umidades próximas à capacidade máxima de retenção podem intensificar a dissolução do fertilizante e alterar a dinâmica de volatilização da amônia, resultando em condições menos representativas daquelas normalmente encontradas em campo. Dessa forma, a adoção de 70% da capacidade de campo contribuiu para a padronização das condições experimentais e para a comparação entre os diferentes ensaios.

Para os experimentos conduzidos com 400,0 g de solo pelo método de titulação, foram necessárias massas de água de 85,0 g, 50,0 g, 67,0 g e 51,0 g nos testes 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Nos ensaios realizados com o protótipo de fotômetro portátil utilizando 200,0 g de solo, as massas de água correspondentes foram de 42,5 g, 25,0 g, 33,5 g e 25,5 g.

As diferenças observadas entre as quantidades de água empregadas em cada ensaio refletem a variabilidade inerente às amostras de solo utilizadas. Como cada experimento foi realizado com uma nova amostra, pequenas diferenças nas características físicas do solo, como textura, distribuição granulométrica, porosidade e teor de matéria orgânica, influenciaram sua capacidade de retenção de água. Esses resultados evidenciam a importância da determinação individual da capacidade de campo para cada amostra, garantindo que todas fossem submetidas a condições equivalentes de umidade e reduzindo possíveis fontes de variabilidade nos ensaios de volatilização de amônia.

5.6. TESTE DE VOLATILIZAÇÃO – MÉTODO TITULAÇÃO

O método utilizado é baseado no procedimento criado pelo Prof^o Khiel da ESALQ/USP, em parceria com a empresa Adfert, utilizando como referência a metodologia do Professor Dr. Heitor Cantarella. (RAIJ; ANDRADE; CANTARELLA; QUAGGIO, 2001).

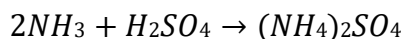
Para a preparação dos ensaios, adicionaram-se 400,0 g de solo previamente seco e quarteado em um recipiente plástico com tampa, ao qual foi incorporada a massa de água potável previamente calculada com base na capacidade de campo. Após a adição da água, o recipiente foi vedado e mantido em repouso por três dias, permitindo a distribuição homogênea da umidade em toda a amostra de solo. Decorrido esse período, inseriu-se no interior do recipiente um suporte destinado à acomodação do papel filtro.

As ureias utilizadas nos testes foram previamente pesadas. Selecionaram-se seis grânulos de dimensões semelhantes, totalizando massa de 0,224 g. Em seguida, os grânulos foram adicionados ao recipiente e posicionados sobre a superfície do solo. A disposição foi realizada em formato de pentagrama, dentro da área delimitada pelo suporte do papel filtro.

Posteriormente, posicionou-se o papel filtro sobre o suporte. Sobre o papel, aplicaram-se cinco gotas de água destilada distribuídas ao longo do perímetro do suporte. Em seguida, adicionou-se 1,0 mL da solução de ácido sulfúrico e uma gota do indicador de pH alaranjado de metila. Após essa etapa, o recipiente foi vedado com a tampa.

Durante a execução dos ensaios, os filtros foram substituídos a cada 24 horas ao longo de quatro dias. Cada filtro removido, manipulado com auxílio de pinça para evitar contaminações, foi transferido para um recipiente contendo 100,0 mL de água destilada e quatro gotas do indicador verde de bromocresol. O filtro foi totalmente submerso na solução, que apresentou coloração amarela após o contato. A solução contendo água, indicador e o papel filtro foi então titulada com solução diluída de hidróxido de sódio.

A titulação foi realizada com solução de NaOH para quantificar o ácido sulfúrico remanescente no papel filtro e, assim, determinar indiretamente a quantidade de amônia volatilizada. A reação entre a amônia e o ácido sulfúrico ocorre conforme a equação:



A estequiometria da reação demonstra que cada mol de ácido sulfúrico reage com dois mols de amônia, permitindo calcular a quantidade de amônia volatilizada a partir da quantidade de ácido não consumido.

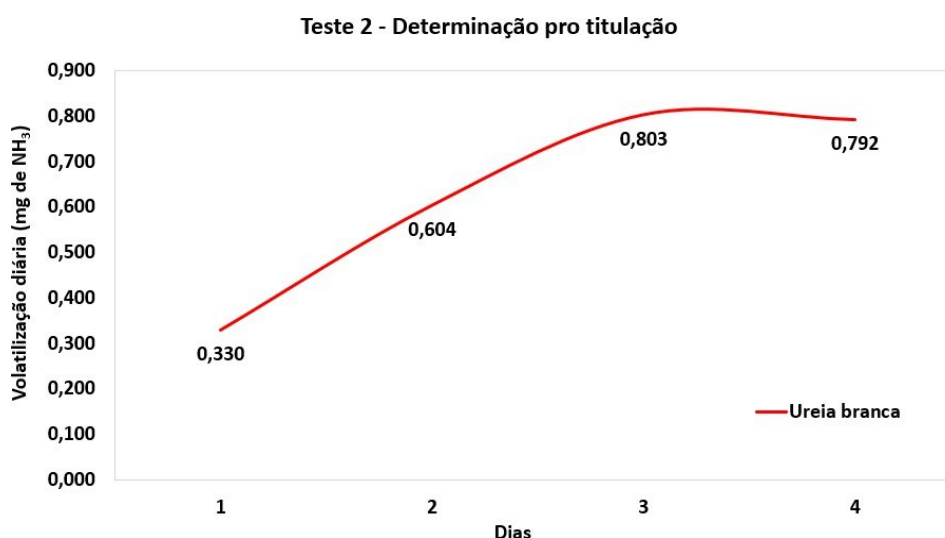
Os resultados obtidos foram analisados ao longo de quatro dias, expressando-se a quantidade diária de amônia, em mg, volatilizada na forma de NH_3 . As Figuras 10 a 13 apresentam, respectivamente, os resultados do teste 1, do teste 2, do teste 3 e do teste 4 durante o período avaliado. Como controle experimental, analisaram-se dois recipientes adicionais, sendo um contendo apenas água e outro contendo somente solo umedecido. Esses controles permitiram confirmar que a amônia detectada nos filtros era proveniente exclusivamente do fertilizante aplicado.

Figura 10: Resultado do teste 1 de volatilização feito a partir da titulação do filtro contendo NH_3



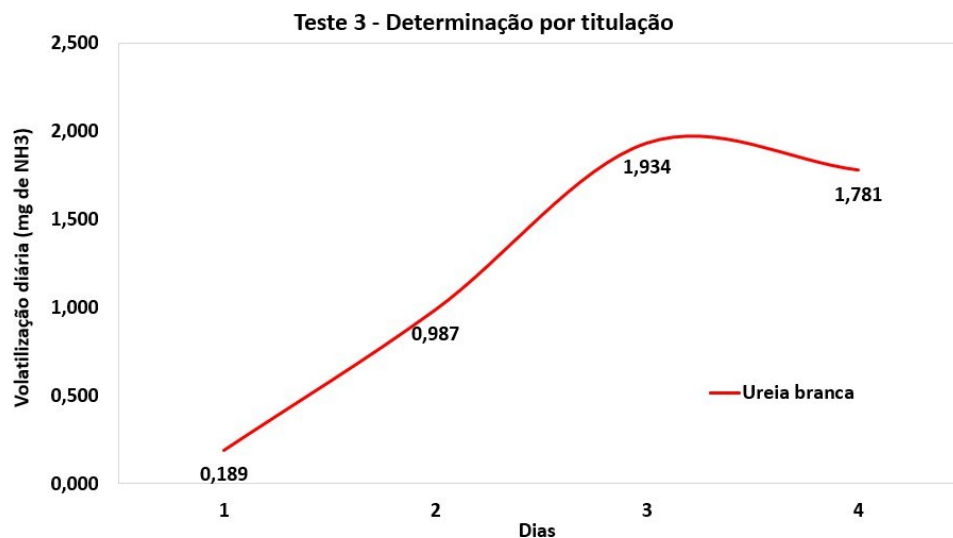
Fonte: O autor

Figura 11: Resultado do teste 2 de volatilização feito a partir da titulação do filtro contendo NH_3



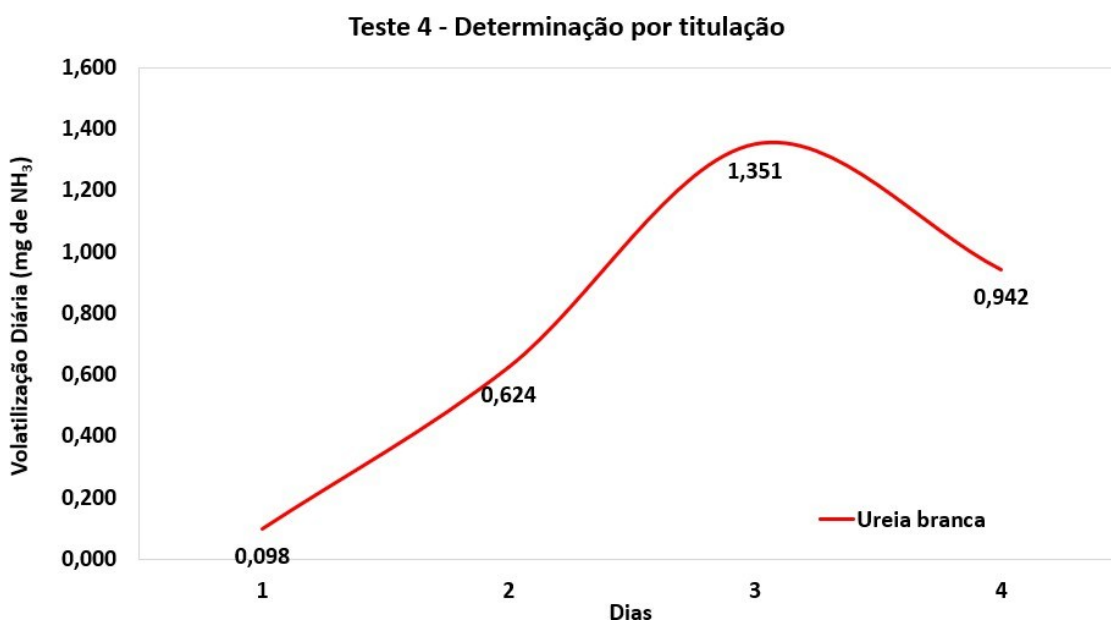
Fonte: O autor

Figura 12: Resultado do teste 3 de volatilização feito a partir da titulação do filtro contendo NH_3



Fonte: O autor

Figura 13: Resultado do teste 4 de volatilização feito a partir da titulação do filtro contendo NH_3



Fonte: O autor

Ao término dos experimentos, observou-se que o teste 1 apresentou volatilização total de 0,924 mg de NH_3 , enquanto o teste 2 registrou 2,529 mg de NH_3 . O teste 3 apresentou volatilização de 4,891 mg de NH_3 e, por fim, o teste 4 registrou 3,015 mg de NH_3 . As diferenças observadas entre os ensaios podem ser atribuídas a diversos fatores, incluindo as características físico-químicas do solo, que podem influenciar diretamente a atividade da enzima urease e, consequentemente, a taxa de hidrólise da ureia. Além disso,

possíveis variações entre os lotes de ureia utilizados também podem ter contribuído para as diferenças nos valores de volatilização. Fatores ambientais, como a temperatura durante os dias de realização dos testes, bem como propriedades intrínsecas do solo, incluindo acidez e teor de matéria orgânica, também exercem influência significativa sobre o processo de volatilização da amônia.

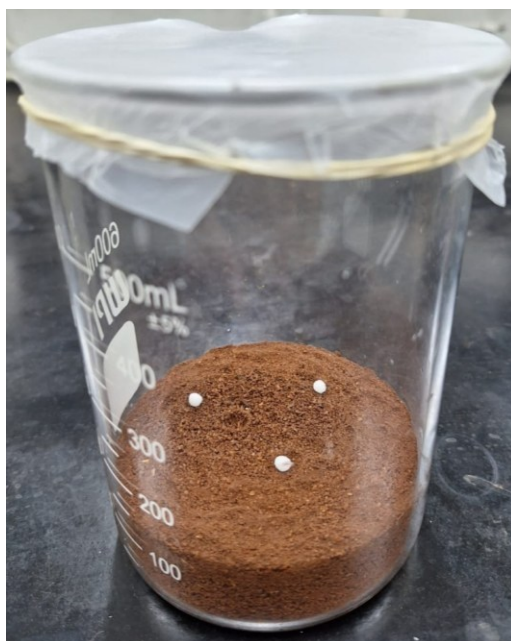
Em todos os ensaios, os recipientes utilizados como controle, contendo apenas água ou somente solo umedecido, não apresentaram volatilização detectável de amônia, confirmando que a amônia quantificada foi proveniente exclusivamente da degradação da ureia aplicada.

5.7. TESTE DE VOLATILIZAÇÃO – MÉTODO PROPOSTO

O preparo do solo e dos recipientes para os ensaios utilizando o protótipo de fotômetro portátil foi semelhante ao procedimento adotado nos testes realizados por titulação. Adicionaram-se 200,0 g de solo previamente seco e quarteado em um béquer, ao qual foi incorporada a massa de água potável previamente calculada com base na capacidade de campo. Após a adição da água, o recipiente foi vedado e mantido em repouso por três dias, permitindo a distribuição uniforme da umidade em toda a amostra de solo.

Os grânulos de ureia utilizados nos ensaios foram previamente pesados. Selecionaram-se três grânulos de tamanho semelhante, totalizando massa de 0,112 g, valor correspondente à metade da massa empregada nos ensaios realizados na Adfert, uma vez que as demais variáveis experimentais também foram reduzidas proporcionalmente. Em seguida, os grânulos foram adicionados ao recipiente e posicionados sobre a superfície do solo. A disposição foi realizada em formato triangular, conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14: Béquer contendo solo umedecido e ureia



Fonte: O autor

Após essa etapa, aguardaram-se 24 horas para que a ureia iniciasse o processo de hidrólise e volatilização da amônia. Decorrido esse período, o béquer foi conectado à bomba de ar do protótipo por meio de um tubo de polietileno. A conexão foi realizada de forma vedada, garantindo que não ocorressem perdas da amônia acumulada no interior do recipiente.

A amônia volatilizada foi transportada para o sistema de detecção por meio de uma bomba de ar acoplada a um controlador de vazão, ajustada para $50 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$. O fluxo gasoso foi direcionado, por meio de um tubo conectado a um adaptador acoplado ao vial, para 1,0 mL de solução absorvedora de ácido sulfúrico (pH 3,5) contendo alaranjado de metila na proporção de 30:1 (v/v). A configuração do sistema manteve o conjunto fechado durante a amostragem, reduzindo perdas de amônia para o ambiente e favorecendo sua absorção pela solução analisadora.

As medições foram realizadas ao longo de 20 minutos, período necessário para a transferência do ar presente no interior do béquer para a solução analisadora. Esse intervalo foi determinado experimentalmente, uma vez que, após 20 minutos, os valores de absorbância permaneceram constantes. O monitoramento foi realizado com leituras a cada 3 minutos, sendo o valor final obtido a partir da média de dez replicatas.

Assim como na construção da curva de calibração, o equipamento forneceu os resultados em lux, tornando necessária a conversão desses valores em absorbância por meio da equação apresentada na Figura 8. Também foi necessário determinar diariamente o valor de lux da água ao longo dos quatro dias de ensaio, utilizando-o como referência para a conversão em absorbância.

Posteriormente, a curva de calibração foi utilizada para determinar a concentração de amônia volatilizada a partir dos valores de absorbância obtidos ao longo dos quatro dias de experimento. Em seguida, de maneira análoga ao método por titulação, calculou-se a quantidade diária de amônia volatilizada, expressa em miligramas de NH_3 . As Figuras 15 e 16 apresentam, respectivamente, os resultados do teste 5 e do teste 6 durante o período avaliado.

Assim como no método por titulação, realizou-se um controle experimental utilizando dois recipientes adicionais, sendo um contendo apenas água e outro contendo somente solo umedecido. Esses controles permitiram confirmar que a amônia detectada era proveniente exclusivamente do fertilizante aplicado.

Figura 15: Resultado do teste 5 de volatilização feito a partir do protótipo de fotômetro portátil. Corresponde ao teste 1.

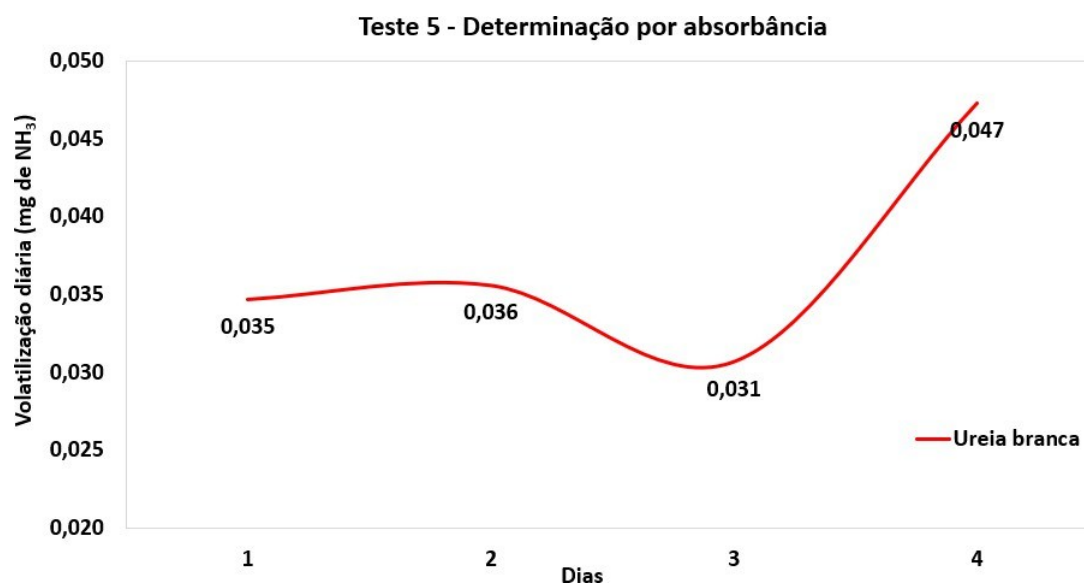
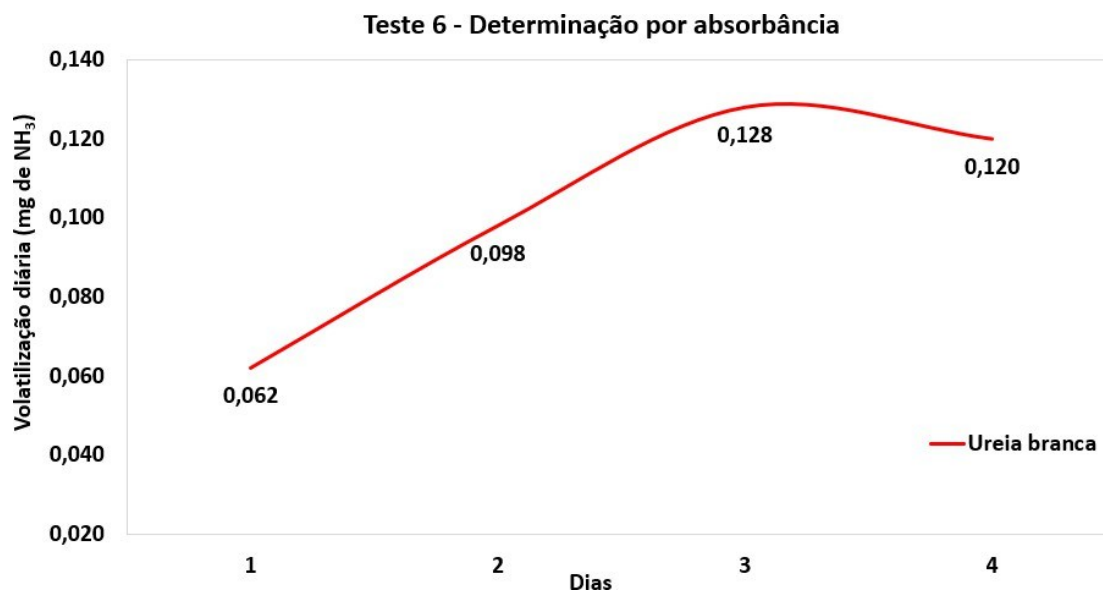


Figura 16: Resultado do teste 6 de volatilização feito a partir do protótipo de fotômetro portátil. Corresponde ao teste 2.



Posteriormente, realizaram-se mais dois ensaios utilizando 400,0 g de solo e 0,224 g de ureia, com o objetivo de compará-los aos testes 3 e 4, conduzidos pelo método de titulação utilizando a mesma massa de solo. No entanto, devido à elevada quantidade de amônia volatilizada, os valores determinados pelo protótipo de fotômetro portátil ultrapassaram significativamente a faixa linear da curva de calibração, bem como os limites de detecção e quantificação do método. Além disso, observou-se saturação rápida do indicador, inviabilizando a realização das medições de forma adequada.

Diante dessa limitação, foram conduzidos outros dois ensaios utilizando as mesmas amostras de solo empregadas nos testes 3 e 4, considerando apenas a fração que ainda não havia entrado em contato com o fertilizante. Nesses novos testes, empregaram-se 200,0 g de solo e 0,112 g de ureia, mantendo-se as condições utilizadas nos testes 5 e 6 realizados com o protótipo de fotômetro portátil. As figuras 17 e 18 apresentam respectivamente, os resultados do teste 7 e do teste 8 durante o período avaliado.

Figura 17: Resultado do teste 7 de volatilização feito a partir do protótipo de fotômetro portátil. Corresponde ao teste 3.

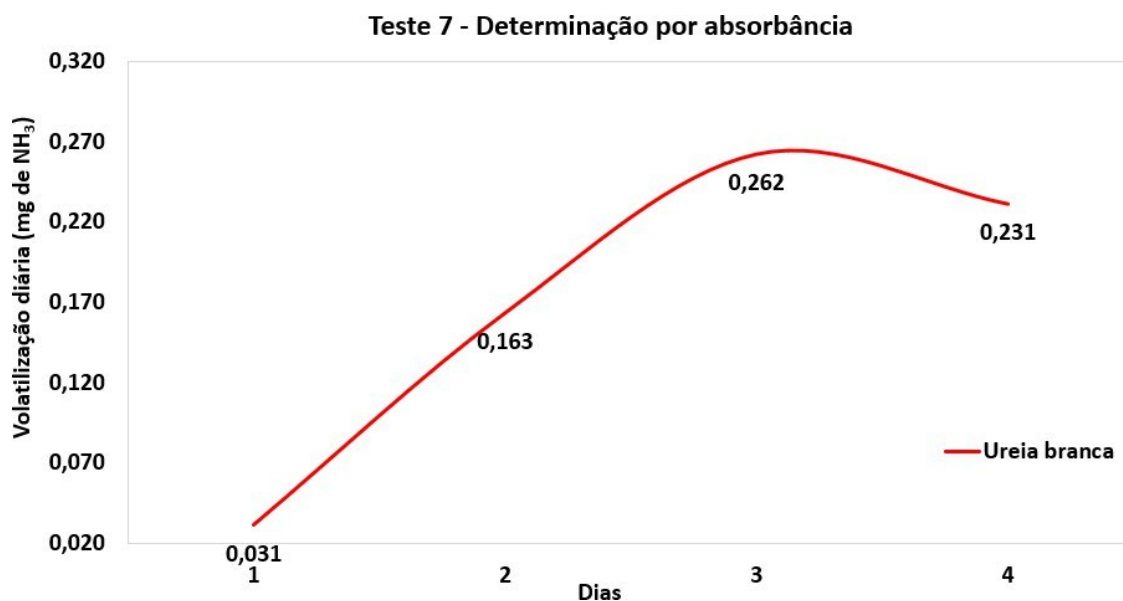
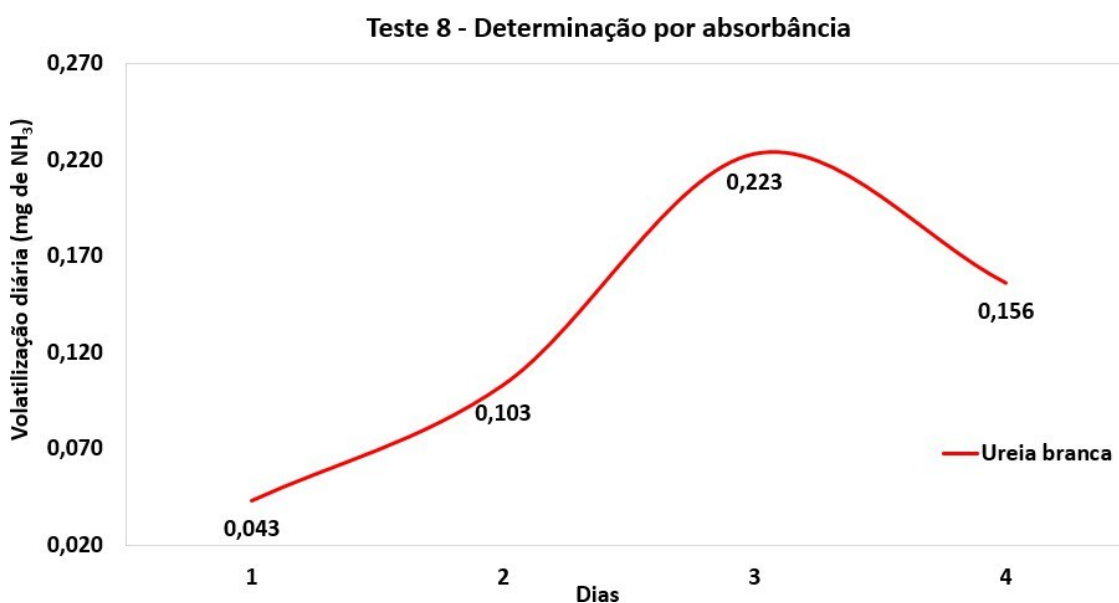


Figura 18: Resultado do teste 8 de volatilização feito a partir do protótipo de fotômetro portátil. Corresponde ao teste 4.



Ao término dos experimentos, observou-se que o teste 5 apresentou volatilização total de 0,148 mg de NH_3 , enquanto o teste 6 registrou 0,408 mg de NH_3 . O teste 7 apresentou volatilização de 0,687 mg de NH_3 e o teste 8 registrou 0,525 mg de NH_3 .

Assim como observado nos ensaios realizados pelo método de titulação, as diferenças entre os resultados podem ser atribuídas a diversos fatores, incluindo as características físico-químicas do solo, que influenciam diretamente a atividade da enzima urease e, consequentemente, a taxa de hidrólise da ureia. Além disso, possíveis variações entre os lotes de ureia utilizados também podem ter contribuído para as diferenças observadas entre os ensaios. Fatores ambientais, como a temperatura durante os dias de realização dos testes, bem como propriedades intrínsecas do solo, incluindo acidez e teor de matéria orgânica, também exercem influência significativa sobre o processo de volatilização da amônia.

Em todos os ensaios, os recipientes utilizados como controle, contendo apenas água ou somente solo umedecido, não apresentaram volatilização detectável de amônia, confirmando que a amônia quantificada foi proveniente exclusivamente da degradação da ureia aplicada.

5.8. COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS

Os experimentos de quantificação de amônia liberado pelos solos realizados pelo método da amostragem com filtro/titulação e de amostragem direta/fotometria conduzidos simultaneamente. O teste 1, realizado por titulação, e o teste 5, conduzido por fotometria, utilizaram o mesmo lote de ureia, a mesma amostra de solo e a mesma capacidade de campo. O mesmo procedimento foi adotado para os pares de testes 2 e 6, 3 e 7 e 4 e 8.

Observou-se que os ensaios realizados por titulação apresentaram valores significativamente maiores de amônia volatilizada. Esse comportamento pode ser atribuído à maior massa de solo empregada nesse método, o que implica maior quantidade de enzima urease e maior teor de matéria orgânica, fatores que favorecem a volatilização da ureia. Além disso, nos ensaios por titulação também foi utilizada maior massa de ureia, contribuindo para os valores mais elevados de amônia detectados.

Destaca-se que, ao realizar ensaios utilizando 400,0 g de solo e 0,224 g de ureia com o método baseado no protótipo de fotômetro portátil, os valores obtidos não apresentaram confiabilidade analítica, uma vez que ultrapassaram significativamente os limites estabelecidos pela curva de calibração. Também foi observada rápida saturação do indicador, indicando que a quantidade de amônia volatilizada excedeu a capacidade

de resposta da solução analisadora. Outro aspecto relevante foi que os valores obtidos não ultrapassaram 0,300 mg de NH_3 , sugerindo que o sistema já se encontrava próximo ao limite de saturação do indicador. Esse comportamento demonstra que o método utilizando o fotômetro portátil apresenta limitações para quantificação de concentrações elevadas de amônia, diferentemente do método por titulação.

Ao comparar os pares de testes, verificou-se que o perfil de volatilização apresentado nos gráficos foi semelhante entre as metodologias. Nos testes 1 e 5, observou-se redução da volatilização no terceiro dia, seguida por aumento no quarto dia, além de comportamentos equivalentes nos dois primeiros dias. Da mesma forma, os demais pares de ensaios apresentaram tendências similares ao longo do período avaliado, apesar das diferenças nos valores absolutos de amônia detectados.

A comparação entre as quantidades totais de amônia volatilizada também demonstrou coerência entre os métodos. A razão entre os testes 1 e 2 e entre os testes 3 e 4, realizados por titulação na Adfert, foi de 2,74 e 0,62, respectivamente. Para os testes 5 e 6 e para os testes 7 e 8, realizados com o protótipo de fotômetro portátil, as razões obtidas foram de 2,76 e 0,76, respectivamente.

Ressalta-se que os testes 7 e 8 apresentaram valores muito próximos, ou ligeiramente superiores, ao limite da curva de calibração, o que pode justificar a maior diferença observada na razão entre esses ensaios quando comparados aos testes 3 e 4. Ainda assim, os resultados evidenciam que, embora o protótipo de fotômetro portátil tenha quantificado valores absolutos menores de amônia, o comportamento relativo entre os ensaios permaneceu semelhante ao observado no método por titulação, demonstrando consistência e coerência entre as metodologias avaliadas.

Considerando que o objetivo da metodologia proposta é a comparação da volatilização de amônia entre diferentes tratamentos, e não a substituição direta do método de titulação em todas as faixas de concentração, a concordância observada entre os perfis de volatilização e entre as razões obtidas para os diferentes ensaios demonstra que o método desenvolvido atende à finalidade para a qual foi concebido. Dessa forma, o protótipo mostrou-se adequado para avaliar a eficiência relativa de aditivos inibidores de urease, mesmo apresentando limitações para amostras com elevadas concentrações de amônia.

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstram que o objetivo deste trabalho foi alcançado, por meio do desenvolvimento de um método analítico para a determinação da amônia proveniente da volatilização em solos fertilizados, baseado em amostragem ativa, alteração do pH, mudança de cor de um indicador ácido-base e determinação por fotometria utilizando um fotômetro UV-Vis portátil.

O método desenvolvido apresentou desempenho satisfatório na faixa de concentração estudada, com boa repetibilidade e capacidade de monitorar a volatilização de amônia ao longo do tempo. A etapa de desenvolvimento metodológico permitiu definir as condições analíticas mais adequadas, incluindo a utilização de ácido sulfúrico como solução absorvedora e do alaranjado de metila como indicador, além de obter uma curva de calibração linear para a faixa de trabalho estabelecida.

A comparação com o método de referência evidenciou que o sistema desenvolvido foi capaz de reproduzir de forma consistente o comportamento da volatilização de amônia entre os diferentes tratamentos, demonstrando potencial para aplicação na avaliação da eficiência de aditivos inibidores de urease.

Embora o método apresente limitações para a quantificação de elevadas concentrações de amônia, devido à saturação do indicador e à extrapolação da faixa linear da curva de calibração, os resultados demonstram que a metodologia proposta constitui uma alternativa portátil, de fácil operação e com potencial para aplicação em estudos de volatilização de amônia em condições experimentais controladas.

7. REFERÊNCIAS

BUAINAIN, Antônio Márcio; ALVES, Eliseu; SILVEIRA, José Maria; NAVARRO, Zander. O mundo rural no Brasil do século 21: A formação de um novo padrão agrário e agrícola. Instituto de Economia - Unicamp, Campinas, 1. ed., p. 373 - 395, 2014. Disponível em: ISBN 978-85-7035-336-8.

RONCON, Natalia. A importância do setor agrícola para a economia brasileira. 2011. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Administração) - Fundação Educacional do Município de Assis - FEMA/IMESA, Assis, p. 48 - 51. Disponível em: <https://cepein.femanet.com.br/extrafema/buscarTccCurso.jsp?id=679>.

AGÊNCIA MINAS. Disponível em: <https://www.agenciaminas.mg.gov.br/noticia/minas-bate-novo-recorde-e-exportacoes-do-agro-atingem-us-14-2-bilhoes>. Acesso em: 03 jan. 2023.

SILVA, Rebeca Ribeiro. Expansão da soja e do milho em Uberlândia - 2001 a 2022. 2022. 36 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia - Instituto de Geografia, Uberlândia, p. 10. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/36023>.

ADAMI, Andréia Cristina de Oliveira. Exportação do Agronegócio. CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada - ESALQ/USP, Piracicaba, p. 2 - 4, 2021. Disponível em: <https://cepea.esalq.usp.br/br/analises-das-exportacoes-do-agronegocio.aspx>.

PODESTA, Inez. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias-2022/balanca-comercial-do-agro-registra-us-15-71-bilhoes-em-junho>. Acesso em: 03 jan. 2023.

GUEDES, Aline. SENADO FEDERAL. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/infomaterias/2022/10/retorno-do-brasil-ao-mapa-da-fome-da-onu-preocupa-senadores-e-estudiosos>. Acesso em: 03 jan. 2023.

REETZ, Harold F. Fertilizantes e seu uso eficiente. Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA), São Paulo, 1. ed., p. 18 - 31 e 65 - 67, 2017. Disponível em: ISBN 979-10-92366-04-4.

MARTINS, Isaac Silva. Doses, épocas e modos de aplicação da ureia comum e revestida na cultura do milho. 2013. 77 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP, Jaboticabal, p. 7 - 12. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/88257>.

DOMINGOS, Aldimiro Paixão. Produção de Ureia: Avaliação Técnica e Econômica. 2018. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química). Programa de Graduação em Engenharia Química - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, p. 21-22. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/24604>.

BORGES, Ana Lúcia. Recomendações de calagem e adubação para abacaxi, acerola, banana, citros, mamão, mandioca, manga e maracujá. Embrapa, Brasília, 2. ed., p. 271 - 299, 2021. Disponível em: ISBN 978-65-87380-38-4.

ESPINDULA, Marcelo Curitiba. Inibidor de Urease (NBPT) e a eficiência da ureia na fertilização do trigo irrigado. 2010. 82 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia). Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, p. 54.

Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/1136>.

INSTITUTO DA POTASSA & FOSFATO. Manual internacional de fertilidade do solo. Tradução e adaptação: Alfredo Scheid Lopes. 2. ed. rev. ampl., Piracicaba: POTAFOS, 1998. 177 p., p. 103 - 104.

TASCA, Francis Alex; ERNANI, Paulo Roberto; ROGERI, Douglas Antonio; GATIBONI, Luciano Colpo; CASSOL, Paulo César. Volatilização de Amônia do solo após a aplicação de ureia convencional ou com inibidor de urease. Revista Brasileira de Ciência do Solo. v. 35, n. 5, p. 494 - 500, mai. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000200018>

SOUZA, José Adinan. Lixiviação de nitrato e volatilização de amônia em um latossolo cultivado com café sob diferentes fontes de nitrogênio. 2012. 86 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição em Plantas - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, p. 2. Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/6218>.

ROCHETTE, Philippe; MACDONALD, J. Douglas; ANGERS, Denis A.; CHANTIGNY, Martin H.; GASSER, Marc-Olivier; BERTRAND, Normand. Banding of Urea Increased Ammonia Volatilization in a Dry Acidic Soil. Journal of Environmental Quality. v. 38, n. 4, p. 1383, jul. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/jeq2008.0295>

TRIVELIN, Paulo Cesar Ocheuze; OLIVEIRA, Mauro Wagner de; VITTI, André Cesar; GAVA, Glauber José de Castro; BENDASSOLLI, José Albertino. Perdas do nitrogênio da uréia no sistema solo-planta em dois ciclos de cana-de-açúcar. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 37, n. 2, p. 193-201, fev. 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2002000200011>

GARCIA, Gabriel; CARDOSO, Arnaldo Alves; SANTOS, Oalas Aparecido Moraes dos. Da escassez ao estresse do planeta: um século de mudanças no ciclo do nitrogênio. Química Nova, [s. l.], v. 36, n. 9, p. 1468 -1476, jun. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000900032>

FELIX, Erika P.; CARDOSO, Arnaldo A. A Method for Determination of Ammonia in Air using Oxalic Acid-Impregnated Cellulose Filters and Fluorimetric Detection. Journal of the Brazilian Chemical Society, [s. l.], v. 23, n. 1, p. 142 -147, jan. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-50532012000100020>

MARSOLA, Tatiana; MIYAZAWA, Mário; PAVAN, Marcos A.; CHAVES, Julio Cesar Dias. Avaliação da perda por volatilização de amônia do solo da lavoura cafeeira. In:

SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1, 2000, Poços de Caldas. Anais do Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil. Brasília: Embrapa Café, 2000, p. 1383 - 1385. Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/754>.

ARAUJO, Matheus Antônio. Revisão bibliográfica: avaliação do método de Kjeldahl na determinação de nitrogênio e sua aplicação na análise foliar. 2019. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química Industrial) - Universidade Federal de Uberlândia - Instituto de Química, Uberlândia, p. 19 - 21. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/25454>.

LEWIS PUBLISHERS, INC. Methods of Air Sampling and Analysis. James P. Lodge, Jr. 3. ed, Florida: CRC PRESS, 1989. 784 p., p. 379. Disponível em: ISBN 13 978-0367580230.

PONTES, Fernanda Veronesi Marinho; MONTEIRO, Maria Inês Couto; SILVA, Lilian Irene Dias da; CARNEIRO, Manuel Castro. Método do INDOFENOL para determinação de nitrogênio em amostras de solo. In: JORNADA DA INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 12, 2004, Rio de Janeiro. Anais da Jornada de Iniciação Científica. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004, p. 1 - 2. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/788>.

RAIJ, Bernardo van; ANDRADE, João Carlos de; CANTARELLA, Heitor.; QUAGGIO, José Antônio. Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais. Instituto Agrônômico, Campinas, 285p, p. 270-271, 2001. Disponível em: ISBN 85-85564-05-9.

FERNANDES, Gabriel Martins; BARRETO, Dianda Nunes; BATISTA, Alex Domingues; PETRUCI, João Flávio da Silveira. A fully integrated 3D printed platform for sulfite determination in beverages via gas diffusion membrane extraction and digital video treatment. Food Chemistry, Uberlândia, v. 406, p. 1-3, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135094>

ANEXO I

Código TSL 2561

```
#include <Wire.h>
```

```
#include <Adafruit_Sensor.h>
```

```
#include <Adafruit_TSL2561_U.h>
```

```
/* This driver uses the Adafruit unified sensor library (Adafruit_Sensor),
```

which provides a common 'type' for sensor data and some helper functions.

To use this driver you will also need to download the Adafruit_Sensor library and include it in your libraries folder.

You should also assign a unique ID to this sensor for use with the Adafruit Sensor API so that you can identify this particular sensor in any data logs, etc. To assign a unique ID, simply provide an appropriate value in the constructor below (12345 is used by default in this example).

Connections

=====

Connect SCL to I2C SCL Clock

Connect SDA to I2C SDA Data

Connect VCC/VDD to 3.3V or 5V (depends on sensor's logic level, check the datasheet)

Connect GROUND to common ground

I2C Address

=====

The address will be different depending on whether you leave the ADDR pin floating (addr 0x39), or tie it to ground or vcc.

The default address is 0x39, which assumes the ADDR pin is floating (not connected to anything). If you set the ADDR pin high or low, use TSL2561_ADDR_HIGH (0x49) or TSL2561_ADDR_LOW (0x29) respectively.

History

=====

2013/JAN/31 - First version (KTOWN)

*/

```
Adafruit_TSL2561_Unified tsl = Adafruit_TSL2561_Unified(TSL2561_ADDR_FLOAT,
12345);
```

```
/*
****/
```

```

/*
    Displays some basic information on this sensor from the unified
    sensor API sensor_t type (see Adafruit_Sensor for more information)
*/
/*****
****/

void displaySensorDetails(void)
{
    sensor_t sensor;
    tsl.getSensor(&sensor);

    Serial.println("-----");
    Serial.print ("Sensor:   "); Serial.println(sensor.name);
    Serial.print ("Driver Ver: "); Serial.println(sensor.version);
    Serial.print ("Unique ID: "); Serial.println(sensor.sensor_id);
    Serial.print ("Max Value: "); Serial.print(sensor.max_value); Serial.println(" lux");
    Serial.print ("Min Value: "); Serial.print(sensor.min_value); Serial.println(" lux");
    Serial.print ("Resolution: "); Serial.print(sensor.resolution); Serial.println(" lux");
    Serial.println("-----");
    Serial.println("");
    delay(500);
}

/*****
****/

/*
    Configures the gain and integration time for the TSL2561
*/
/*****
****/

void configureSensor(void)
{

```

```

/* You can also manually set the gain or enable auto-gain support */

// tsl.setGain(TSL2561_GAIN_1X);    /* No gain ... use in bright light to avoid sensor
saturation */

// tsl.setGain(TSL2561_GAIN_16X);    /* 16x gain ... use in low light to boost sensitivity
*/

    tsl.enableAutoRange(true);        /* Auto-gain ... switches automatically between 1x
and 16x */

/* Changing the integration time gives you better sensor resolution (402ms = 16-bit
data) */

    // tsl.setIntegrationTime(TSL2561_INTEGRATIONTIME_13MS);    /* fast but low
resolution */

    // tsl.setIntegrationTime(TSL2561_INTEGRATIONTIME_101MS); /* medium resolution
and speed */

    tsl.setIntegrationTime(TSL2561_INTEGRATIONTIME_402MS);    /* 16-bit data but
slowest conversions */

/* Update these values depending on what you've set above! */

Serial.println("-----");

Serial.print ("Gain:    "); Serial.println("Auto");

Serial.print ("Timing:  "); Serial.println("13 ms");

Serial.println("-----");
}

/*****
****/

/*

Arduino setup function (automatically called at startup)

*/

/*****
****/

void setup(void)
{
    pinMode(13,OUTPUT);

```

```

pinMode(12,OUTPUT);

Serial.begin(9600);

Serial.println("Light Sensor Test"); Serial.println("");

/* Initialise the sensor */

//use tsl.begin() to default to Wire,
//tsl.begin(&Wire2) directs api to use Wire2, etc.
if(!tsl.begin())
{
    /* There was a problem detecting the TSL2561 ... check your connections */
    Serial.print("Ooops, no TSL2561 detected ... Check your wiring or I2C ADDR!");
    while(1);
}

/* Display some basic information on this sensor */
displaySensorDetails();

/* Setup the sensor gain and integration time */
configureSensor();

/* We're ready to go! */
Serial.println("");
}

/*****
*****/

/*
    Arduino loop function, called once 'setup' is complete (your own code
    should go here)
*/

/*****
*****/

void loop(void)
{
    digitalWrite(13,HIGH);

```

```
digitalWrite(12,HIGH);  
//delay(101);  
//digitalWrite(13,HIGH);  
//delay(101);  
/* Get a new sensor event */  
sensors_event_t event;  
tsl.getEvent(&event);  
/* Display the results (light is measured in lux) */  
if (event.light)  
{  
    Serial.print(event.light); Serial.println(" lux");  
}  
else  
{  
    /* If event.light = 0 lux the sensor is probably saturated  
       and no reliable data could be generated! */  
    Serial.println("Sensor overload");  
}  
delay(2000);  
}
```