

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

**O USO DE GAMAESPECTROMETRIA COMBINADA COM ANÁLISES DE SOLO
PARA AVALIAR O IMPACTO DA AGRICULTURA INTENSIVA EM ÁREA ÚMIDA
ISOLADA**

Isabella Cristina Abelar

Prof^ª.Dr^ª. Vânia Silvia Rosolen

Rio Claro (SP)

2026

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

ISABELLA CRISTINA ABELAR

O USO DE GAMAESPECTROMETRIA COMBINADA COM
ANÁLISES DE SOLO PARA AVALIAR O IMPACTO DA
AGRICULTURA INTENSIVA EM ÁREA ÚMIDA ISOLADA

Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para
obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Rio Claro - SP

2026

A141u

Abelar, Isabella Cristina

O uso de gamaespectrometria combinada com análises de solo para avaliar o impacto da agricultura intensiva em área úmida isolada / Isabella Cristina Abelar. -- Rio Claro, 2026

41 p. : tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientadora: Vânia Silvia Rosolen

1. Impacto ambiental. 2. Sustentabilidade. 3. Manejo do solo. 4. Fertilizante. I. Título.

ISABELLA CRISTINA ABELAR

O USO DE GAMAESPECTROMETRIA COMBINADA COM
ANÁLISES DE SOLO PARA AVALIAR O IMPACTO DA
AGRICULTURA INTENSIVA EM ÁREA ÚMIDA ISOLADA

Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para
obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Comissão Examinadora

Profa. Dra. Vania Silvia Rosolen (orientador)

Prof. Dr. Cesar Augusto Moreira

Prof. Dr. Marcus Cesar Avezum Alves de Castro

Rio Claro, 22 de junho de 2026.

Assinatura do(a) aluno(a)



assinatura do(a) orientador(a)

Dedico este trabalho a ...

À única pessoa que será capaz de estar comigo do começo ao literal fim de minha jornada: a mim mesma. Do primeiro batimento cardíaco à última célula viva restante. Pequena Isabella, você sente orgulho de mim, tanto quanto sinto sua falta?

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq/ PIBIC – Brasil. Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de Iniciação Científica (PIBIC) (Processo nº106909/2026-6), e à Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – Unesp, pelo suporte institucional. Agradeço à minha orientadora Prof^a.Dr^a. Vânia Silvia Rosolen por todo suporte, auxílio e orientação no desenvolvimento do presente trabalho e à banca examinadora pelo comprometimento e atenção. Agradeço ao Prof. Dr. José Silvio Govone por me auxiliar em parte do desenvolvimento prático do trabalho, através da base teórica e aplicação estatística dos dados utilizados. Agradeço ao Prof. Dr. Dionísio Uendro Carlos e a doutoranda Ms. Beatriz Leonardo Silva pelo tratamento dos dados geofísicos envolvendo as análises de gamaespectrometria. Agradeço à minha família, especialmente meus pais, por sempre me apoiarem de todas as maneiras possíveis, me concederem todo o suporte financeiro necessário e por sempre me motivarem a seguir em frente. Agradeço a todos os docentes e meus colegas de graduação que passaram por minha vida e são parte de todo o repertório profissional e pessoal que construí para além da sala de aula. Agradeço à Unesp e ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas – IGCE por possibilitarem que toda a minha jornada acadêmica acontecesse e que este trabalho fosse desenvolvido. Meus mais sinceros agradecimentos a todas as pessoas e instituições que me trouxeram até este momento ajudaram a construir a pessoa que sou hoje.

RESUMO

A cana-de-açúcar é a segunda commodity comercializada pelo Brasil, atrás apenas da soja. Por essa razão existe uma crescente expansão das fronteiras agrícolas para o setor canavieiro especialmente no Estado de São Paulo, com setor agrícola voltado para o cultivo e processamento da cana-de-açúcar. Nesse contexto muitos ecossistemas são constantemente afetados direta e indiretamente, principalmente pela intensificação do uso de fertilizantes no cultivo da cana. Dentre os ecossistemas mais afetados pelos fertilizantes da agricultura intensiva, estão as áreas úmidas, regiões periódicas ou permanentemente alagadas que, apesar de sua importância na provisão de serviços ecossistêmicos, carecem de políticas públicas do âmbito ambiental. Sob essa ótica o presente trabalho fez uso do método geofísico da gamaespectrometria, associada a coletas de amostras de solo em transecto, de uma área úmida localizada no município de Piracicaba- SP, e posteriormente analisou o teor do carbono total, (CT), nitrogênio total (NT) e os isótopos ^{15}N e ^{13}C como traçadores para diferenciação do nitrogênio orgânico do nitrogênio proveniente dos fertilizantes, que indicaram a baixa retenção da ureia proveniente do NPK na área úmida. As amostras foram submetidas a análises de fluorescência de raios X, complexo sortivo e granulometria, que indicaram a migração de potássio, cloro e fósforo dos fertilizantes para o interior da área úmida, que por apresentar solo argiloso promove a retenção e incorporação de parte dos nutrientes fertilizantes nas reações de troca catiônica. As análises de solo juntamente com a aplicação de técnicas estatísticas como a regressão linear e análise de componentes principais, destacaram o papel do fertilizante agrícola como agente de desequilíbrio biogeoquímico do solo, uma clara evidência de insustentabilidade do atual modelo de manejo de solo agrícola.

Palavras-chave: impacto ambiental; sustentabilidade; manejo do solo; fertilizante.

ABSTRACT

Sugar cane is the second largest commodity traded by Brazil, trailing only soy. For this reason, there is a growing expansion of agricultural frontiers for the sugarcane sector, especially in the State of São Paulo, which features an agricultural sector focused on the cultivation and processing of sugarcane. In this context, many ecosystems are constantly affected both directly and indirectly, mainly due to the intensification of fertilizer use in sugarcane cultivation. Among the ecosystems most affected by fertilizers from intensive agriculture are wetlands—periodically or permanently flooded regions that, despite their importance in providing ecosystem services, lack public environmental policies. From this perspective, the present study utilized the geophysical method of gamma-ray spectrometry, associated with soil sample collection along a transect in a wetland located in the municipality of Piracicaba, SP. Subsequently, the content of total carbon (TC), total nitrogen (TN), and the isotopes ^{15}N and ^{13}C were analyzed as tracers to differentiate organic nitrogen from fertilizer-derived nitrogen, which indicated a low retention of urea from NPK in the wetland area. The samples were subjected to X-ray fluorescence, sorption complex, and grain size analyses, which indicated the migration of potassium, chlorine, and phosphorus from fertilizers into the wetland. Due to its clayey soil, the wetland promotes the retention and incorporation of part of these fertilizer nutrients through cation exchange reactions. The soil analyses, along with the application of statistical techniques such as linear regression and principal component analysis (PCA), highlighted the role of agricultural fertilizer as an agent of biogeochemical imbalance in the soil—clear evidence of the unsustainability of the current agricultural soil management model.

Keywords: environmental impact; sustainability; soil management; fertilizer.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Metodologias de análise dos parâmetros do complexo sortivo	16
Tabela 2- Percentual de Carbono Total (CT%), Nitrogênio Total (NT%) e diferenças relativas de razão isotópica ($\delta^{15}\text{N}$ e $\delta^{13}\text{C}$ - ‰).....	22
Tabela 3- Residuais e Coeficientes da regressão linear das variáveis CT (Carbono Total) e NT (Nitrogênio Total)	23
Tabela 4 - Residuais e Coeficientes da regressão linear das variáveis NT e $\delta^{15}\text{N}$	24
Tabela 5 - Residuais e Coeficientes da regressão linear das variáveis CT e $\delta^{13}\text{C}$	25
Tabela 6- Principais componentes detectados na fluorescência de cátions (ppm)	27
Tabela 7– Valores obtidos da regressão linear entre as variáveis K_2O e Cl	28
Tabela 8- Complexo sortivo	30
Tabela 9– Frações granulométricas e classificação textural das amostras	31
Tabela 10 – Percentual de variância explicada de cada variável nos componentes/dimensões principais	32

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Localização da área úmida isolada, transecto, pontos de coleta de amostras e o entorno convertido em plantio intensivo de cana-de-açúcar.....	13
Figura 2- Pontos de medição	14
Figura 3- Tubos onde as alíquotas são armazenadas (à esquerda) e emissor de raios-X (à direita)	15
Figura 4- Assinatura do urânio (U^{238})	19
Figura 5- Assinatura do tório (Th^{232})	19
Figura 6- Assinatura do potássio (K^{40})	20
Figura 7- Dispersão das variáveis CT (Carbono Total) e NT (Nitrogênio Total).....	24
Figura 8- Dispersão das variáveis NT e $\delta^{15}N$	25
Figura 9- Dispersão das variáveis CT e $\delta^{13}C$	26
Figura 10– Dispersão das variáveis K_2O e Cl	28
Figura 11– Diagrama dos componentes principais das variáveis de XRF e Complexo Sortivo	32

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	7
1.1	Objetivo geral	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	A dinâmica dos fertilizantes relacionada com o setor agrícola	9
2.2	Áreas úmidas	10
2.3	A gamaespectrometria para avaliar impactos do uso de fertilizantes no solo ...	10
3	MATERIAIS E MÉTODOS	12
3.1	Área de estudo	12
3.2	Gamaespectrometria	13
3.3	Determinação do teor de Carbono Total (CT), Nitrogênio Total (NT) e dos isótopos naturais estáveis	14
3.4	Análise química total por Fluorescência de Raios-X (XRF).....	15
3.5	Análise de complexo sortivo do solo.....	15
3.6	Ensaio de granulometria	16
3.7	Tratamento Estatístico: análise de componentes principais (PCA).....	16
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
4.1	Gamaespectrometria	18
4.2	Comportamento do CT, NT e isótopos estáveis	20
4.3	Fluorescência de Raios-X (XRF)	26
4.4	Complexo sortivo	28
4.5	Ensaio de granulometria.....	30
4.6	Análise de Componentes Principais (PCA).....	31
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
	REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

As áreas úmidas geograficamente isoladas são ecossistemas que ocupam pequenas áreas (geralmente < 10 ha) caracterizados por uma área alagadiça, responsável por prover serviços como recarga de aquíferos, manutenção da ciclagem de nutrientes e biodiversidade e regulação microclimática (Junk et. al.,2011). A Convenção de Ramsar (1971) foi uma das primeiras iniciativas intergovernamentais na articulação de ações e políticas nacionais e internacionais para o mapeamento e a conservação, bem como o uso racional das áreas úmidas (MMA). No entanto, as áreas úmidas permanecem, de modo geral, à margem de políticas públicas ambientais, fator que as torna um dos mais vulneráveis alvos da conversão de uso da terra, especialmente o uso agrícola. Técnicas geofísicas como a gamaespectrometria têm sido amplamente aplicadas no estudo dos impactos da agricultura intensiva no solo, por possibilitarem a identificação da presença de contaminantes oriundos da fertilização, uma das principais ações de impacto ambiental. A gamaespectrometria é um método que permite e proporciona análises geofísicas de solo, e tem como assinatura sua alta facilidade de manejo, podendo ser aplicada in situ, baixo custo relativo, de aquisição e execução, e seu caráter não invasivo para o ecossistema objeto de estudo (Viscarra Rossel et al., 2010; Reinhardt & Herrmann, 2018). Por essas razões, a espectrometria de raios gama é um método geofísico de quantificação de elementos radionuclídeos, como o Urânio, Potássio e Tório, adequada para o contexto do presente trabalho. Os elementos anteriormente mencionados serão avaliados em termos de concentração no solo, uma vez que são amplamente aplicados como fertilizantes agrícolas, e no contexto do referido trabalho, o fertilizante utilizado é do tipo NPK, caracterizado pela forte presença de ureia em sua composição. A área de estudo deste projeto, está localizada no município de Piracicaba- SP, na sub-bacia do rio Piracicaba, consiste numa área úmida geograficamente isolada, inserida em uma região de uso do solo para fins de cultivo de cana-de-açúcar. Segundo a classificação de Köppen, Piracicaba possui clima do tipo Mesotérmico Úmido Subtropical (Cwa), caracterizado pela presença de duas estações bem definidas, sendo uma delas um verão quente e chuvoso e, outra sendo um inverno seco e ameno. Possui uma alta predominância de latossolos vermelho e roxo, tipicamente presentes em regiões de clima tropical, que, juntamente com o clima, torna a área de estudo propícia para o cultivo de cana. Sendo uma das mais importantes commodities a ser cultivada no Brasil desde o século XVI, especialmente no estado de São Paulo (IBGE, 2023), a cana-de-açúcar tem demandado, década após década, toneladas de fertilizantes com o objetivo de aumentar a produtividade do setor canavieiro. O uso recorrente destes insumos agrícolas tem sido responsável pela

degradação física, e biogeoquímica do solo, com desestruturação do horizonte pedológico, diminuição da fixação de carbono, perda de nutrientes, e, como se pretende evidenciar por meio do presente trabalho, aumento na concentração de radionuclídeos (Urânio, Tório e Potássio). Por estar inserida nas proximidades de uma área úmida, a fronteira agrícola da cana-de açúcar, passa a exercer uma influência altamente danosa a esse pequeno ecossistema, que, como evidenciado pelos estudos de Diegues (1990), tem sua disponibilidade hídrica e ciclagem de nutrientes alterada, com aumento do potencial de entrada de componentes tóxicos e desequilíbrio de fauna e flora. Nesse sentido, o estudo do efeito que a intensa fertilização para fins agrícolas exerce sobre as áreas úmidas, através de técnicas de fácil manuseio, baixo custo e mínima intervenção no meio, possui um papel fundamental para a compreensão acerca da importância das áreas úmidas enquanto ecossistemas cruciais para a manutenção de serviços ecossistêmicos, e dos variados efeitos ambientais adversos promovidos pela conversão de uso da terra.

1.1 Objetivo geral

O objetivo deste estudo é avaliar os impactos potenciais relacionados com a elevada concentração de nutrientes provenientes de fertilizantes no solo agrícola e no interior de uma área úmida isolada, através das assinaturas radioativas de Urânio (U^{238}), Tório (Th^{232}) e Potássio (K^{40}) obtidas por gamaespectrometria, juntamente com análises de propriedades físico-químicas das amostras de solo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A dinâmica dos fertilizantes relacionada com o setor agrícola

A cana-de-açúcar é a segunda commodity comercializada pelo Brasil, com o Estado de São Paulo, uma referência tanto na extensão territorial plantada quanto no volume comercializado, com produção de mais de 430 milhões de toneladas em uma área total estimada em mais de 5 milhões de hectares apenas no ano de 2023 (IBGE, 2023). O cultivo foi estimulado inicialmente pelo programa governamental Proálcool que na década de 1970 buscava substituir parcialmente os combustíveis fósseis inflacionados no comércio internacional e, mais recentemente, a produção do etanol como biocombustível para minimizar as emissões de gases de efeito estufa resultantes da queima de combustíveis fósseis.

O interesse pelos produtos oriundos da cana-de-açúcar no mercado nacional e internacional resultou na intensificação da demanda por fertilizantes, com o Brasil como 4º maior consumidor do mundo. Segundo a Agência Nacional para Difusão de Adubos (ANDA), no ano de 2022, cerca de 34 milhões de toneladas de fertilizante intermediário e complexo NPK foram importados, enquanto em 2024, de acordo com a atualização mais recente da agência, a quantidade de produto em toneladas foi de cerca de 41 milhões. Em contraponto a estes dados, no início da década de 2000, a importação era de cerca de 10 milhões de toneladas (ANDA, 2021). Projeções elaboradas pelo Embrapa, Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) e Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA), de forma conjunta, indicam que até 2050, o volume de fertilizantes que chegam ao consumidor final, pode alcançar em torno de 65,1 milhões de toneladas.

O iminente crescimento da demanda por fertilizantes aplicados à indústria das commodities, seja no cenário brasileiro ou global, está inserido em um contexto de complexas dinâmicas geopolíticas atuais, e para além dos impactos socioambientais desencadeados pelo uso indiscriminado dos fertilizantes, os mecanismos geopolíticos globais, também são fatores que guardam uma estreita relação com sua demanda. A atual instabilidade geopolítica mundial provocada por conflitos como a guerra no Oriente Médio, e entre Rússia e Ucrânia, somada aos efeitos da crescente crise climática e à aplicação de severas sanções econômicas aos países envolvidos nesses conflitos, impactaram diretamente as rotas comerciais dos fertilizantes, uma vez que Rússia, China, EUA, Canadá e União Europeia e Arábia Saudita, são os principais exportadores e fornecedores dos fertilizantes utilizados no setor agrícola brasileiro (Cardoso et. al., 2025). A instabilidade causada por fatores geopolíticos e climáticos no comércio global de fertilizantes agrícolas e a dependência brasileira destes da importação desses insumos, devido

à baixa incidência de jazidas minerais utilizadas em sua produção, expõe a fragilidade dos adubos químicos enquanto principal alternativa para o aumento da produtividade agrícola mundial.

2.2 Áreas úmidas

Áreas úmidas são definidas como complexos e frágeis ecossistemas de interface terrestre e aquática e caracterizados por depressões circundadas por elevações topográficas sem conectividade aparente com outros corpos hídricos (rios, lagos ou outras áreas úmidas) superficiais na escala local (TINNER, 2003), e situados tanto em regiões costeiras quanto em áreas continentais.

Apesar do pequeno tamanho e isolamento, apenas geográfico e não funcional, também merecem destaque pela provisão de serviços ecossistêmicos como regularização de cheias dos corpos hídricos, o sequestro de carbono, a recarga de aquífero e a manutenção de uma rica e endêmica biodiversidade (CLARKSON et al., 2013). Apesar da relevância ambiental, a agricultura intensiva é a atividade antrópica que causa a maior degradação das pequenas áreas úmidas em todo o mundo pois compromete o balanço biogeoquímico, o input de nutrientes e metais tóxicos provenientes dos agroquímicos e o desequilíbrio hidrológico pela conversão de uso da terra (HE et al., 2025).

Nas bacias hidrográficas da área de estudo, inúmeras pequenas áreas úmidas isoladas estão inseridas em uma matriz fortemente antropizada, particularmente pelo cultivo de cana-de-açúcar. O uso de fertilizantes agrícolas para seu cultivo impacta diretamente os serviços ecossistêmicos promovidos por estes ambientes, uma vez que os nutrientes, em sua maioria, associados ao nitrogênio-fósforo- potássio, são retidos nos solos ou dissolvidos na água, com alteração da estrutura e funcionamento do sistema físico e biológico. Portanto, estudar os impactos decorrentes da expansão agrícola sobre esses ecossistemas é fundamental para avançar em um caminho de sustentabilidade como preconizado pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

2.3 A gamaespectrometria para avaliar impactos do uso de fertilizantes no solo

A espectrometria de raios gama é um método de investigação geofísica do solo que permite mensurar a emissão de raios gama e reconhecer os radionuclídeos potássio (K^{40}), tório (Th^{232}) e urânio (U^{238}). O principal objetivo da gamaespectrometria aplicada à pedologia é a caracterização e mapeamento das características biogeoquímicas do solo, associadas aos seus

aspectos físicos (Rodrigues et. al., 2019.). No contexto do presente trabalho, sua aplicação reside na necessidade de mapear a concentração do complexo fertilizante NPK no interior de uma área úmida geograficamente isolada (AUGI) por meio de gamaespectrômetro portátil. A principal vantagem da gamaespectrometria é seu aspecto não invasivo com relação ao meio analisado, custo-benefício satisfatório e fácil procedimento operacional (Viscarra Rossel et al., 2010; Reinhardt & Herrmann, 2018).

Segundo a Associação Internacional da Indústria de Fertilizantes – IFA, e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – UNEP, fertilizantes são materiais naturais ou manufaturados que contém nutrientes essenciais para o crescimento normal e o desenvolvimento das plantas, e tem como principais objetivos suplementar a disponibilidade natural do solo com a finalidade de satisfazer a demanda de culturas que apresentam um alto potencial de produtividade e de levar a produções economicamente viáveis, compensar a perda de nutrientes decorrentes da remoção da culturas, por lixiviação ou perdas gasosas e melhorar as condições não favoráveis ou manter boas condições do solo para produção das culturas (IFA; UNEP, 1998.) Os fertilizantes podem ser provenientes de fonte orgânica (resíduos de fonte animal ou vegetal), minerais, caracterizados pelo alto teor de nutrientes, como é o caso do complexo Nitrogênio- Fósforo- Potássio com adição de ureia (NPK), aplicado no cultivo de cana de açúcar localizado no entorno da área úmida de interesse, e podem inclusive, serem aplicados no solo em conjunto (organominerais). O manejo inadequado dos fertilizantes em solos agrícolas impacta diretamente na estrutura do solo, por meio da acidificação estímulo à erosão acelerada, além de influenciar na qualidade dos corpos hídricos superficiais e subterrâneos, e na qualidade do ar, uma vez que fertilizantes contribuem para a emissão dos GEEs (IFA; UNEP, 1998).

O sistema de produção e o manejo da cana-de açúcar causam inúmeros impactos físicos e químicos na arquitetura do solo, impulsionados pelo elevado e constante aplicação de fertilizantes agrícolas compostos por nitrogênio, fósforo e potássio afetando drasticamente a integridade do sistema através dos mecanismos de sorção/dessorção, complexação e precipitação e dependente do pH, textura, matéria orgânica e microrganismos (CALABRESI et al., 2005; HUSSEIN et al., 2011). Os diversos impactos ambientais supracitados evidenciam a necessidade de se pensar modelos mais sustentáveis de manutenção da fertilidade do solo com técnicas de manejo da produtividade do solo baseadas em práticas conservacionistas do solo, à medida que as atuais técnicas agrícolas que promovem o lucro por meio da exportação de grandes volumes anuais de commodities, especialmente em escala nacional, têm sido as principais causas do desequilíbrio dos ciclos biogeoquímicos que ocorrem no solo.

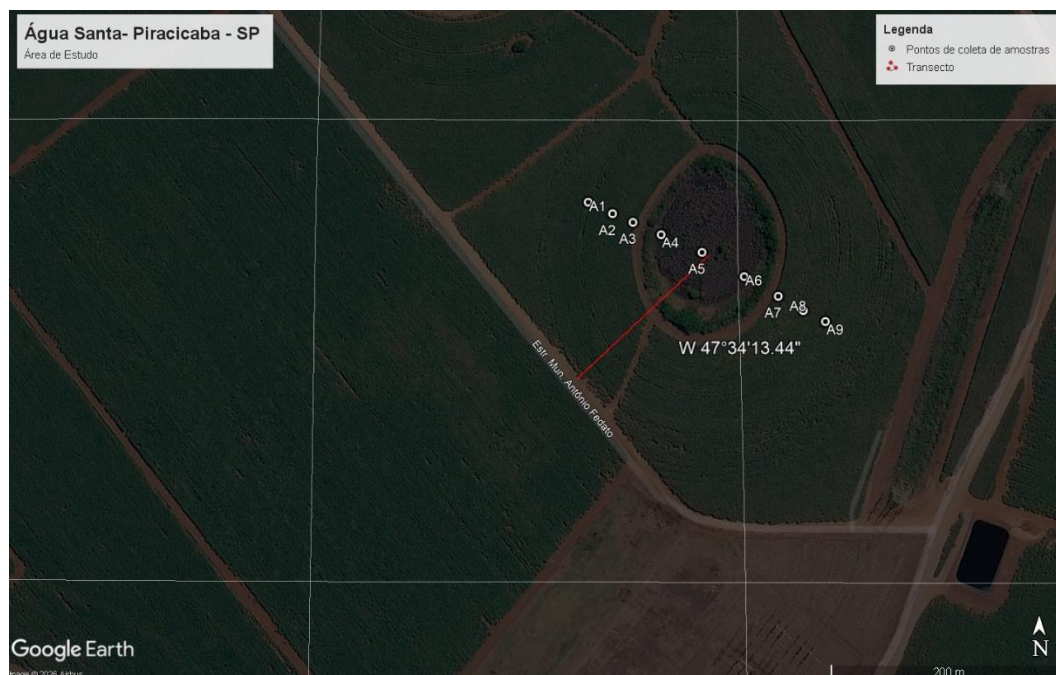
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A pequena área úmida isolada está localizada no município de Piracicaba (SP) (22°37'50"S e 47°34'14" O). O município tem uma população estimada em cerca de 423.300 habitantes, área total de 1.378 km², uma área destinada ao cultivo de cana de açúcar de 41.200 Ha (412 km²) (IBGE, 2024). A área úmida estudada está localizada em Água Santa, bairro na região norte do município, é caracterizada por um hidroperíodo sazonal (Figura 1), possui área de 1,7 ha e seu entorno imediato é composto por cultura de cana-de-açúcar com solo exposto nos períodos de entressafra (figura 1). A área está inserida na sub-bacia do rio Piracicaba, que integra a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 5- UGRHI-05, na qual está contida a bacia PCJ (rios Piracicaba, Capivari e Jundiá), e sua hidrografia é caracterizada por drenagem de baixa a média intensidade.

Segundo a classificação de Köppen, Piracicaba possui clima do tipo Mesotérmico Úmido Subtropical (Cwa), caracterizado pela presença de duas estações bem definidas, uma delas um verão quente e chuvoso e, outra um inverno seco e ameno. O clima é caracterizado como subtropical com invernos secos e verões quentes, tendo temperaturas médias máximas de 27,6°C e mínimas de 14,9°C, com pluviosidade média de 1370 mm. O município de Piracicaba está sob as formações geológicas Serra Geral e Irati, caracterizadas pela presença de diabásio e folhelho, respectivamente (DEMATTE et. al., 2000). Os solos da área são classificados como Latossolo Roxo (LR) distrófico (textura muito argilosa) Latossolo Vermelho-Escuro (LE) eutrófico (textura muito argilosa), Podzólico Vermelho Escuro (PE) distrófico (textura muito argilosa), Litossolo (LI) distrófico (textura média), Aluvial (Al) eutrófico (textura argilosa), segundo Camargo et al., (1987) e Estados Unidos (1990).

Figura 1- Localização da área úmida isolada, transecto, pontos de coleta de amostras e o entorno convertido em plantio intensivo de cana-de-açúcar.



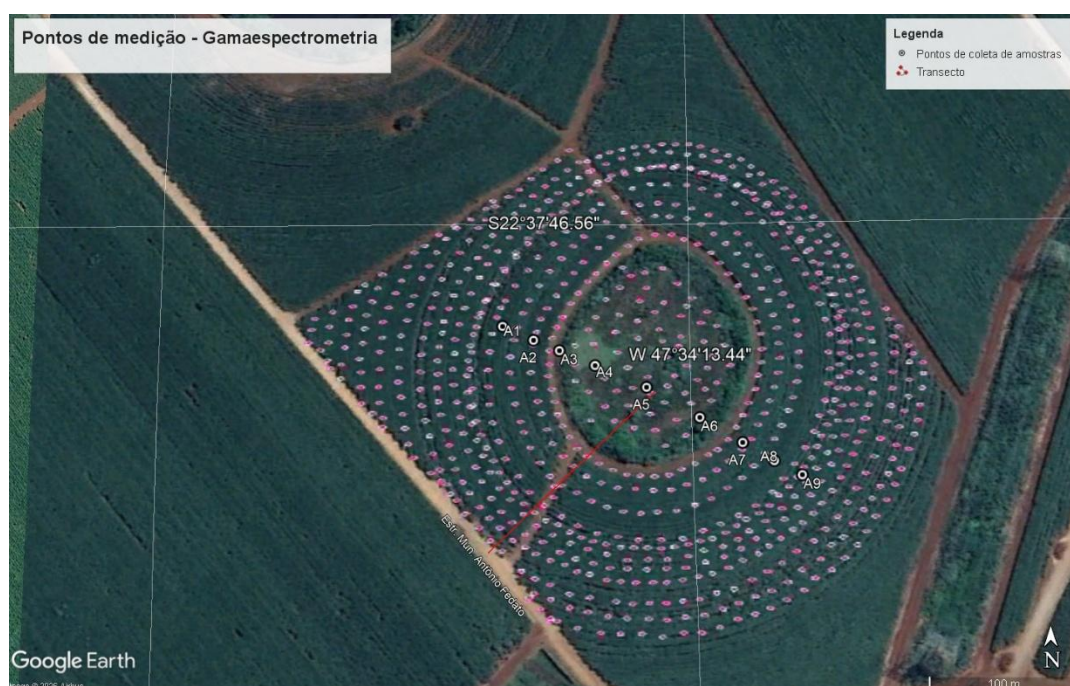
Fonte: Elaborado pelo autor via Google Earth, 2026.

3.2 Gamaespectrometria

O método da gamaespectrometria foi realizada *in situ*, por meio de um gamaespectrômetro portátil de modelo RS-332 Multipurpose Gamma-Ray Spectrometer System, com o objetivo de avaliar a distribuição espacial de elementos químicos esperados encontrar em fertilizantes solúveis usados na cana-de-açúcar baseado no potássio e no urânio e tório provenientes da apatita e a coleta de solos para validar os resultados gama e avaliação a concentração ou arraste dos elementos do solo para o interior da área úmida. A varredura para obtenção dos dados de gamaespectroscopia foi realizada em uma malha de pontos concêntricas ao redor de uma área úmida isolada, recobrindo a parte topograficamente mais elevada até o centro da área úmida, em transectos de aproximadamente 80 m. O processamento dos dados geofísicos gerou mapas da assinatura radioativa a fim de detectar os locais onde ocorrem acúmulos de tais elementos originados de fertilizantes solúveis ou como assinatura da rocha e solo. Os pontos de leitura foram espaçados em 10 metros e tempo de aquisição foi de 60 segundos por ponto. Na região interna, o levantamento será realizado através do posicionamento randomizado. A figura 2 ilustra os pontos de medição onde o gamaespectrômetro portátil foi inserido. O método foi detalhadamente descrito e validado nos estudos de Casagrande et al., (2023) e Moreira et al., (2025). Após o processamento dos dados

foram gerados mapas da assinatura radioativa baseados nas isolinhas de concentração do U^{238} , Th^{232} e K^{40} . Para validar os resultados, foi feita uma amostragem do solo para relacionar as áreas (zonas) representadas pelas maiores e menores concentrações. Em cada zona interna e externa à área úmida foram coletadas três amostras na profundidade entre 0-30 cm por meio de trado manual tipo holandês, com 9 amostras, identificadas como n°1, 2, 3, 7, 8 e 9 na zona externa e n°4, 5 e 6, na zona interna da área úmida. As amostras de solo foram acondicionadas em sacos plásticos, etiquetadas e enviadas ao laboratório para peneiramento na fração terra fina (< 2 mm), secadas em estufa a $40^{\circ}C$ durante 48 h.

Figura 2- Pontos de medição



Fonte: Elaborado pelo autor via Google Earth, 2026.

3.3 Determinação do teor de Carbono Total (CT), Nitrogênio Total (NT) e dos isótopos naturais estáveis

As determinações dos teores de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT), bem como as análises isotópicas de $\delta^{13}C$ e $\delta^{15}N$, foram realizadas as razões-padrão internacionais *Vienna Pee Dee Belemnite* (VPDB) para $^{13}C/^{12}C$ e o ar atmosférico (AIR) para $^{15}N/^{14}N$, respectivamente, no Centro de Isótopos Estáveis da UNESP (Botucatu, Brasil). As análises foram efetuadas em um sistema de Espectrometria de Massas de Razão Isotópica acoplado a um Analisador Elementar (EA-IRMS; Flash 2000 – Delta V Advantage, Thermo Scientific, Alemanha). Para cada análise, uma massa de 0,5 a 40,0 mg de amostra seca e

homogeneizada foi pesada em cápsula de prata. Os resultados foram normalizados a partir dos materiais de referência certificados USGS61, USGS62, USGS63, USGS90 e USGS91 (Schimmelmann et al., 2016; Schimmelmann et al., 2020). A incerteza-padrão da análise foi de $\pm 0,10\%$ para o $\delta^{13}\text{C}$ e de $\pm 0,15\%$ para o $\delta^{15}\text{N}$.

3.4 Análise química total por Fluorescência de Raios-X (XRF)

Para determinar o teor total de metais e óxidos presente nas alíquotas, as amostras foram devidamente preparadas em compartimentos específicos para serem submetidos ao ensaio, como mostra a figura 3. As amostras foram posicionadas no leitor, onde a fluorescência dos íons é emitida a partir do bombardeamento de feixes de raio-x para a determinação dos teores, gerados em forma de tabela.

Figura 3- Tubos onde as alíquotas são armazenadas (à esquerda) e emissor de raios-X (à direita)



Fonte: THE XRF COMPANY- Disponível em: <https://shop.xrfcompany.com/products/xrf-certified-sample-test-cup-for-environmental-soil?hl=pt-BR>

3.5 Análise de complexo sortivo do solo

Para determinar a fração disponível para reações de troca catiônica e incorporação como nutrientes vegetal e microbiológico, foi realizada a análise de complexo sortivo das 9 amostras coletadas, no Laboratório de Solos da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo - ESALQ/USP, localizada no município de Piracicaba-SP. A tabela 1 apresenta a metodologia de análise de cada parâmetro integrante do complexo sortivo. As

análises foram realizadas de acordo com as metodologias do Manual de Métodos de Análise de Solo da EMBRAPA (2017) e do manual de Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais do Instituto Agronômico de Campinas (2001).

Tabela 1- Metodologias de análise dos parâmetros do complexo sortivo

Parâmetro	Unidade	Método de análise
pH H ₂ O	-	
pH CaCl ₂	-	extração por dicromato de sódio, determinação por colorimetria
Matéria Orgânica	g/kg	extração por dicromato de sódio, determinação por colorimetria
Fósforo (P) Mehlich	mg/dm ³	extração com resina trocadora de íons
Cálcio (Ca)	cmolc/dm ³	extração com KCl 1 mol L ⁻¹
Magnésio (Mg)	cmolc/dm ³	extração com KCl 1 mol L ⁻¹
Potássio (K) Mehlich	mg/dm ³	extração com resina trocadora de íons
Alumínio (Al)	cmolc/dm ³	extração com KCl 1 mol L ⁻¹
H+Al (acidez potencial)	cmolc/dm ³	Ph SMP (Tampão SMP)
Soma de bases (SB)	cmolc/dm ³	SB = Ca ⁺² + Mg ⁺² + Na ⁺ + K ⁺
Capacidade de troca catiônica (CTC pH 7)	cmolc/dm ³	CTC = SB + H ⁺ + Al ³⁺
Saturação de bases (V)	%	V = (100×SB) ÷ CTC
Saturação de alumínio (m)	%	m = (100×Al ³⁺) ÷ (SB+Al ³⁺)
Boro (B)	mg/dm ³	água quente/micro-ondas
Cobre (Cu)	mg/dm ³	extração com ácido dietilenotriaminopentaacético (DTPA)
Ferro (Fe)	mg/dm ³	extração com ácido dietilenotriaminopentaacético (DTPA)
Manganês (Mn)	mg/dm ³	extração com ácido dietilenotriaminopentaacético (DTPA)
Zinco (Zn)	mg/dm ³	extração com ácido dietilenotriaminopentaacético (DTPA)

Fonte: Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais. (Instituto Agronômico de Campinas, 2001); Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 2017).

3.6 Ensaio de granulometria

A análise de composição granulométrica das 9 amostras coletadas foi realizada no Laboratório de Solos da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo - ESALQ/USP, localizada no município de Piracicaba-SP. A diferenciação entre as frações de areia, silte e argila foi baseada no Manual de Métodos de Análise de Solo da EMBRAPA (2017). A fração de areia foi determinada por meio da pesagem em balança de precisão, para a fração de argila foi adicionado um dispersante de partículas presente em forma de solução de hidróxido de sódio e hexametáfosfato de sódio, e utilizado um densímetro de Bouyoucos. Para medir a densidade de partículas foi utilizado um picnômetro.

3.7 Tratamento Estatístico: análise de componentes principais (PCA)

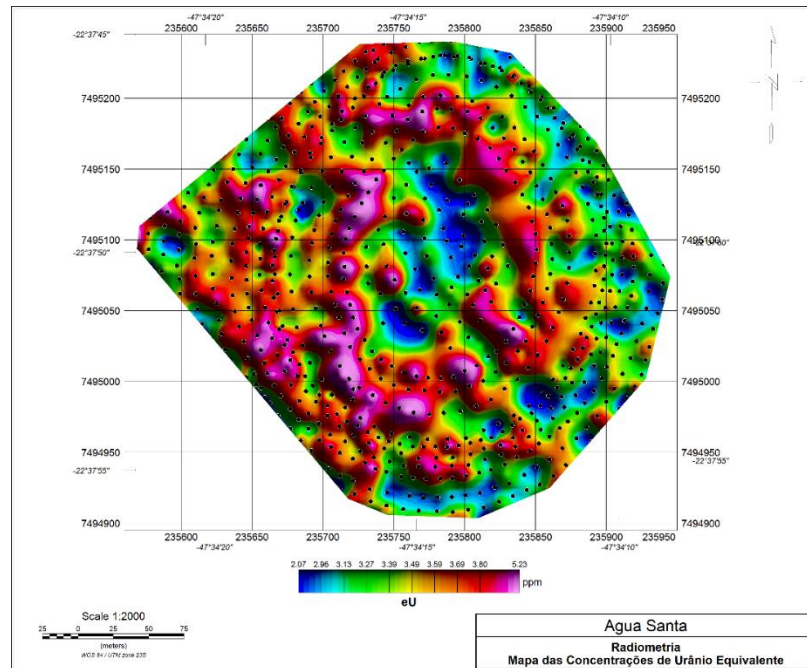
A partir dos dados obtidos das análises de fluorescência de raio-X e complexo sortivo das 9 amostras de solo coletadas, foram escolhidas variáveis, isto é, componentes químicos quantificados, que se mostraram relevantes para o desenvolvimento conclusivo acerca da dinâmica dos fertilizantes na área úmida estudada. As variáveis escolhidas foram Carbono e Nitrogênio total, por estarem associados à presença e decomposição de matéria orgânica e ureia no interior da área úmida, Cloro (Cl), por ter sido detectado em altos teores na análise de fluorescência de raios- X e considerando que não é usualmente presente em solos lateríticos, ao contrário do Ferro (Fe), óxido de alumínio (Al_2O_3) e dióxido de silício (SiO_2), que foram escolhidos por serem abundantes nesse tipo de solo. Também foram escolhidos o óxido de potássio (K_2O), potássio mehlich determinado por complexo sortivo (K mehlich) e o fósforo (P mehlich), por serem os principais componentes integrantes do fertilizante NPK em contato com a área úmida e os demais constituintes do solo. De acordo com Manly & Alberto (2019), o objetivo da análise é tomar um certo número variáveis $X_1, X_2...X_n$ para produzir índices $Z_1, Z_2...Z_n$ que sejam não correlacionados na sua ordem de sua importância, e que descrevam a variação nos dados, portanto, a análise de componentes principais no presente contexto é responsável por indicar quais parâmetros foram determinantes na diferenciação das 9 amostras coletadas. As análises foram feitas no software RStudio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Gamaespectrometria

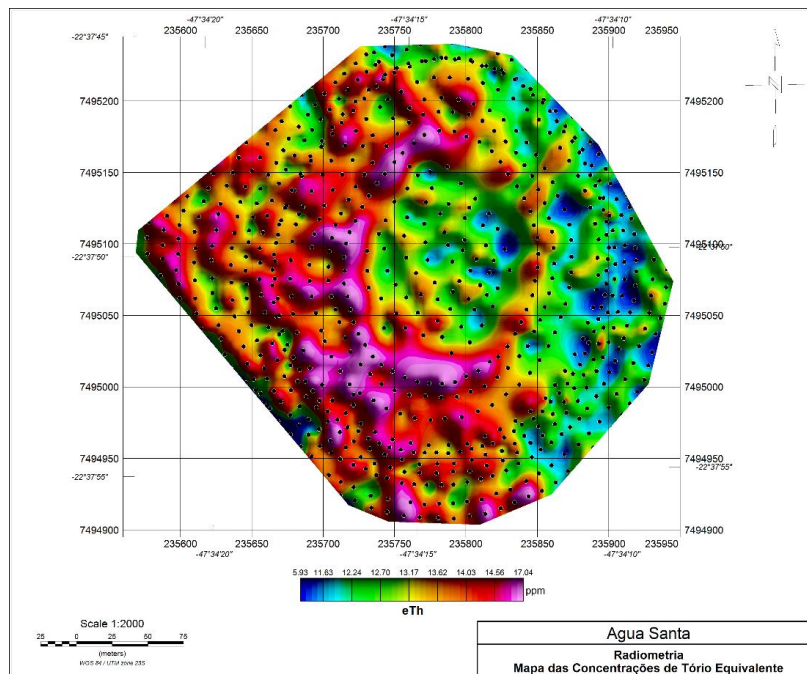
A utilização da gamaespectrometria in situ demonstrou que os isótopos do Urânio (U^{238}) apresentaram um espalhamento mais homogêneo em relação ao Tório e o Potássio, como é possível observar ao se comparar as figuras 4, 5 e 6, que exibem os mapas de assinatura radioativa de cada um dos radionuclídeos. De acordo com hipóteses anteriores aos do presente trabalho, como as apontadas por Becegato & Ferreira (2005), o urânio possui alta mobilidade em solos provenientes de clima tropical, e, portanto, com processos intempéricos intensos. Por outro lado, as altas concentrações de tório (Th^{232}) representadas pelas manchas em tons de vermelho e violeta, como observou Moreira et. al (2025), são menos influenciadas pela lixiviação, e neste contexto, possivelmente, são mais influenciadas pela inserção dos insumos agrícolas em pontos específicos. Por outro lado, o potássio (K^{40}), pouco presente em solos lateríticos como os da área de estudo, é caracterizado pela alta mobilidade quando submetido à lixiviação, possivelmente é proveniente, em maior escala, de fonte externa, enquanto a fração originada da pedogênese, deve ser mínima, uma vez que o potássio é o principal componente que integra insumos agrícolas do complexo NPK (Nitrogênio-Fósforo-Potássio), amplamente utilizado no setor agrícola brasileiro. É possível afirmar que o potássio, por possuir mobilidade maior que o urânio, tende a se acumular em áreas de menor declividade de terreno, nesse caso, no interior da área úmida (LIVENS; BEXTER, 1988), como é possível observar na figura 6.

Figura 4- Assinatura do urânio (U^{238})

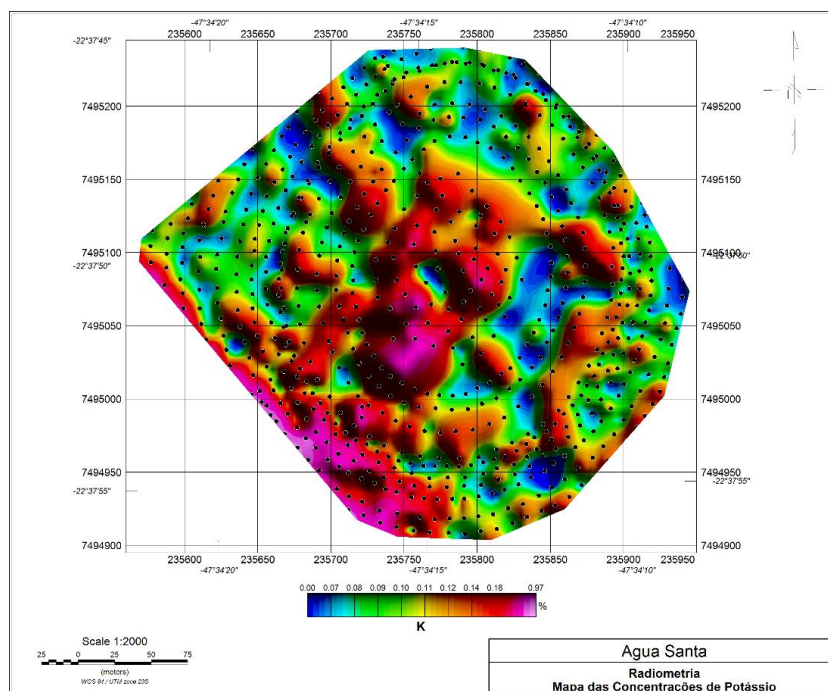


Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Figura 5- Assinatura do tório (Th^{232})



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Figura 6- Assinatura do potássio (K^{40})

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

4.2 Comportamento do CT, NT e isótopos estáveis

A tabela 2 mostra os resultados obtidos referentes aos teores do Carbono e Nitrogênio totais na área de estudo. Nesta tabela também são apresentadas as assinaturas isotópicas $\delta^{13}C$ que variam entre -16,51 e -19,65‰ associadas com uma mistura de plantas de ciclo fotossintético C_3 (floresta) e de plantas C_4 (gramíneas), embora com uma maior presença de plantas C_4 . De acordo com Bird et al. (2020) a abundância relativa de plantas com vias fotossintéticas C_3 ou C_4 influencia diretamente os valores de $\delta^{13}C$ na matéria orgânica do solo, uma vez que plantas C_3 geralmente apresentam assinaturas mais empobrecidas (-32 a -19‰), enquanto plantas C_4 exibem valores mais enriquecidos (-16 a -10‰). As gramíneas presentes na área úmida e a cana-de-açúcar, também inserida na categoria de planta C_4 , é dominante na área. Porém, é possível associar a presença de vegetação arbórea de baixo porte dentro da área úmida bem como restos de vegetação original de floresta que cobria os solos quimicamente ricos provenientes da alteração de diabásio.

A fração do componente de interesse sobre o valor total é baixa, indicativo de que o carbono disponível na área de estudo majoritariamente orgânico. O carbono é passível de decomposição pela atividade microbiana do solo e consequentemente favorece a disponibilidade de compostos nitrogenados. Estes elementos traço estão em sua maioria associados à matéria orgânica presente no interior da área úmida, uma vez que esta é

naturalmente um pequeno ecossistema alagadiço com maior presença de atividade biológica quando comparado com seu entorno. Em relação ao ^{15}N , quando é produto da decomposição da matéria orgânica do solo, a assinatura possui forte correlação com o nitrogênio total (NT). No entanto, a partir dos resultados provenientes de tratamento estatístico por regressão linear, indicados pela figura 8 e tabela 4, é possível constatar que NT e ^{15}N possuem relação estatística pouco significativa. Os resultados obtidos sugerem que o isótopo presente está associado à matéria orgânica do solo e não com a aplicação do fertilizante, diferente dos resultados obtidos pela gamaespectrometria.

Sob outra ótica, baseada nos estudos de Bedard et. al., (2003) e Faquhar et. al. (1989), a tabela 2 indica um valor negativo para ^{15}N na amostra do fertilizante (-0,16), por outro lado os valores de ^{15}N das demais amostras apresentam valores positivos e, portanto, superiores aos do fertilizante (média de 7,16 (‰)), evidência de que o teor do isótopo ^{15}N não é representativo em relação ao fertilizante. Os dados de carbono e nitrogênio total (CT e NT), indicam que as médias das amostras 4, 5 e 6, pertencentes ao solo do interior da área úmida, são maiores que as médias dos valores de CT e NT das amostras das áreas externas à área úmida (amostras 1, 2, 3, 7, 8, e 9), com médias de carbono e nitrogênio total do interior da área 0,18 e 0,15% respectivamente, contrastando com as médias de 0,35% de CT e 0,10% de NT, das áreas externas. Nesse sentido, é possível interpretar que a ureia proveniente do fertilizante do cultivo de cana não é retida no solo e pode ter dois destinos possíveis: (1) percolar e incorporar aos corpos hídricos e (2) a volatilização e emissão atmosférica.

É importante pontuar que o presente trabalho não tem como foco avaliar todo o ciclo do nitrogênio e, as vias possíveis, são apenas de hipóteses plausíveis baseadas em trabalhos anteriores como o de Vasconcelos et. al., (2022).

Tabela 2- Percentual de Carbono Total (CT%), Nitrogênio Total (NT%) e diferenças relativas de razão isotópica ($\delta^{15}\text{N}$ e $\delta^{13}\text{C}$ - ‰)

ID Amostra	Profundidade de coleta	Característica superficial	Massa de amostra (mg)	Nitrogênio Total (%)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	Carbono Total (%)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)
Amostra 1	30 cm	Solo vermelho arado agrícola usado para cana-de-açúcar. Solo com cana recém cortada	11,849	0,15	6,65	1,77	-19,65
Amostra 2	30 cm	Solo vermelho arado agrícola usado para cana-de-açúcar. Solo com cana recém cortada	13,442	0,07	7,31	1,03	-17,73
Amostra 3	30 cm	Solo vermelho arado agrícola usado para cana-de-açúcar. Solo com cana recém cortada	11,365	0,13	7,23	1,72	-16,51
Amostra 4	30 cm	Área de baixada mais úmida com vegetação natural – gramíneas, arbustos e pequenas árvores (Maior concentração de matéria orgânica que o solo agrícola)	14,219	0,11	7,46	1,35	-16,88
Amostra 5	30 cm	Área de baixada mais úmida com vegetação natural – gramíneas, arbustos e pequenas árvores	10,282	0,18	6,78	2,18	-19,02
Amostra 6	30 cm	Área de baixada mais úmida com vegetação natural – gramíneas, arbustos e pequenas árvores	11,751	0,17	7,9	1,92	-16,79
Amostra 7	30 cm	Solo vermelho arado agrícola usado para cana-de-açúcar. Solo com cana recém cortada	11	0,11	7,43	1,33	-17,85
Amostra 8	30 cm	Solo vermelho arado agrícola usado para cana-de-açúcar. Solo com cana recém cortada	10,877	0,1	7,04	1,21	-17,58
Amostra 9	30 cm	Solo vermelho arado agrícola usado para cana-de-açúcar. Solo com cana recém cortada	10,171	0,08	6,66	1,04	-17,46
Amostra fertilizante		Fertilizante granulado (NPK) solúvel usado no cultivo da cana de açúcar	1,048	7,74	-0,16	0,33	-20,17

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

As figuras 7, 8 e 9 comprovam a hipótese de que o carbono e o nitrogênio são de origem orgânica e que a ureia que integra o fertilizante NPK aplicado na área de cultivo não permanece no solo. Como pode ser observado, as dispersões de Nitrogênio Total e $\delta^{15}\text{N}$ (‰) e as de Carbono total e $\delta^{13}\text{C}$ apresentadas nas figuras 8 e 9, possuem uma baixa correlação estatística. A regressão linear entre o carbono e nitrogênio total, com seus respectivos isótopos, realizada no software Rstudio, gerou os valores de inclinação e intercepto da reta, juntamente

com o valor p , que é o principal critério de verificação da significância da relação entre as variáveis. Caso $p \leq 0,05$, a relação é significativa. As tabelas 4 e 5 explicitam, através dos valores p gerados, que a relação dos elementos com seus isótopos, não é significativa, e, portanto, indica baixa correlação entre as variáveis.

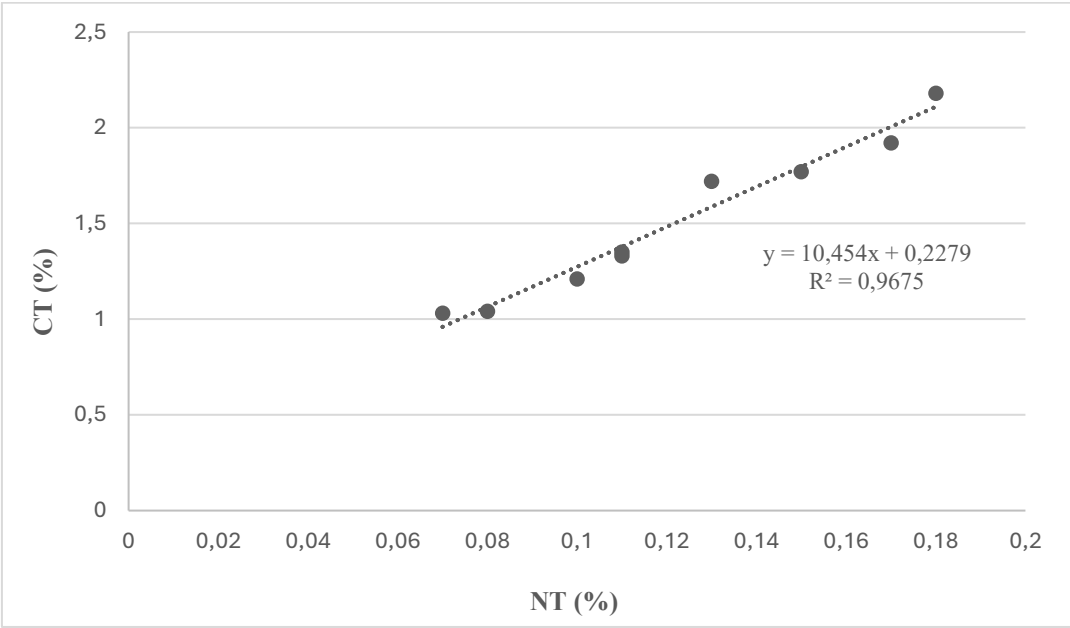
Por outro lado, a figura 7 de dispersão das variáveis carbono total (CT) e nitrogênio total (NT), juntamente com a tabela 3, indicam o oposto do observado entre as variáveis anteriormente citadas. O valor $p \leq 0,05$ ($1,828 \times 10^{-6}$) e o R^2 próximo de 1 ($0,9675$), denotam uma alta correlação entre as variáveis, além disso, a nuvem de dispersão da figura 7 segue um padrão visível.

Tabela 3- Residuais e Coeficientes da regressão linear das variáveis CT (Carbono Total) e NT (Nitrogênio Total)

Residuais				
Mínimo	1Q	Médio	3Q	Máximo
-0,08501	-0,04779	-0,02594	0,07036	0,13314
Coeficientes				
Desvio padrão estimado t valor Pr (> t)				
Intercepto	0,22788	0,09233	2,468	0,0429*
NT e CT	10,45369	0,72439	14,431	$1,83 \times 10^{-6}$ ***
Desvio padrão residual:	R^2 múltiplo:	R^2 ajustado:	F-estatístico:	Valor p:
0,07854 a 7 graus de liberdade	0,9675	0,9628	208,3 a 1 e 7 graus de liberdade	$1,828 \times 10^{-6}$
Códigos de significância				
(***)	(**)	(*)	(.)	()
0,001	0,01	0,05	0,1	1

Fonte: elaborado pelo autor, 2026.

Figura 7- Dispersão das variáveis CT (Carbono Total) e NT (Nitrogênio Total)



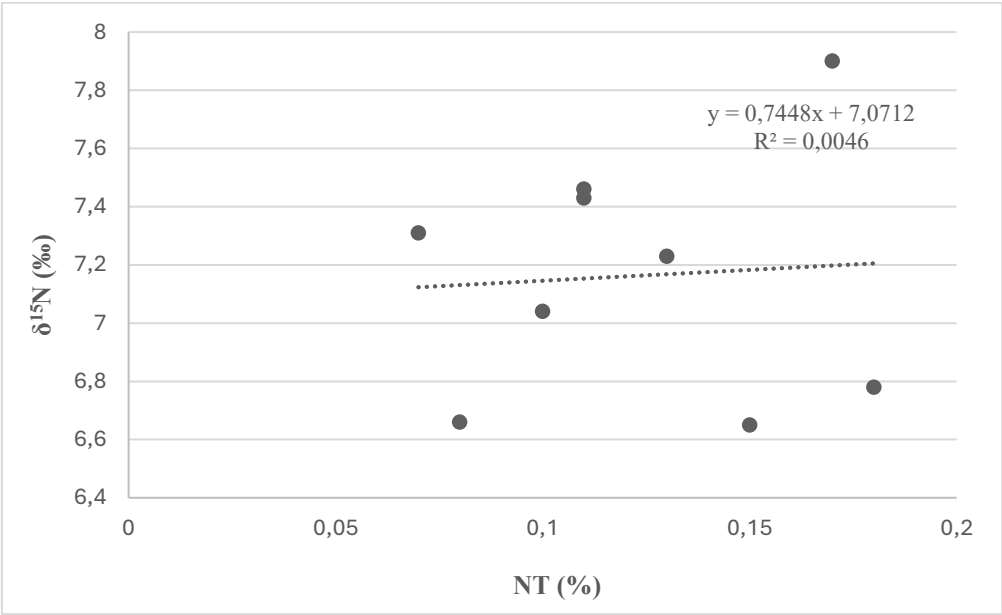
Fonte: elaborado pelo autor, 2026.

Tabela 4 - Residuais e Coeficientes da regressão linear das variáveis NT e $\delta^{15}\text{N}$

Residuais				
Mínimo	1Q	Médio	3Q	Máximo
-0,53291	-0,42526	0,06198	0,27688	0,70219
Coeficientes				
Desvio padrão estimado t valor Pr (> t)				
Intercepto	7,0712	0,5258	13,45	2,95^e-06 ***
NT e $\delta^{15}\text{N}$	0,7448	4,1251	0,181	0,862
Desvio padrão residual:	R² múltiplo:	R² ajustado:	F-estatístico:	Valor p:
0,4473 a 7 graus de liberdade	0,004636	-0,1376	0,0326 a 1 e 7 graus de liberdade	0,8618
Códigos de significância				
(***)	(**)	(*)	(.)	()
0,001	0,01	0,05	0,1	1

Fonte: elaborado pelo autor, 2026.

Figura 8- Dispersão das variáveis NT e $\delta^{15}\text{N}$

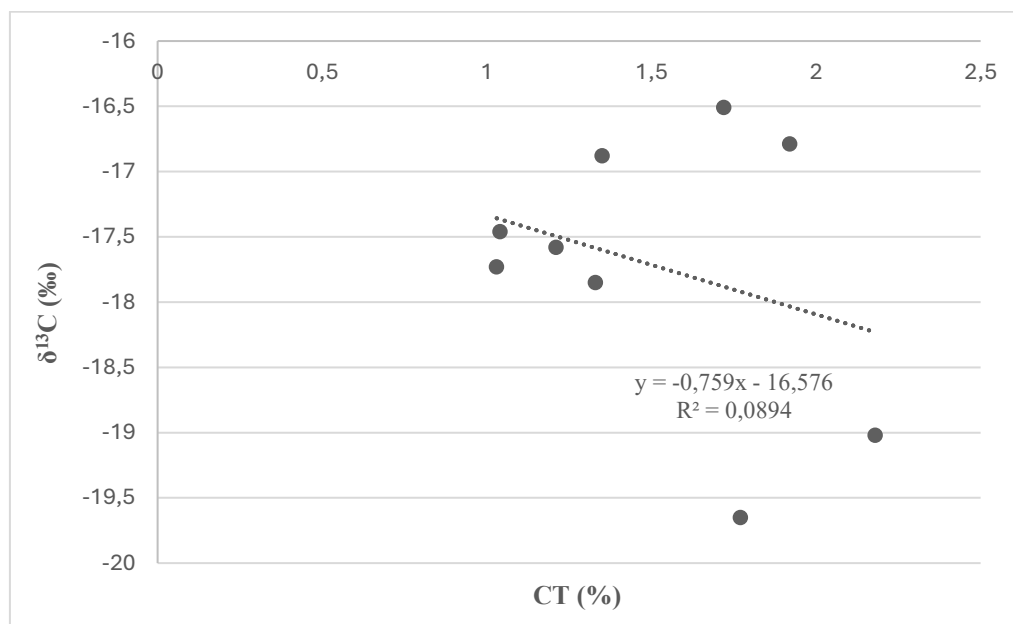


Fonte: elaborado pelo autor, 2026.

Tabela 5 - Residuais e Coeficientes da regressão linear das variáveis CT e $\delta^{13}\text{C}$

Residuais				
Mínimo	1Q	Médio	3Q	Máximo
-1,73041	-0,37204	-0,09445	0,72083	1,37164
Coeficientes				
Desvio padrão estimado t valor Pr (> t)				
Intercepto	-16,5762	1,4224	-11,654	7,74 ^{e-06} ***
CT e $\delta^{13}\text{C}$	-0,759	0,9154	-0,829	0,434
Desvio padrão residual:	R² múltiplo:	R² ajustado:	F-estatístico:	Valor p:
1,055 a 7 graus de liberdade	0,08942	-0,04067	0,6874 a 1 e 7 graus de liberdade	0,4344
Códigos de significância				
(***)	(**)	(*)	(.)	()
0,001	0,01	0,05	0,1	1

Fonte: elaborado pelo autor, 2026.

Figura 9- Dispersão das variáveis CT e $\delta^{13}\text{C}$ 

Fonte: elaborado pelo autor, 2026.

4.3 Fluorescência de Raios-X (XRF)

A tabela 6 mostra os principais óxidos e metais detectados, em parte por milhão (ppm) nas amostras de solo, a partir da emissão de raios X. O ferro (Fe), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de silício (SiO_2), são os componentes com maior teor total. Estes elementos são os componentes presentes em maior quantidade nos solos lateríticos com óxidos de alumínio e silício (Al_2O_3 e SiO_2), estão altamente associados à configuração tetraédrica e octaédrica das partículas dos argilominerais presentes no solo, também chamadas de filossilicatos. Estas partículas de argila são filamentos geométricos, os tetraedros de silício e os octaedros de alumínio, ambos constituintes da caulinita - argila de baixa atividade, presentes em larga escala no território brasileiro (Bertollo et. al., 2021).

O baixo teor de óxido de potássio (K_2O), reforça a constatação de que sua origem é majoritariamente oriunda do fertilizante, e não pedogenética, uma vez que são fortemente submetidos à lixiviação. Adicionalmente os resultados indicaram que os solos são dessaturados e, portanto, composto por argilas de baixa atividade (caulinita) que possuem baixa capacidade sortiva. É possível afirmar que o fósforo (P), também pouco presente em solos lateríticos, tem como fonte o complexo NPK aplicado nas áreas de cultivo de cana, e que é lixiviado para o interior da área úmida.

Um fator que chama a atenção é a presença expressiva do elemento cloro (Cl), considerado atípico de solos tropicais como o da área de estudo, o que possibilita a inferência

de que ele é proveniente de uma fonte externa, que, nesse caso são os insumos agrícolas utilizados no cultivo da cana. O cloro é fortemente associado ao potássio do complexo NPK. A partir deste dado, foi realizada uma análise de regressão linear entre as concentrações de óxido de potássio (K_2O) e do elemento cloro (Cl_{35}), de cada amostra, com o objetivo de confirmar estatisticamente a correlação entre as variáveis, como mostra a tabela 7 e a figura 10, no entanto, a regressão não indicou uma relação significativa entre as variáveis, uma vez que o valor p , para que represente uma relação significativa, deve obedecer à sentença $p \leq 0,05$, portanto é possível afirmar apenas que este cloro não é proveniente da pedogênese, ainda que não guarde relação aparente com o teor de potássio do complexo NPK.

Tabela 6- Principais componentes detectados na fluorescência de cátions (ppm)

ID	Th	U	K ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P	Cl	Fe
Amostra 1	0,0013	< LOD	0,0604	< LOD	4,453	10,9452	0,0182	0,7032	12,0627
Amostra 2	0,0023	< LOD	0,0882	< LOD	4,4698	10,5166	< LOD	0,7142	11,6269
Amostra 3	< LOD	< LOD	0,0703	0,5608	3,496	10,6179	< LOD	0,7012	9,86
Amostra 4	0,0009	< LOD	0,1186	< LOD	3,861	14,6303	0,0255	0,7122	7,6281
Amostra 5	0,0016	0,0024	0,2207	0,5686	3,4163	11,869	0,035	0,7072	8,1576
Amostra 6	0,0014	< LOD	0,1437	< LOD	4,2326	15,4478	< LOD	0,6878	9,0155
Amostra 7	0,0012	< LOD	0,0767	< LOD	3,9711	11,362	< LOD	0,7549	9,6588
Amostra 8	0,0027	0,0016	0,1083	< LOD	7,7968	18,2687	0,0284	0,7556	11,2958
Amostra 9	0,002	< LOD	0,0898	0,7933	6,378	16,4661	0,0171	0,6868	10,963
Fertilizante	0,0014	< LOD	9,8286	< LOD	3,2287	1,6148	1,9998	13,8368	4,6654

*LOD: Limite de detecção do equipamento

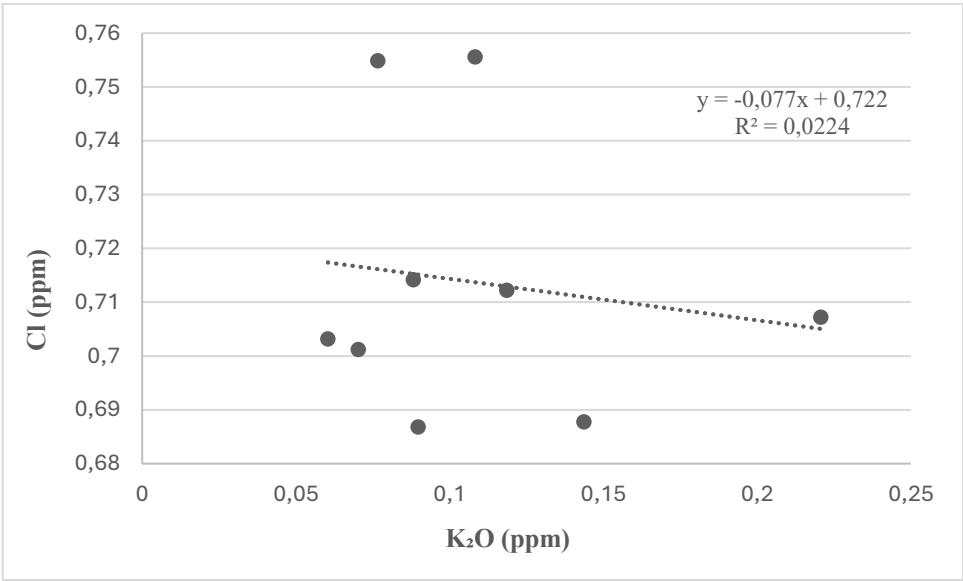
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Tabela 7– Valores obtidos da regressão linear entre as variáveis K₂O e Cl

Residuais				
Mínimo	1Q	Médio	3Q	Máximo
-0,028319	-0,01542	-0,001042	0,002158	0,041905
Coeficientes				
Desvio padrão estimado t valor Pr (> t)				
Intercepto	0,72203	0,02271	31,79	7,87 e ⁻⁹ ***
K ₂ O e Cl	-0,07698	0,19234	-0,4	0,701
Desvio padrão residual:	R ² múltiplo:	R ² ajustado:	F-estatístico:	Valor p:
0,02684 a 7 graus de liberdade	0,02237	-0,1173	0,1602 a 1 e 7 graus de liberdade	0,7009
Códigos de significância				
(***)	(**)	(*)	(.)	()
0,001	0,01	0,05	0,1	1

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Figura 10– Dispersão das variáveis K₂O e Cl



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

4.4 Complexo sortivo

A tabela 8 exhibe os dados de teor de nutrientes disponível para reações de troca catiônica e incorporação vegetal e microbiológica. Diferentemente da análise de fluorescência de cátions, que contabiliza o total de óxidos e metais nas amostras, o complexo sortivo representa a parcela efetivamente utilizada nas reações químicas envolvidas na nutrição vegetal troca catiônica. Ao

contrário dos altos teores de ferro (Fe) e manganês (Mn), que são tipicamente presentes em solos lateríticos, a alta concentração de potássio (K mehlisch) e fósforo (P mehlisch) por dm^3 de amostra analisada, reforça a conclusão de que grande parte destes elementos são originados do fertilizante NPK, uma vez que solos lateríticos promovem uma lixiviação bastante acentuada desses íons, de modo que permanecem em baixa disponibilidade, com necessidade de grandes doses de adubos químicos para o aumento da produtividade do cultivo da cana. Em termos de pH em solução de CaCl_2 , segundo a classificação para a acidez do solo de Tomé Júnior (1997), as amostras do interior da área úmida indicam um solo de baixa a média acidez. A capacidade de troca catiônica das amostras (CTC) a pH 7,0, ou seja, capacidade do solo de promover fluxo de íons sob pH neutro, é considerada média ($5,0 \leq \text{CTC pH } 7 \leq 15,0$) (Embrapa, 2015). A saturação por bases (v%) é um indicativo de fertilidade do solo, sendo $v \geq 50\%$ - fértil (eutrófico) e $v < 50\%$ - pouco fértil (distrófico), segundo o manual da Embrapa (2010), portanto, é possível observar que as amostras indicam uma alta fertilidade do solo no interior da área úmida.

Tabela 8- Complexo sortivo

ID		Amostr a 1	Amostr a 2	Amostr a 3	Amostr a 4	Amostr a 5	Amostr a 6	Amostr a 7	Amostr a 8	Amostr a 9
Profundidade		0-30	0-30	0-30	0-30	0-30	0-30	0-30	0-30	0-30
Talhão		Encost a/ Cana de açúcar	Encost a/ Cana de açúcar	Encost a/ Cana de açúcar	Baixada/ área natural/ arbustos/ gramíne as	Baixada/ área natural/ arbustos/ gramíne as	Baixada/ área natural/ arbustos/ gramíne as	Encost a/ Cana de açúcar	Encost a/ Cana de açúcar	Encost a/ Cana de açúcar
pH H ₂ O	-	5,95	5,6	5,89	6,19	5,8	5,74	5,74	5,63	6,4
pH CaCl ₂	-	5,78	5,4	5,55	5,09	5,12	5,23	5,41	5,42	6,03
Matéria Orgânica	g/kg	28,51	21,16	28,98	30,18	40,08	30,65	23,1	25,7	21,26
Fósforo (P) Mehlich	mg/dm ³	13,51	15,29	14,98	22,58	33,28	19,79	12,43	10,41	19,17
Cálcio (Ca)	cmolc/d m ³	7,89	6,5	8,36	3,84	6,22	6,4	6,37	3,86	6,82
Magnésio (Mg)	cmolc/d m ³	2,04	2,36	2,44	1,26	1,41	2,16	1,3	1,2	0,89
Potássio (K) Mehlich	mg/dm ³	324	354	438	372	261	315	324	399	333
Alumínio (Al)	cmolc/d m ³	0	0	0	0,08	0,18	0	0	0	0
H+Al	cmolc/d m ³	3,4	1,72	2,92	5,56	7,12	5,68	3,44	4,28	3,16
SB	cmolc/d m ³	10,76	9,77	11,92	6,05	8,3	9,37	8,5	6,08	8,56
CTC pH 7	cmolc/d m ³	14,16	11,48	14,84	11,61	15,42	15,05	11,94	10,36	11,72
V	%	76	85	80	52	54	62	71	59	73
m	%	0	0	0	1	2	0	0	0	0
Boro (B)	mg/dm ³	0,23	0,58	0,23	0,28	0,33	0,32	0,22	0,18	0,39
Cobre (Cu)	mg/dm ³	5,6	2,1	1	5,8	5,7	3,9	2	2,3	1,9
Ferro (Fe)	mg/dm ³	10,8	9,1	6,4	59,6	83,6	59,9	7,9	8,4	7,8
Manganês (Mn)	mg/dm ³	74,1	36,2	42,7	24,8	25,4	55,3	62	70,4	63,2
Zinco (Zn)	mg/dm ³	1,8	1,6	2,3	3,2	4,4	2,7	1,4	1,1	1,5

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

4.5 Ensaios de granulometria

A tabela 9 apresenta as frações granulométricas das nove amostras coletadas, e suas respectivas classificações texturais. É possível observar que o solo da área de estudo é caracterizado por uma textura argilosa a muito argilosa. A classificação textural na qual são classificadas as amostras, exerce um papel fundamental para a dinâmica dos fertilizantes carregados para a área úmida, à medida que solos argilosos possuem alta capacidade de retenção incorporação de nutrientes, quando comparados com solos arenosos onde a percolação é mais

acentuada. Nesse sentido, os fertilizantes aplicados na área de cultivo de cana, ao serem lixiviados para a área úmida, são inseridos nas diversas cadeias de reações químicas, especialmente nas reações de troca catiônica, que ocorrem na estrutura do solo, e que por ser argiloso, acentua a retenção dos componentes fertilizantes nessas estruturas.

Tabela 9– Frações granulométricas e classificação textural das amostras

ID	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8	Amostra 9
Talhão	Encosta/ Cana de açúcar	Encosta/ Cana de açúcar	Encosta/ Cana de açúcar	Baixada/ área natural/ arbustos/ gramíneas	Baixada/ área natural/ arbustos/ gramíneas	Baixada/ área natural/ arbustos/ gramíneas	Encosta/ Cana de açúcar	Encosta/ Cana de açúcar	Encosta/ Cana de açúcar
Argila (g/kg)	660,1	678,8	599,5	419,1	534,5	494,2	597,3	646	658,1
Silte (g/kg)	160,9	128,7	174,3	250,4	235,7	222,4	161,6	63,6	111,6
Areia total (g/kg)	179	192,5	226,2	330,5	229,8	283,4	241,1	290,4	230,3
Classificação textural	Muito argiloso	Muito argiloso	Argiloso	Argiloso	Argiloso	Argiloso	Argiloso	Muito argiloso	Muito argiloso

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

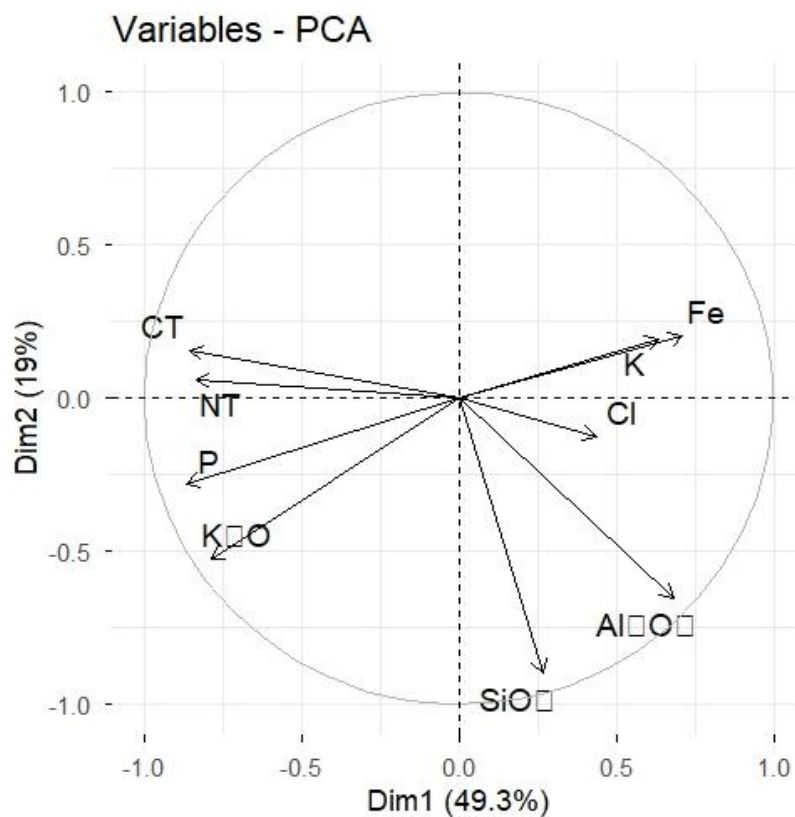
4.6 Análise de Componentes Principais (PCA)

A figura 11 ilustra o diagrama das variáveis integrantes da análise de componentes principais, nas duas principais dimensões (Dimensões 1 e 2). A tabela 10 indica o percentual de variação explicada por cada variável das 9 amostras coletadas, nas duas dimensões. O componente 1 explica 49,3% da variância dos dados, enquanto o componente 2 explica 19%. Os dois componentes explicam 68% de variância dos dados, uma explicação razoável. A tabela 10 evidencia que as variáveis Nitrogênio e Carbono total (NT e CT), Fósforo (P) e Óxido de Potássio (K_2O), contrastam com as demais, ou seja, na dimensão 1 cerca de 65,25% da variância dos dados é explicada por essas variáveis.

Na dimensão 2, as variáveis Dióxido de Silício (SiO_2), Óxido de alumínio (Al_2O_3) e Óxido de potássio (K_2O) contrastam com as demais, que explicam cerca de 88,29% da variância dos dados. A figura 11 evidencia a relação direta entre o carbono e nitrogênio total, que permite concluir que seus teores no interior da área úmida aumentam conjuntamente, o mesmo padrão observado entre Al_2O_3 e SiO_2 . À medida que os teores de CT e NT aumentam, Al_2O_3 , SiO_2 e Cloro (Cl) diminuem levemente, o que pode indicar uma relação inversa entre estas cinco variáveis. O mesmo padrão é observado para o Potássio (K) e Ferro (Fe), em contraponto ao

Fósforo (P), e Óxido de potássio (K_2O). Enquanto os teores de K e Fe aumentam conjuntamente, os teores de fósforo e óxido de potássio diminuem.

Figura 11– Diagrama dos componentes principais das variáveis de XRF e Complexo Sortivo



Fonte: Elaborado pelo autor via RStudio, 2026.

Tabela 10 – Percentual de variância explicada de cada variável nos componentes/dimensões principais

	Dimensão 1	Dimensão 2
NT	15,72	0,2266
CT	16,56	14
Cl	4,27	0,8935
P	17	5
K	9,09	2,21
Fe	11,33	2,45
K_2O	13,97	16,14
Al_2O_3	10,46	24,97
SiO_2	1,6	47,18

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As assinaturas provenientes da gamaespectrometria permitiram a compreensão acerca do comportamento dos radionuclídeos de potássio (K^{40}), Tório (Th^{232}) e Urânio (U^{238}) detectados, em que o potássio e urânio apresentam maior mobilidade em solos lateríticos como o da pequena área úmida, quando comparados com o tório, com o potássio como o radionuclídeo de maior mobilidade. A gamaespectrometria foi fundamental no entendimento da dinâmica de aplicação dos fertilizantes NPK, uma vez que os altos teores de assinatura radioativa estão diretamente relacionados com a inserção destes nutrientes.

O sistema de espectrometria de massas para medição de carbono e nitrogênio total e $\delta^{13}C$ e $\delta^{15}N$, evidenciaram que a ureia associada ao nitrogênio do complexo fertilizante NPK, não permanece retida na área úmida, com destinação mais provável a volatilização e percolação em direção aos corpos hídricos, o que reforça a problemática acerca dos fertilizantes como um modelo de manejo do solo pouco sustentável e de caráter modificador da qualidade do solo, ar e água. A fluorescência de raios X indicou, através da presença considerável de K_2O , P e Cl, que o fertilizante aplicado na área de cultivo de cana localizada nas proximidades da área úmida, que esses componentes migram por meio da lixiviação para o interior da área úmida, uma vez que usualmente apresentam valores baixos em latossolos tropicais. As análises de complexo sortivo das 9 amostras de solo coletadas da área úmida apontam para um solo distrófico, de moderada fertilidade, baixa a média acidez, provavelmente em decorrência da calagem (correção da acidez do solo), e média capacidade de troca catiônica (CTC).

Por apresentar um solo argiloso, segundo os ensaios de granulometria, a área úmida exerce a função de retenção de grande parte dos nutrientes que são introduzidos nela, ao passo que também promove a incorporação dos resíduos provenientes dos fertilizantes nas reações de troca catiônica. A análise de componentes principais sintetizou a relação dinâmica de teores dos principais metais e óxidos presentes no solo, tanto pedogenéticos, quanto introduzidos por ação antrópica, com notável relação entre compostos orgânicos (nitrogênio e carbono) e os integrantes do complexo NPK. A gamaespectrometria, juntamente com as análises de solo conduzidas, reforçam o papel da fertilização química aplicada ao setor agrícola como um agente de desequilíbrio da ciclagem biogeoquímica do solo.

A fragilidade ecossistêmica das áreas úmidas, bem como ineficiência de políticas públicas voltadas para a proteção e manejo sustentável, somadas à instabilidade comercial global da indústria de fertilizantes, sinalizam para um modelo de produção de commodities pouco sustentável e eficiente.

REFERÊNCIAS

BECEGATO, Valter Antonio; FERREIRA, Francisco José Fonseca. Gamaespectrometria, resistividade elétrica e susceptibilidade magnética de solos agrícolas no noroeste do Estado do Paraná. *Revista Brasileira de Geofísica*, [S. l.], v. 23, n. 4, p. 371-405, dez. 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/rbg>. Acesso em: 23 mar. 2026.

BEDARD-HAUGHN, A.; VAN GROENIGEN, J. W.; VAN KESSEL, C. Tracing ¹⁵N through landscapes: potential uses and precautions. *Journal of Hydrology*, [S. l.], v. 272, n. 1-4, p. 175–190, 2003.

BERTOLLO, Mait; ALBERTIN, Ricardo M.; BACHA, André L R.; et al. *Pedologia*. Porto Alegre: SAGAH, 2021. E-book. p.76. ISBN 9786556901909. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786556901909/>. Acesso em: 23 mar. 2026.

BIRD, Michael I. et al. Stable isotope proxy records in tropical terrestrial environments. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, [s. l.], v. 538, e10, 2020. Disponível em: <https://www.elsevier.com/locate/palaeo>. Acesso em: 26 mai. 2026.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Plano Nacional de Fertilizantes: Estatísticas do Setor. Brasília: MAPA, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/plano-nacional-de-fertilizantes/estatisticas-do-setor>. Acesso em: 19 maio 2026.

Brasil. Ministério do Meio Ambiente. A Convenção de Ramsar. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/biodiversidade-e-biomas/biomas-e-ecossistemas/area-s-umidas/a-convencao-de-ramsar-1>. Acesso em: 5 set. 2025.

CALABRESI, E.J., KOSTECKI, P.T., DRAGUN, J. Contaminated Soils, Sediments and Water: Science in the Real World. Springer, Boston. 2005, 611 p.

CAMARGO, M.N.; KLANT, E.; KAUFFMAN, J.H. Classificação de solos usada em levantamentos pedológicos no Brasil. *Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.12, n.1, p.11-33, 1987.

CARDOSO, V. M.; PFEIFER, A.; KENNEDY, H. J.; CHIODI, L. A.; JANK, M. S.; GOMES, G. C. Geopolítica Global dos Fertilizantes: impactos sobre o agronegócio brasileiro. São Paulo: Insper Agro Global, nov. 2025. (Working paper, n. 7/2025). Disponível em: <https://agro.insper.edu.br/storage/papers/November2025/2025.11.25%20IAG%20WP%20Geopol%C3%ADtica%20dos%20Fertilizantes.pdf>. Acesso em: 19 maio 2026.

CASAGRANDE, M.S. et al. The use of in situ Gamma-Ray Spectrometry to Assess the Environmental Impacts of Intensive Agriculture in terms of Geochemical Mobility in soil and waters. *Geofísica internacional*, vol. 63, n. 2, 2024, p. 851-864.

CLARKSON, B.R., AUSSEIL, A.G.E., GERBEAUX, P. Wetland ecosystem services. In: Dymond, J.R. (ed.) *Ecosystem Services in New Zealand – Conditions and Trends*. Manaaki Whenua Press, Lincoln, New Zealand, 2013, 192–202.

DEMATTE, J. A. M.; CAMPOS, R. C.; ALVES, M. C. Avaliação espectral de solos desenvolvidos em uma topossequência de diabásio e folhelho da região de Piracicaba, SP. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 35, n. 12, p. 2447-2460, dez. 2000.

DIEGUES, Antonio Carlos S. et al. Inventário de áreas úmidas do Brasil: versão preliminar. São Paulo: USP, 1990.

EMBRAPA MONITORAMENTO POR SATÉLITE. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. [Autor]: César Castilho Ronquim. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010. 26 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Monitoramento por Satélite, 8). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/882598/1/BPD8.pdf>. Acesso em: 18 mai. 2026.

EMBRAPA TABULEIROS COSTEIROS. Guia prático para interpretação de resultados de análises de solos. [Autores]: Lafayette Franco Sobral, Maria da Conceição de V. Barreto, Alexandro Ferreira da Silva, José Luiz dos Anjos. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015. 13 p. (Documentos / Embrapa Tabuleiros Costeiros, 206). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1042994/1/Doc206.pdf>. Acesso em: 18 mai. 2026.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. Agency for International Development. Soil Conservation Service. Soil Survey Staff. Keys to soil taxonomy. 4.ed. Blacksburg, 1990. 422p. (SMSS Technical Monograph, 19)

FARQUHAR, G. D.; EHLERINGER, J. R.; HUBICK, K. T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, [S. l.], v. 40, n. 1, p. 503-537, 1989.

HE, H., LI, X., & LI, T. (2025). The sustainable development of wetlands and agriculture: A literature review. *Agronomy*, 15(3), 746.

HUSSAIN, R.O., HUSSAIN, H.H. Investigation the Natural Radioactivity in Local and Imported Chemical Fertilizers. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, vol. 54, n. 4, 2011, p. 777-782. TINER, R. W. Geographically isolated wetlands of the United States. *Wetlands*, vol. 23, n. 3, 003. Pp. 494-516

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e Estados: Piracicaba: Pesquisa. Rio de Janeiro: IBGE, 2026. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/piracicaba/pesquisa/14/0>. Acesso em: 19 maio 2026.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e Estados: Piracicaba: Panorama. Rio de Janeiro: IBGE, 2026. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/piracicaba/panorama>. Acesso em: 19 maio 2026.

IBGE. Produção Agropecuária Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/cana-de-acucar/sp>.

INTERNATIONAL FERTILIZER INDUSTRY ASSOCIATION; UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. O uso de fertilizantes minerais e o meio ambiente. Tradução: Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA). Paris: IFA/UNEP, 1998.

JUNK W.J., SILVA C.J., NUNES DA CUNHA C. & WANTZEN K.M. (eds) (2011b) The Pantanal: Ecology, Biodiversity and Sustainable Management of a large Neotropical Seasonal Wetland. Pensoft Publishers, 857 p.

JUNK, W.J., PIEDADE, M.T.F., SCHÖNGART, J., COHN-HAFT, M., ADENEY M. & WITTMANN, F. (2011a): A classification of major Amazonian wetlands. *Wetlands* 31(4): 623–640.

LAPOLA, D. M. et al. Pervasive transition of the Brazilian land-use system. *Nature climate change*, vol. 4, n. 1, 2014, p. 27-35.

LIVENS, F. R.; BAXTER, M. S. Particle size and radionuclide levels in some west soils. *The Science of the Total Environment*, [S.l.], v. 70, p.1-17, 1988.

MANLY, Bryan F J.; ALBERTO, Jorge A N. Métodos estatísticos multivariados: uma introdução. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2019. E-book. p.103. ISBN 9788582604991. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788582604991/>. Acesso em: 20 mai. 2026.

MILANI, E. J. et al. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 15, n. 2, p. 265–287, 2007.

MOREIRA, C.A. et al. The use of in situ Gamma-Ray Spectrometry to Assess the Environmental Impacts of Intensive Agriculture in terms of Geochemical Mobility in soil and waters. *Geofísica internacional*, vol. 63, n. 2, 2024, p. 851-864.

MOREIRA, César Augusto et al. Applied in-situ gamma-ray spectrometry for evaluating erosion and fertilizer accumulation in the tropical soil around small isolated wetland. *Pure and Applied Geophysics*, [S. l.], 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-025-03745-8>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00024-025-03745-8>. Acesso em: 23 mar. 2026.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. *Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais*. Campinas, Instituto Agrônomo, 285p. 2001.

REINHARDT, N.; HERRMANN, L. Gamma-ray spectrometry as versatile tool in soil science: A critical review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v. 000, p. 1-19, 2018.

RODRIGUES, Hugo Machado; NASCIMENTO, Carlos Wagner Rodrigues do; CEDDIA, Marcos Bacis; VASQUES, Gustavo Mattos; FEIJÓ, Raquel Gomes. Gamaespectrômetro como ferramenta ao cientista do solo: identificando o limite entre um argissolo vermelho e um planossolo háplico. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 18., 2019, Fortaleza. Anais... Fortaleza: UFC, 2019. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1120316/1/GamaespectrometrocomoFerramentaaoCientistaDoSolo2019.pdf>

SCHIMMELMANN, A., QI, H., COPLEN, T. B., BRAND, W. A., FONG, J., MEIER-AUGENSTEIN, W., KEMP, H. F., et al. 2016. Organic Reference Materials for Hydrogen, Carbon, and Nitrogen Stable Isotope-Ratio Measurements: Caffeines, n-Alkanes, Fatty Acid Methyl Esters, Glycines, l-Valines, Polyethylenes, and Oils. *Anal. Chem.* 888, 4294–4302. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.5b04392>

SCHIMMELMANN, A., QI, H., DUNN, P. J. H., CAMIN, F., BONTEMPO, L., POTOČNIK, D., et al. 2020. Food Matrix Reference Materials for Hydrogen, Carbon, Nitrogen, Oxygen, and Sulfur Stable Isotope-Ratio Measurements: Collagens, Flours, Honeys, and Vegetable Oils. *J. Agric. Food Chem.* 6839, 10852–10864. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c02610>

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p

TOMÉ JÚNIOR, J. B. *Manual para interpretação de análise de solo*. Guaíba, SP: Agropecuária, 1997. 274 p.

VASCONCELOS, Ana Luisa S.; CHERUBIN, Maurício R.; CERRI, Carlos E. P.; FEIGL, Brigitte J.; REIS, André F. Borja; SIQUEIRA-NETO, Marcos. Sugarcane residue and N-fertilization effects on soil GHG emissions in south-central, Brazil. *Biomass and Bioenergy*, [s. l.], v. 158, e106342, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/biomass-and-bioenergy>. Acesso em: 26 mai. 2026.

VISCARRA ROSSEL, R. A., MCBRATNEY, A. B., MINASNY, B. (2010): *Proximal Soil Sensing*. Springer, Dordrecht, The Netherlands.