

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE AGRONOMIA

CLARA LARA SILVA QUEIROZ

**AVALIAÇÃO DO INCREMENTO NOS TEORES DE ARSÊNIO (As) EM SOLOS
COM HISTÓRICO DE USO DE ULEXITA**

Uberlândia

2025

CLARA LARA SILVA QUEIROZ

**AVALIAÇÃO DO INCREMENTO NOS TEORES DE ARSÊNIO (As) EM SOLOS
COM HISTÓRICO DE USO DE ULEXITA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Agronomia, da Universidade
Federal de Uberlândia, como requisito parcial
para obtenção do grau de Agrônoma.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Araújo Hulmann
Batista

Uberlândia

2025

CLARA LARA SILVA QUEIROZ

**AVALIAÇÃO DO INCREMENTO NOS TEORES DE ARSÊNIO (As) EM SOLOS
COM HISTÓRICO DE USO DE ULEXITA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Agronomia, da Universidade
Federal de Uberlândia, como requisito parcial
para obtenção do grau de Agrônoma.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Araújo Hulmann
Batista.

Uberlândia, 5 de maio de 2025.

Banca Examinadora:

Prof^a. Dra. Araújo Hulmann Batista

Orientadora

Prof. Dr. Wedisson Oliveira Santos

Membro da Banca

Msc. Ricardo Ferreira Domingues

Membro da banca

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão a Deus por me guiar ao longo de toda a minha jornada acadêmica. Agradeço também à minha família, em especial à minha mãe, ao meu padrasto e aos meus avós, por sempre estarem ao meu lado e me apoiarem incondicionalmente.

Meu profundo agradecimento à minha professora orientadora, Araújo Hulmann Batista, por acreditar no meu potencial e por sua valiosa orientação durante o desenvolvimento deste trabalho. Também sou grata ao meu grupo de estudos, NEGENS, pelo apoio ao longo da minha trajetória na faculdade.

Agradeço à US Borax e à Rio Tinto pelo financiamento deste estudo e à Universidade Federal de Uberlândia por proporcionar as condições necessárias para a realização desta pesquisa.

Por fim, expresso minha gratidão à banca avaliadora pelo tempo dedicado à análise deste trabalho.

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo determinar o teor pseudototal de arsênio (As) em solos agrícolas com histórico de uso de ulexita na região do Triângulo Mineiro, Estado de Minas Gerais. O histórico de aplicação de ulexita, fertilizante utilizado para o fornecimento de boro às plantas, foi fundamental para a escolha das áreas, assim como a classe do solo (Latossolo) foi a mesma. Para todos os usos do solo uma área referência com vegetação nativa foi selecionada para obtenção dos valores de referência de As dos locais selecionados. As amostras de solos foram coletadas nas profundidades de 0 – 20 e 20 – 40 cm, considerando os seguintes usos: i. Cultivo de grãos (áreas com cultivo de milho irrigado, soja em sequeiro e vegetação nativa); ii. Cultivo de café (uma área cultivada há 10 anos, uma área atualmente em reforma para grãos, além de vegetação nativa); iii. Cultivo de eucalipto (amostras coletadas na linha e entrelinha de dois talhões distintos, bem como em uma área de vegetação nativa). Foram avaliadas estatisticamente a interação entre os diferentes usos do solo dentro de uma mesma área, bem como a interação entre as profundidades dentro de cada área. Os teores pseudototais de arsênio foram determinados pelo método US-EPA 3051, e as análises foram realizadas na Fundação ABC, no estado do Paraná. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) para verificar o efeito dos diferentes usos do solo ($p \leq 0,05$), sendo as médias agrupadas pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$). Os valores de referência de qualidade do solo considerados foram os limites estabelecidos pela resolução COPAM 166 de 2011 que estabelece o valor pseudototal de As de 8 mg/dm³ para o estado de Minas Gerais. A área de cultivo de café e a maioria dos talhões de eucalipto apresentaram valores de referência de qualidade superior ao limite estabelecido pela legislação estadual. No entanto, apesar desses valores elevados, nem todas as áreas cultivadas mostraram diferença significativa em relação à vegetação nativa. Além disso, um dos talhões de eucalipto foi a única área cultivada que não ultrapassou o Valor de Referência de Qualidade (VRQ), registrando um valor inferior ao da área nativa, possivelmente devido à declividade do terreno ou a outros fatores pedológicos. Quando comparadas as profundidades, houve diferença nas amostras da área de cultivo de eucalipto. Os resultados indicam que o uso do solo por cultivos agrícolas pode promover incremento de As, porém, não foi possível comprovar a influência da ulexita como responsável por estes aumentos.

Palavras-Chave: Pseudototal, Uso do Solo, contaminação, valor de referência.

ABSTRACT

The present study aimed to determine the pseudototal content of arsenic (As) in agricultural soils with a history of ulexite use in the region of Triângulo Mineiro, State of Minas Gerais, Brazil. The history of application of ulexite, fertilizer used to supply boron to plants, was fundamental for the choice of areas, as well as the class of soil (Oxisol) was the same. For all uses a reference area with native vegetation was selected to obtain the background values of As from the selected sites. Soil samples were collected at depths of 0 - 20 and 20 - 40 cm, considering the uses as follows: i. Grain cultivation (areas with irrigated corn, soybean in dry land and native vegetation); ii. Coffee cultivation (an area cultivated for 10 years, an area currently under reform for grain, in addition to native vegetation); iii. Eucalyptus cultivation (samples collected in the line and interlace of two distinct plots, as well as in an area of native vegetation). The interaction between different land uses within the same area, as well as the interaction between depths within each area were statistically evaluated. The pseudototal arsenic contents were determined by US-EPA 3051, and the analyses were carried out at the ABC Foundation in the state of Paraná. The data were submitted to analysis of variance (ANOVA) to verify the effect of different land uses ($p < 0.05$), and the averages are grouped by the Scott-Knott test ($p < 0.05$). The soil quality reference values considered were the limits established by COPAM resolution 166 of 2011 that establishes the pseudo-total value of As of 8 mg/dm^3 for the state of Minas Gerais. The coffee growing area and most of the eucalyptus plots presented quality reference values higher than the limit established by state legislation. However, despite these high values, not all cultivated areas showed significant difference in relation to native vegetation. In addition, one of the eucalyptus stands was the only cultivated area that did not exceed the Quality Reference Value (QRV), recording a lower value than the native area, possibly due to the slope of the terrain or other pedological factors. When the depths were compared, there was a difference in the samples of the eucalyptus cultivation area. The results indicate that the use of land for agricultural crops can promote increase in As, however, it was not possible to prove the influence of ulexite as responsible for these increases.

Keywords: Pseudototal, Land Use, contamination, reference value.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVO GERAL.....	10
1.2 JUSTIFICATIVA.....	10
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	11
2.1 Determinação dos teores pseudototais de arsênio.	14
2.2 Análise Estatística.....	15
2.3 Análise de Distanciamento de Valores	16
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
4 CONCLUSÕES	22
5 REFERÊNCIAS	22

1 INTRODUÇÃO

A fertilidade do solo é um fator essencial para garantir altos níveis de produtividade agrícola, especialmente em regiões onde os solos apresentam deficiência natural de nutrientes, como é o caso do Cerrado brasileiro. Para suprir essas deficiências, a aplicação de fertilizantes é uma prática amplamente adotada, visando fornecer elementos essenciais ao crescimento vegetal, como nitrogênio, fósforo, potássio e boro. No entanto, a adição de nutrientes ao solo deve ser realizada de maneira sustentável e segura, considerando a presença de elementos potencialmente tóxicos que podem estar presentes como impurezas em fertilizantes comerciais. Dentre esses elementos, destaca-se o arsênio, um elemento-traço que pode se acumular no solo ao longo do tempo, causando impactos negativos tanto na produtividade agrícola quanto na saúde humana (BOLUDA et al., 2020).

O arsênio é um elemento-traço, ou seja, ocorre naturalmente no solo em concentrações muito baixas, geralmente na faixa de partes por milhão. No entanto, seu incremento devido a atividades antropogênicas, como o uso indiscriminado de fertilizantes e defensivos agrícolas, pode levar à contaminação ambiental e ao comprometimento da segurança alimentar.

A presença de arsênio no solo pode ter origem natural ou ser resultado de atividades humanas. Naturalmente, o elemento pode estar associado à composição mineralógica da rocha matriz do solo, sendo encontrado em minerais como arsenopirita, realgar e orpimento. No entanto, em solos agrícolas, sua presença pode ser potencializada por fontes antrópicas, como fertilizantes boratados, defensivos agrícolas e efluentes industriais. A utilização de fertilizantes boratados representa uma das principais vias de entrada desse elemento nos solos agrícolas, visto que a contaminação existente nas jazidas de formação da ulexita traz esse elemento ao solo no momento da adubação das culturas. Entretanto, as principais fontes comerciais de boro, como a ulexita e o bórax, podem conter impurezas de arsênio, que variam conforme a origem mineral do produto (SALDANHA, 2023).

A associação da Ulexita ($\text{NaCaB}_5\text{O}_6(\text{OH})6.5(\text{H}_2\text{O})$) com o mineral Realgar (As_4S_4) é um ponto de atenção, uma vez que este último possui arsênio em sua composição. Considerando esse fato, a utilização da ulexita como fonte de boro na agricultura pode representar um risco ambiental, gerando contaminação da cadeia alimentar, de solos e de lençóis freáticos.

A legislação brasileira, por meio da Instrução Normativa nº 27 de 2006, permite até 4.000 mg/dm³ de As em fertilizantes boratados, um valor considerado elevado e que pode resultar no acúmulo progressivo do elemento no solo. Estudos apontam que a aplicação de fertilizantes boratados contendo impurezas de arsênio pode levar ao aumento expressivo da concentração

desse elemento em áreas agrícolas, o que gera preocupação quanto à contaminação do meio ambiente e sua entrada na cadeia alimentar (SALDANHA, 2023).

Nos solos brasileiros, a Resolução CONAMA 420/2009 estabelece o valor de referência de prevenção para o arsênio em 15 mg/dm^3 de solo em base seca, sendo que valores superiores a esse podem indicar contaminação. Além disso, o mesmo órgão estipula um nível máximo permitido de 8 mg/dm^3 em solos agrícolas, limite que, quando ultrapassado, exige medidas de remediação para evitar riscos à saúde humana e ao meio ambiente. O acúmulo progressivo de arsênio no solo pode comprometer a produtividade agrícola e afetar negativamente a microbiota do solo, reduzindo a atividade biológica e impactando processos essenciais, como a decomposição da matéria orgânica e a fixação biológica de nitrogênio.

Diante do potencial impacto ambiental do arsênio, torna-se essencial compreender sua dinâmica nos solos agrícolas e buscar estratégias para mitigar sua presença. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo investigar o incremento nos teores totais de arsênio em áreas com histórico de uso de fertilizantes boratados (ulexita) na região do Triângulo Mineiro, Minas Gerais, buscando compreender a influência das práticas agrícolas na dinâmica desse elemento no solo e seus possíveis impactos ao ambiente e à saúde pública.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo proposto com a realização deste trabalho foi responder se o uso de ulexita gera acúmulo de arsênio (As) em solos utilizados para cultivos agrícolas e florestais. Foram selecionados solos com histórico de uso de ulexita, utilizados com cultivo de eucalipto, café, grãos e batata, localizados na região do Triângulo Mineiro, estado de Minas Gerais.

1.2 JUSTIFICATIVA

Devido ao risco à saúde humana e a qualidade ambiental, a investigação sobre os incrementos de arsênio nos solos agrícolas é bastante relevante. Caso os teores de arsênio presentes no solo ultrapassem os limites permitidos pela legislação ambiental vigente, isso é um indicativo de que o uso do solo pode causar aumento nos teores deste elemento traço, tornando-se, assim, um risco à saúde humana. De acordo com o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e o Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM), os limites máximos de arsênio no solo são de $15,0 \text{ mg/dm}^3$ e $8,0 \text{ mg/dm}^3$ para solos agrícolas. Valores acima desses limites podem tornar o ambiente impróprio para a produção de alimentos e colocar em risco a segurança alimentar e a saúde pública.

Nesse contexto, o presente trabalho busca compreender os impactos do uso da ulexita, fonte de boro para as plantas cultivadas, na concentração de As no solo. A pesquisa se propôs a investigar se a aplicação desse insumo pode contribuir para o acréscimo de As além dos níveis naturais já presentes nos solos do Cerrado do Triângulo Mineiro.

Adicionalmente, este estudo visa contribuir com a comunidade científica por meio da geração de dados sobre a interação do As com os solos ricos em óxidos de ferro e alumínio característicos da região.

2 MATERIAL E MÉTODOS

As coletas de solo para a realização deste trabalho foram conduzidas em três áreas distintas, localizadas nos municípios de Uberlândia, Araguari e Nova Ponte, todos situados na região do Triângulo Mineiro, estado de Minas Gerais. Em cada um desses locais, foram amostrados solos sob diferentes usos agrícolas, além das respectivas áreas de reserva das propriedades, com o objetivo de comparar os teores naturais de As com aqueles encontrados em solos utilizados para fins produtivos.

A seleção das áreas seguiu dois critérios principais: a utilização de ulexita como fonte de boro e a presença de solos classificados como Latossolo. As doses de ulexita utilizadas não foram confirmadas pelos produtores, que indicaram que o fertilizante foi aplicado conforme as necessidades de boro para as culturas. Os pontos de coleta foram escolhidos de forma aleatória e exploratória. Ao todo, foram obtidas três amostras compostas por área de uso.

As coletas foram realizadas em duas profundidades, de 0 a 20 cm e de 20 a 40 cm, com o intuito de avaliar a distribuição vertical do As no perfil do solo. A hipótese considerada foi de que, se houvesse acúmulo de As nas camadas mais profundas, isso poderia estar relacionado às características pedológicas locais. Por outro lado, concentrações elevadas na superfície podem indicar contaminação resultante das atividades agrícolas.

A primeira coleta ocorreu na Fazenda Pombo, no município de Uberlândia (Figura 1), onde foram amostradas quatro áreas distintas: uma área de cultivo de grãos em sistema de sequeiro; uma área de cultivo irrigado de grãos, anteriormente utilizada como pastagem (Pivô 17); uma área de cultivo irrigado de grãos em rotação com batata-semente (Pivô 15); e uma área de reserva legal da propriedade. Foram coletadas, nesse local, 24 amostras, sendo 12 em cada profundidade.

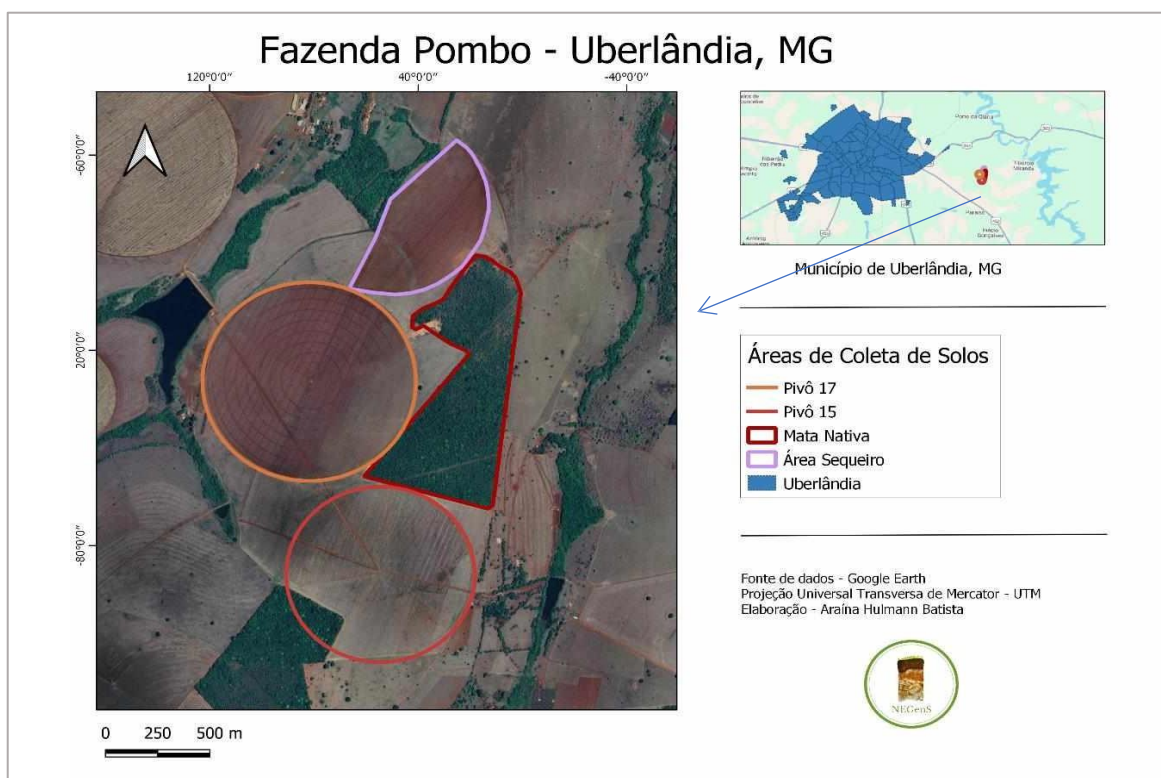


Figura 1: Área de coleta na Fazenda Pombo localizada no município de Uberlândia. Mapa elaborado por Batista, A.H. (2025).

A segunda coleta foi realizada em uma fazenda produtora de café no município de Araguari (Figura 2). As amostragens ocorreram em três áreas: uma com cultivo contínuo de café há dez anos; outra em processo de reforma, anteriormente cultivada com café e destinada ao plantio de grãos; e a terceira, correspondente à área de preservação permanente da propriedade. Nesse local, foram coletadas 18 amostras.

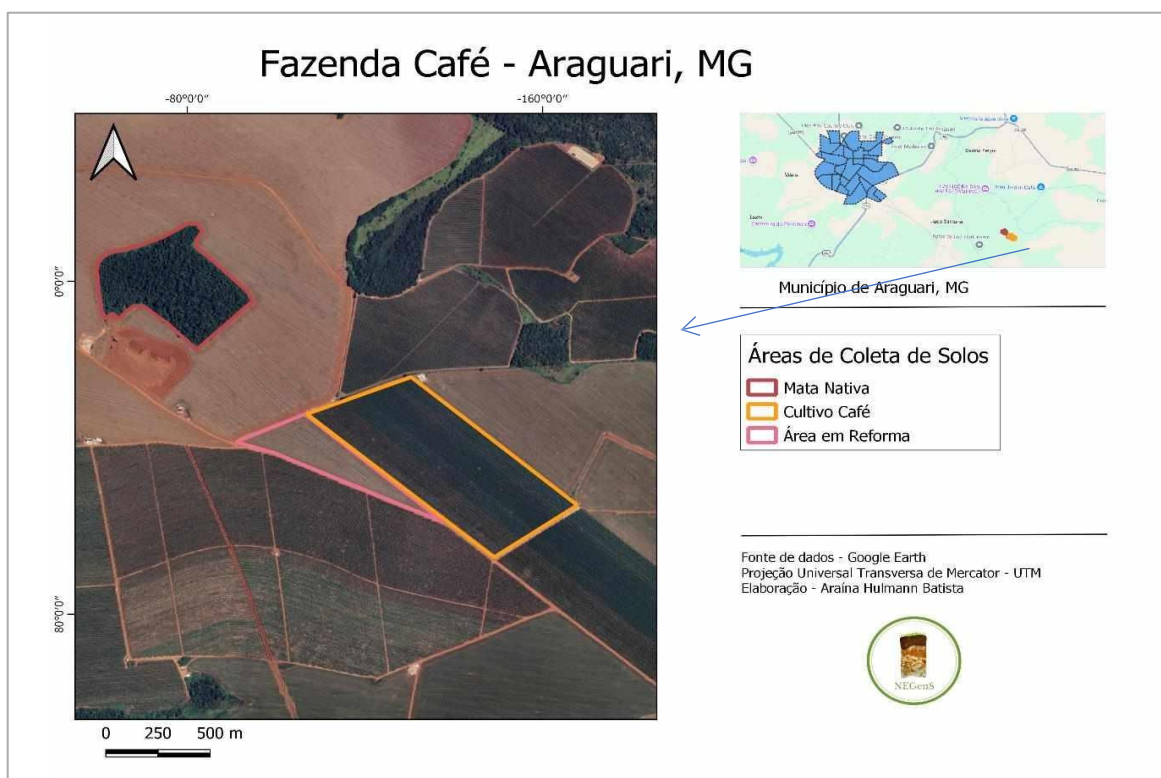


Figura 2 – Área de realização da segunda coleta localizada no município de Araguari. Mapa elaborado por Batista, A. H. (2025).

A última etapa de coleta ocorreu no município de Nova Ponte (Figura 3), em uma propriedade destinada ao cultivo de eucalipto. Foram amostradas três áreas: o Talhão 395, atualmente ocupado com eucalipto, mas que há quatro anos teve cultivo de pinus nas entrelinhas; o Talhão 109, uma área de repovoamento com eucalipto; e a área de reserva legal da propriedade. Nesta propriedade, a metodologia de coleta foi ajustada devido ao histórico de uso do solo. Considerando que a adubação com ulexita foi realizada em linha de plantio e que a área anteriormente recebia cultivo de pinus nas entrelinhas, optou-se por coletar amostras tanto na linha quanto na entrelinha do eucalipto, a fim de comparar os teores de As entre essas duas condições. Ao final, foram coletadas 30 amostras nesse local, totalizando 72 amostras de solo em todo o estudo.

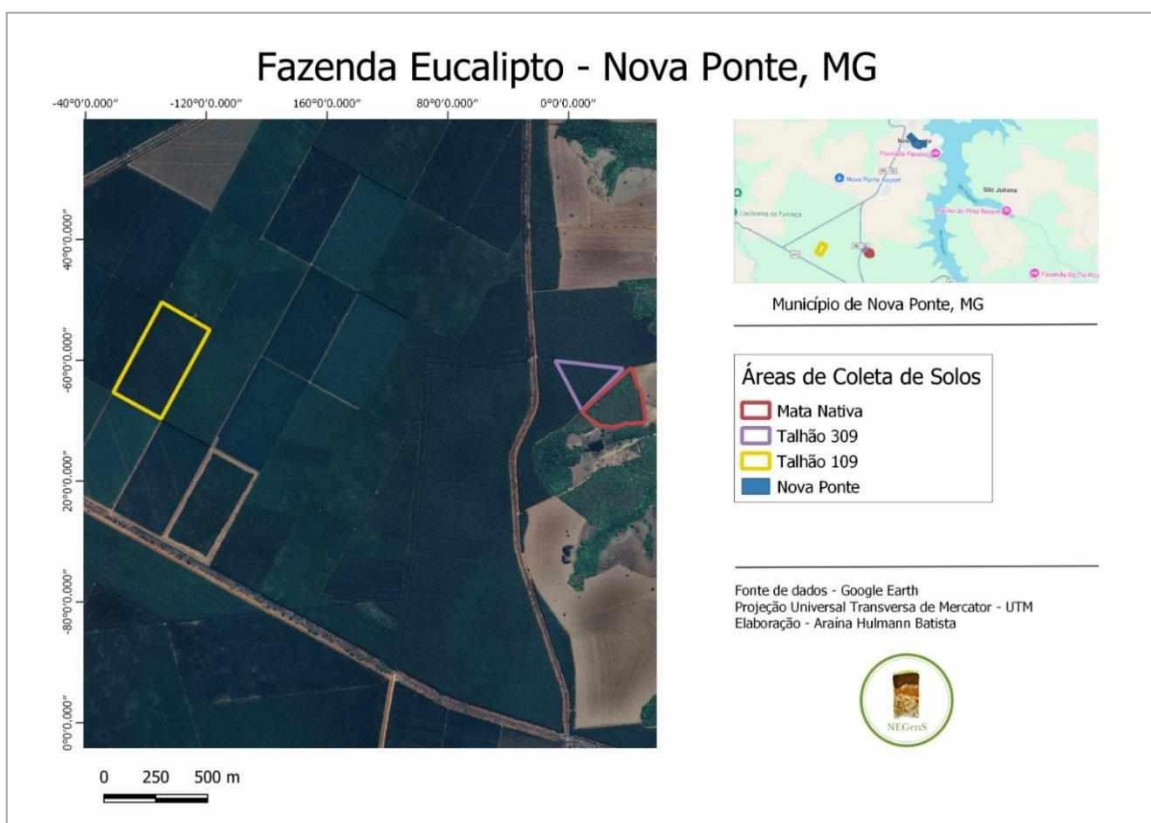


Figura 3 – Área de realização da terceira coleta localizada no município de Nova Ponte. Mapa elaborado por Batista, A.H. (2025).

Depois que as coletas foram realizadas o material foi encaminhado para o Laboratório de Análise de Solo e Tecido Vegetal, da Universidade Federal de Uberlândia, onde foram preparadas, secas ao ar e peneiradas, em uma peneira de 2 mm, e depois foram realizadas análises de rotina do laboratório.

2.1 Determinação do teor pseudototal de arsênio (As)

Após o preparo adequado das amostras de solo, que incluiu a secagem em temperatura ambiente, destorroamento, peneiramento em malha de 2 mm (terra fina seca ao ar – TFSA) e homogeneização, as amostras foram encaminhadas à Fundação ABC, localizada no estado do Paraná, para a determinação do teor pseudototal de As.

A metodologia empregada para a quantificação do As foi a digestão ácida assistida por micro-ondas, conforme o método US-EPA 3051 (USEPA, 2007). Esse método é amplamente utilizado para a extração de elementos-traço em amostras de solo, lodo e resíduos sólidos, permitindo a determinação dos teores pseudototais, ou seja, a fração que pode ser mobilizada por ácidos fortes, sem promover a decomposição completa da matriz silicatada do solo. O procedimento consiste na digestão de 0,5 g da amostra com 10 mL de ácido nítrico concentrado

(HNO₃) em recipiente de Teflon, submetido à radiação de micro-ondas em sistema fechado, sob temperatura e pressão controladas. Após o processo, o extrato obtido é filtrado, diluído e posteriormente analisado por espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES) ou por espectrometria de absorção atômica com geração de hidretos (HG-AAS), técnicas sensíveis e apropriadas para a detecção de As em baixos níveis (KOMAR et al., 2015).

Esse método foi escolhido por apresentar boa reprodutibilidade, segurança no manuseio e eficiência na extração de metais e metalóides em estudos ambientais, sendo amplamente aceito em pesquisas que buscam avaliar o potencial de contaminação e o comportamento geoquímico de elementos como o As em solos com diferentes históricos de uso.

2.2 Análise estatística

Para a análise estatística dos dados referentes aos teores pseudototais de As nos solos, foi utilizado o software Sisvar® (Sistema para Análise de Variância), amplamente empregado em pesquisas agrônomicas. Inicialmente, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), com o objetivo de verificar se existiam diferenças significativas entre os tratamentos, ou seja, entre os diferentes usos do solo e profundidades amostradas. Quando identificada significância estatística pelo teste F a 5% de probabilidade, aplicou-se o teste de Scott-Knott para a comparação das médias.

O teste de Scott-Knott foi escolhido por sua eficiência em agrupar médias de forma hierárquica e não sobreposta, facilitando a interpretação dos resultados ao formar grupos estatisticamente distintos, quando há heterogeneidade entre os tratamentos. A adoção do nível de significância de 5% ($p \leq 0,05$) seguiu o padrão recomendado para trabalhos científicos da área, conferindo rigor estatístico às conclusões do estudo. Esse procedimento permitiu avaliar com segurança a influência do histórico de uso do solo e da profundidade de coleta nos teores de As, além de validar as comparações com as áreas de vegetação nativa.

2.3 Análise comparativa entre o distanciamento de valores

Além da análise estatística dos dados, foi realizada uma avaliação comparativa dos teores pseudototais de As obtidos neste estudo com os valores de referência de qualidade do solo estabelecidos por legislações ambientais vigentes (Resolução CONAMA nº 420, de 2009 e Deliberação Normativa COPAM nº 166, de 2011), tanto em âmbito nacional quanto estadual, bem como com valores médios de fundo reportados na literatura científica. Essa comparação teve como objetivo verificar o distanciamento entre os teores observados e os limites considerados seguros para a qualidade ambiental dos solos.

Os valores utilizados como parâmetros de comparação foram: o valor de fundo médio de As nos solos a nível global, estimado em $1,38 \text{ mg/dm}^3$, conforme descrito por Nogueira et al. (2015 a,b), o valor de referência de qualidade estabelecido pela Resolução CONAMA nº 420, de 2009, que define o limite máximo permitido de As nos solos brasileiros como 15 mg/dm^3 , e o valor estabelecido pela Deliberação Normativa COPAM nº 166, de 2011, que determina o limite de 8 mg/dm^3 para o estado de Minas Gerais.

A comparação com os valores de referência é fundamental para compreender se os teores encontrados podem representar ameaça à saúde humana, à qualidade do solo e aos recursos hídricos associados, especialmente em áreas com histórico de uso agrícola e aplicação de fontes minerais de boro, como a ulexita.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a área de cultivo de grãos, os resultados obtidos não foram significativos em relação ao fator profundidade, demonstrando que, no contexto avaliado, a concentração de As no solo não variou significativamente entre as camadas analisadas. Em contrapartida, observou-se efeito significativo entre os tratamentos aplicados, evidenciando que o manejo adotado nas áreas agrícolas influencia diretamente os teores desse elemento no solo (Figura 4).

De acordo com Nogueira et al. (2015 a,b), a média global dos teores naturais de As nos solos é de aproximadamente $1,38 \text{ mg/dm}^3$, valor que serve como referência para avaliação de contaminações. No presente estudo, observou-se que o fundo natural da região avaliada, com valores próximos a 2 mg/dm^3 , está dentro da faixa de variação esperada para solos do Cerrado, sendo compatível com os dados apresentados por esses autores.

As áreas cultivadas sob sistema de irrigação por pivô central (Pivô 17) e em sequeiro apresentaram diferenças estatisticamente significativas em relação à área de reserva florestal, demonstrando acúmulo de As em decorrência da atividade agrícola. Embora não seja possível afirmar com segurança que o incremento observado seja exclusivamente decorrente da aplicação de ulexita como fonte de boro, devido à multiplicidade de fatores ambientais e edáficos envolvidos, os resultados apontam para uma tendência de aumento nos teores de As em áreas cultivadas, o que demanda atenção quanto ao uso contínuo desse insumo e seus impactos potenciais à saúde do solo e à cadeia alimentar (ROSENDO, et al., 2024).

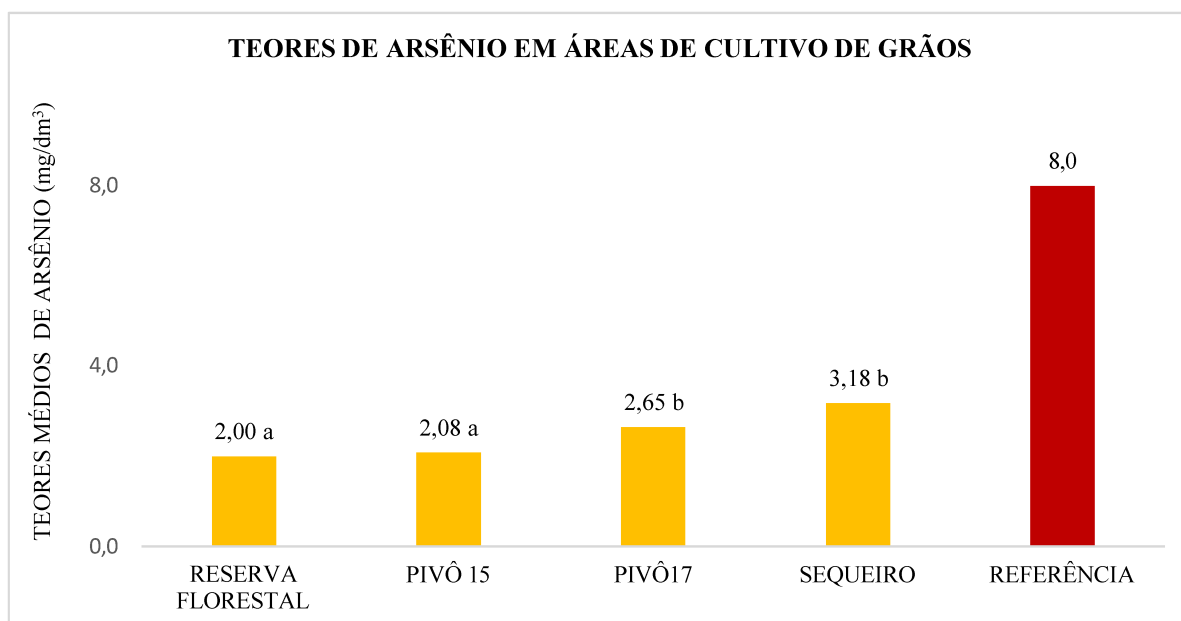


Figura 4. Teores pseudototais de As, obtidos por digestão ácida (EPA3051) em áreas de cultivo de grãos com histórico de uso de ulexita.

*Referência - valor de referência de qualidade de solos para o estado de Minas Gerais, segundo Resolução COPAM 166. Letras minúsculas distintas diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

Em contraste, a área sob Pivô 15 não apresentou diferenças significativas quando comparada à área de vegetação nativa. Esse resultado pode estar associado às particularidades do solo local, tais como menor tempo de cultivo, pH menor e maior teor de óxidos de ferro. Solos altamente intemperizados do Cerrado, ricos em óxidos de ferro e alumínio, possuem elevada capacidade de adsorção de elementos traço, como o As, o que reduz sua mobilidade e biodisponibilidade. Esse comportamento é semelhante ao do fósforo (P), elemento com o qual o As compete por sítios de adsorção nos minerais oxídicos da fração argila dos solos (PINTO et al, 2013).

Em ambientes com alta concentração de óxidos, o As tende a se ligar fortemente aos colóides minerais, dificultando sua extração por métodos convencionais, o que pode levar à subestimativa dos teores presentes. Tal característica ressalta a importância de considerar os atributos químicos e mineralógicos do solo na interpretação dos dados analíticos e na avaliação do risco ambiental. Ressalta-se que o método adotado no presente estudo, solubiliza a matriz sólida do tamanho argila, especialmente os minerais oxídicos. Partículas de minerais primários em tamanho areia, como quartzo e feldspato, resistem ao método e são consideradas como fase residual do método de extração.

Dessa forma, os resultados indicam que a atividade agrícola, embora essencial para o desenvolvimento econômico e social, deve ser conduzida com critérios técnicos e

monitoramento ambiental contínuo, especialmente quanto ao uso de fontes de nutrientes que possam conter elementos potencialmente tóxicos. Aqui nenhum resultado ultrapassou os limites estabelecidos pelo estado de Minas Gerais.

Para a área de cultivo de café, os resultados do teste de variância (ANOVA) foram semelhantes aos obtidos na área de cultivo de grãos, apresentando significância estatística apenas entre os tratamentos, sem interação significativa entre profundidades (Figura 5). Observou-se que os teores de As na área de reserva florestal foram bastante próximos aos observados na área de cultivo de grãos. Esses valores mantêm-se próximos à média mundial de As nos solos, estimada em $1,38 \text{ mg/dm}^3$ (Nogueira et al., 2015 a,b), o que reforça a hipótese de que a região apresenta um fundo natural de As em torno de 2 mg/dm^3 .

No entanto, nesta etapa do estudo, foram avaliadas apenas duas áreas cultivadas além da reserva florestal. Dentre essas, apenas uma delas apresentou diferença estatística significativa levando em conta o teste de Skott-Knott em relação à área de vegetação nativa. A área que não apresentou diferença estatística encontrava-se em processo de reforma, após aproximadamente dez anos de cultivo de café, estava sendo preparada para a implantação de grãos, tendo passado por práticas intensivas de revolvimento do solo, como aração e gradagem.

O revolvimento intenso do solo favorece o aumento da superfície de contato entre os colóides do solo e os elementos traço, como o As. Esse processo aumenta o número de sítios de adsorção, principalmente em solos ricos em óxidos de ferro e alumínio, comuns no Cerrado, o que reduz a mobilidade do As e sua detecção em análises convencionais. Assim, práticas como a aração e a gradagem podem atenuar temporariamente os teores disponíveis de As ao promovê-lo à forma adsorvida, menos biodisponível.

Por outro lado, a área onde o cultivo de café ainda estava em atividade contínua apresentou diferença estatística significativa em relação à reserva florestal, com teores de As superiores ao limite permitido pela legislação ambiental do Estado de Minas Gerais. Esse achado sugere que as práticas agrícolas empregadas podem estar contribuindo para o acúmulo de As no solo, sobretudo em sistemas de produção contínua e sem manejo adequado.

É importante destacar que áreas que utilizam fontes de boro não processadas, como a ulexita, devem ser monitoradas com maior rigor, dada a possibilidade de contaminação com elementos traço. Estudos apontam que o monitoramento constante dos teores de As no solo é essencial para prever e mitigar os impactos ambientais de longo prazo, garantindo a sustentabilidade do sistema produtivo (BRUNS et al., 2019).

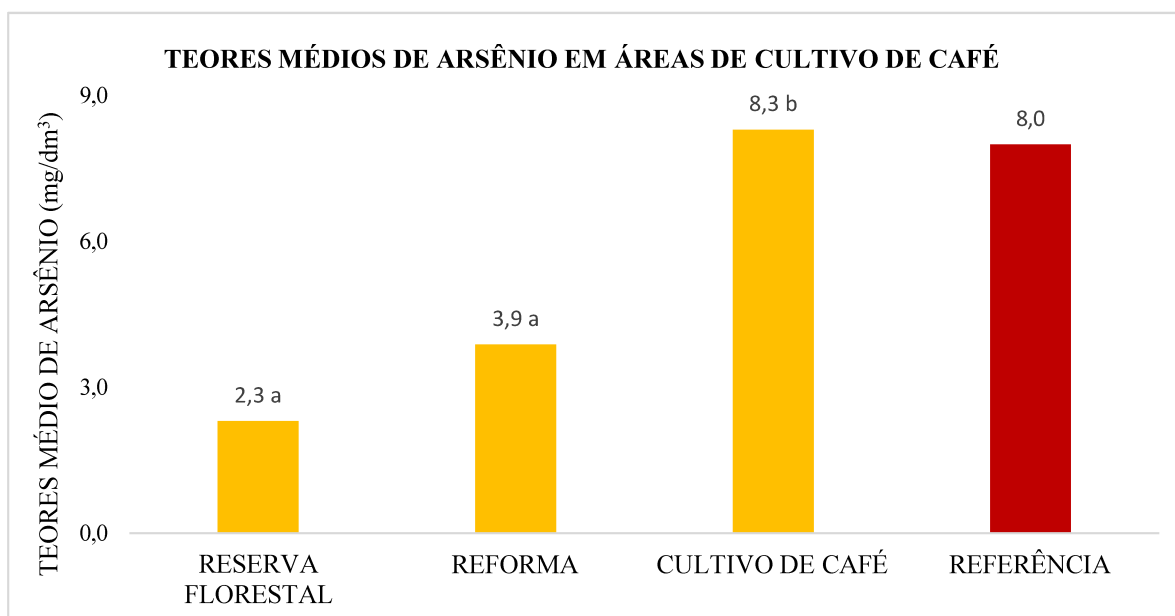


Figura 5. Teores pseudototais de As, obtidos por digestão ácida (EPA3051) em áreas de cultivo de café, área de reforma com anterior cultivo de café e área de reserva florestal.

*Referência - valor de referência de qualidade de solos para o estado de Minas Gerais, segundo Resolução COPAM 166. Letras minúsculas distintas diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

Por fim, a última área analisada foi a de cultivo de eucalipto. Diferentemente das demais áreas avaliadas, o teste de variância (ANOVA) revelou significância estatística tanto entre os tratamentos quanto entre as profundidades amostradas (Figura 6).

Ao analisar os tratamentos por meio do teste de agrupamento de Scott-Knott, observou-se que todas as áreas apresentaram médias de As superiores ao limite estabelecido pela legislação vigente do Estado de Minas Gerais, com exceção do talhão de eucalipto "395 linha", cuja média foi de 7,48 mg/dm³, ainda que muito próxima do valor-limite.

Considerando o fundo natural da região, previamente discutido como sendo de aproximadamente 2 mg/dm³ (Nogueira et al., 2015), observa-se que a área de reserva do cultivo de eucalipto apresentou valor significativamente superior, com uma média geral de 9,53 mg/dm³. Este valor é substancialmente elevado para a região e supera inclusive as médias observadas em alguns dos próprios talhões cultivados, como os talhões "395 linha" e "entrelinha".

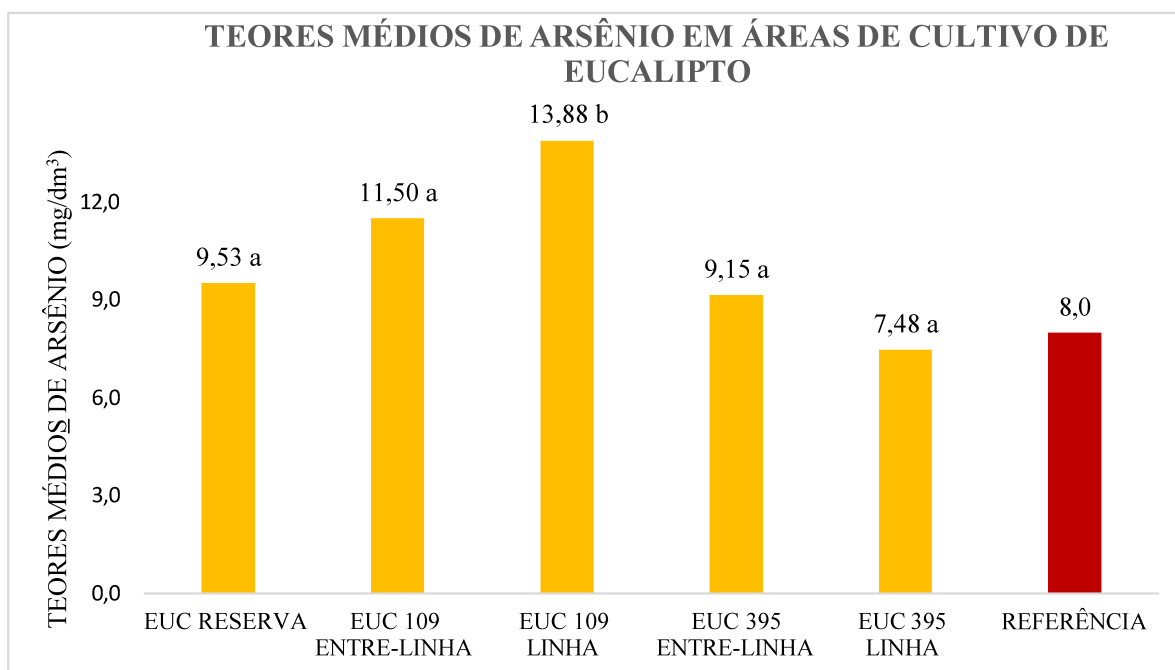


Figura 6. Teores pseudototais de As, obtidos por digestão ácida (EPA3051) em áreas de cultivo de Eucalipto e área de reserva florestal. *Referência - valor de referência de qualidade de solos para o estado de Minas Gerais, segundo Resolução COPAM 166. Letras minúsculas distintas diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

Durante a coleta de dados, constatou-se que a área de reserva florestal está localizada em uma posição mais baixa no relevo, em meio a um declive. Para comprovar essa hipótese, foi elaborado um gráfico de declividade com o auxílio do Google Earth. A análise revelou que o talhão "395 linha" se encontra a uma altitude de 986 metros, enquanto a área de reserva está situada a 966 metros, o que favorece o escoamento superficial descendente. Essa diferença altimétrica pode justificar o acúmulo de elementos traço, como o As, na parte mais baixa do relevo, o que explicaria os maiores teores observados na área de reserva em comparação a alguns talhões cultivados.

Adicionalmente, o único talhão que apresentou diferença estatística significativa em relação à área de reserva, conforme o teste de Scott-Knott, foi o talhão "109 linha", com uma média de 13,88 mg/dm³, valor que se destacou como o maior encontrado em todo o estudo.

É importante ressaltar que as práticas agrícolas, incluindo o uso de insumos, podem contribuir significativamente para o aumento dos níveis de As nos solos do Triângulo Mineiro. O uso intensivo de fertilizantes pode incrementar e alterar a mobilidade de elementos traço no solo, favorecendo sua redistribuição e, em certos casos, seu acúmulo em camadas superficiais

Em relação à profundidade, a área de cultivo de eucalipto apresentou diferença estatística significativa entre as camadas 0–20 cm e 20–40 cm, sendo que a maior concentração de As foi observada na camada superficial (0–20 cm) (Figura 7). Esse resultado reforça a hipótese de que as atividades agrícolas têm contribuído para o acréscimo de As nos solos, uma vez que o incremento se apresenta em superfície. Concentrações elevadas em camadas mais profundas são atribuídas às características pedogenéticas, como a presença de minerais naturais ou processos de intemperismo, e não às fontes externas recentes.

A predominância de As na superfície pode estar associada, entre outros fatores, à prática de adubação localizada em sulco de plantio, comum no cultivo de eucalipto. Essa técnica concentra os insumos químicos em faixas específicas do solo, especialmente na camada mais superficial, o que favorece o acúmulo de elementos traço como o As, principalmente quando associados a fontes de boro ou outros fertilizantes não processados.

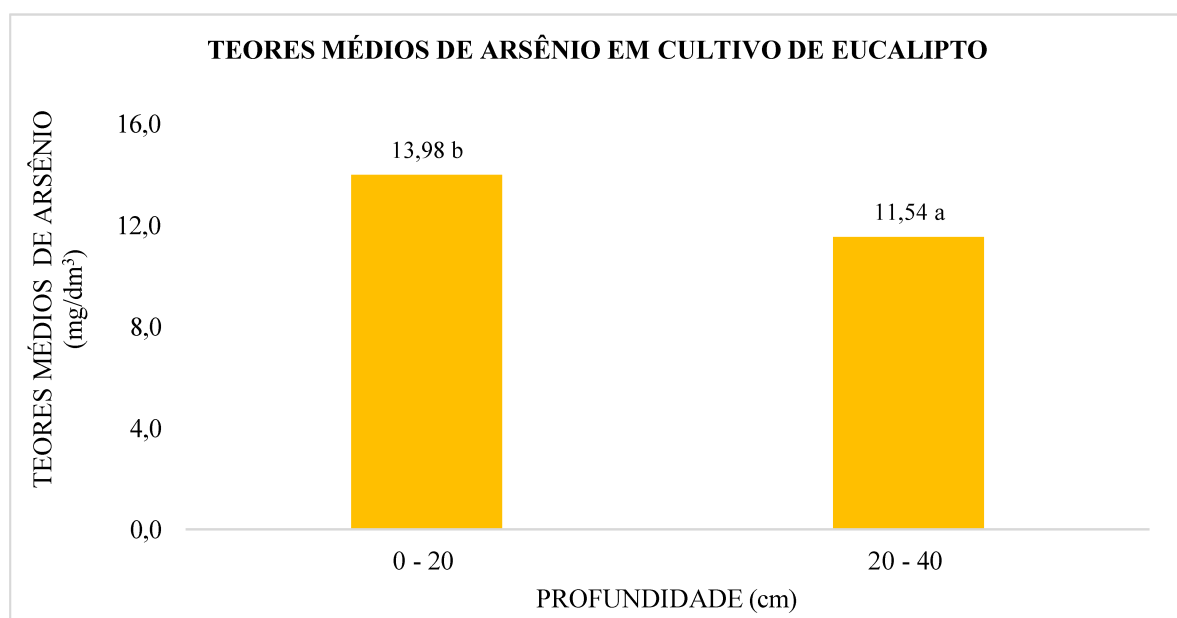


Figura 7. Teores pseudototais de As, obtidos por digestão ácida (EPA3051) em áreas de cultivo de Eucalipto em duas profundidades. *Referência - valor de referência de qualidade de solos para o estado de Minas Gerais, segundo Resolução COPAM 166. Letras minúsculas distintas diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

Outro fator que pode justificar os teores superficiais de As está relacionado ao balanço de absorção e exportação desse elemento pelas plantas de eucalipto. Assim, como o elemento não

é eficientemente exportado pelas plantas, permanece adsorvido nos colóides do solo, aumentando seu teor com o tempo. O incremento de As é esperado ao longo dos anos de cultivo, uma vez que ele é um elemento de baixa mobilidade e que faz ligações químicas muito fortes com os colóides do solo.

4 CONCLUSÕES

Os resultados apontam que o uso do solo para atividades agrícolas e florestais contribuiu para o aumento dos teores de arsênio (As) nas áreas avaliadas. No entanto, não foi possível atribuir esse incremento especificamente ao uso de ulexita, uma vez que o insumo não foi isolado de outros fatores que também podem influenciar os atributos do solo. Investigações adicionais, conduzidas em condições controladas e com metodologias específicas, são recomendadas para identificar com maior precisão a principal fonte responsável pelo aumento dos teores de As nas áreas estudadas.

5 REFERÊNCIAS

- BOLUDA, R. et al. Soil pollution in agricultural areas of European Mediterranean Region: trace elements, pesticides and fertilizers. *Science of the Total Environment*, v. 738, p. 140365, 2020. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721051810>
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). *Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009*. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e dá outras providências. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, 30 dez. 2009. <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2017/09/resolucao-conama-420-2009-gerenciamento-de-acrs.pdf>
- BRUNS, R. E.; ABREU, M. M.; CAMPOS, T. M. R.; BIONDI, C. M.; MOREIRA, J.C. Efeitos tóxicos de arsênio em *Eisenia andrei* em exposição a solos do entorno de minerações de ouro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 43, e0180171, 2019.
- COSTA, B. E. S.; COELHO, L. M.; COELHO, N. M. M. Especiação de arsênio inorgânico em amostras de arroz, empregando extração por ponto nuvem e detecção por ETAAS. In: 39ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química, 2016, Goiânia.
- DANI, ULHOA. Quando, como e por que o arsênio acumula no organismo e causa doenças e morte. 2009. Disponível em: < <http://alertaparacatu.blogspot.com.br./2009/07/quando-como-e-por-que-o-arsenioacumula.html> > Acessado em 26 de Jan. 2025.
- MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM). *Deliberação Normativa nº 166, de 29 de junho de 2011*. Altera o Anexo I da Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº 2, de 6 de setembro de 2010, estabelecendo os Valores de Referência de Qualidade dos Solos. *Diário do Executivo – Minas Gerais*, Belo Horizonte, 27 jul. 2011. <https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=14670>

NOGUEIRA, T. A. R. et al. Teores naturais e valor de referência de qualidade para arsênio em solos do Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 35., 2015, Natal. *Anais...* Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015b. - <https://eventossolos.org.br/cbcs2013/anais/arquivos/1913.pdf>

PINTO, F. A. et al. Sorção e dessorção de fósforo em solos de Cerrado brasileiro como suporte para o manejo da adubação fosfatada. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 37, n. 6, p. 521-530, 2013.

ROSENDI, Geovanna Beatriz Oliveira. Efeitos da exposição ao arsênio, chumbo, mercúrio e cádmio no metabolismo lipídico e glicêmico. Orientadora: Dra. Lúcia de Fátima Campos Pedrosa. 2024. 100f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Saúde) - Centro de Ciências da Saúde, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2024.

SALDANHA, E. Qual a quantidade de arsênio presente nos fertilizantes que contêm boro? *U.S. Borax*, 30 ago. 2023. Disponível em: <https://www.borax.com/>. Acesso em: 15 set. 2024.

U.S. BORAX. Teor de arsênio dos fertilizantes de micronutrientes. Disponível em: <https://www.borax.com/>. Acesso em: 20 out. 2024. <https://agricultura-brasil.borax.com/resources/infographics/arsenic-micronutrient-fertilizers>

USEPA – United States Environmental Protection Agency. *Method 3051A: Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils*. Revision 1. Washington, DC, 2007. - <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/3051a.pdf>