



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE QUÍMICA

LUMA TEIXEIRA DE SOUZA

ANÁLISE DA MUDANÇA DAS CARACTERÍSTICAS DO SOLO EM ÁREA DE
CULTIVO DE SOJA E MILHO AO LONGO DE TRÊS ANOS EM FUNÇÃO DAS
PRÁTICAS DE CULTIVO E ADUBAÇÃO UTILIZANDO ANÁLISE DE
COMPONENTES PRINCIPAIS

BRASÍLIA-DF
1º /2023



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE QUÍMICA

LUMA TEIXEIRA DE SOUZA

ANÁLISE DA MUDANÇA DAS CARACTERÍSTICAS DO SOLO EM ÁREA DE
CULTIVO DE SOJA E MILHO AO LONGO DE TRÊS ANOS EM FUNÇÃO DAS
PRÁTICAS DE CULTIVO E ADUBAÇÃO UTILIZANDO ANÁLISE DE
COMPONENTES PRINCIPAIS

Trabalho de Conclusão de Curso em
Química apresentado ao Instituto de
Química da Universidade de Brasília,
como requisito parcial para a obtenção do
título de bacharelado em Química
Tecnológica.

Orientador: Prof. Dr. Jez Willian Batista Braga

BRASÍLIA-DF
1º/2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram para a realização do meu TCC:

Primeiramente, agradeço a Deus por me guiar e me fortalecer ao longo desse processo.

À minha mãe Lúcia, meu pai Marcos, meu irmão Luan e ao meu namorado Bruno agradeço pelo amor incondicional, encorajamento constante. Vocês sempre estiveram ao meu lado, me apoiando e acreditando em mim, e sou imensamente grato por isso.

À minha amiga de curso Pabline, aos colegas de profissão Jaddy e Paulino e minha amiga agrônoma Millena, que compartilharam conhecimentos, experiências e me forneceram orientações valiosas. A colaboração e o trabalho em equipe foram essenciais para ampliar meu entendimento sobre o tema e melhorar minha abordagem.

À minha supervisora no estágio, Marta, e ao agrônomo da empresa Leandro agradeço imensamente pela oportunidade de aprender e crescer profissionalmente em um ambiente desafiador. Agradeço pela confiança depositada em mim e pelas oportunidades que me foram concedidas.

Ao meu professor e orientador Dr. Jez Braga, gostaria de expressar minha gratidão pela sua orientação, conhecimento e apoio ao longo de todo o processo do meu TCC. Suas sugestões, correções e incentivo constante contribuíram para que eu pudesse aprimorar minha pesquisa e alcançar resultados satisfatórios. Agradeço por seu comprometimento e por acreditar no meu potencial.

Por fim, gostaria de expressar minha gratidão à empresa Nativa Agrícola, pela oportunidade de realizar o estágio e pelo apoio concedido ao longo desse período. A experiência adquirida foi fundamental para complementar meu conhecimento teórico e me proporcionou uma visão prática e real do campo profissional.

A todos que mencionei e àqueles que, de alguma forma, contribuíram para o sucesso do meu TCC, meu sincero agradecimento. Vocês foram peças-chave nessa jornada, e sou grata por cada gesto de apoio, incentivo e confiança depositados em mim.

RESUMO

A análise de solo e a consulta profissional de um agrônomo são fundamentais para o cultivo eficiente e bem-sucedido de commodities agrícolas, como soja, milho, carne, açúcar, café e etanol. A disponibilidade adequada de nutrientes, tanto macronutrientes quanto micronutrientes, é essencial para o sucesso dessas culturas. No entanto, o uso excessivo de fertilizantes químicos pode ter impactos negativos no ecossistema. Portanto, práticas de manejo adequadas, como rotação de culturas, são necessárias para preservar a saúde do solo, controlar pragas e doenças, e reduzir a dependência de pesticidas. Investir em análise de solo é uma decisão econômica perspicaz, pois fornece informações cruciais para a tomada de decisões conscientes e redução de custos de produção. A análise de solo, em conjunto com tabelas de interpretação da fertilidade, ajuda a identificar deficiências de nutrientes e determinar níveis ideais de fertilização, garantindo altos rendimentos e baixo impacto ambiental. Contudo, a interpretação de muitas variáveis simultaneamente pode dificultar a tomada de decisões e melhorias nas recomendações de correções do solo. Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi aplicar a ferramenta de Análise de Componentes Principais (PCA) para facilitar o entendimento das mudanças nas propriedades do solo em áreas de cultivo de soja e milho, fornecendo informações para o planejamento e manejo sustentável. A aplicação da PCA nos dados dos solos analisados permitiu observar um perfil químico diferente entre as amostras de diferentes anos, constatar o aumento da heterogeneidade das amostras e identificar as variáveis que mais contribuíram para essas diferenças. Além disso, foi possível a identificação clara de resultados anômalos, facilitando sua remoção dos dados ou indicação de reanálise. Os resultados desta pesquisa forneceram insights para técnicos e gestores ambientais, auxiliando na tomada de decisões para a adoção de práticas que possam melhorar o cultivo. A PCA demonstrou ser uma ferramenta analítica eficaz para explorar similaridade e dissimilaridade entre as amostras, identificar amostras anômalas e simplificar as relações complexas entre múltiplas variáveis, validando a utilidade da abordagem de agricultura de precisão e reforçando a importância de análises quimiométricas no campo da agronomia.

ABSTRACT

Soil analysis and the professional consultation of an agronomist are key to the efficient and successful cultivation of agricultural commodities such as soybeans, corn, beef, sugar, coffee and ethanol. Adequate availability of nutrients, both macronutrients and micronutrients, is essential for the success of these crops. However, excessive use of chemical fertilizers can have negative impacts on the ecosystem. Therefore, proper management practices, such as crop rotation, are necessary to preserve soil health, control pests and diseases, and reduce dependence on pesticides. Investing in soil analysis is a shrewd economic decision, as it provides crucial information for making informed decisions and reducing production costs. Soil analysis, in conjunction with fertility interpretation tables, helps identify nutrient deficiencies and determine optimal fertilization levels, ensuring high yields and low environmental impact. However, the interpretation of many variables simultaneously can make it difficult to make decisions and improve recommendations for soil amendments. In this sense, the objective of this study was to apply the Principal Component Analysis (PCA) tool to facilitate the understanding of changes in soil properties in areas of soybean and corn cultivation, providing information for planning and sustainable management. The application of PCA in the data of the analyzed soils allowed the observation of a different chemical profile between the samples from different years, the increase in the heterogeneity of the samples and the identification of the variables that most contributed to these differences. In addition, it was possible to clearly identify anomalous results, facilitating their removal from the data or indication of reanalysis. The results of this research provided insights for technicians and environmental managers, helping in decision-making for the adoption of practices that can improve cultivation. PCA proved to be an effective analytical tool to explore similarity and dissimilarity between samples, identify anomalous samples and simplify complex relationships between multiple variables, validating the usefulness of the precision agriculture approach and reinforcing the importance of chemometric analyzes in the field of agronomy.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	7
2. OBJETIVOS.....	9
2.1 Geral.....	9
2.2 Específicos.....	9
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
3.1 Características físicas e químicas do solo: descrição dos principais atributos do solo.....	10
3.2 Influência das práticas de cultivo.....	14
3.3 Quimiometria.....	16
3.3.1 Análise de Componentes Principais (PCA).....	16
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
4.1 Descrição da área e análises dos parâmetros de qualidade do solo.....	18
4.2 Análise de dados.....	19
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
5.1 Modelagem preliminar por PCA para as amostras de solo.....	20
5.2 Modelagem por PCA recalculada após reanálise da amostra anômala.....	22
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	28
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	30
APÊNDICE 1 – Tabelas de resultados das análises.....	33
APÊNDICE 2 – Tabelas de interpretação de resultados.....	35

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos vinte anos, a produção agrícola no Brasil teve um aumento significativo devido aos avanços tecnológicos, a ampliação da demanda mundial e aos preços elevados. Como resultado da expansão das terras cultivadas e das alterações nas práticas de manejo das lavouras, o Brasil tornou-se o principal exportador de *commodities* como soja, milho, entre outros (MALUF; FLEXOR, 2017). O cultivo desses grãos requer a disponibilidade adequada de nutrientes para garantir um bom crescimento e desenvolvimento das plantas. Os nutrientes essenciais necessários para o seu cultivo são classificados em macronutrientes e micronutrientes. É importante monitorar os níveis de nutrientes do solo e fornecer a fertilização adequada para atender às necessidades nutricionais dessas plantas em diferentes estágios de crescimento (LOPES, 1995). A análise de solo e a consulta profissional de um agrônomo são práticas importantes para avaliar as exigências nutricionais específicas das plantas em uma determinada área de cultivo.

O uso em excesso de fertilizantes químicos pode levar ao acúmulo de nutrientes, como nitrogênio, fósforo, potássio, alguns micronutrientes como zinco, ferro, manganês, cobre, entre outros no solo, causando impactos negativos, principalmente na sustentabilidade do sistema de cultivo. Portanto, é essencial compreender as práticas adequadas de manejo que podem ser implementadas para garantir a disponibilidade de nutrientes para as plantas, evitando o desperdício e a contaminação do ecossistema. O emprego de estratégias de rotação de culturas ajuda os agricultores a manterem a saúde do solo, bem como controlar as possíveis pragas e doenças e preservar a fertilidade do solo, de modo a reduzir a dependência de pesticidas (CHERLINKA, 2023). Este processo garante a viabilidade da agricultura a longo prazo. A fertilização e as práticas de cultivo em excesso podem prejudicar a qualidade do solo e levar à menor produtividade.

Deste modo, tem-se que a produção agrícola é um sistema sustentável que envolve várias questões e o que mostram os relatórios de análise do solo, que são cruciais para tomar decisões conscientes sobre a área cultivada e cortar custos de produção. No entanto, investir em análise de solo é de fato uma boa decisão econômica, pois ao comparar um plantio com e sem a análise, a diferença é visível com base nos resultados. A análise de solo, juntamente com os parâmetros que interpretam a fertilidade, podem revelar deficiências de nutrientes e ajudar na determinação dos níveis ideais de fertilização para diferentes culturas. Isto garante um rendimento produtivo e baixo impacto ambiental (EMBRAPA, 2009).

Desta forma, esse estudo tem o objetivo de contribuir para o entendimento dos

processos de mudança das características do solo em áreas de cultivo de soja e milho, de modo a proporcionar as informações necessárias para o planejamento e manejo sustentável. Serão abordadas as alterações nas propriedades do solo, tais como pH, teor de nutrientes, matéria orgânica e fertilidade do solo, entre outros.

Assim, a compreensão dos efeitos das práticas de cultura e adubação no solo, ao longo do tempo, é de suma importância para a promoção da agricultura sustentável. Deve-se destacar que essa envolve a determinação e análise de vários parâmetros ao mesmo tempo, sendo um problema de múltiplas variáveis. Nesse contexto, a análise de componentes principais (PCA, do inglês Principal Component Analysis), amplamente empregada em diversas aplicações de análise de dados, oferece maior potencialidade na exploração e exame de dados multivariados. Ao permitir a contração dimensional e a identificação de padrões com maior facilidade, fornece uma percepção valiosa que pode auxiliar na elucidação e tomada de decisão.

A quimiometria é uma área da química analítica que utiliza técnicas de estatística e matemática para a análise de dados químicos. A PCA é a ferramenta de análise exploratória mais utilizada no ramo. Inclusive, na análise de solo, ela pode ser aplicada para investigar a composição química, proporcionando a visualização dos resultados em gráficos bidimensionais ou tridimensionais que ajudam de maneira substancial para entender as relações entre essas variáveis químicas. Assim, facilita na identificação de padrões e tendências, onde possibilita uma compreensão maior das mudanças químicas ocorridas no solo em resposta às práticas de cultivo. Nesse trabalho, a PCA contribuiu para observar as características do solo por três anos consecutivos e isto inclui o teor de matéria orgânica (M.O) , a acidez do solo medida por seu pH, o teor de saturação por alumínio (sAl%) , o teor de saturação por bases (STB%), a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) , e a razão das concentrações de cálcio e magnésio (Ca/Mg). Nesse caso, irá identificar os principais componentes (que explicam as variações) e auxiliar na análise das práticas de cultivo e adubação entendendo como isso influencia nas mudanças a longo prazo.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

O objetivo principal desse trabalho de conclusão de curso é avaliar a mudança das características do solo ao longo de três anos consecutivos em uma área utilizada para o cultivo de soja e milho. Para isso, foram realizadas análises físicas e químicas do solo, considerando o histórico de manejo da área, incluindo plantio e a adubação das culturas. Para obter os dados necessários, houve a colaboração com a empresa Nativa Laboratório de Análises Agrícolas, que forneceu as informações sobre as análises de solo e o histórico de manejo ao longo desse triênio de uma área escolhida para a realização do estudo.

2.2 Específicos

Como objetivos específicos do trabalho pode-se citar:

- Avaliar a existência de padrões ou similaridades entre as características do solo em função do tempo, plantio e adubação empregando PCA
- Tentar compreender melhor os efeitos das práticas de adubação e de plantio de soja e milho nas características do solo ao longo desse período.
- Entender como as culturas de soja e milho e as práticas de adubação afetam as características do solo nesse lapso temporal.
- Tentar contribuir para o desenvolvimento de estratégias de manejo mais eficientes, que promovam a sustentabilidade da produção agrícola e a conservação do solo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Características físicas e químicas do solo: descrição dos principais atributos do solo.

A análise de componentes químicos do solo desempenha um papel crucial na transferência de informações valiosas, sobre calagem e fertilização, de pesquisadores para agricultores. Ao examinar meticulosamente amostras de solo, pode-se identificar deficiências de nutrientes e determinar a quantidade adequada de fertilizantes necessários. Para atingir esses objetivos, várias tarefas precisam ser executadas, desde a amostragem do solo até a recomendação de medidas corretivas e fertilizantes.

A figura 1 mostra um diagrama com as etapas envolvidas no programa de análise da Embrapa, a amostragem do solo consiste em coletar amostras representativas em diferentes pontos da área a ser avaliada. Essas amostras são enviadas ao laboratório para análise. No laboratório, as amostras passam pelo preparo, que envolve secagem, moagem e peneiramento, para obter uma amostra homogeneizada. Em seguida, é realizada a análise química, que inclui a extração e quantificação dos nutrientes presentes no solo. Com base nos resultados das análises, os especialistas interpretam os dados e fazem recomendações específicas para corrigir deficiências de nutrientes e ajustar o manejo do solo. Em alguns casos, é recomendada a confirmação dos resultados e procedimentos adotados, através da repetição das análises ou realização de testes adicionais. Essas etapas são importantes para auxiliar no planejamento adequado da adubação e corrigir possíveis desequilíbrios no solo, garantindo um ambiente propício ao crescimento saudável das plantas (EMBRAPA,2009).

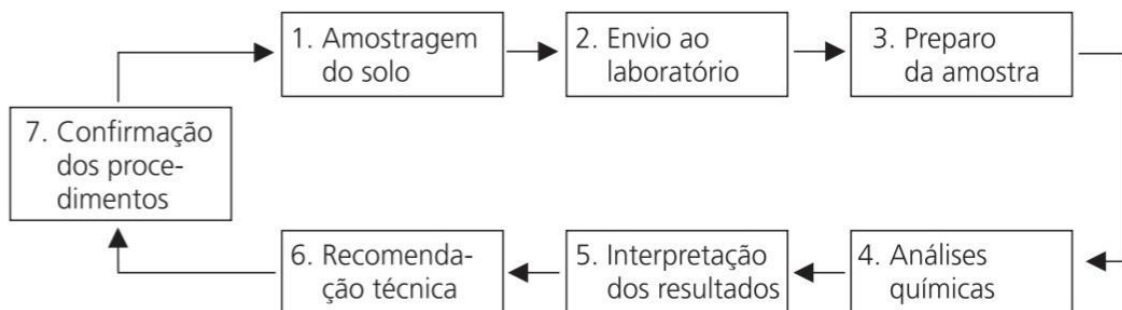


Figura 1. Diagrama ilustrativo das etapas do programa de análise química de plantas. *Fonte: EMBRAPA,2009*

O solo é essencial para a agricultura e suas características físico-químicas, como textura, estrutura, pH, teor de matéria orgânica e nutrientes, afetam a produtividade agrícola. Para determinar esses parâmetros são realizadas análises químicas que tem seu preparo iniciado na amostragem do solo. Para garantir uma análise precisa do solo, é crucial coletar

amostras de áreas com características de solo, relevo e histórico de uso semelhantes. Idealmente, a amostragem do solo deve ser realizada após a colheita da safra anterior, pouco antes do plantio da próxima. Para obter uma melhor representatividade, recomenda-se coletar aleatoriamente de 10 a 20 amostras individuais de diferentes pontos dentro de cada área designada (EMBRAPA SOJA, 2013).

Após a coleta, a preparação adequada das amostras é uma etapa fundamental para garantir resultados precisos e confiáveis, e envolve uma série de procedimentos que visam garantir a qualidade dos resultados obtidos. Dentre os parâmetros mais utilizados visando uma recomendação de adubação para um plantio de soja e milho, temos: o teor de matéria orgânica (M.O), a acidez do solo medida por seu pH, o teor de saturação por alumínio (sAl%), o teor de saturação por bases (STB%), a Capacidade de Troca Catiônica (CTC), e a razão das concentrações de cálcio e magnésio (Ca/Mg).

A matéria orgânica é um componente vital para um ecossistema saudável, pois facilita inúmeros processos físicos, químicos e biológicos. Exemplos deste último incluem a criação de poros no solo a partir do crescimento de raízes e fungos que afeta diretamente a macroestrutura do solo. Além disso, a decomposição de compostos orgânicos modifica indiretamente a disponibilidade de nutrientes, estimulando a mineralização e imobilização de nutrientes (LEITE, 2004).

Para avaliar o conteúdo orgânico do solo, um dos principais métodos ainda empregados é o da oxirredução, por meio da qual os íons dicromato reagem com a matéria orgânica em um ambiente altamente ácido, liberando CO₂. O processo de oxidação da matéria orgânica é realizado a frio, agitando suavemente a amostra de solo em uma solução de dicromato de sódio e ácido sulfúrico (EMBRAPA, 2009).

O teor de matéria orgânica (MO) um indicador chave e as várias classes de interpretação para MO são fornecidas no apêndice 2.

O pH do solo é uma medida que representa a atividade do íon H⁺ (hidrogênio) na solução do solo, ele indica a acidez do solo. O pH é determinado pela concentração de íons H⁺, que está em equilíbrio com a acidez da fase sólida do solo (RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A., 2001).

O pH é medido em solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹. O aumento na concentração de eletrólitos pode diminuir os valores de pH, deslocando H⁺ e Al³⁺ das partículas do solo. (EMBRAPA,2009).

A avaliação do pH do solo é feita utilizando o valor de 5,5 como referência. Quando o pH do solo está abaixo de 5,5 significa que há uma concentração de íons H⁺ na solução

maior que o valor tido como referência, e o solo é classificado como ácido. Por outro lado, um pH é maior que 5,5 há uma concentração de íons H^+ abaixo do valor de referência, sendo o solo classificado como alcalino. Destaca-se que essa é uma classificação arbitrária e característica da área de análise de solo, uma vez que o valor universalmente adotado para julgar a neutralidade, acidez e alcalinidade de uma solução é $pH=7,0$. A acidez do solo pode afetar a disponibilidade de nutrientes para as plantas. Em solos ácidos, alguns nutrientes essenciais para o crescimento das plantas, como fósforo, cálcio e magnésio, podem se tornar menos disponíveis para as raízes das plantas. Em casos de solos ácidos, podem ser adotadas práticas de correção, como a aplicação de corretivos de acidez, como o calcário, para elevar o pH e criar um ambiente mais adequado para o desenvolvimento das plantas.

O $sAl\%$ é uma medida da proporção do alumínio trocável em relação às bases trocáveis presentes no solo. Na agricultura, as bases trocáveis são os cátions que estão aderidos às partículas do solo e podem ser trocados por outros cátions presentes na solução do solo. A quantidade de bases trocáveis em um solo indica a sua capacidade de reter nutrientes e a sua fertilidade. As bases trocáveis referem-se à soma dos cátions essenciais, como potássio (K^+), sódio (Na^+), cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}), que estão disponíveis para serem trocados com outros cátions no solo (TEIXEIRA, 2017). A soma desses cátions essenciais na capacidade de troca catiônica (CTC) do solo representa a capacidade do solo de reter essas bases e fornecê-las para as plantas. Quando o grau de saturação de alumínio é calculado, é considerada a relação entre o alumínio trocável e a soma das bases trocáveis. Para facilitar a compreensão, este texto se referirá à saturação de base como $sAl\%$ em vez da notação média agronômica típica de $m\%$.

Quando as condições ideais são alcançadas, ou seja, o pH do solo está acima de 5,5 e a presença de íons Al^{3+} é mínima, o grau de saturação de alumínio ($sAl\%$) será próximo de zero. Isso indica que a quantidade de alumínio trocável no solo é insignificante e não representa uma limitação para o crescimento das plantas (PREZOTTI; GUARÇONI M., 2013).

A saturação de alumínio no solo é calculada pela relação entre o teor de alumínio trocável e a capacidade de troca catiônica efetiva (CTC) do solo, representada pela letra t . A fórmula geral para o cálculo da saturação de alumínio ($sAl\%$) é a seguinte:

$$sAl\% = \frac{Al^{3+}}{t} \times 100, \text{ onde: } t = [K^+] + [Na^+] + [Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] + [Al^{3+}]$$

Portanto, ao dividir o teor de alumínio trocável pela CTC efetiva e multiplicar por

100, obtemos a porcentagem de saturação de alumínio no solo. Para essa variável também temos uma tabela a qual temos valores de referência para fins interpretativos apresentada no apêndice 2.

Na saturação por alumínio utilizamos para o cálculo a CTC efetiva que reflete a capacidade do solo de reter e disponibilizar cátions nutrientes, enquanto na saturação por bases é usado a CTC total que inclui cátions não trocáveis, como o H^+ , que não contribuem diretamente para a fertilidade do solo. (RONQUIM, 2010).

A saturação de bases no solo (STB%) é um indicador importante da fertilidade do solo. Reflete a quantidade de bases (cátions como cálcio, magnésio, potássio e sódio) em relação à capacidade de troca catiônica (CTC) total do solo, representada por T. A fim de simplificar a compreensão, este trabalho usará STB% como uma designação para saturação de base, em vez da representação usual de meios agrônômicos de v%. Para atender às necessidades da cultura, muitas vezes é desejável aumentar a saturação de bases do solo por meio da prática de calagem, que envolve a aplicação de calcário. O objetivo geralmente é atingir uma faixa de saturação de bases de 50% a 80% (PREZOTTI; GUARÇONI M., 2013). Portanto, o aumento da saturação de bases por meio da calagem contribui para a redução da acidez do solo, melhorando as condições gerais do solo para o crescimento das plantas.

A saturação de bases no solo é calculada pela relação entre a soma de bases (cálcio, magnésio, potássio e sódio) e a capacidade de troca catiônica (CTC) total do solo. A fórmula geral para o cálculo da saturação de bases (STB%) é a seguinte:

$$STB\% = \frac{SB}{T} \times 100,$$

onde $T = [K^+] + [Na^+] + [Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] + [Al^{3+}] + [H^+]$ e $SB = [Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] + [K^+] + [Na^+]$

A capacidade de troca catiônica (CTC) é uma propriedade importante do solo que indica sua capacidade de reter e liberar cátions. Uma alta CTC é desejável em solos agrícolas, pois indica que o solo possui uma capacidade maior de reter nutrientes essenciais para as plantas, como cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^+), evitando sua lixiviação e permitindo que fiquem disponíveis para as raízes das plantas a longo prazo. Por outro lado, se cátions potencialmente tóxicos, como o hidrogênio (H^+) e o alumínio (Al^{3+}), ocupam uma parte significativa da CTC, isso indica que o solo pode apresentar condições

inadequadas para o crescimento das plantas (RONQUIM, 2010).

Portanto, uma boa proporção entre cátions essenciais e cátions potencialmente tóxicos na CTC do solo é um indicativo de sua qualidade e fertilidade. É importante considerar a CTC ao manejar o solo e aplicar fertilizantes, a fim de garantir a disponibilidade adequada de nutrientes e evitar problemas de toxicidade (RONQUIM, 2010).

A fórmula geral para o cálculo da CTC (T) é a seguinte:

$$CTC (T) = SB + [H^+] + [Al^{3+}], \text{ onde } SB = [K^+] + [Na^+] + [Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]$$

A associação entre os nutrientes cálcio e magnésio na nutrição das plantas se deve às suas características químicas quase idênticas, incluindo raio iônico, valência, grau de hidratação e mobilidade. Essa similaridade resulta em uma competição por locais de adsorção do solo e absorção radicular (MENDEIROS *et al.*, 2008).

A correlação entre os nutrientes Ca e Mg pode auxiliar na decisão de qual tipo de calcário, calcítico (possuindo uma proporção maior de Ca) ou dolomítico (possuindo proporções iguais para Ca e Mg, sendo mais utilizado em solos que apresentam deficiência de magnésio), utilizar para o manejo da acidez do solo. Além disso, serve como um guia complementar para a interpretação dos resultados da análise química do solo (DE CASTRO, 2020).

Para uma composição ideal do solo, recomenda-se que a proporção de teor de Ca para Mg em $cmol/dm^3$ esteja dentro da faixa de 1:1 até um máximo de 10:1. É importante observar que o solo deve conter no mínimo $0,5 cmol/dm^3$ de Mg (onde $cmol=10^{-2}mol$.) (SOUSA E LOBATO, 2004).

3.2 Influência das práticas de cultivo

A qualidade do solo é essencial para a produtividade e a sustentabilidade da agricultura, práticas de cultivo podem ter um impacto significativo na saúde e na qualidade do solo. A rotação de culturas, a adoção de práticas de cultivo conservacionistas, como a semeadura direta e a redução do uso de pesticidas, são algumas das estratégias que podem melhorar a qualidade do solo. Neste tópico, serão discutidos os principais impactos das práticas de cultivo na qualidade do solo ao longo do tempo, destacando a importância da adoção de práticas sustentáveis para a saúde do solo e a produtividade agrícola.

A produtividade dos solos cultivados é limitada pelo cultivo repetido, o que reduz a fertilidade ao longo do tempo. Isso representa um desafio considerável em regiões tropicais

com alta densidade populacional, onde a expansão da agricultura depende do trabalho com solos empobrecidos que são ácidos, pobres em nutrientes ou propensos à escassez de água. Portanto, em países como o Brasil, é crucial ter uma compreensão diferenciada das propriedades químicas e físicas do solo para manejá-lo e utilizá-lo de maneira ideal, com os insumos certos, para obter os melhores rendimentos possíveis (RONQUIM, 2010).

Práticas agrícolas eficazes estão se tornando cada vez mais dependentes de uma variedade de técnicas, incluindo rotação de culturas e manejo do solo.

A rotação de culturas é um processo em que diferentes espécies de plantas são rotacionadas anualmente na mesma área agrícola para fins comerciais e de recuperação do solo. Este método tem inúmeros benefícios. Melhora as características físicas, químicas e biológicas do solo, auxiliando simultaneamente no controle de ervas daninhas e pragas, a rotação de culturas ajuda a restaurar a matéria orgânica no solo e protege-a dos danos induzidos pelo clima. Com isso, o Sistema Semeadura Direta se torna sustentável, impactando positivamente a produção agrícola e o meio ambiente como um todo (CRUZ; PEREIRA FILHO ; ALBUQUERQUE, 2021).

O principal objetivo do manejo do solo é criar um ambiente propício para a semeadura, crescimento e produção de culturas por um período indefinido. O preparo do solo, a operação mais importante e crucial, envolve uma série de práticas que requerem atenção cuidadosa. Não é apenas uma mera tecnologia, mas um conjunto complexo de operações que devem ser executadas meticulosamente, como a exemplo a homogeneização e o peneiramento do solo.

Quando usado apropriadamente, este método de cultivo pode resultar em alta produtividade com custos mínimos. No entanto, uma aplicação inadequada pode causar rapidamente a deterioração física, química e biológica do solo, diminuindo gradativamente sua capacidade produtiva (EMBRAPA SOJA, 2013).

Atualmente, a combinação mais comum de culturas anuais no Cerrado é o plantio de soja no verão, seguido imediatamente pelo milho na segunda safra. Para manter a qualidade e estabilidade produtiva dos solos de textura mais arenosa, a matéria orgânica é um componente crucial. Entretanto, os solos do Cerrado apresentam naturalmente baixa disponibilidade de micronutrientes, especialmente Zinco (Zn) e Boro (B), o que levou à ampla aplicação desses nutrientes, junto com formulados NPK (nitrogênio, fósforo e potássio, respectivamente), pelos agricultores da região (RESENDE *et al.*, 2018). Segundo o estudo feito por Fernando Lamas, pesquisador da Embrapa, o maior desafio atual para a fertilidade do solo na produção de soja/milho segunda safra no Cerrado é a necessidade de

diversificar o sistema agrícola, buscando alternativas à sucessão simples dessas duas culturas, que ainda é amplamente utilizada em vastas áreas da região.

3.3 Quimiometria

A quimiometria é método interdisciplinar que combina conceitos da matemática, química e estatística, envolvendo a aplicação de técnicas estatísticas e matemáticas para análise de dados químicos de disciplinas de química orgânica, química analítica e química medicinal, além do planejamento de experimentos e simulações. A mesma desempenha um papel fundamental no processamento e análise de dados químicos, visando extrair informações relevantes e úteis desses dados, transformando de dados brutos, como números de uma tabela, em informações que podem ser utilizadas na tomada de decisões. (FERREIRA, 2015).

Essa disciplina é amplamente utilizada para o planejamento e otimização de procedimentos experimentais, bem como na interpretação e análise dos resultados obtidos. Ela busca identificar padrões, relações e tendências nos dados químicos, permitindo a compreensão mais completa dos fenômenos químicos estudados.

3.3.1 Análise de Componentes Principais (PCA)

A análise de componentes principais, do inglês “*Principal Component Analysis*” (PCA), é uma técnica notável que é amplamente utilizada para analisar dados multivariados e reduzir sua dimensionalidade, permitindo a identificação de padrões e relações entre variáveis. Essa técnica é útil para identificar a influência das variáveis na variação total dos dados e pode ser aplicada em várias áreas, incluindo a química, biologia, e engenharia, para análise de dados complexos e para a tomada de decisões (VALDERRAMA *et al.*, 2015).

Em outras palavras, a PCA é um método de decomposição matemático que permite encontrar os eixos/direções de maior variabilidade dos dados, que são as PC's, e projetar as amostras nesses eixos, obtendo-se assim uma representação dos dados em um espaço com menor número de variáveis e de interpretação mais simples.

A PCA envolve reduzir o número de variáveis enquanto retém o máximo de informações. Para minimizar a perda de informação, o objetivo é reestruturar a informação associada de forma a redistribuir a variação observada dos eixos. Este processo visa criar um novo conjunto de eixos ortogonais não correlacionados. Existem muitos softwares e ambientes de computação disponíveis, incluindo o *Matlab*®, que é amplamente utilizado

para análise de dados multivariados. A PCA é uma técnica comum usada para reduzir a dimensionalidade dos dados e transformar as amostras em espaços de dimensão reduzida definidos pelas componentes principais ou PC's do inglês *Principal Components* (PCs). Durante o cálculo matemático das PC's, a matriz **X** é decomposta em três matrizes: a matriz de escores (**T**), que contém as coordenadas das amostras projetadas no espaço definido pelas PC's; a matriz de pesos (**P^T**), que contém os pesos para cada variável em cada PC; e uma matriz de resíduos (**E**), que contém as informações remanescentes que não são explicadas pelas PC's. Como expressado na equação abaixo: (SOUZA; POPPI, 2010).

$$\mathbf{X} = \mathbf{TP}^T + \mathbf{E}$$

A partir dos gráficos de escores e pesos pode-se obter de forma mais simplificada informações valiosas sobre a relação entre as amostras e as variáveis, bem como sobre a presença de amostras com comportamento anômalo. (SOUZA; POPPI, 2010). Os gráficos de pesos ajudam a identificar quais variáveis estão mais fortemente relacionadas a cada componente principal e como elas se relacionam entre si. Os gráficos de escores permitem visualizar a distribuição dos dados no espaço das componentes principais e identificar padrões, agrupamentos ou anomalias.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Descrição da área e análises dos parâmetros de qualidade do solo

Todas as amostras que fizeram parte desse trabalho foram analisadas utilizando a metodologia proposta pela Embrapa (EMBRAPA, 2009) para a caracterização química de solos. Amostras de solo foram coletadas selecionando aleatoriamente os pontos de coleta. Cerca de 30 pontos de amostras simples foram retiradas em cada ponto, atingindo uma profundidade de 20 cm. A propriedade em que a coleta foi realizada será descrita a seguir sob linhas gerais, de modo a preservar informações do proprietário. A fazenda selecionada fica no Município de Buritis, em Minas Gerais. Sua área agrícola é seccionada para culturas anuais em rotação de soja e milho. Ao final das análises das amostras, os resultados dos ensaios foram lançados em um sistema eletrônico do laboratório Nativa. Esses dados são avaliados, e feito reanálise se assim houver necessidades.

As amostras foram coletadas no período de agosto de 2019, setembro de 2020 e outubro de 2021. Os dados obtidos nas planilhas de Excel (apêndice 1) disponibilizadas pela empresa Nativa Laboratório de Análises foram reorganizados por ano, amostra e variáveis químicas analisadas.

Para entender melhor os atributos químicos, uma análise descritiva foi realizada para obter informações sobre o comportamento dos dados. As variáveis químicas selecionadas para estudo foram pH, MO (matéria orgânica), STB% (saturação por bases), sAl% (saturação por alumínio), CTC (capacidade de troca catiônica) e a razão Ca/ Mg. Conforme mencionado anteriormente, as análises seguiram as recomendações no guia da EMBRAPA (2009). Abaixo são descritos brevemente a forma como cada parâmetro foi determinado, sendo que detalhes podem ser obtidos no guia da EMBRAPA.

Para medir pH foi utilizado um copo com 10 cm³ de solo, adicionou-se 25 mL uma solução de CaCl₂ com concentração de 0,01 mol L⁻¹. A mistura foi agitada por 15 minutos em uma mesa agitadora, visando a homogeneização dos componentes. Em seguida, o aparelho de medição de pH foi calibrado com soluções padrão de pH 4,00 e pH 7,00. Após um período de 30 minutos, para permitir o equilíbrio e decantação da suspensão, o pH foi medido sem nova agitação, utilizando o eletrodo de vidro imerso na suspensão homogeneizada.

Para determinar matéria orgânica, foi transferido 1 cm³ de solo para um frasco cilíndrico de 100 mL. Uma prova em branco, sem amostra, também foi realizada. Em seguida, adicionou-se 10 mL de uma solução com concentração de 0,667 mol L⁻¹ de

dicromato de sódio e 5 mol L^{-1} de ácido sulfúrico, utilizando um dispensador. A mistura foi agitada durante 10 minutos em um agitador com movimento circular horizontal a uma velocidade mínima de 180 rpm. Após um período de repouso de uma hora, adicionou-se 50 mL de água para promover a mistura das soluções e permitiu-se a decantação durante a noite. Após 24Hr, o líquido sobrenadante foi transferido para a cela de medida de um espectrofotômetro, utilizando um filtro de transmissão máxima de 650nm. O aparelho foi ajustado com o zero usando a prova em branco completa.

Para calcular STB% (saturação por bases), sAl% (saturação por alumínio), CTC (capacidade de troca catiônica) e a relação Ca (cálcio) e Mg (magnésio), foi realizada a determinação da concentração de cada analito (Ca, Mg e Al), que são determinados coletando 5 cm^3 de solo e adicionando 50 ml da solução de KCl 1 mol L^{-1} , agitação por 5 minutos e deixar em repouso durante uma noite, uma fração da amostra foi retirada para fazer leitura de Ca e Mg por espectrofotometria de absorção atômica e na outra fração foi feita titulação com NaOH para obter o teor de alumínio. Para determinar K e Na, foi coletado 5 cm^3 de solo, adicionando 50 mL de uma solução de *Mehlich 1*, constituída por uma mistura de HCl $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ + H_2SO_4 $0,0125 \text{ mol L}^{-1}$, a amostra é agitada por 5 min e deixada em repouso durante a noite, uma fração da amostra foi separada para fazer as determinações de K e Na por fotometria de chama.

Na determinação de $[\text{H}^+] + [\text{Al}^{3+}]$ foi realizada a coleta 5 cm^3 de solo, adicionou-se 75 mL de acetato de cálcio pH 7,1–7,2, agitou-se a solução e em seguida deixou-se decantar durante uma noite. Após decorrido o tempo, uma alíquota de 25 mL foi retirada e titulada com solução de NaOH, usando 3 gotas de fenolftaleína como indicador.

4.2 Análise de dados

Os dados foram analisados com o auxílio do Software *Matlab*® e pacote *PLS-Toolbox*® versão 8.8.1. Ao todo, foram analisadas 92 amostras de solo utilizando a técnica de PCA. Para construir o dendrograma foi utilizada a técnica de Análise Hierárquica de Agrupamentos (HCA, do inglês Hierarchical Cluster Analysis), empregando distância Euclidiana para medir a distância entre as amostras e o método de Ward como estratégia de agrupamento.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando os resultados médios dos parâmetros estudados pode-se observar que o ano de 2019, quando comparado aos outros anos, apresentou valores de STB%, CTC e Ca/Mg dentro dos recomendados, mas não ideais (conforme apresentados na tabela 7 e comparando aos valores das tabelas no apêndice 2). Enquanto a sAl% (saturação por alumínio) e matéria orgânica apresentaram valores altos, levando em conta os valores recomendados para o cultivo de soja e milho. Ronquim (2010) propôs que um valor de STB% do solo entre 50 e 80% e um nível de pH entre 6,0 e 6,5 são ideais para atingir a produtividade média esperada dessas culturas. Portanto, pode-se concluir que os valores de STB% encontrados estão dentro da faixa ideal, mas os valores de pH são relativamente baixos em todos os anos, sugerindo que corretivos de acidez podem ser necessários. Já para os valores de sAl% o ideal seria o mais próximo de zero possível, sendo assim temos que último ano está mais adequado. Por outro lado, os valores de matéria orgânica embora quando vistos na tabela apresentem um valor relativamente alto em relação aos valores gerais recomendados, é necessário que se tenha valores ainda mais elevados para esse tipo de cultivo.

Tabela 7. Média e desvio padrão dos parâmetros gerais escolhidos para esse estudo.

Parâmetros	2019	2020	2021
pH	5,55 (\pm 0,04)	5,64 (\pm 0,09)	5,68 (\pm 0,16)
Matéria orgânica	3,33 (\pm 0,11)	2,88 (\pm 0,16)	3,12 (\pm 0,18)
CTC	8,20 (\pm 0,14)	8,99 (\pm 0,42)	9,45 (\pm 0,52)
STB%	53,12(\pm 1,71)	57,79 (\pm 2,48)	61,53 (\pm 4,36)
sAl%	0,46 (\pm 0,05)	0,20 (\pm 0,00)	0,19 (\pm 0,03)
Ca/Mg	3,05 (\pm 0,10)	3,82 (\pm 0,26)	3,35 (\pm 0,25)

pH em $CaCl_2$; Matéria orgânica (dag/Kg); CTC: Capacidade de troca de cátions ($cmol_c/dm^3$); STB%: Saturação por bases (%); CTC: Capacidade de troca de cátions ($cmol_c/dm^3$); sAl%: Saturação por alumínio (%); Razão Ca/Mg ($cmol_c/dm^3$). Fonte: Elaborado pela própria autora, 2023.

5.1 Modelagem preliminar por PCA para as amostras de solo

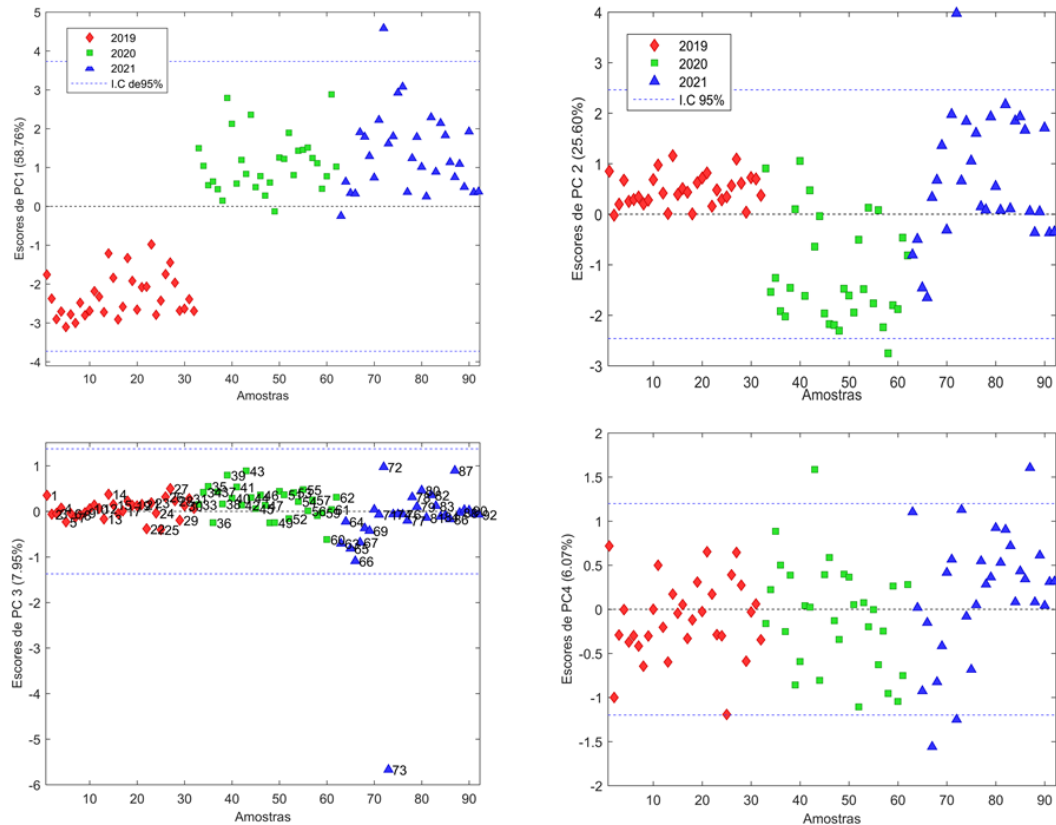
Para avaliar a similaridade das amostras e as variáveis que mais influenciaram nas tendências observadas o conjunto de dados completo foi submetido a PCA empregando

autoescalamento como pré-processamento dos dados. O modelo PCA que utilizou quatro componentes principais capturou 98,39% da variância total dos dados. Isso significa que a combinação dessas quatro componentes principais é capaz de explicar praticamente toda a variação presente nos dados originais. A variância explicada total é a soma das variâncias explicadas por cada componente principal. Quanto maior for a variância explicada total, mais eficiente é a redução de dimensionalidade proporcionada pelo PCA, pois é possível representar a maior parte da variabilidade dos dados com menos componentes, conforme visto na tabela 8.

Tabela 8. Percentual de variância explicada por cada componente principal para o modelo PCA construído para amostras de um solo específico.

Componente Principal	% Variância explicada	% Variância total explicada
1	58,76	58,76
2	25,60	84,36
3	7,95	92,31
4	6,07	98,39
5	1,10	99,49
6	0,51	100,00

Figura 2. Distribuição dos escores para amostras de solo em função do ano que a amostra foi coletada.



A Figura 2 apresenta o gráfico de escores das quatro primeiras PC's, onde pode-se observar que a PC1 separa muito bem as amostras do ano de 2019 em relação aos outros anos. Isso se deve, pois, no ano de 2019 ainda não havia um acompanhamento do solo, e nos anos de 2020 e 2021 as análises foram feitas após as recomendações de adubação pela empresa. Na PC2 se observa uma separação quase completa das amostras do ano de 2020 em relação aos outros anos, indicando que esse ano também teve um comportamento distinto.

Analisando os escores de PC3 (figura 2) notamos a presença de uma amostra anômala, amostra 73, esse gráfico (figura 2, imagem 3) ilustra muito bem como a ferramenta de PCA é bastante eficiente na detecção de pontos anômalos que podem conter algum erro de análise. Inspeccionando a planilha de resultados, notou-se que o pH estava com o valor de 5,14 o que é abaixo do esperado. Após reanálise desse ponto amostral percebeu-se que se tratava de um erro de análise, sendo o valor corrigido para 5,89 e a PCA recalculada.

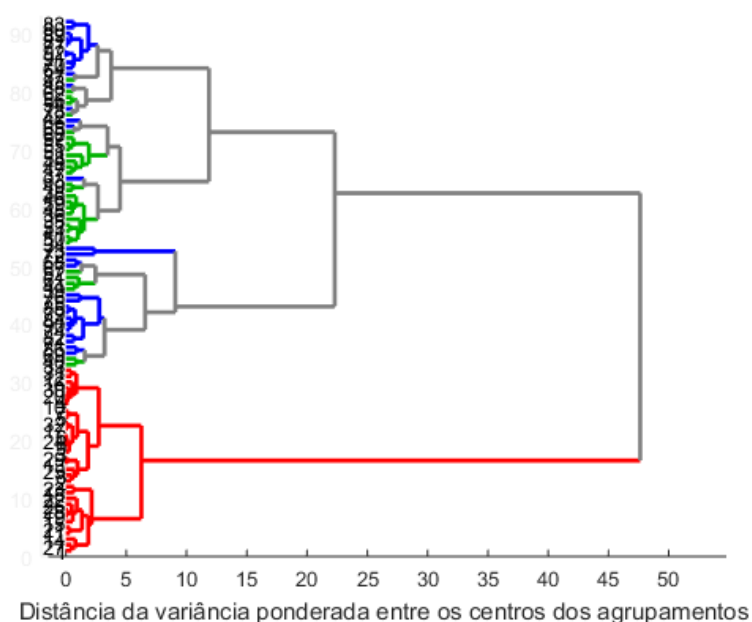
5.2 Modelagem por PCA recalculada após reanálise da amostra anômala.

Após correção do valor anômalo foi criado um dendrograma com os dados autoescalados, apresentado na Figura 3. O dendrograma é composto por linhas e ramificações que se conectam. Cada amostra está representada por uma linha na parte à esquerda do dendrograma, enquanto os grupos/clusters presentes nos dados são

evidenciados pelas ramificações à direita. O tamanho das ramificações representa a distância entre as amostras, que representa uma medida de dissimilaridade ou similaridade empregando distância Euclidiana.

Foi possível identificar na Figura 3 quais amostras de solo coletadas em diferentes anos são mais semelhantes entre si. Isso é útil para analisar tendências temporais, identificar padrões de mudanças nas propriedades do solo ao longo do tempo e entender a evolução do solo em determinada área. É notório a maior similaridade entre as amostras dos anos de 2020 e 2021, que foram os anos monitorados pela empresa e que já sofreram correção do solo, e a separação nítida do primeiro ano de 2019 (vermelho).

Figura 3. Dendograma dos dados originais após correção do valor anômalo pre-processados com autoescalonamento. vermelho ano 2019, verde ano 2020 e azul ano 2021.



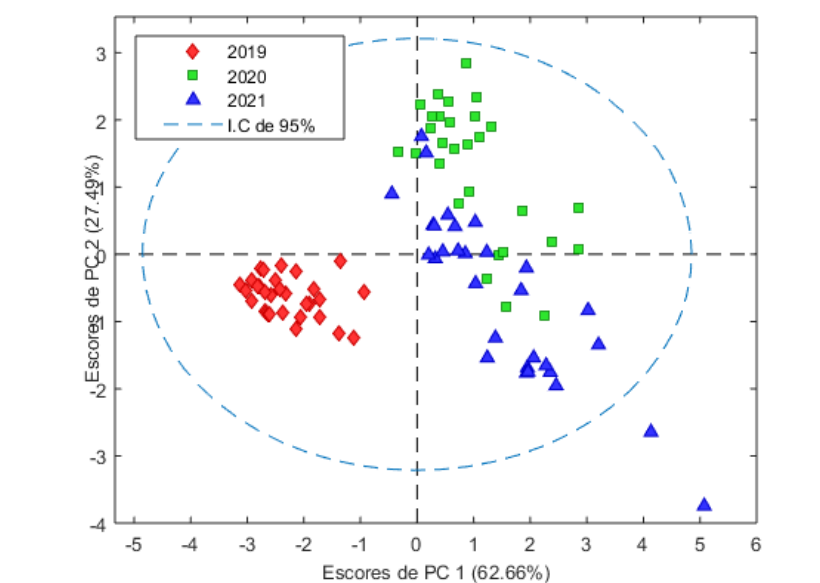
A tabela 7 apresenta os valores de variância explicada para o modelo PCA pós a correção valor de pH. Pode-se observar que nesse novo modelo o uso de somente 2 ou 3 PC's consegue explicar 90,14 ou 96,52% dos dados, respectivamente. Inicialmente, serão consideradas as três primeiras PC's, sendo os 3,48% restantes considerados correspondentes ao ruído aleatório presente nos dados. Logo, comparando com o modelo anterior, constata-se que uma PC estava sendo necessária apenas para explicar aquele valor anômalo.

Com isso temos a tabela 9, recalculada com os valores, sendo assim a figura 4 foi projetada, observe abaixo:

Tabela 9. Percentual de variância explicada por cada componente principal recalculada para o modelo PCA construído para amostras de um solo específico.

Componente Principal	% Variância explicada	% Variância total explicada
1	62,66	62,66
2	27,49	90,14
3	6,37	96,52
4	2,14	98,65
5	0,93	99,58
6	0,42	100,00

Figura 4. Distribuição dos escores de PC1 x PC2 para amostras de solo em função do ano que a amostra foi coletada.



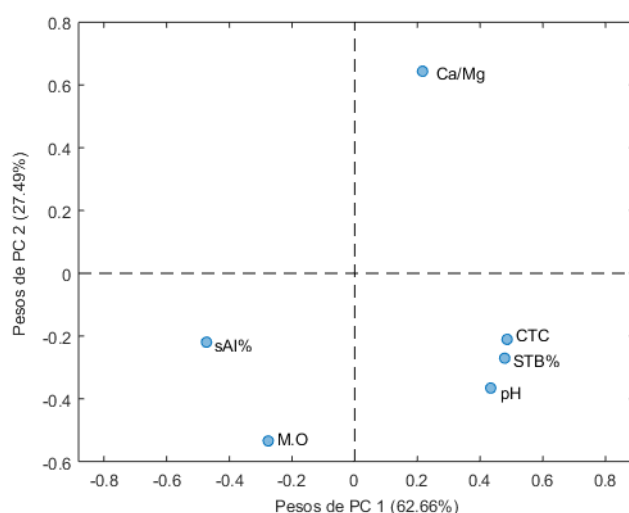
Ao analisar o gráfico de escores de PC1 x PC2 (Figura 4) observou-se que as amostras de 2019 se separam muito bem, quando comparado as amostras de 2020 e 2021. As sobreposições no gráfico das amostras de 2020 e 2021 de um mesmo pivô confirmam a similaridade nos parâmetros do solo e que os resultados das análises sofriam pouca variação quando se tinha um acompanhamento adequado. Destaca-se que a Figura 4 com duas PC's já apresenta um resultado que concorda muito bem com o dendrograma gerado com 100% da informação dos dados.

Para identificar as variáveis químicas originais que tiveram maior influência no comportamento do gráfico de escores foi realizada a plotagem de um gráfico de pesos. Essa visualização nos permitiu observar a correspondência entre as componentes principais

selecionadas no gráfico de escores e as variáveis originais. Ao analisar conjuntamente os gráficos de escores e pesos, pode-se avaliar como as seis variáveis originais afetaram a organização das amostras em cada gráfico.

Para simplificar a análise, reduzimos o conjunto de dados original, que continha seis variáveis, para apenas três componentes principais, selecionadas pelo modelo com dados após correção da amostra anômala. Essa visualização bidimensional dos dados reduzidos permite identificar relacionamentos, agrupamentos ou tendências entre as amostras sendo possível assim extrair padrões relevantes.

Figura 5. Distribuição dos pesos de PC1 x PC2 para amostras de solo em função do ano que a amostra foi coletada.



Ao analisar o gráfico de escores e pesos das amostras de solo para PC1 x PC2 (Figuras 4 e 5), é possível observar um agrupamento separado das amostras do ano de 2019. Nos escores negativos de PC1 têm-se as amostras do primeiro ano analisado e nos escores positivos têm-se a grande maioria das amostras dos dois anos seguintes. Os pesos negativos de PC1 mostram que as variáveis de matéria orgânica (M.O) e saturação por alumínio (sAl%) são as principais responsáveis por essa distinção, sendo assim, quanto maior o valor desses parâmetros e menor os demais, mais negativo estará o escore em PC1. Pode-se notar também que esse primeiro ano os solos possuem um pH um pouco mais ácido, pois o parâmetro de pH se encontra no quadrante oposto a essas amostras.

O valor de sAl%, embora não muito longe do que se espera, requer alguns ajustes, pois o ideal é o mais próximo de zero. Além disso, observa-se que as variáveis pH, STB% e CTC são muito correlacionadas, apesar de terem significados químicos distintos, observa-se

que nas amostras de solos analisadas esses parâmetros tem variação correlacionada.

As amostras dos anos de 2020 e 2021 apresentaram uma maior dispersão em relação ao ano de 2019, indicando que apesar da correção do solo implementada ter mudado as características do solo a heterogeneidade dos pontos amostrados aumentou em relação ao ano de 2019. Essa maior dispersão provavelmente é resultado da qualidade do calcário, gesso e cloreto de potássio aplicados na correção do solo e nas máquinas empregadas para essa aplicação.

No segundo ano (2020) as mostras se encontram mais na parte positiva de PC2 e de PC1 revelou a grande variação na relação Ca/Mg, sendo a variável que mais influenciou na diferenciação desse ano específico, visto que todas as outras variáveis se encontram nos pesos negativos de PC2. Provavelmente esse comportamento é resultado da recomendação adotada no primeiro ano, que foi a utilização de calcário (2.590 kg/ha), gesso (1.298 kg/ha) e cloreto de potássio (166 kg/ha) para a correção do solo. Principalmente a adição de calcário eleva os níveis de Ca em relação aos de Mg no solo, essa relação é muito importante quando tratamos do cultivo da soja principalmente. Além disso, diminuiu sAl%, chegando perto do ideal que seria zero, houve também uma degradação da matéria orgânica e por isso sua diminuição no seu valor, e com a recomendação feita para esse ano obteve um aumento nos valores de pH.

O terceiro ano (2021) observou-se uma pequena separação com relação as amostras do ano de 2020. Ao se verificar a recomendação feita para 2021 foi constatado que uma quantidade bem mais baixa de calcário (2.340 kg/ha) e gesso (1.155 kg/ha) foi utilizada em comparação com o ano de 2020. Como resultado dessa diferença na correção do solo nota-se que a razão Ca/Mg diminuiu um pouco em relação ao último ano. Além disso, sugere-se que essa menor correção também é responsável pelo leve aumento do pH, CTC e STB%.

Figura 10. Distribuição dos escores de PC3 para amostras de solo em função do ano que a amostra foi coletada.

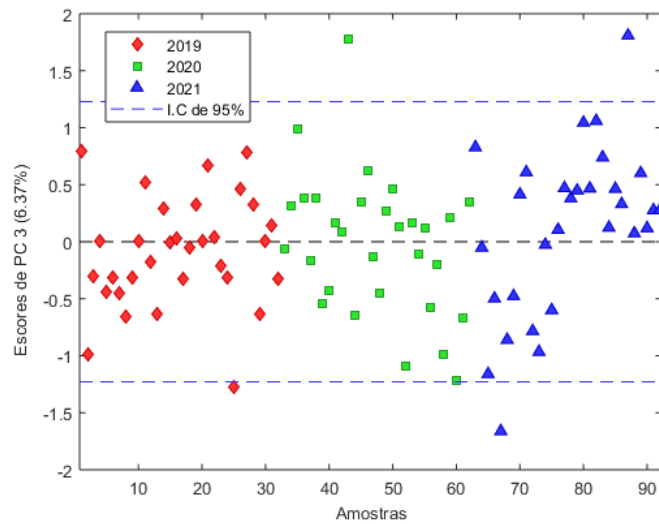
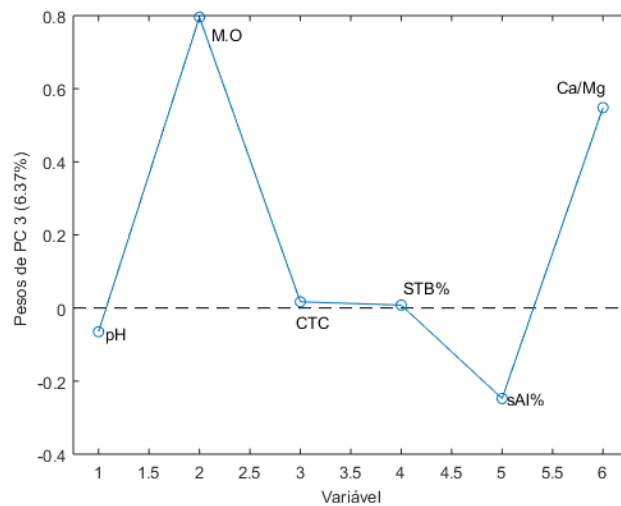


Figura 11. Distribuição dos pesos de PC3 para amostras de solo em função do ano que a amostra foi coletada.



No gráfico de escores de PC3 vemos que não há nenhuma tendência clara de separação das amostras. Apenas no ano de 2021 tem-se uma certa divisão das amostras entre os escores positivos e negativos. Contudo, não se observou nenhuma explicação para essa divisão. Tendo em vista essa dispersão é quase aleatória e que essa PC explica apenas 6,37% de variância, chegou-se a conclusão que apenas as duas primeiras componentes principais são suficientes para descrever o conjunto de dados adequadamente. Logo o modelo PCA proporcionou uma redução de seis para duas variáveis, o que simplificou muito a interpretação dos dados.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A PCA é uma técnica estatística utilizada para identificar padrões e relações entre variáveis em um conjunto de dados multidimensionais, tendo se mostrado muito útil em análises exploratórias, como no caso da análise do solo mencionada. O PCA se mostrou útil para reduzir a dimensionalidade dos dados de 6 para 2 componentes principais e identificar as principais variáveis que contribuem para as diferenças observadas entre as amostras de solo de cada ano em específico. Através da análise dos gráficos de escores e pesos, foi possível observar padrões de similaridade entre as amostras.

No caso específico mencionado, a análise dos escores das amostras de solo revelou um perfil químico diferente para as amostras do ano de 2019 em comparação com as amostras de 2020 e 2021. Isso indica que houve uma mudança nas características químicas do solo após a implementação da agricultura de precisão. Além disso, a análise exploratória permitiu identificar as variáveis que mais contribuíram para o comportamento dos pontos amostrados em cada ano. Nesse caso, as variáveis mais relevantes foram a saturação por alumínio, a matéria orgânica no ano de 2019 e a razão Ca/Mg para o ano de 2020. Isso sugere que essas características químicas têm um papel importante na diferenciação das amostras de solo antes e depois da agricultura de precisão.

A análise das amostras do mesmo pivô, revelou a manutenção de um perfil consistente de resultados próximos mas não tão homogêneos nos anos de 2020 e 2021. Isso sugere que aumentou a heterogeneidade nas características químicas do solo dentro dessas áreas específicas após as correções sugeridas, revelando que a forma de aplicação dos adubos pode ser melhorada. Uma vez que a heterogeneidade das amostras dos anos de 2020 e 2021, pode ser explicada pela qualidade do calcário aplicada, maquinário utilizado ou outros erros ocorridos pela prática de aplicação. Contudo, a identificação de apenas uma amostra como anômala indica que as análises e a amostragem foi realizada de forma eficiente.

No contexto da agricultura de precisão, os resultados obtidos pela PCA puderam mostrar de forma clara a mudança das características do solo nos três anos estudados em função das análises realizadas, o que ressalta a importância dessas práticas na agricultura moderna. Isso é valioso tanto para a empresa quanto para a aplicação de conhecimentos quimiométricos em nível de graduação, pois valida a utilidade dessa abordagem em ambientes práticos e reforça a importância da agricultura de precisão para o manejo adequado do solo.

Conclui-se, que o uso do PCA na análise exploratória do solo permitiu identificar padrões de similaridade entre as amostras, destacar diferenças entre os anos analisados,

identificar as principais variáveis que contribuíram para essas diferenças e identificar amostras com comportamento anômalo. Isso fornece conhecimentos valiosos para a empresa e destaca a utilidade da PCA como ferramenta analítica no campo da agronomia, fornecendo insights valiosos para entender as mudanças ocorridas no solo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CASTRO, César; OLIVEIRA JUNIOR, Adilson; OLIVEIRA, Fábio; FIRMANO, Ruan; ZANCANARO, Leandro; KLEPKER, Dirceu; FOLONI, José; BRIGHENTI, Alexandre; BENITES, Vinícius. **Magnésio: Manejo para o equilíbrio nutricional da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020. 54 p.

CRUZ, José Carlos; PEREIRA FILHO, Israel Alexandre; ALBUQUERQUE, Manoel Ricardo. **Rotação de culturas**. [S. l.]: Embrapa, 8 dez. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacaotecnologica/cultivos/milho/producao/rotacao-de-culturas>. Acesso em: 4 maio 2023.

CHERLINKA, Vasyl. **Rotação De Culturas: Objetivo, Técnicas E Vantagens**. [S. l.], 21 mar. 2023. Disponível em: <https://eos.com/pt/blog/rotacao-de-culturas/>. Acesso em: 15 maio 2023.

EMBRAPA SOJA (Londrina). **Tecnologias de Produção de Soja - Região Central do Brasil 2014**. [S. l.: s. n.], 2013. 265 p. ISBN 2176-2902. Disponível em: [file:///C:/Users/Windows10/Downloads/SP-16-online%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Windows10/Downloads/SP-16-online%20(1).pdf). Acesso em: 22 maio 2023.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes** (2.ed.) Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 628p.

FERREIRA, Márcia Miguel. **Quimiometria: Conceitos, Métodos e Aplicações**. Campinas, SP: Unicamp, 2015.

FILIZOLA, Heloisa; GOMES, Marco; SOUZA, Manoel. **Manual de procedimentos de coleta de amostras em áreas agrícolas para análise da qualidade ambiental: solo, água e sedimentos**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 169 p

GOMES, João Bosco Vasconcellos; CURI, Nilton; MOTTA, Paulo Emilio Ferreira; KER, João Carlos; MARQUES, João José; SCHULZE, Darrell. Seção V - Gênese, **Morfologia e Classificação do Solo**. Revista Brasileira de Ciência do Solo: Análise de Componentes Principais de Atributos Físicos, Químicos e Mineralógicos de Solos do Bioma Cerrado, [s.

l.], v. 28, p. 137-153, 2004. DOI <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000100014>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/YqNHPQbCSVL4s4ZbVnmYsKQ/?lang=pt>. Acesso em: 4 maio 2023.

LAMAS, Fernando. ESPECIALIZAR ou Diversificar a Produção Agrícola?. [S. l.], 22 out. 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/56702406/artigo-especializar-ou-diversificar-a-producao-agricola>. Acesso em: 29 maio 2023.

LEITE, Luiz Fernando. **Matéria Orgânica do Solo**. 1. ed. Teresina: Embrapa, 2004. 31 p

LOPES, Alfredo. **MANUAL INTERNACIONAL DE FERTILIDADE DO SOLO**. 2. ed. rev. e aum. Piracicaba-SP: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1995. Disponível em: <https://www.ufjf.br/baccan/files/2019/04/Manual-Internacional-de-Fertilidade-do-Solo.pdf>. Acesso em: 22 maio 2023.

MALUF, Renato; FLEXOR, Georges. **Questões agrárias, agrícolas e rurais : conjunturas e políticas públicas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Observatório de Políticas Públicas para a Agricultura, 2017. ISBN 978-85-7650-561-7. Disponível em: https://lemate.paginas.ufsc.br/files/2018/04/MalufR-FlexorG-Quest%C3%B5es-agr%C3%A1rias-e-agr%C3%ADcolas_colet%C3%A2nea.pdf. Acesso em: 22 maio 2023.

MANEJO de nutrientes no cultivo de milho segunda safra na região do cerrado. 166. ed. Plantio direto, 31 dez. 2018. Disponível em: <https://www.plantiodireto.com.br/artigos/138#:~:text=O%20milho%20segunda%20safra%20na,exportado%20na%20colheita%20do%20cereal>. Acesso em: 4 maio 2023.

MENDEIROS, João Carlos; ALBUQUERQUE, Jackson Adriano; MAFRA, Álvaro Luiz; DALLA, Jaqueline; COLPO, Luciano. **Relação cálcio:magnésio do corretivo da acidez do solo na nutrição e no desenvolvimento inicial de plantas de milho em um Cambissolo Húmico Álico**. Semina: Ciências Agrárias, vol. 29, núm. 4, outubro-diciembre, 2008, pp. 799-806. Universidade Estadual de Londrina. Londrina, Brasil.

PREZOTTI, Luiz Carlos; GUARÇONI M., André. **Guia de interpretação de análise de solo e foliar**. Vitória, ES: Incaper, 2013. 104 p.

RAIJ, Bernardo Van; ANDRADE, João Carlos; CANTARELLA, Heitor; QUAGGIO, José Antônio. **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. Campinas, Instituto Agronômico, 285p. 2001.

RONQUIM, Carlos Cesar; **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Embrapa Monitoramento por Satélite. Campinas: n. 8, 2010. 26 p.

SOUSA, Djalma; LOBATO, Edson. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 416 p.

SOUZA, André; POPPI, Ronei. **Experimento Didático de Quimiometria Para Análise Exploratória de Óleos Vegetais Comestíveis Por Espectroscopia no Infravermelho Médio e Análise de Componentes Principais: Um Tutorial, Parte I**. Química Nova, Universidade Estadual de Campinas, v. 35, p. 223-229, 22 jul. 2010. DOI <https://doi.org/10.1590/S0100-40422012000100039>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/9JsN7MQQygC4CX46svZLJ4p/?lang=pt>. Acesso em: 4 maio 2023.

TEIXEIRA, Paulo; DONAGEMMA, Guilherme; FONTANA, Ademir; TEIXEIRA, Wenceslau. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.

VALDERRAMA, Leonardo; PAIVA, Vassula; MARÇO, Paulo; VALDERRAMA, Patrícia. **Proposta Experimental Didática Para o Ensino de Análise de Componentes Principais**. Química Nova, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, v. 39, p. 245-249, 26 out. 2015. DOI <http://dx.doi.org/10.5935/0100-4042.20150166>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/qqK4CRfymw79mHHMhg3kmvz/?lang=pt>. Acesso em: 4 maio 2023.

APÊNDICE 1 – Tabelas de resultados das análisesTabela 1 – Resultados análises químicas 2019 (*Fonte: Nativa Laboratório de Análises**Agrícolas*)

Pontos	Ano	pH	M.O	CTC	STB%	sAl %	Ca/Mg
1	2019	5,59	3,5	8,4	54,9	0,4	3,2
2	2019	5,55	3,1	8,1	52,2	0,5	3
3	2019	5,51	3,3	8,1	50,7	0,5	3
4	2019	5,54	3,4	8,1	53	0,5	3
5	2019	5,49	3,3	8,1	50	0,5	2,9
6	2019	5,52	3,3	8,1	51,6	0,5	3
7	2019	5,51	3,3	8,1	50,4	0,5	2,9
8	2019	5,54	3,2	8,1	52,7	0,5	3
9	2019	5,52	3,3	8,1	51,4	0,5	3
10	2019	5,54	3,4	8,1	53,2	0,5	3
11	2019	5,57	3,5	8,2	54,1	0,4	3
12	2019	5,55	3,3	8,2	53,8	0,5	3,1
13	2019	5,51	3,2	8,1	51,2	0,5	3
14	2019	5,65	3,4	8,6	56,4	0,4	3,1
15	2019	5,58	3,3	8,2	54	0,4	3,1
16	2019	5,51	3,4	8,1	51,9	0,5	3
17	2019	5,54	3,3	8,2	52,2	0,5	3
18	2019	5,59	3,2	8,4	54,6	0,4	3,3
19	2019	5,57	3,4	8,3	54	0,4	3,1
20	2019	5,55	3,4	8,1	53,2	0,5	3
21	2019	5,56	3,5	8,3	54	0,4	3,1
22	2019	5,5	3,3	8,2	54,1	0,4	3,1
23	2019	5,63	3,2	8,5	56,8	0,4	3,2
24	2019	5,52	3,3	8,1	51,5	0,5	3
25	2019	5,54	3,1	8,2	52,6	0,5	2,8
26	2019	5,59	3,4	8,2	55,2	0,4	3,2
27	2019	5,63	3,5	8,5	56	0,4	3,2
28	2019	5,58	3,4	8,2	54	0,4	3,1
29	2019	5,51	3,2	8,1	51,6	0,5	3
30	2019	5,55	3,4	8,2	52,7	0,5	3
31	2019	5,57	3,4	8,2	53,8	0,5	3,1
32	2019	5,54	3,3	8,1	51,9	0,5	3
Médias		5,55	3,33	8,20	53,12	0,46	3,05

Tabela 2 – Resultados análises químicas 2020 (Fonte: Nativa Laboratório de Análises Agrícolas)

Pontos	Ano	pH	M.O	CTC	STB %	sAl %	Ca/Mg
1	2020	5,75	3,1	9,5	60,9	0,2	3,3
2	2020	5,63	2,9	8,9	57,1	0,2	4
3	2020	5,61	3,1	8,7	56,8	0,2	4
4	2020	5,52	2,9	8,9	56,4	0,2	4
5	2020	5,61	2,8	8,4	54,9	0,2	3,9
6	2020	5,57	3	8,6	54,9	0,2	3,8
7	2020	5,85	2,8	9,8	61,9	0,2	3,7
8	2020	5,81	3	9,8	61,8	0,2	3,3
9	2020	5,63	2,9	8,6	55,5	0,2	3,9
10	2020	5,71	3,1	9,3	59,9	0,2	3,4
11	2020	5,65	3,3	9	58,1	0,2	4,1
12	2020	5,78	2,8	9,6	61,9	0,2	3,6
13	2020	5,55	2,9	8,6	56,3	0,2	4
14	2020	5,57	2,9	8,7	56,4	0,2	4,2
15	2020	5,56	2,8	8,5	54	0,2	3,9
16	2020	5,54	2,7	8,6	55,9	0,2	3,9
17	2020	5,52	3	8,5	55,1	0,2	3,7
18	2020	5,63	2,9	9	57,8	0,2	4,1
19	2020	5,62	2,8	8,9	57,2	0,2	4,1
20	2020	5,71	2,7	9,4	60,3	0,2	3,5
21	2020	5,63	2,9	8,8	56,2	0,2	3,9
22	2020	5,72	3	9,3	60	0,2	3,5
23	2020	5,65	2,8	9	57,9	0,2	4,1
24	2020	5,72	2,9	9,3	60,2	0,2	3,4
25	2020	5,61	2,7	8,8	57,2	0,2	4,1
26	2020	5,58	2,5	8,6	56,4	0,2	4
27	2020	5,55	2,9	8,8	55,1	0,2	3,9
28	2020	5,56	2,6	8,8	56,2	0,2	3,6
29	2020	5,75	2,7	9,9	63,1	0,2	3,8
30	2020	5,65	3	9	58,2	0,2	3,8
Médias		5,64	2,88	8,99	57,79	0,20	3,82

Tabela 3 – Resultados análises químicas 2021 (Fonte: Nativa Laboratório de Análises Agrícolas)

Pontos	Ano	pH	M.O	CTC	STB %	sAl %	Ca/Mg
1	2021	5,47	3,2	8,8	56,4	0,2	3,6
2	2021	5,61	3	9	57,6	0,2	3,5
3	2021	5,54	2,7	8,7	55,9	0,2	3,4
4	2021	5,47	2,8	8,8	57	0,2	3,6
5	2021	5,72	2,7	9,5	62,1	0,2	3,1
6	2021	5,73	2,9	9,5	62,5	0,2	3,2
7	2021	5,72	3,1	9,5	61,8	0,2	3
8	2021	5,63	3,1	9,1	57,9	0,2	3,6
9	2021	5,77	3,3	10,2	64,8	0,2	3,3
10	2021	6,15	3,1	10,3	73,2	0,1	2,8
11	2021	5,14	3	10,3	72,7	0,1	2,8
12	2021	5,78	3,2	9,8	63,4	0,2	3,1
13	2021	5,81	2,9	10,1	65,5	0,2	3,4
14	2021	5,82	3,1	10,2	65,5	0,1	3,3
15	2021	5,61	3,2	9	58,2	0,2	3,4
16	2021	5,7	3,1	9,2	60	0,2	3,6
17	2021	5,78	3,3	9,8	63,8	0,2	3,2
18	2021	5,7	3,3	9,2	60,3	0,2	3,6
19	2021	5,61	3,2	8,9	57,8	0,2	3,4
20	2021	5,81	3,4	10,1	65,6	0,2	3,4
21	2021	5,65	3,2	9,2	59,3	0,2	3,6
22	2021	5,78	3,2	10	64,6	0,2	3,2
23	2021	5,76	3,3	9,9	64,1	0,2	3,2
24	2021	5,72	3,3	9,5	62,1	0,2	3,1
25	2021	5,68	3,4	9	59	0,2	3,9
26	2021	5,65	3	9,1	59,5	0,2	3,6
27	2021	5,63	3,2	9	58,2	0,2	3,5
28	2021	5,78	3,2	9,9	63,2	0,2	3,2
29	2021	5,61	3,1	8,9	56,9	0,2	3,5
30	2021	5,61	3,1	8,9	57,1	0,2	3,5
Médias		5,68	3,12	9,45	61,53	0,19	3,35

APÊNDICE 2 – Tabelas de interpretação de resultados

Tabela 1. Classes de interpretação para MO.

Elemento	Método	Unidade	Classificação		
			Baixo	Médio	Alto
Matéria orgânica (MO)	Colorimétrico	dag/Kg	<1,5	1,5 – 3,0	>3,0

Fonte: PREZOTTI; GUARÇONI M., 2013.

Tabela 2. Classe de interpretação da acidez ativa do solo (pH).

Determinação	Acidez		
	Elevada	Média	Fraca
pH em CaCl ₂	< 5,0	5,0 – 5,9	6,0 – 6,9

Fonte: PREZOTTI; GUARÇONI M., 2013.

Tabela 3. Classes de interpretação para saturação em alumínio (sAl%).

Elemento	Método	Unidade	Classificação		
			Baixo	Médio	Alto
Saturação por alumínio (sAl%)	$\frac{Al^{3+}}{t} \times 100$	%	<50	50-70	>70

Fonte: PREZOTTI; GUARÇONI M., 2013.

Tabela 4. Classes de interpretação para saturação por bases (STB%).

Elemento	Método	Unidade	Classificação		
			Baixo	Médio	Alto
Saturação por bases (STB%)	$\frac{SB}{T} \times 100$	%	< 50	50 - 70	>70

Fonte: PREZOTTI; GUARÇONI M., 2013.

Tabela 5. Classes de interpretação para CTC total (T).

Elemento	Método	Unidade	Classificação		
			Baixo	Médio	Alto
CTC(T)	SB + [H ⁺] + [Al ³⁺]	cmol/dm ³	< 4,5	4,5 – 10	> 10

Fonte: PREZOTTI; GUARÇONI M., 2013.

Tabela 6. Classes de interpretação para Ca:Mg.

Elemento	Unidade	Classificação		
		Estreita	Adequada	Alta
[Ca ²⁺]/[Mg ²⁺]	cmol/dm ³	< 2,0	2,0 - 10	> 10

Fonte: SOUSA E LOBATO, 2004.