

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**ASSINATURA MAGNÉTICA EM ÁREAS ESPECÍFICAS DE
MANEJO NA GERAÇÃO DE PROTOCOLOS DE CALAGEM**

**Simone da Silva Gomes
Tecnóloga em Agroecologia**

2020

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**ASSINATURA MAGNÉTICA EM ÁREAS ESPECÍFICAS DE
MANEJO NA GERAÇÃO DE PROTOCOLOS DE CALAGEM**

Discente: Simone da Silva Gomes

Orientador: Prof. Dr. José Marques Júnior

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Campus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção de título de Doutora em Agronomia (Ciência do Solo)

2020

G633a Gomes, Simone da Silva
Assinatura magnética em áreas específicas de manejo na
geração de protocolos de calagem / Simone da Silva Gomes. --
Jaboticabal, 2020
61 p. : il., tabs., mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: José Marques Junior

1. Geoestatística. 2. Magnetismo do solo. 3. Maghemita. 4.
Mapeamento do solo. 5. Zonas de manejo. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



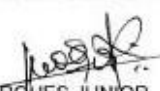
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: ASSINATURA MAGNÉTICA EM ÁREAS ESPECÍFICAS DE MANEJO NA GERAÇÃO DE PROTOCOLOS DE CALAGEM

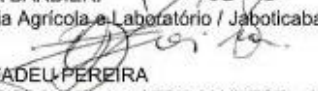
AUTORA: SIMONE DA SILVA GOMES


ORIENTADOR: JOSÉ MARQUES JUNIOR

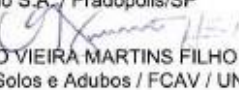
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JOSÉ MARQUES JUNIOR
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal


Dr. DIOGO MAZZA BARBIERI
Athenas Consultoria Agrícola e Laboratório / Jaboticabal/SP


Prof. Dr. GENER TADEU PEREIRA
Departamento de Ciências Exatas / FCAV / UNESP - Jaboticabal


Dr. LUCAS AGUILAR CORTEZ
Grupo São Martinho S.A. / Pradópolis/SP


Prof. Dr. MARCÍLIO VIEIRA MARTINS FILHO
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 12 de março de 2020

DADOS CURRICULARES DA AUTORA

SIMONE DA SILVA GOMES – Nascida em Glória de Dourados– MS, no dia 19 de fevereiro de 1991, filha de Valdecir Pedro Gomes e Eliete Nogueira da Silva Gomes. Em 2010 ingressou no curso de Agroecologia da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul. No ano de 2014 ingressou no curso de Pós-Graduação, em nível de Mestrado, pela Universidade Federal da Grande Dourados – MS, na área de Biologia Geral/Bioprospecção. Atualmente é Doutoranda do programa de pós-graduação em Agronomia (Ciência do solo), atuando no grupo de pesquisa CSME (Caracterização do solo para fins de manejo específico).

“Ninguém é tão sábio que não tenha algo para aprender e nem tão tolo que não tenha algo para ensinar” (Blaise Pasca)

DEDICATÓRIA

A Deus, por ter me dado forças de concluir essa etapa de minha vida e não ter me deixado desistir.

Aos meus pais Valdecir Gomes e Eliete Nogueira pelo amor, confiança e suporte recebido em todos os momentos de minha vida. E minha irmã querida que sempre me apoiou e me encorajou para seguir meu caminho.

Ao meu amigo e marido Ricardo Lima por toda paciência e respeito. Construimos nossa família em meio a este turbilhão de emoções que se chama "Pós-graduação", e continuamos seguindo um apoiando o outro, com muito amor.

Ao meu filho Joaquim que chegou para iluminar minha vida e de minha família.

AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Unesp, Jaboticabal, São Paulo, e aos docentes e discentes do Programa de Pós-graduação em Agronomia (Ciência do Solo) desta instituição.

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

Ao meu orientador Dr. José Marques Júnior pela paciência e pelos ensinamentos valiosos.

A todos os alunos, estagiários e membros do Grupo de Pesquisa CMSE. Em especial: a Kathleen e Gabriela que foram essenciais para tornar esse trabalho possível. As queridas Deise e Priscila pelos momentos de descontração e alegria.

Ao Diego Siqueira pelos ensinamentos e cordialidade.

As queridas Kamila e a Katharine que tornaram os dias mais leves e divertidos ao longo período de curso. Em especial a Nélida, pela amizade e ajuda nos momentos mais difíceis

SUMÁRIO

RESUMO.....	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABELAS.....	vii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Aplicação de calagem	8
2.2. Áreas de manejo específico e variabilidade espacial do solo	11
2.3. Aprendizagem de máquinas: árvore de regressão.....	12
3. MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1. Localização da área de estudo e amostragem.....	14
3.2. Análises granulométricas, químicas e mineralógicas do solo	15
3.3. Suscetibilidade magnética do solo	16
3.4. Análises estatísticas.....	17
3.4.1. Estatística descritiva	17
3.4.2. Colinearidade.....	18
3.4.3. Árvore de regressão	18
3.4.4. Análise geoestatística	19
3.4.5. Análise discriminante	19
3.5. Recomendações de manejo.....	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
4.1. Caracterização da área.....	20
4.2. Árvore de regressão.....	24
4.3. Variabilidade espacial dos atributos do solo e áreas específicas de manejo ..	29
4.4. Aplicações.....	34

5. CONCLUSÃO.....36

6. REFERÊNCIAS.....37

ASSINATURA MAGNÉTICA EM ÁREAS ESPECÍFICAS DE MANEJO NA GERAÇÃO DE PROTOCOLOS DE CALAGEM

RESUMO- A acidez do solo é um fator limitante para a produção agrícola. A calagem vem como alternativa viável para elevar os teores de pH, Ca, Mg e a saturação por bases do solo. Para que as recomendações de correção se tornem eficientes é necessário conhecer os atributos do solo e relacioná-los com a variabilidade espacial da área. O objetivo deste trabalho foi estimar a necessidade de calagem do solo pela assinatura magnética e determinar áreas de manejo específico. Foram coletadas 100 amostras de solos em uma área de 180 hectares, em Alpinópolis - MG. As amostras foram submetidas a análise granulométrica, química, mineralógica e de suscetibilidade magnética do solo (SM). A quantificação dos minerais magnéticos do solo, magnetita (Mt) e maghemita (Mh) foi obtida por SM antes e após o tratamento com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio. Os resultados foram submetidos a análise descritiva, geoestatística e análise de árvore de regressão. Com base no banco de dados disponível, a assinatura magnética possibilita estimar com precisão a necessidade de calagem utilizando árvore de regressão. O padrão espacial da SM solo possibilita reconhecer áreas com diferentes potenciais de necessidade de calagem. Isto consolida a análise como uma ferramenta indireta e promissora na definição de áreas de manejo específico e no planejamento táticos e operacionais das atividades agrícolas que buscam incrementos na produtividade das culturas. Foi possível elaborar um protocolo alternativo de necessidade de calagem, utilizando os valores de suscetibilidade magnética e os teores de argila do solo. A SM do solo permite diferenciar a origem dos sinais magnéticos em lito-pedogenéticos, especialmente a Mt e a Mg; podendo ainda associá-los com os atributos do solo. É possível elaborar um protocolo alternativo de necessidade de calagem, utilizando os valores de SM e os teores de argila do solo.

Palavras-chave: geoestatística, magnetismo do solo, maghemita, mapeamento do solo e zonas de manejo.

MAGNETIC SIGNATURE IN SPECIFIC MANAGEMENT AREAS IN LIMING PROTOCOLS GENERATION

ABSTRACT- Soil acidity is a limiting factor for agricultural production. Liming is a viable alternative to increase the levels of pH, Ca, Mg and saturation by soil bases. In order to have efficient correction recommendations, it is necessary to know the soil attributes and relate them to the spatial variability of the area. The objective of this work was to estimate the soil liming requirement by the magnetic signature and to determine specific management areas. 100 soil samples were collected in 180 ha - area, in Alpinópolis - MG. Samples were submitted to soil granulometric, chemical, mineralogical and magnetic susceptibility analysis (SM). Magnetic soil minerals, magnetite (Mt) and maghemite (Mh) quantification was used by SM before and after treatment with addition sodium citrate bicarbonate. The results were submitted to descriptive, geostatistical and regression tree analysis. Based on the available database, the magnetic signature makes it possible to accurately estimate the need for liming using a regression tree. The spatial pattern of the SM soil makes it possible to recognize areas with different potential for liming requirements. This consolidates the analysis as an indirect and promising tool in the definition of specific management areas and in the tactical and operational planning of agricultural activities that pursue increases in crop productivity. It was possible to develop an alternative liming requirement protocol, using magnetic susceptibility values and soil clay contents. A soil SM allows to differentiate the origin of magnetic signals in pedogenetics, especially Mt and Mg; it can also be associated with soil attributes. It is possible to elaborate an alternative liming requirement protocol, using the values of SM and the clay content of the soil.

Key words: management zones, soil magnetism, maghemite, soil mapping and geostatistics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipo de comportamento magnético do solo. Adpatada por Barrón (2017), comunicação pessoal.	5
Figura 2. Esquema representativo do elétron na orbital (A) e o movimento giratório em seu próprio eixo (spin)(B). Adaptado por Barrón (2017), comunicação pessoal.	6
Figura 3. Desenho esquemático representando os domínios magnéticos de acordo com o tamanho das partículas. Adaptado por Poggere (2018).	7
Figura 4. Disponibilidade dos nutrientes em função do pH do solo (linha pontilhada representa o pH ideal de correção). (Adaptado de EMBRAPA, 2013)	9
Figura 5: Diagrama ilustrativo de uma árvore de regressão/classificação.....	13
Figura 6. Localização da área de estudo e pontos amostrais.....	15
Figura 7: Fluxograma organizacional das análises realizadas	18
Figura 8. Atributos que apresentaram maior importância para o modelo de árvore de regressão.	25
Figura 9. Árvore de regressão dos atributos SMbx – suscetibilidade magnética; Mt – magnetita; Mh – maghemita e argila do solo em relação a recomendação de calagem.....	26
Figura 10. Erro encontrado em cada nó da árvore de regressão (seta indica onde foi realizada a poda).....	26
Figura 11. Árvore de regressão dos atributos SMbx – suscetibilidade magnética; Mt – magnetita; Mh – maghemita e argila do solo após a poda em relação a recomendação de calagem.....	27
Figura 12. Validação do modelo utilizado e histograma da distribuição dos dados. .	29
Figura 13. Mapas de distribuição espacial dos atributos do solo.....	31
Figura 14. Mapas de calagem observado (A) e predito (B) em relação a SMbx do solo.....	32
Figura 15. Análise discriminante de clusters dos diferentes ambientes encontrados na área.....	33
Figura 16. Mapa dos ambientes com base nos teores de suscetibilidade magnética do solo encontrados na área.	34

Figura 17. Recomendação de calagem com base nos teores de suscetibilidade magnética do solo e argila.....	35
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Análise descritiva dos atributos do solo.	21
Tabela 2. Valores de colinearidade das variáveis preditoras.	24
Tabela 3. Parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas dos atributos do solo.	30
Tabela 4. médias para cada agrupamento de clusters	33

1. INTRODUÇÃO

Os solos tropicais são considerados altamente intemperizados e conseqüentemente mais desenvolvidos. Os Latossolos e Argissolos correspondem 58% dos solos do território brasileiro (Embrapa, 2018), apresentam baixa fertilidade natural (Brilhante et al., 2017) e são considerados mais ácidos. A baixa disponibilidade de nutrientes nessas condições afeta o crescimento das plantas, reduzindo o sistema radicular e adsorção de nutrientes e água (Moreira e Fageria, 2010). É importante ressaltar que o equilíbrio dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo é um requisito essencial para que haja um melhor aproveitamento dos nutrientes pelas plantas e, conseqüentemente, um melhor aproveitamentos do uso de fertilizantes e corretivos no solo.

A acidez do solo é um fator limitante para a produção agrícola, em decorrência da toxicidade causada pelo Al e Mn e da baixa saturação por bases (Coleman e Thomas, 1967). A calagem é uma alternativa viável que eleva os teores de pH do solo, os teores de Ca e a saturação por bases, além de reduzir o Al e Mn trocável do solo (Caires et al., 2008; Moreira e Fageria, 2010). Para que as recomendações de correção se tornem eficientes é necessário conhecer os atributos do solo e relacioná-los com a variabilidade espacial da área (Lark e Minasny, 2018).

Existe uma grande variabilidade espacial das condições de acidez do solo, mesmo em áreas de cultivo homogêneo. Neste sentido, a aplicação de corretivos quando não é realizada adequadamente pode acarretar acúmulo de calagem em algumas partes e o uso de subdoses em outras partes do campo (Lacerda et al., 2006). Assim, o planejamento amostral se torna essencial a fim de direcionar um manejo mais adequado da variabilidade espacial dos atributos do solo.

Na fração argila dos solos tropicais, com alto grau de intemperismo estão presentes os argilominerais do tipo 1:1, como a caulinita, que é considerado o principal mineral com teores expressivos e também a presença dos óxidos de ferro e hidróxidos de Fe e Al (Fontes et al., 2001). Destaca-se ainda a presença de carga elétrica variável de pH nesses ambientes, pois os solos intemperizados apresentam baixa carga

estrutural, o que pode afetar a fertilidade do solo e a produtividade das culturas (Landell et al., 2003).

Para os minerais do grupo dos óxidos ferro, que são considerados os mais abundantes nos solos tropicais (Schwertmann e Herbillon 1992), podemos destacar a magnetita (Mt - Fe_3O_4) que é um óxido primário litogenético. Ela é encontrada principalmente em rochas efusivas básicas de basalto (Costa et al., 1999), e está presente na fração silte e areia fina. Há também a ocorrência da maghemita (Mh - $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), que é um óxido secundário pedogenético, cuja principal via de formação é a partir da oxidação da Mt ou diretamente do material de origem (Kämpf e Curi, 2000). Ela está presente na fração argila do solo. É considerada um mineral comum em solos tropicais, mas que apresenta uma lacuna em relação a sua formação pedogênica.

A caracterização da Mh e Mt é realizada quimicamente por meio de extrações com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB), ácido oxálico de amônio (AOA) e dissolução sulfúrica (Schwertmann e Fechter, 1984). No entanto, são raros os estudos que ajudaram na identificação da Mh, pois este mineral é encontrado em baixas concentrações e parte do espectro de difração está em sobreposição de planos como da Hematita (Hm) (Costa et al., 1999).

Um método alternativo e eficiente para mensurar de forma indireta esses minerais é a suscetibilidade magnética do solo (SM). Dentre as vantagens em se empregar a SM, em estudos de solos, está o seu custo reduzido, por ser um método relativamente sensível, seguro e rápido quando comparado com outras técnicas, podendo ser realizado tanto no campo quanto em laboratório (Dearing et al., 1996).

A relação da SM com os atributos químicos do solo foi investigada por Cortez et al. (2011), trabalhando com a cultura da laranja. Os autores observaram a relação direta com todos os atributos do solo e a SM, principalmente com aqueles que estão relacionados com a produtividade e qualidade do fruto. Barrios et al. (2017) verificaram que a SM indicou mudanças nas características físicas, químicas e mineralógicas de Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. As propriedades magnéticas do solo, especialmente o tamanho da partícula magnética foram utilizados em estudos de pedogênese (Long et al., 2015), erosão do solo (Rowntree et al., 2017), e ainda como covariável para predição de atributos do solo (Siqueira et al., 2016).

Para entender o comportamento dos atributos do solo, a estatística tradicional linear não é eficiente para apontar os complexos padrões e relações existentes aos conjuntos de dados (Bekker et al., 2019). Assim, a aprendizagem de máquinas pode ser uma alternativa capaz de modelar comportamentos não-lineares dos dados, deixando de seguir os padrões adotados pelos modelos paramétricos.

Neste contexto, a utilização de métodos que visem a geração de protocolos de manejo de áreas específicas com base na SM, como as recomendações de calagem, surge como possível avanço nessa linha tecnológica. Tendo em vista que os fertilizantes e corretivos minerais são fontes naturais finitas de reserva e sob perspectiva de esgotarem ao longo dos anos (Raliya e Biswas, 2016).

Todavia, se faz necessário reconhecer o tipo de mineral magnético do solo, uma vez que dada sua origem lito e/ou pedogenética é possível reconhecer ambientes de fertilidade elevada daqueles com necessidade de sucessivas correções químicas para uso agrícola. Deste modo, conhecer a mineralogia e a variabilidade espacial dos atributos do solo pode beneficiar o manejo adequado das culturas e reduzir perdas de nutrientes. Assim, o objetivo deste trabalho foi estimar a necessidade de calagem do solo pela assinatura magnética e determinar áreas de manejo específico.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Óxidos de ferro e suscetibilidade magnética do solo

O solo é considerado um corpo natural essencial para o desenvolvimento das plantas e possui propriedades que interagem com o clima, os organismos vivos, agindo sobre o material de origem e sua localização na paisagem (Lepsh, 2011). Os solos apresentam três fases, líquida, gasosa e a sólida. Na fase sólida do solo os minerais representam 45% e a matéria orgânica com 5% da sua constituição (Sparks, 1995).

Os minerais do grupo dos óxidos de ferro e alumínio são considerados os mais abundantes nos solos tropicais. A concentração desses minerais está diretamente relacionada ao material de origem, com alto grau de intemperismo e aos processos pedogenéticos existentes no solo (Citação). Os óxidos de ferro são considerados em termo quantitativo o segundo maior grupo de minerais da fração argila, caso dos Latossolos que são altamente intemperizados (Schwertmann e Herbillon 1992).

Os argilominerais são importantes no solo pois contribuem de forma significativa nas propriedades físicas (textura, estrutura etc.) e também nas propriedades químicas (disponibilidade de nutrientes, CTC, pH, etc.), decorrentes principalmente do tamanho da partícula e a elevada área superficial. Essas interações nas propriedades físico-químicas dos solos com os óxidos de ferro contribuem para utilizá-las como indicadoras de ambientes pedogênicos (Schwertmann, 1985; Kämpf et al., 1988).

Os principais óxidos e hidróxidos de ferro encontrados na fração argila dos solos tropicais são: hematita (Hm - α -Fe₂O₃), maghemita (Mh - γ -Fe₂O₃), goethita (Gt - α -FeOOH), lepidocrocita (γ -FeOOH), a magnetita (Mt - Fe₃O₄) e ferrihidrita (Fe₅HO₈. 4H₂O) (Inda Júnior, 2002). A Gt e a Hm são considerados os óxidos predominantes desses solos, (Kämpf e Curi 2000). Além disso, os solos tropicais apresentam elevada concentração de minerais magnéticos e não magnéticos (Resende et al., 1988). Esse magnetismo é geralmente correlacionado com o teor de Fe na estrutura do mineral, uma vez que esse é o único elemento, entre os nove principais da crosta terrestre, que apresenta um momento magnético (Mullins, 1977; Maher, 1986; Jong et al., 2000; Grimley et al., 2004).

No entanto, alguns minerais não apresentam Fe em sua estrutura e o momento magnético expressado não é considerado significativo. O comportamento magnético pode ser classificado como: diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo, ferrimagnetismo e antiferromagnetismo (Dearing 1999). Para os minerais diamagnéticos, os átomos que arranjam uma célula unitária do mineral, apresentam as camadas eletrônicas completas. Para os minerais paramagnéticos as camadas eletrônicas permanecem incompletas. A presença de um campo magnético externo torna os "spins" alinhados. Nos minerais ferrimagnéticos, os "spins" não estão acoplados, assim há um maior número de "spins" no mesmo sentido. Já os minerais

antiferromagnéticos não apresentam propriedades magnéticas (Rezende et al., 1988) (Figura 1).

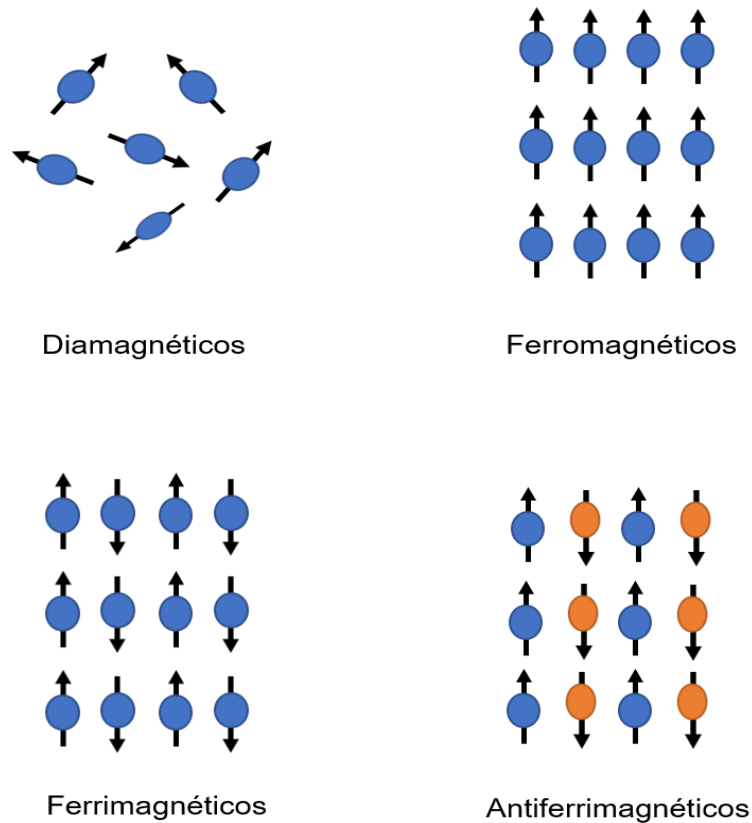


Figura 1. Tipo de comportamento magnético do solo. Adaptada de Barrón (2017), comunicação pessoal.

Os minerais do solo que apresentam importante expressão ferromagnética são a Mt (Fe_3O_4), que é considerado um mineral primário litogenético com elevado grau de substituição isomórfica do ferro (Schwertmann e Cornell, 1991; Costa e Bigham, 2009) e está presente na fração silte e areia fina do solo. Outro importante óxido de ferro magnético é a Mh ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), que é um mineral secundário ferrimagnético formado pela oxidação da Mt encontrado na fração argila do solo. A Mh também pode se formar quando outros óxidos de ferro existentes no solo são aquecidos ($300 - 450^\circ\text{C}$) na presença de calor ou por indução de ações antrópicas (Grimley et al., 2004).

A caracterização dos minerais magnéticos é realizada quimicamente por meio de extrações com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB), ácido oxálico de amônio (AOA) e dissolução sulfúrica (Schwertmann e Fechter, 1984). No entanto, são

raros os estudos que ajudaram na identificação da Mh, pois este mineral é encontrado em baixas concentrações e parte do espectro de difração está em sobreposição de planos como da hematita (Costa et al., 1999).

Um método alternativo e eficiente para mensurar de forma indireta esses minerais é a suscetibilidade magnética do solo (SM), podendo auxiliar na determinação indireta dos atributos do solo. A SM pode ser definida como o grau de magnetização de um material em resposta a um campo magnético. Segundo Luque (2008), a SM é produzida pela indução de um campo magnético terrestre durante a cristalização do mineral presente na rocha ou no solo, originado das propriedades de rotação de elétrons (Figura 2). Dentre as vantagens em se empregar a SM em estudos de solos, está o seu custo reduzido, por ser um método relativamente sensível, seguro e rápido quando comparado com outras técnicas, podendo ser realizado tanto no campo quanto em laboratório (Dearing et al., 1996).

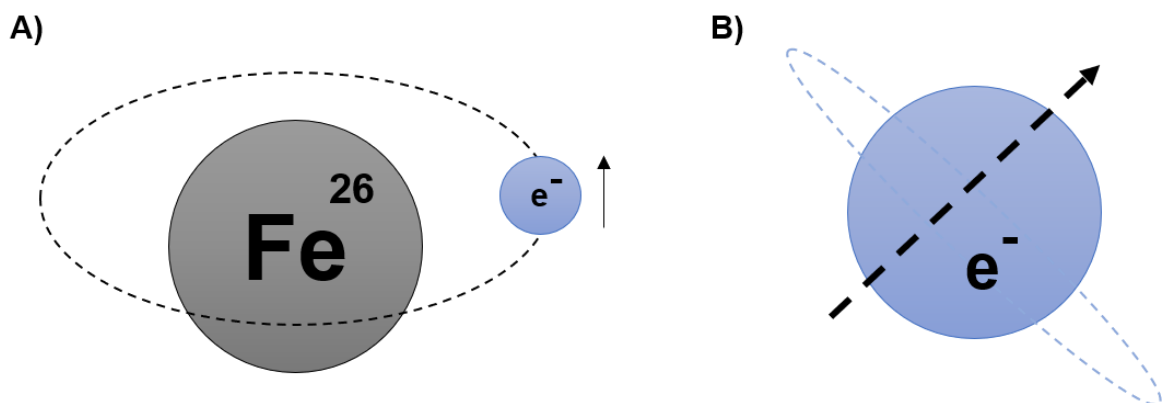


Figura 2. Esquema representativo do elétron na orbital (A) e o movimento giratório em seu próprio eixo (spin)(B). Adaptado por Barrón (2017), comunicação pessoal.

A presença de partículas ferrimagnéticas é verificada pela medida em diferentes frequências da SM (FD%), que é obtida por alta e baixa frequências dos campos magnéticos (Dearing, 1999). Essa medida é muito importante para estimar as proporções de Mt e Mh do solo, e conseqüentemente o entendimento dos processos de sua formação. De acordo com Dearing, (1999), as amostras de solos que apresentarem $FD\% < 2\%$ indicam a presença de minerais multidomínios; $FD\%$ entre 2 e 10 % possuem partículas de multidomínios e superparamagnéticas e os valores de 10 e 14 % de $FD\%$ a predominância de partículas superparamagnéticas (Figura 3).

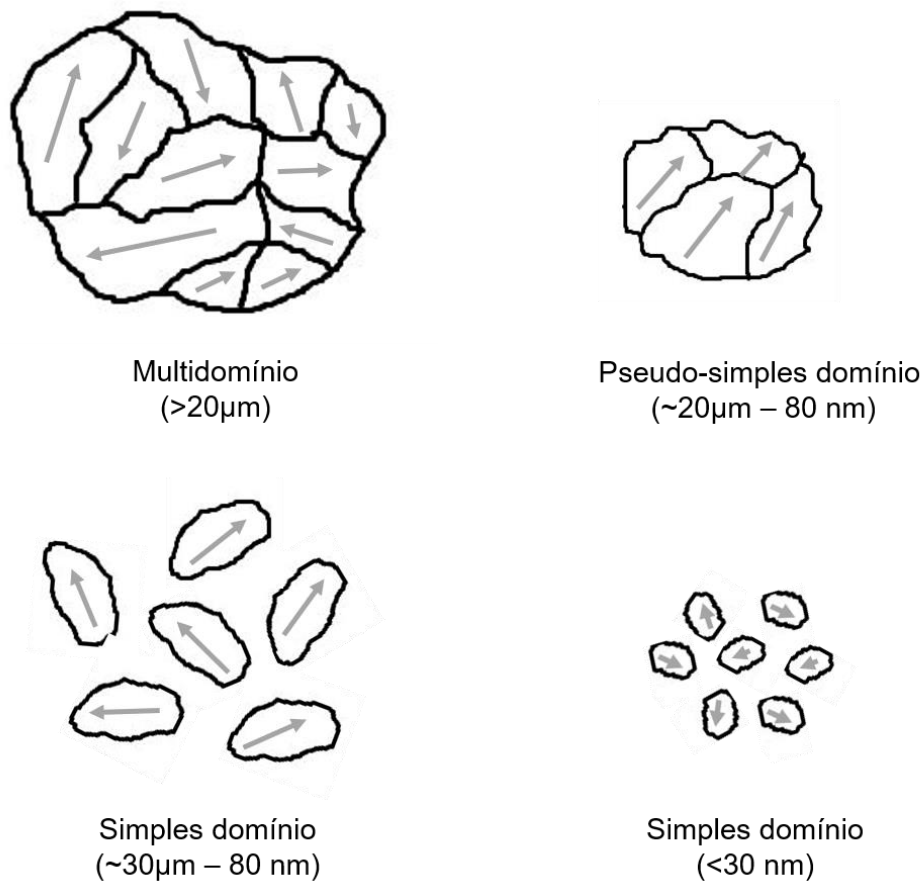


Figura 3. Desenho esquemático representando os domínios magnéticos de acordo com o tamanho das partículas. Adaptado por Poggere (2018).

Estudo realizado por Peluco et al. (2013), concluíram que a SM pode ser usada como função de pedotransferência, na quantificação indireta das doses recomendadas e da capacidade de suporte do solo à aplicação de vinhaça. No trabalho de Siqueira et al. (2010), os autores encontraram correlações significativas da SM com o teor de argila, CTC, capacidade de adsorção de fósforo e teor de hematita, confirmando o emprego da SM nas funções de pedotransferência.

A técnica de SM foi utilizada por Cortez et al. (2011), em uma área sob o cultivo de laranja, para identificar os atributos do solo e da planta em relação ao relevo da área. Tais autores observaram relação direta com todos os atributos do solo e a SM, e principalmente com aqueles que estão diretamente relacionados com a produtividade e qualidade do fruto. Já Sanchez et al. (2009), observaram que pequenas alterações nos atributos do solo podem ser indicadores ambientais, para a

determinação de áreas de manejo específico e produção de café. Em outros estudos como Guzmán et al., (2010) e Ventura Jr et al., (2001), os autores utilizaram a SM como marcadores constituídos por óxidos de ferro magnéticos para analisar a erosão do solo.

A SM do solo tem potencial de auxiliar grande parte das análises convencionais de laboratório, tendo em vista que consegue acompanhar as variações químicas do solo ao longo da paisagem (Barrón e Torrent, 1986; Brown et al., 2006; Viscarra-Rossel et al., 2006; Camargo et al., 2015). Neste sentido, é extremamente importante destacar a necessidade de realização de novos estudos, que estimulem a investigação da relação da SM com os atributos do solo, a fim de determinar áreas de manejo específico com diferentes potenciais de recomendação de adubação (Souza Júnior et al., 2008; Santos et al., 2011; Matias et al., 2013; Siqueira et al., 2015a).

2.2. Aplicação de calagem

Os solos tropicais são naturalmente acidificados devido ao material de origem e a processos constantes de intemperismo (Brilhante, et al., 2017). Tal fato associado ao manejo inadequado do solo, levam os sistemas de cultivo a exaustão em termos de fertilidade do solo, reduzindo de forma significativa o desenvolvimento vegetal esperado (Natale et al., 2012; Costa et al., 2015).

De forma geral, os solos possuem deficiência de nutrientes, alta saturação por alumínio (m%), baixo valor de pH e elevada capacidade de fixação de fósforo (Lopes e Cox, 1979). As alterações no pH modificam os processos de adsorção e lixiviação dos nutrientes da solução, sejam eles ânions ou cátions. Ainda, o aumento do pH aumenta a precipitação de alumínio, que, em suma, é altamente tóxico às culturas (Kaminski, 1989).

No solo, o pH em água precisa atingir níveis entre 5,5 e 6,3, para que as plantas possam apresentar melhores condições de assimilação de nutrientes (Malavolta, 1987). Portanto, manter o pH na faixa adequada para a cultura é crucial para alcançar altas produtividades (Figura 4).

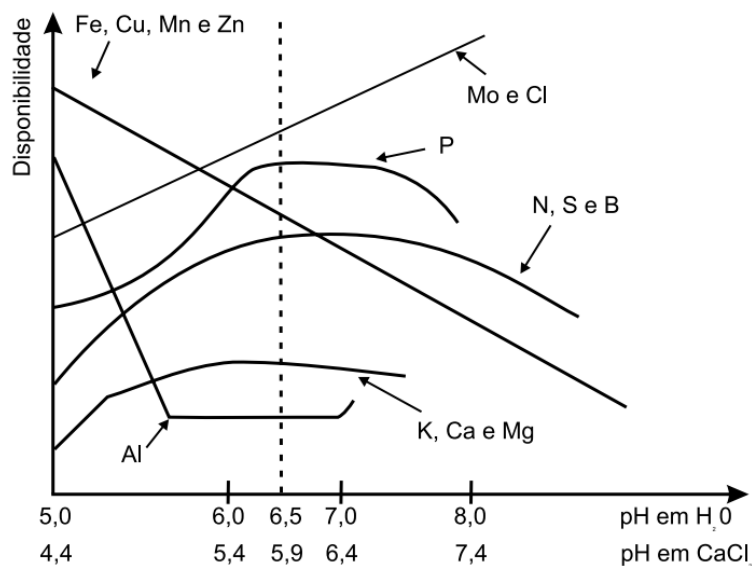


Figura 4. Disponibilidade dos nutrientes em função do pH do solo (linha pontilhada representa o pH ideal de correção). (Adaptado de EMBRAPA, 2013)

Essas limitações do pH podem ser evitadas com a devida correção da acidez, e como alternativa a calagem é a principal forma de correção (Montovanelli et al., 2016). A calagem do solo pode ser realizada pela aplicação de produtos de reação básica, que possuem compostos neutralizantes como carbonato de cálcio (CaCO_3) e o carbonato de magnésio (MgCO_3) presente nos calcários agrícolas; o óxido de cálcio (CaO) e o óxido de magnésio (MgO) na cal virgem; o hidróxido de cálcio (CaOH_2) e o hidróxido de magnésio (MgOH_2) na cal hidratada (Tedesco et al., 2000).

O calcário é um mineral abundante no território brasileiro, e por esse motivo pode ser considerado um insumo agrícola barato (Natale et al., 2012). Sua utilização promove a correção do pH do solo, neutralização do alumínio tóxico, fornece cálcio e magnésio, influenciando assim no melhor aproveitamento de nitrogênio, potássio, fósforo, entre outros, resultando em melhorias na produtividade das culturas (Costa et al., 2016).

A escolha do corretivo é um fator importante a se considerar, tendo em vista os aspectos de qualidade, as características químicas, os teores e os compostos neutralizantes, bem como o grau de moagem e a sua granulometria (Tedesco et al., 2000; Alcarde e Rodella, 2003). Nesse sentido, a tomada de decisão quanto a aplicação ou não do calcário é extremamente importante para o produtor, tendo em vista a interpretação correta das análises.

São diversos os métodos de recomendação de calagem utilizados no Brasil, sendo os principais: métodos da saturação por bases, métodos da neutralização do alumínio trocável e adição de cálcio e magnésio, e método da solução tampão SMP nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (Lopes e Guilherme, 1990).

Em relação as correções de acidez do solo com base no método de saturação por bases, as recomendações são propostas pela Embrapa Cerrados (2015), onde destacam o pH, a saturação por bases (v%), a capacidade de troca de cátions (CTC), e o fator de correção da qualidade do calcário (f). Tais informações podem ser observadas na equação:

$$NC = \frac{(V2 - V1)T \times f}{100}$$

Onde NC =necessidade de calcário em tonelada por hectare; V2: saturação por bases que se deseja ; V1= saturação por base atual; T=capacidade de troca de cátions a pH 7 (H + Al + S) em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; S=soma de bases (Ca + Mg +K) em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; f=fator de correção da qualidade do calcário; PRNT= poder relativo de neutralização total. As recomendações buscam elevar a porcentagem de saturação por bases (V%), e de certa forma, condicionar valores de CTC a 70% (Centro Sul e Sudeste) ou a 50% (Centro-Oeste do Brasil) (Sousa e Lobato, 2004).

Os efeitos positivos da correção de solo com a calagem são amplamente conhecidos, diversos autores ressaltam seus benefícios na disponibilidade de nutrientes no solo, além de melhorias na produtividade das culturas (Pauletti et al., 2014; Bambolim et al., 2015; Mantovanelli et al., 2019). Contudo a forma de aplicação e o tipo de calcário utilizados irá influenciar na sua eficiência e tempo de resposta. Natale et al. (2012) destacaram que há uma maior facilidade de utilização em culturas anuais, devido a possibilidade de revolvimento do solo comparado a culturas perenes.

Vários trabalhos têm mostrado resultados significativos na utilização da calagem na correção da acidez do solo, bem como na disponibilização de cálcio e magnésio (Fageria, 2001; Moreira et al, 2001; Zandoná, 2015). Além disso, estudos de Malavolta (1979) comprovaram que o pH da solução do solo tem relação direta na disponibilidade de macro e micronutrientes para as plantas. Isso é explicado pelo fato de a proporção de cargas negativas e positivas nos colóides dos solos, intimamente

ligada com a adsorção ou não dos cátions e ânions presentes no solo, variar com o pH da solução do solo.

A aplicação e a utilização da calagem no solo, muitas vezes é realizada de forma inadequada, não levando em consideração as recomendações de manejo. Surgindo assim, a preocupação de utilizar técnicas alternativas que auxiliem nas recomendações de forma sustentável. Assim, torna-se essencial conhecer a variabilidade espacial dos atributos do solo, para conseguir mapear as áreas de manejo onde haverá maior ou menor aplicação.

2.3. Áreas de manejo específico e variabilidade espacial do solo

A utilização de instrumentos de gestão e planejamento na agricultura tem se tornado cada vez mais necessário, pois auxiliam na compreensão da variabilidade espacial do solo e sua relação com as mais diferentes variáveis na relação solo-planta (Martín et al., 2005, Siqueira et al., 2010a). Assim, o estudo desses atributos em diferentes escalas permite explorar ao máximo a área para promover melhor produtividade da cultura e, conseqüentemente, maior lucratividade e/ou competitividade para a agroindústria (Maule et al., 2001).

O mapeamento da variabilidade dos atributos do solo é indispensável para o planejamento sustentável das atividades agrícolas (Frogbrook e Oliver, 2007). Existem diversas técnicas que auxiliam na identificação e mapeamento dos atributos do solo, podendo citar: o mapeamento com base no conceito de relação solo-paisagem; mapeamento por similaridade de diferentes pédonos; mapeamento utilizando a lógica fuzzy; mapeamento utilizando análise geoestatística e classificação pela capacidade de uso da terra (Legros, 2006).

Pesquisadores têm abordado a utilização de mapeamento dos solos e seus atributos, adotando métodos determinísticos (relação solo-paisagem, entre outros) e métodos estocásticos (geoestatística) (Brito et al., 2008; Marques JR. et al., 2014). Esses mapeamentos auxiliam de forma positiva o entendimento da variabilidade do solo e de seus atributos, pois são relativamente precisos e eficientes, minimizando a

subjetividade dos métodos clássicos (McBratney et al.,2000). Neste contexto, é essencial utilizar métodos quantitativos para delimitar áreas de maior homogeneidade dos atributos do solo, a fim de entender a dinâmica do solo (Hudson, 1992).

2.4. Aprendizagem de máquinas: árvore de regressão

A Utilização de ferramentas eficientes na extração de informações agronômicas a partir de um banco de dados, tem crescido nos últimos anos. E com isso, tem se buscado métodos capazes de responder problemas de forma rápida e de fácil compreensão. De acordo com Bekker et al, (2019) e colaboradores, os métodos tradicionais estatísticos lineares não são eficientes para explicar as complexas relações e padrões que envolvem os conjuntos de dados das ciências agrárias. Em contrapartida está a aprendizagem de máquinas (AM) que permite modelar as relações não lineares dos dados, e utiliza algoritmos matemáticos para aprender por regressão ou classificação, conforme são submetidos a treinamento (Canizo et al., 2019).

A AM é uma técnica contida na área da inteligência artificial, que é capaz de construir sistemas automatizados de aprendizagem a partir de diversos treinos (Batista, 2019). Para Stephen Marsland (2015), a AM consiste na eficiência do computador em adaptar os dados e aumentar a precisão do modelo. Já Luxburg e Schölkopf, (2011), afirmam que AM aprende a partir de observações e exemplos computacionais de ações específicas de algoritmos de aprendizagem. Dentre as técnicas de AM, a árvore de regressão e classificação (Classification And Regression Trees) é considerada uma técnica preditiva e descritiva que usa a estrutura de seus dados em árvores (Breiman et al., 1984).

O modelo de árvore de regressão (AR) possibilita a explicação de uma variável numérica, por meio de um conjunto de variáveis e suas eventuais interações (Taconeli et al., 2009). A AR é indicada para situações onde as relações entre as variáveis são consideradas complexas e não explicadas por um modelo linear (Witten et al. 2011).

O algoritmo usado para este modelo é o CART (Classification And Regression Trees) que se baseia na execução de partições binárias sucessivas (Breiman, et al., 1984). Além disso, o algoritmo CART tem se destacado por não apresentar restrições quanto a distribuição das variáveis, com flexibilidade e de fácil entendimento em relação a construção do modelo e a interpretação dos resultados (Taconeli et al., 2009).

A construção da árvore é feita por indução básica do algoritmo, de cima para baixo (Han e Kamber, 2001). Inicialmente os dados originais são denominados nós iniciais, seguido de nós intermediários às subamostras que podem originar as novas subamostras e os nós finais (Figura 5). Esse procedimento é repetido até que o conjunto de dados apresente resultados homogêneos e que seja possível atribuir um valor para a variável dependente.

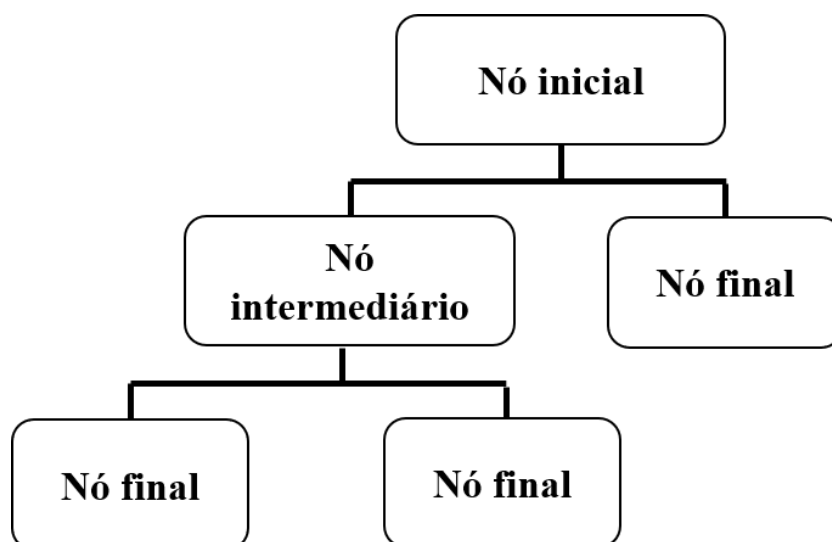


Figura 5: diagrama ilustrativo de uma árvore de regressão/classificação.

O algoritmo usado para a construção da AR costuma criar árvores grandes. E isso pode afetar o desempenho, pois a árvore se torna sensível após o treino. Uma alternativa utilizada para amenizar esses erros é o uso da poda da árvore, onde é possível retirar os galhos que não estão contribuindo com informações relevantes ou ainda que incrementem para o erro da predição (Semeraro et al., 1997).

São diversas as áreas de conhecimento onde esse algoritmo é aplicado, como nas ciências sociais (Kucukkocaoglu e Alp, 2012), nas biomédicas (Grubinger et al., 2012), na ecologia (Death e Fabricius, 2000), e também nas agrárias (Williams et al.,

2009) sendo essa última com o número reduzido de trabalhos. Neste contexto, a utilização de técnicas alternativas de aprendizagem de máquinas, como a AR, associada a técnica da SM podem ajudar no planejamento e na predição de aplicação de calcário no solo de forma eficiente e sustentável.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização da área de estudo e amostragem

A área de estudo localiza-se no sudoeste de Minas Gerais, no município de Alpinópolis, entre a latitude de 20° 51' 50" S e longitude de 46° 23' 16" O (Figura 6). A altitude varia de 700 a 800 m. A área se encontra na calha do Rio Grande, no ponto culminante da serra do Capão do Alto. O clima é classificado segundo Koppen (1949), como Cwb (clima temperado húmido com inverno seco e verão temperado). Predominantemente ocorre o clima semiúmido (4 a 5 meses secos), e subseqüente úmido (3 meses secos), no qual os meses de maio a setembro são os mais secos e a temporada chuvosa, de novembro a março. A faixa de temperatura é a quente, com pelo menos um mês do inverno com média entre 15 °C e 18 °C, sendo julho o mês mais frio.

A sua geologia é representada pelo domínio de Nappe de Passos e composta por metassedimentos do Grupo Araxá, com predominância de calciclorita xisto e quartzito. A maior parte das rochas deste grupo, ocorre nas folhas Catalão e Araxá, encontrando-se desde os arredores de Araxá, parte centro-sul da área, até os limites com o rio Paranaíba (Heilbron et al., 2007). O solo característico da região foi classificado como Latossolo vermelho distrófico (Santos, 2018).

A área possui 180 hectares com cultivo de soja na safra e milho na entre safra, com alternância de cultivares ano a ano para ambos os cultivos. Foi feita uma malha amostral na área, perfazendo um total de 100 pontos. Em cada ponto do cruzamento desta malha, as amostras de solo foram coletadas na profundidade de 0,00 - 0,20 m.

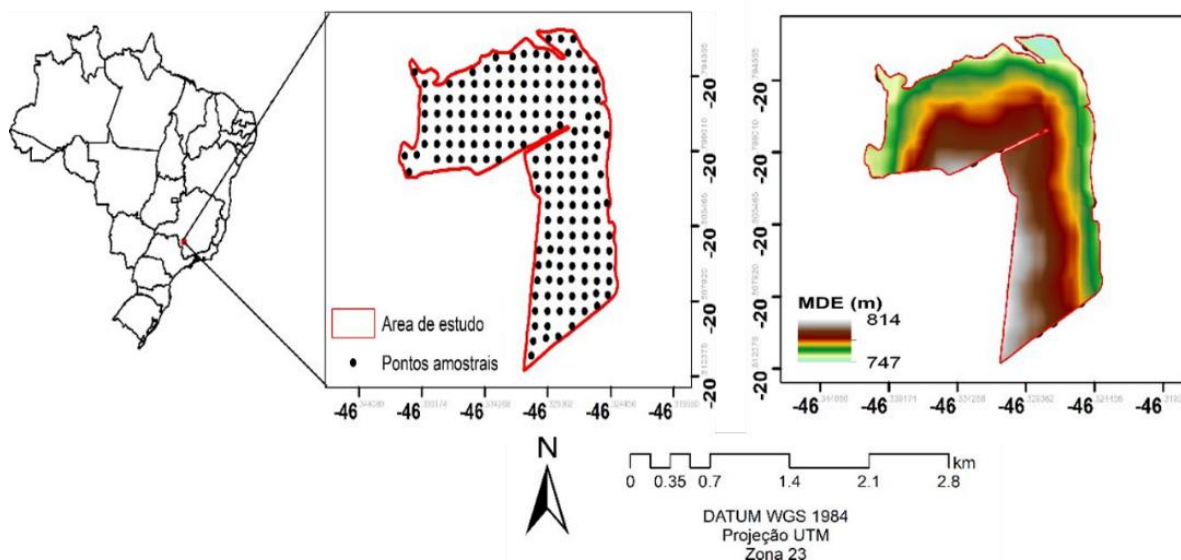


Figura 6. Localização da área de estudo e pontos amostrais.

3.2. Análises granulométricas, químicas e mineralógicas do solo

A análise granulométrica foi determinada seguindo metodologia da Embrapa (2017), na qual utiliza-se uma solução de NaOH 0,1 N + hexametáfosfato de sódio 0,1 N como dispersante químico. Posterior a dispersão química, as amostras foram submetidas a agitação mecânica em aparato de baixa rotação por 16 horas. A argila foi determinada pelo método da pipeta, a areia foi separada por tamisação e o silte foi calculado por diferença. Os teores de matéria orgânica (MO), e o teores de Ca, Mg e H + Al (RAIJ, 2001). A soma de bases (SB), a capacidade de cátions do solo (CTC) e o V% foram calculados a partir dos valores das bases e H + Al.

A extração dos óxidos de ferro pedogênicos cristalinos (Fed) foi feita com solução de ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB) (Mehra e Jackson), a extração dos óxidos de ferro pedogênicos de baixa cristalinidade (Feo) foi realizada com a solução de oxalato de amônio a 0,2 mol L⁻¹ a pH 3,0, no escuro, conforme Schwertmann (1964). Os teores de óxidos de ferro solubilizados foram determinados por absorbância no espectrofotômetro a 518 nm.

Os teores de fósforo adsorvido foram determinados de acordo com Fassbender e Igue (1967), na qual 2 g de solo seco ao ar foram agitados a 25° C, com 20 ml de solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ contendo KH₂PO₄ a uma concentração de 100 mg L⁻¹ de P. Depois de 16 h, a suspensão foi centrifugada, e o sobrenadante foi coletado para a determinação da concentração de fósforo em equilíbrio por meio de um espectrofotômetro.

3.3. Suscetibilidade magnética do solo

A suscetibilidade magnética do solo (SM) de todas as amostras foi quantificada com terra fina seca ao ar (TFSA) no medidor MS2 de Bartington Instruments, no qual foi acoplado a um sensor de laboratório MS2B de duas frequências. Assim, foi possível medir a SM em campo magnético em baixa frequência (SM_{bx} - 0,47 kHz) e alta frequência (SM_{al} - 4,7 kHz). A medição em dupla frequência permitiu calcular a porcentagem χ dependente da frequência ($\chi_{FD}\%$) (Dearing et al., 1996). Essa medição é utilizada como parâmetro para indicar a presença de minerais de domínio único, múltiplo ou superparamagnética, sendo:

$$\chi_{FD}\% = (\chi_{lf} - \chi_{hf} / \chi_{lf}) * 100$$

Onde, $\chi_{FD}\%$ é a porcentagem χ dependente da frequência, lf é baixa frequência χ e hf é alta frequência χ .

Para a análise de separação da maghemita/magnetita, as amostras também foram submetidas a um tratamento com ditionito-citrato- bicarbonato (DCB), por 16 horas (Mehra e Jackson, 1960). Posteriormente, as mostras foram centrifugadas para a remoção do sobre nadante e lavado com água deionizada por três vezes consecutivas por um tempo de 10 minutos a 3000 rpm. No resíduo centrifugado foi medido, a diferença entre a TFSA – DCB de antes e depois tratada com DCB correspondente a Mh (Mh-SM_{bx}-BCD). A atribuição de um valor de $763 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, foi estimada Mh em g kg⁻¹ (Peters e Dekkers, 2003), sendo descrita pela equação:

$$Mh = \frac{(\chi_{lf} \text{ ADFE} - \chi_{lf} \text{ rem}) * 100}{173}$$

O mesmo procedimento foi utilizado para quantificar Mt, sendo estimado a partir do valor restante presente nas frações de resíduos (areia + silte), ou seja, remanescente, assumindo um valor igual a $1000 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, denominado Mt-SMbx-rem, sendo:

$$Mt = \frac{\chi_{lf} \text{ rem} \times 100}{1000}$$

Em que, o rem é determinado em baixa frequência no solo após o tratamento com Mh também foi determinado na fração argila de ferro-óxidos concentrada, com amostras de argila em $5 \text{ molL}^{-1} \text{ NaOH}$, referido como Mh – SMbx sendo descrita abaixo pela equação:

$$Mh = \frac{(\chi_{lf} \text{ concentração de argila} \times 100)}{763}$$

Onde, é baixa frequência determinada em argila concentrada de óxido.

3.4. Análises estatísticas

3.4.1. Estatística descritiva

Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva para a obtenção da média, mediana, coeficiente de variação, valores de máximos e mínimos, assimetria e curtose com o uso do software Minitab 13.1 (Minitab 13.1). As etapas de cada análise foram descritas em um fluxograma organizacional (Figura 7).

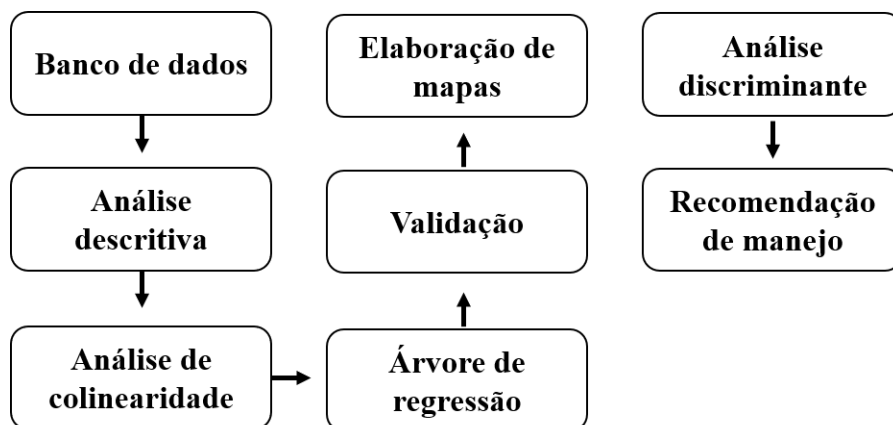


Figura 7: fluxograma organizacional das análises realizadas

3.4.2. Colinearidade

Foram selecionados os atributos do solo (SMbx, Mh, Mt, Argila, Feo, Fed e Pads). Para entender o comportamento das variáveis, verificou-se a relação que ambas exercem entre si por meio da colinearidade. A definição desta é dada a partir de uma pontuação que varia de 0 a 10, e chamada fator de inflação de variância (FIV), que explica o quanto a variância de um coeficiente de regressão é inflada à colinearidade no modelo. A análise foi gerada no RStudio (Rstudio Team, 2016) para a realização dos cálculos e o pacote utilizado foi o “fmsb” (Minato Nakazawa, 2007).

3.4.3. Árvore de regressão

A análise de predição foi conduzida considerando as variáveis que apresentaram relevância (SMbx, Mt, Mh, argila, Feo e Pads). O algoritmo utilizado para o modelo foi o CART (Breiman et al., 1984). Onde foram separadas 60% do banco de dados para treino e os 40% restantes para teste. O processamento foi conduzido no pacote Rpart (Therneau et al, 2012) na linguagem R (Rstudio Team, 2016).

3.4.4. Análise geoestatística

Para a caracterização e variabilidade espacial da área foi utilizado a análise geoestatística (VIEIRA et al., 1983). O semivariograma experimental foi estimado pela equação:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

Em que, $\gamma(h)$ - valor da semivariância para uma distância h ; $N(h)$ - número de pares envolvidos no cálculo da semivariância; $Z(x_i)$ - valor do atributo Z na posição x_i ; $Z(x_i+h)$ - valor do atributo Z separado por uma distância h da posição x_i .

Os semivariogramas experimentais foram escolhidos com base no número de pares envolvidos no cálculo da semivariância dos primeiros “lags” e presença de patamar definido (Burrough e McDonnell 2000). Após o ajuste dos modelos matemáticos foi feita à interpolação dos dados por meio da krigagem. A análise geoestatística foi feita no software Surfer versão 8.

3.4.5. Análise discriminante

Para as definições das zonas de manejo específicos da área foi utilizada a análise discriminante de “Clusters” com o pacote facto extra no programa R.

3.5. Recomendações de manejo

O cálculo de recomendação de necessidade de calagem (NC) para aplicação foi realizado de acordo com a fórmula proposta pela Embrapa cerrados (Comunicado

Técnico 177 e Circular 29, Embrapa Cerrados, 2015) para todos os pontos amostrados, tendo como base os teores de saturação por bases (V%), capacidade de troca de cátions (CTC) e poder de neutralização (PRNT). Assim, utilizou-se a equação dose ($t\ ha^{-1}$):

$$NC = \frac{CTC \times (V2 - V1)}{100}$$

Onde, NC = Necessidade de calagem em $t\ ha^{-1}$, por 0,20 m de profundidade; CTC = Capacidade de troca de cátions em $mmolc\ dm^{-3}$ a pH 7; V2 = Saturação por bases desejada para a cultura em % (neste caso foi considerado um V% de 60); V1 = Saturação por bases atual do solo em % e o PRNT a 100%.

Foi realizado teste de recomendação baseada no manejo nutricional convencional e o manejo separado por zonas de manejo a partir da SMBx. Onde foram utilizadas as médias dos valores das análises descritivas do solo, para toda área e para o manejo dos ambientes do solo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização da área

O teor médio de argila encontrado no solo estudado foi de $492,61\ g\ kg^{-1}$ e variou de 266 a $637\ g\ kg^{-1}$, refletindo a diversidade de material parental de intensidade de intemperismo (Tabela 1). Para areia e o silte os valores ficaram na média de 237 e $273\ g\ kg^{-1}$, variando de 110,26 a $346,44\ g\ kg^{-1}$ e 116,74 a $562,81\ g\ kg^{-1}$, respectivamente.

Solos com valores elevados de argila favorecem a formação de minerais de comportamento magnético mais evidente, como por exemplo a Mh (Fontes et al., 2000). Os teores médios de argila encontrados neste estudo, corroboraram com

resultados encontrados por Melo et al. (2003), os quais obtiveram valores médios de argila em um Latossolo Vermelho eutrófico no Triângulo Mineiro variaram de 600 g kg⁻¹. Já Rolim Neto et al. (2004), que trabalharam em solos do grupo Araxá da região do Alto Paranaíba verificaram valores médios de argila de 400 g kg⁻¹.

Tabela 1. Análise descritiva dos atributos do solo.

Atributos	Média	Mediana	DP	CV	Mín.	Máx.	Ass.	Cur.
Atributos granulométricos								
Argila (g kg ⁻¹)	492,6	499,8	71,1	14,4	266,8	637,6	-0,8	1,3
Silte (g kg ⁻¹)	273,1	254,3	68,1	24,9	116,7	562,8	1,3	3,0
Areia (g kg ⁻¹)	237,0	238,8	40,4	17,0	110,2	346,4	-0,1	1,2
Atributos químicos do solo								
Al (mmol _c dm ⁻³)	0.31	0.30	0.47	0.47	0	4.50	7.31	64.21
Ca (mmol _c dm ⁻³)	50.76	48.53	14.67	28.91	23.94	114.66	1.10	3.15
Mg (mmol _c dm ⁻³)	15.10	15.22	4.09	27.08	6.76	24.71	0.15	-0.53
CTC (mmol _c dm ⁻³)	93,5	92,8	17,0	18,2	60,7	156,2	0,7	1,4
P (mg dm ⁻³)	32,98	30,63	13,87	42,06	8,64	81,00	0,80	0,91
Pads (mg dm ⁻³)	856,1	858,5	22,4	2,6	787,0	907,0	-0,4	0,6
SB (cmol _c dm ⁻³)	69,2	66,4	18,0	26,0	33,7	139,3	0,8	1,8
V (%)	73,1	74,0	7,1	9,8	53,8	89,1	-0,3	-0,2
pH	5,8	5,9	0,2	4,9	5,1	6,6	-0,3	0,2
Atributos mineralógicos								
SMbx (10 ⁻⁶ m ³ kg ⁻¹)	6,1	6,0	3,1	51,2	0,8	13,7	0,3	-0,6
FD %	15,7	16,3	3,4	22,0	2,0	20,5	-2,0	5,1
Mh (g kg ⁻¹)	5,2	4,7	2,7	52,5	0,7	13,10	0,5	-0,3
Mt (g kg ⁻¹)	0,1	0,1	0,0	49,8	0,0	0,3	1,6	5,0
Fed (g kg ⁻¹)	30,8	33,0	4,7	15,2	13,6	37,4	-1,4	2,0
Feo (g kg ⁻¹)	0,9	0,9	0,1	13,0	0,7	1,6	2,1	8,2
Recomendação ¹								
NC (t ha ⁻¹)	0,2	0,2	0,2	114,2	-0,5	0,77	-0,2	0,1

DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; Ass – assimetria; Max – máximo; Min – mínimo; Curt – curtose; Al – Alumínio; Ca – Cálcio; Mg – Magnésio; CTC – capacidade de troca de cátions; P – Fósforo disponível; Pads – Fósforo adsorvido; SB – Soma de Bases; V% - Índice de saturação por bases; SMbx - Suscetibilidade magnética do solo em baixa frequência; FD % - variação percentual entre alta e baixa frequência da suscetibilidade magnética, Mh – Maghemita; Mt – Magnetita; Fed – Ferro ditionito; Feo – Ferro oxalato; ¹recomendações de acordo com o método da Embrapa (2015).

O coeficiente de variação (CV), de acordo com o critério de Warrick e Nielsen (1980), indicou baixa variabilidade (CV ≤ 12%) para os teores de V%, pH e Pads (Tabela 1). A CTC, FD%, Feo, Fed, argila, silte e areia enquadraram-se na classe

moderada ($12\% < CV < 24\%$), enquanto os demais atributos SB, Mh, Mt e SMbx apresentaram alta variação ($CV \geq 24\%$). Embora, a estimativa do CV seja utilizada para avaliar a homogeneidade dos dados e na tomada de decisão quanto a amostragem, esse parâmetro não deve ser o único utilizado para entender a variabilidade do solo (Obi e Ogunkunle, 2009).

Os valores médios de Al do solo foram de $0,31 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, variando de 0 a $4,50 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Foi possível observar valores altos e positivos de assimetria e curtose, ou seja, com concentração dos valores acima do valor médio dessa variável. No entanto, os valores de média e mediana estão próximos, e corroborando com Little e Hills (1978) que verificaram a mesma semelhança entre os valores de média e mediana, indicando que a variável está próxima da distribuição normal. Afirmando ainda, que tal fato mostra que na natureza não são encontradas distribuições que sejam sempre normais.

Com relação as médias de Ca e Mg foram encontrados valores de 50,76 e 15,10 $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente. Para a CTC, V% e pH do solo os valores foram semelhantes entre assimetria e curtose, e próximos a zero, com média de 93,5; 53,8 e 5,8, respectivamente. O solo é formado a partir de uma mistura de minerais e a relação entre pH em água e V% é influenciada pelo mineral que apresenta maior CTC, com argilominerais 2:1 sobre 1:1 e da matéria orgânica sobre os demais atributos do solo (Mehlich, 1942). Segundo Fontes et al. (2001), solos intemperizados que apresentam cargas variáveis podem apresentar propriedades agronômicas desejáveis como: profundidade, estrutura estável, boa porosidade e alta permeabilidade. Contudo, esses solos também podem apresentar alta acidez, baixa reserva de nutrientes, baixa capacidade de troca catiônica e ponto de carga zero alto.

Os óxidos de ferro referentes a forma cristalina (Fed) e óxidos de ferro relativos as formas de baixa cristalinidade (Feo), apresentaram teores médios de 30,8 e $0,9 \text{ g kg}^{-1}$ respectivamente, como pode ser observado na Tabela 1. O Fed predomina sobre as formas de Feo no material de origem do solo. A heterogeneidade dos minerais óxidos de ferro no solo se deve pelas mudanças pedogênicas que podem alterar os fatores das reações químicas no solo como, pH, SB e a MO do solo (Inda Junior e Kämpf, 2005). Além disso, um fator importante presente no solo, é a cristalinidade do

mineral que pode influenciar na CTC, superfície específica e na adsorção de P (Rolim Neto et al., 2004).

A SMbx do solo apresentou valores de média e mediana semelhantes, seguido do coeficiente de assimetria e curtose com valores próximos de zero (Tabela 1). Os valores médios variaram de 0,83 a $13,70 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ e com valores altos de CV. Para FD% da área de estudo os valores médios variaram de 2,06 a 20,52 % reforçando a variabilidade dos atributos do solo. Os valores de SM do solo podem estar associados à influência litogenética (Lu, 2008; Hanesch et al., 2007), fatores da pedogênese e condições pedoambientais (Curi e Franzmeier, 1984). Estes resultados mostram a grande sensibilidade da SM aos processos do solo que variam continuamente na paisagem, podendo ser expressa nas propriedades cristalográficas dos minerais presentes nos sedimentos e no solo.

A presença de partículas ferrimagnéticas é verificada pela medida em diferentes frequências da SM (FD%), que é obtida por alta e baixa frequências dos campos magnéticos (Dearing, 1999) (Tabela 1). Essa medida é muito importante para estimar as proporções de Mt e Mh do solo, e conseqüentemente o entendimento dos processos de sua formação. De acordo com Dearing (1999), as amostras de solos que apresentarem $\text{FD}\% < 2\%$ indicam a presença de minerais multidomínios; $\text{FD}\%$ entre 2 e 10 % possuem partículas de multidomínios e superparamagnéticas e os valores de 10 e 14 % de $\text{FD}\%$ indicam a predominância de partículas superparamagnéticas.

Os teores médios de Mh e Mt foram de 5,2 e 0,1 g kg^{-1} , respectivamente no solo. A separação desses minerais é desconhecida na literatura, mas uma nova metodologia adotada neste estudo possibilitou separar tais minerais e entender o seu comportamento na paisagem. A Mt é um mineral litogenético, presente principalmente em rochas de origem basáltica. Já a Mh encontrada na fração argila, apresentou maiores teores no solo, confirmando que sua presença varia ao longo da paisagem, como observado nos elevados teores de CV. Segundo Camargo et al., (2015) a SMbx surge como um complemento para caracterizar os minerais da fração argila e sob a magnetização dos minerais magnéticos como maghemita e/ou magnetita. Portanto, como as recomendações de correção de NC estão em função dos teores de argila, a SMbx se torna uma técnica promissora capaz de auxiliar no planejamento das aplicações.

As médias e medianas para recomendação de NC estão próximas, e variaram de -0,5 a 0,77 t ha⁻¹ logo tem distribuição assimetria. A acidez do solo é considerada um dos principais fatores que afetam o potencial produtivo das culturas em solos tropicais. Assim, a correção do solo se faz necessária a fim de potencializar a disponibilidade de nutrientes no sistema radicular das plantas para garantir seu crescimento e desenvolvimento (Nolla, 2004). Os solos que apresentam altos teores de argila apresentam maior efeito tampão, devido as trocas de carga nos colóides orgânicos e minerais do solo, além de atuarem como receptores de H⁺, contribuindo para que o pH não tenha alterações (Luchese et al., 2001). As correções com calagem em grandes profundidades são menores pela presença de altos teores de argila, principalmente em solos de textura média.

4.2. Árvore de regressão

Na Tabela 2 são apresentados os valores gerados a partir do cálculo de FIV, onde nota-se que os atributos preditores (SMbx, argila, Mt, Mh, Feo, Fed e Pads) apresentaram colinearidade baixa, reduzindo assim, a possibilidade do sobre ajuste do modelo. Valores obtidos, comprovaram a independência dos atributos. É fundamental atentar-se a colinearidade dos dados, pois a sua presença pode gerar informações instáveis e pouco confiáveis (Demirhan, 2014).

Tabela 2. Valores de colinearidade das variáveis preditoras.

	SMBX (10 ⁻⁶ m ³ kg ⁻¹)	Mh (g kg ⁻¹)	Mt (g kg ⁻¹)	Fed (g kg ⁻¹)	Feo (g kg ⁻¹)	Argila (g kg ⁻¹)	Pads (mg dm ⁻³)
FIV	1.186	1.209	1.035	1.21	1.032	1.257	1.073

FIV – fator de inflação de variância; SMBx - suscetibilidade magnética do solo em baixa frequência; Mh – maghemita; Mt – magnetita; Fed – ferro ditonito; Feo – ferro oxalato e Pads – fósforo adsorvido.

Os dados estudados apresentaram comportamento não-paramétrico. Segundo Bekker et al., (2019) os métodos tradicionais estatísticos lineares não são eficientes para explicar as complexas relações e padrões que abrangem grande parte dos conjuntos de dados. Nesse sentido, foi utilizado análise de AR, onde inicialmente o

banco de dados foi dividido em 60% para dados de treino e 40% para dados de teste e para a validação externa foram utilizados todos os dados.

Inicialmente o modelo realizou o ranqueamento com base na relevância dos atributos preditores na estimativa NC (Figura 8). Nota-se que a SMbx foi a de maior importância explicando 27% dos dados, seguida pela argila e pela variável Mt, estas somadas representam 70% do banco de dados.

O modelo de predição da AR criou sete nós terminais (Figura 9), a qual classificou 78% dos dados de treino (RMSE=0,15). Para garantir a eficiência do modelo de predição foi realizado uma análise de erro relativo por nó (Figura 10). Onde foi possível observar que a partir do sexto nó ocorreu uma desestabilização do modelo, podendo assim deixar este mais errático. De acordo com Han (2001), as sub-árvores podem criar erros que podem causar problemas de sobre ajustes no modelo. Isso também foi observado por Facelli et al (2011) onde afirma que a poda visa a melhoria do modelo, uma vez que a árvore tende a ser grande e de difícil compreensão.

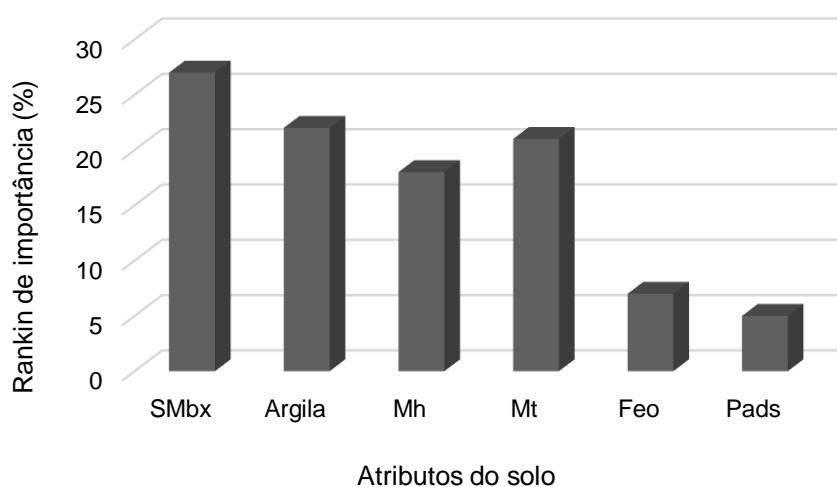


Figura 8. Atributos que apresentaram maior importância para o modelo de árvore de regressão. Onde SMbx – suscetibilidade magnética do solo; Mh – maghemita; Mt – magnetita; Feo – ferro oxalato e Pads – fósforo adsorvido.

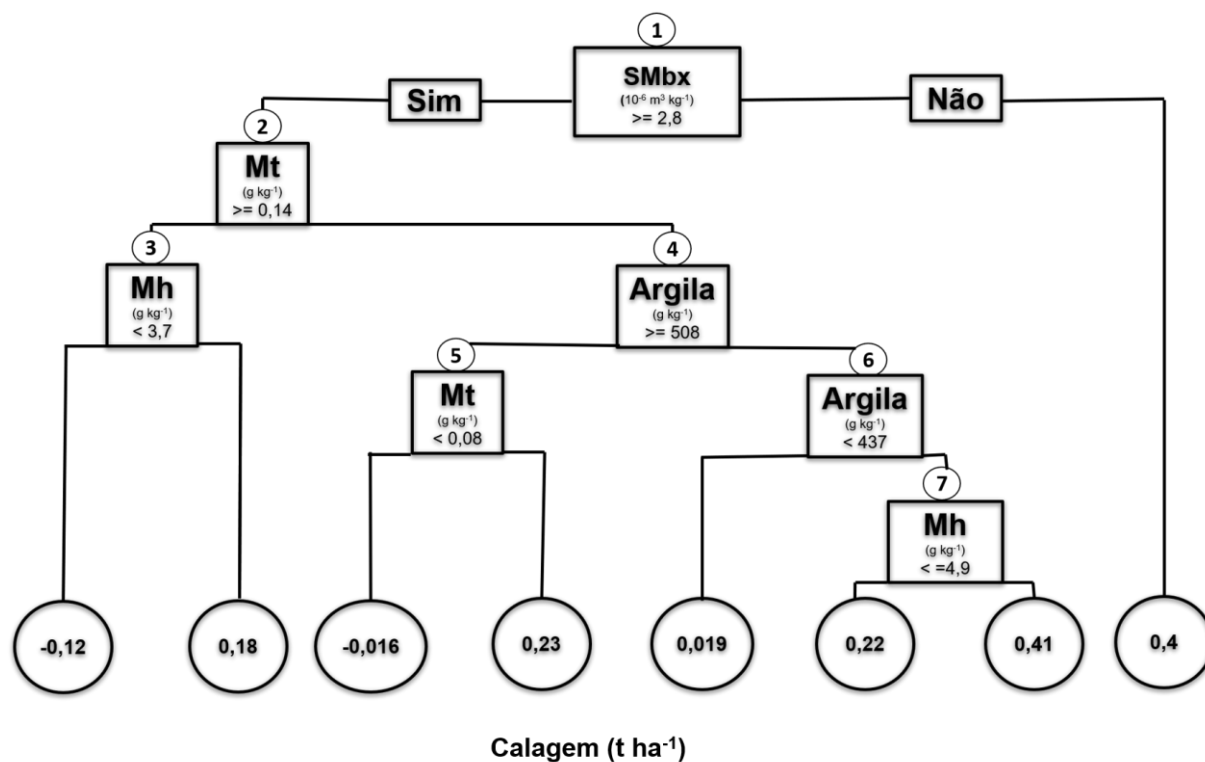


Figura 9. Árvore de regressão dos atributos SMbx – suscetibilidade magnética; Mt – magnetita; Mh – maghemita e argila do solo em relação a recomendação de calagem.

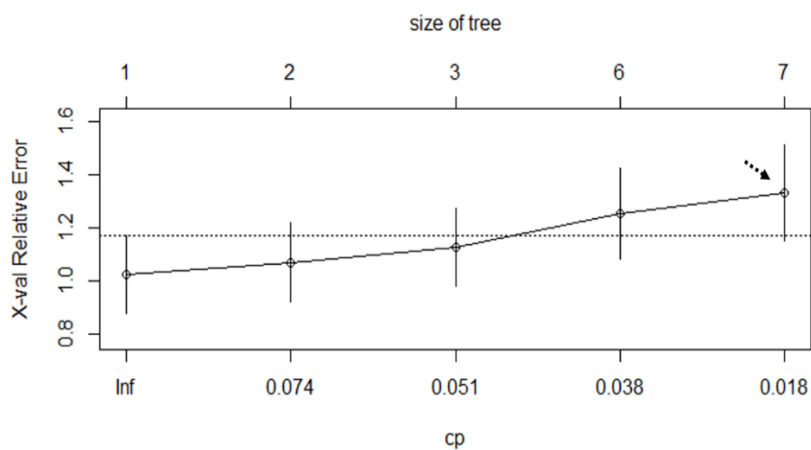


Figura 10. Erro encontrado em cada nó da árvore de regressão (seta indica onde foi realizada a poda).

Nesse sentido, realizou-se uma poda no sétimo nó da AR como podemos observar na Figura 11. O primeiro nó separou a SMbx e utilizou 100% dos dados para o modelo. A SM está diretamente relacionada com a mineralogia do solo e sendo influenciada pelos óxidos de ferro (Camargo et al., 2012), e possui potencial para

determinar indiretamente os atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo, tais como cálcio, potássio, soma de bases, teor de argila, Hm e Gt (Torrent et al., 2007; Siqueira et al., 2010).

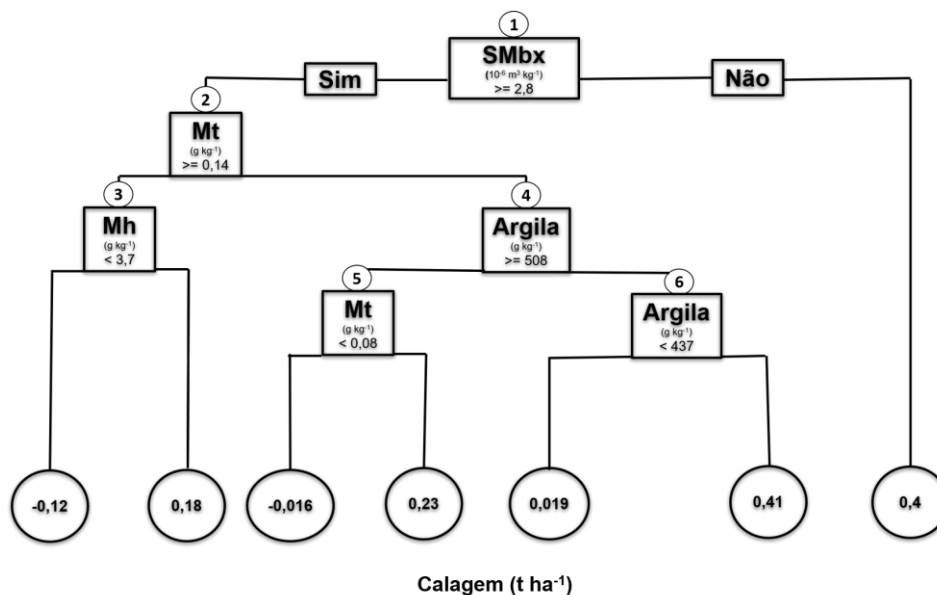


Figura 11. Árvore de regressão dos atributos SMbx – suscetibilidade magnética; Mt – magnetita; Mh – maghemita e argila do solo após a poda em relação a recomendação de calagem.

Os resultados comprovam que a utilização da SM se torna uma ferramenta de correlação dos atributos do solo (Tabela 2 e Figura 6), mas estão relacionadas muito mais ao material de origem do que classe de solo (Hanesch e Scholger, 2005). Além disso, a SM de um mineral contribui para predição dos teores de atributos do solo e a sua variabilidade na área (Petrovsky et al. 2000). Matias et al. (2013) mostram que é possível utilizar a SM para delimitar e caracterizar áreas homogêneas, ou seja, com características físicas, químicas e mineralógicas semelhantes, o que auxilia no manejo específico do solo.

Para os valores de $SMbx \leq 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ recomenda-se a aplicação de calcário de $0,4 \text{ t ha}^{-1}$. No segundo nó os valores de $SMbx > 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ deve-se observar o comportamento da Mt que apresentou 82% dos dados. Os valores de $Mt \geq 0,14 \text{ g kg}^{-1}$ devem seguir para o terceiro nó, onde os valores de $Mh < 3,7 \text{ g kg}^{-1}$ recomenda-se não aplicar calagem ($-0,12 \text{ t ha}^{-1}$) e os valores de $Mh > 3,7 \text{ g kg}^{-1}$ recomenda-se aplicar $0,18 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário. A Mh é um mineral pedogênico formado

em condições oxidantes, e sua formação pode ser consequência da transformação direta da Mt, como sugere a relação entre a Mt e Mh, enaltecendo a natureza dos atributos do solo e corroborando com resultados de Poggere et al. (2018) em solos intemperizados.

Os solos magnéticos apresentam grande potencial agrícola e boa resposta às adubações (Reis et al., 1995). Mas os estudos relacionados a esses minerais são limitados e seu entendimento baseia-se em suposições sobre os teores relativos de que os micronutrientes (Curi, 1984; Resende et al., 1988) ajudem na absorção de outros nutrientes pela planta e que a mineralogia presente no solo, contribua para a sua disponibilidade (Reis et al., 1995). Estudos realizados por Ferreira et al. (1994), em duas sequencias de solos de Minas Gerais, encontraram correlação com os macros e micronutrientes e os minerais magnéticos do solo.

A Mt conseguiu associar 82% dos dados na AR, onde $Mt < 0,14 \text{ g kg}^{-1}$ deve atribuir os teores de argila do solo com 61% do banco de dado. No quarto nó os valores de argila $\geq 508 \text{ g kg}^{-1}$ devem seguir para o quinto nó que apresenta novamente os valores de Mt. Quando esses valores forem menores que $0,08 \text{ g kg}^{-1}$ não são recomendadas aplicações de calagem e os valores superiores recomenda-se aplicar a dose de $0,23 \text{ t h}^{-1}$.

Para o sexto nó devemos observar os teores de argila $< 508 \text{ g kg}^{-1}$, onde as frações menores que 437 g Kg^{-1} se recomenda a aplicação de $0,019 \text{ t ha}^{-1}$ e para os teores de argila superiores são recomendados $0,32 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário no solo. A fração argila que é considerada a parte ativa do solo, e pode ser considerada um pedoindicador seguro dos fatores que interferem na produtividade, o que corrobora a eficiência do uso da SM para a caracterização de ambientes de produção. O modelo utilizado neste estudo conseguiu definir parâmetros que contribuem para o planejamento aplicado na área, tendo em vista a recomendação de doses adequadas de corretivos de forma localizada, reduzindo os custos de produção e contribuindo para o manejo sustentável do solo.

Os dados foram submetidos a validação externa, onde foi possível observar os valores preditos e observados em relação a SMbx e a Calagem. O modelo utilizado no estudo conseguiu explicar 70% dos dados e com RMSE de 0,20. Comprovando

assim, o uso da SMbx como indicador eficiente e sensível para os atributos do solo (Figura 12).

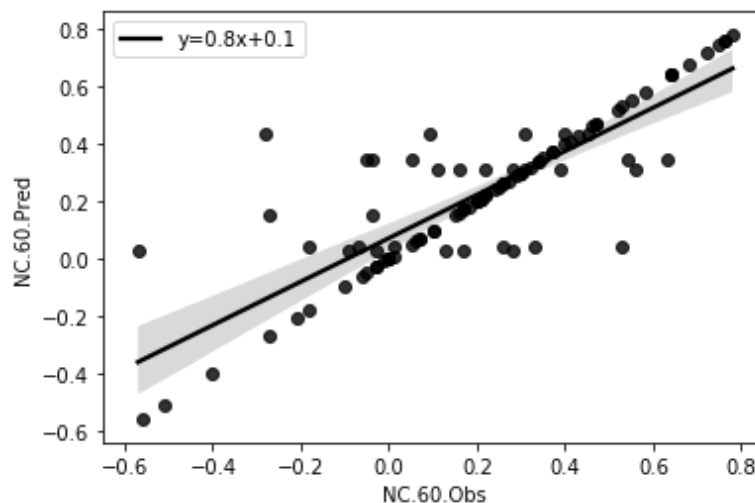


Figura 12. Validação do modelo utilizado e histograma da distribuição dos dados. Sendo NC.60. Obs – necessidade de calagem observada a 60% e NC.60.Pred – necessidade de calagem predita a 60%.

4.3. Variabilidade espacial dos atributos do solo e áreas específicas de manejo

Os resultados da análise geoestatística na área, demonstraram que os atributos estudados apresentaram dependência espacial (Tabela 3). O modelo esférico ajustou-se às principais variáveis estudadas Ca, Mg, CTC, SMbx, Mh, Mt e NC predito, com exceção da NC observada e a argila que apresentaram modelo exponencial. O modelo esférico geralmente indica transições abruptas ao longo da paisagem, sendo ele o mais comumente ajustado em estudos de variabilidade espacial em ciência do solo (McBratney e Webster, 1986). Segundo Souza et al., (2014) semivariogramas com estrutura de dependência espacial de moderada a forte geram mapas de krigagem mais precisos, que aqueles gerados com fraca dependência espacial, devido à menor contribuição do componente aleatório na variabilidade dos dados.

Tabela 3. Parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas dos atributos do solo.

Atributos	Modelo	C0	C0 + C1	Alcance (m)	R ²	SQR
Ca (mmol _c dm ⁻³)	Esférico	106,1000	320,0000	3110,00	0,7	3720
Mg (mmol _c dm ⁻³)	Esférico	8,0100	31,8700	3110,00	0,7	46,3
CTC (mmol _c dm ⁻³)	Esférico	141,0000	540,4000	3110,00	0,7	11539
Argila (g kg ⁻¹)	Exponencial	321,0000	343,0000	86,00	0,5	121935
SMbx (10 ⁻⁶ m ³ kg ⁻¹)	Esférico	5,0000	13,8100	17336,00	0,8	8,79
Mh (g kg ⁻¹)	Esférico	0,0100	73,970	191	0,8	2,06
Mt (g kg ⁻¹)	Esférico	0,0013	0,0035	741	0,8	1,574E ⁻⁰⁴
Calagem Obs (t ha ⁻¹)	Exponencial	0,0047	0,0720	300	0,7	1,57
Calagem Pred (t ha ⁻¹)	Esférico	0,0001	0,0541	211	0,8	2,02E ⁻⁰¹

Co – efeito pepita; Co + C1 – patamar; A – alcance; R² – coeficiente de determinação; SQR – soma do quadrado do resíduo; Ca – cálcio; Mg – magnésio; CTC – capacidade de troca de cátions; Al – alumínio; SMbx - suscetibilidade magnética do solo em baixa frequência; Mh – maghemita; Mt – magnetita; Calagem Obs – calagem observada; Calagem Pred – recomendação de calagem predita de acordo com a suscetibilidade magnética do solo.

Um importante parâmetro utilizado é o alcance, que representa a distância máxima em que uma variável está correlacionada espacialmente à outra (Viera et al., 2000). A Mh apresentou os menores valores de alcance (191 m) (Tabela 3). Os demais atributos apresentaram valores superiores. Essas informações auxiliam nas definições de áreas de manejo específico, uma vez que encontra relação entre os fatores de formação do solo e a variabilidade espacial detalhada dos atributos.

Para os atributos que apresentaram dependência espacial, foram construídos mapas de distribuição espacial de Krigagem (Figura 13). Os mapas de Ca, Mg e CTC apresentaram o mesmo comportamento, seguindo o mesmo sentido das isolinhas de variabilidade. Já os mapas SMbx e Mt seguiram um padrão em relação a classe de solo. Tais informações ajudam a compreender as relações de variabilidade entre a relação solo - paisagem (Siqueira et al., 2010). Nesses locais, as partículas dos minerais magnéticos como a Mt podem ser carregadas das áreas mais altas para as mais baixas, refletindo em uma maior variabilidade da SM, evidenciando a influência do relevo nos atributos do solo. Os maiores valores foram encontrados na área central da paisagem.

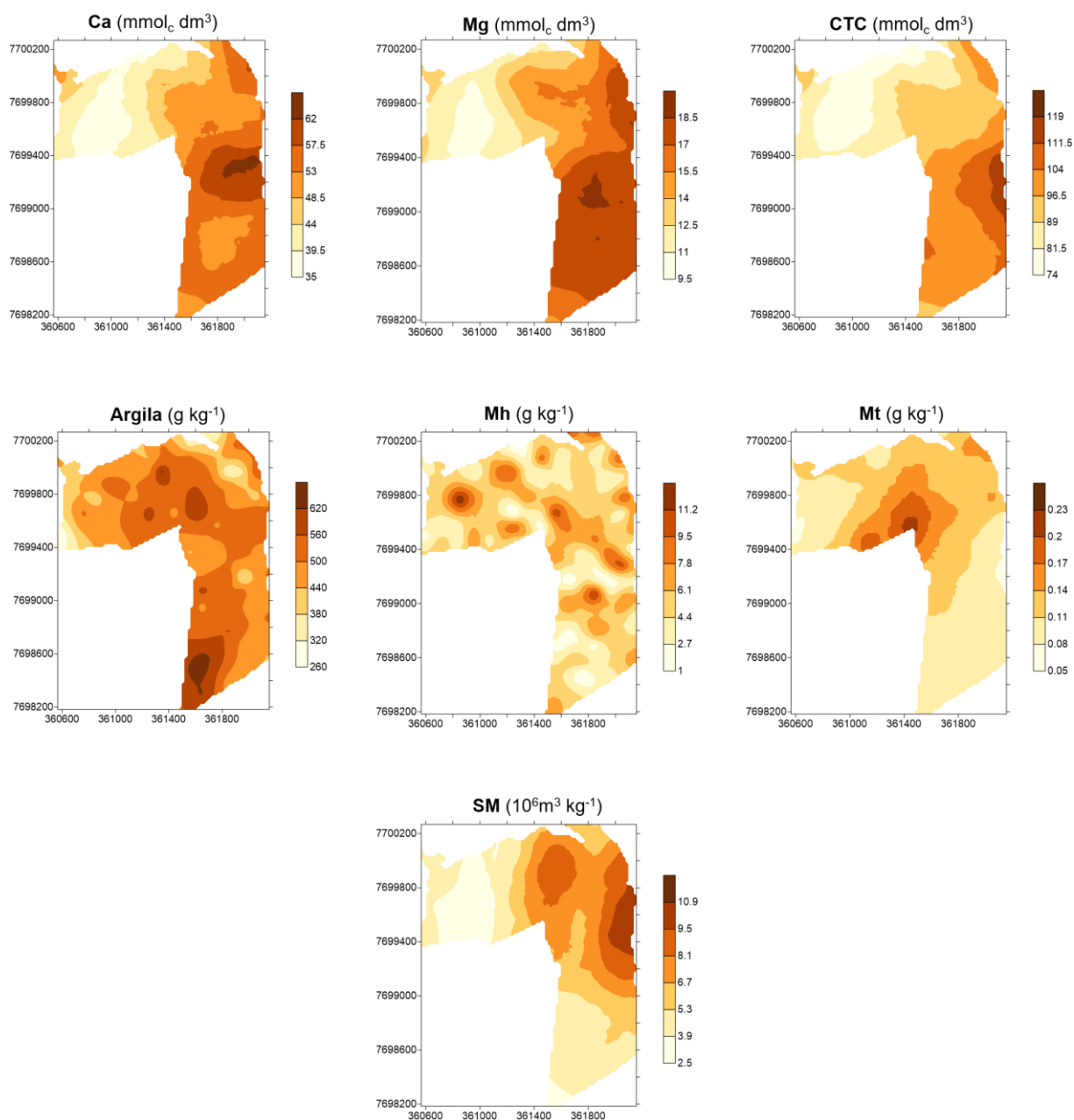


Figura 13. Mapas de distribuição espacial dos atributos do solo. Sendo Ca – cálcio; Mg – magnésio, CTC – capacidade de troca de cátions; Mh – maghemita; Mt – magnetita e SM – suscetibilidade magnética do solo.

A variabilidade espacial entre os mapas de recomendação de calagem obtidas pelo cálculo da Embrapa (2015) (Figura 14A) apresentam similaridade ao encontrado nas recomendações preditas pela SM do solo (Figura 14B). Esses resultados enaltecem o potencial da SMbx, pois sabe-se que a determinação de nutrientes por análises convencionais do solo exige uma grande quantidade de reagentes, tempo e

um grande número de amostras. O contrário ocorre com a técnica da SMbx, que além de identificar áreas com maiores e menores necessidades de aplicação de corretivo, de modo a priorizar dosagens localizadas, reduz os custos da produção e garante o manejo sustentável do solo.

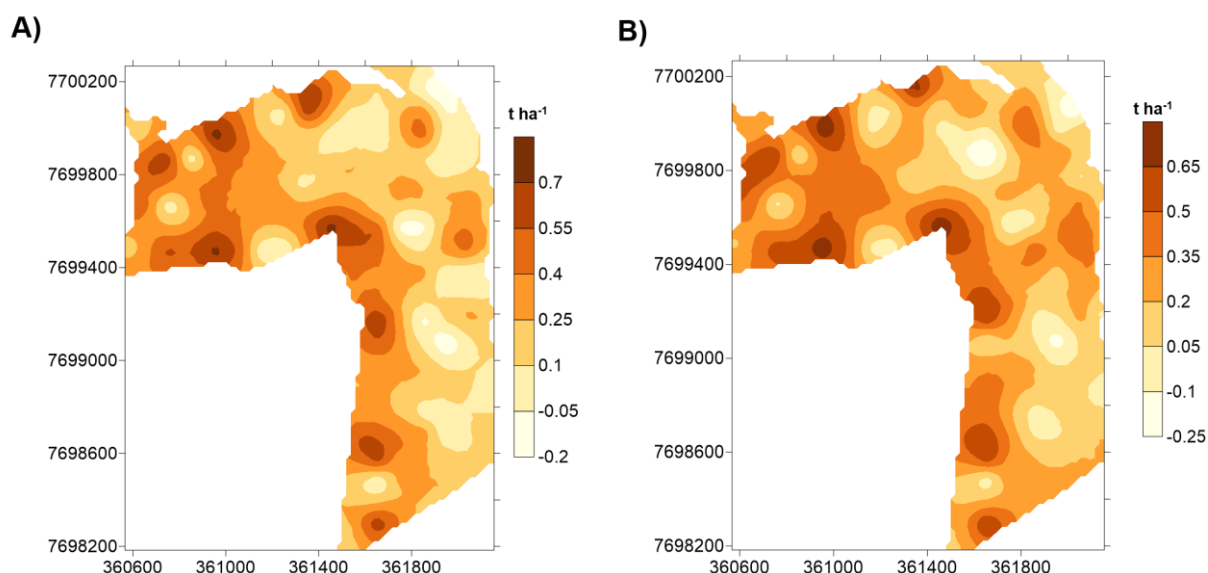
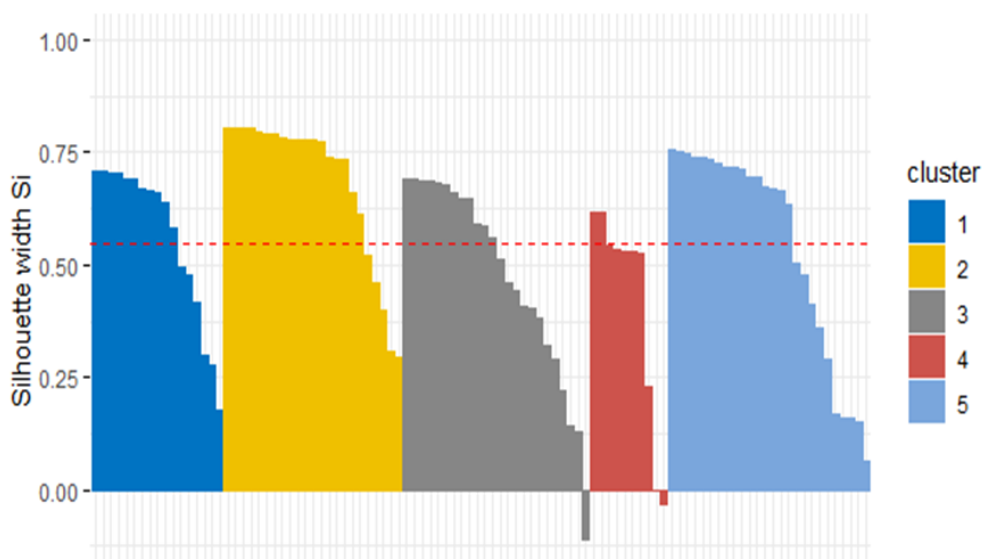


Figura 14. Mapas de calagem observado (A) e predito (B) em relação a SMbx do solo.

Após entender o comportamento dos atributos no solo, foi realizada uma análise discriminante de clusters, na qual foi possível separar cinco áreas de manejo (Tabela 4). O primeiro cluster conseguiu separar um ambiente com 17 pontos e uma média de 0,56. Para o cluster 2 e 3 os ambientes foram de 23 e 24 pontos, com uma média de 0,67 e 0,47. Já para os cluster 5 foram 26 pontos selecionados com uma média de 0,54. Essas informações foram apresentadas na Figura 15. A área de estudo, quando comparada a grandes áreas agrícolas, pode ser considerada pequena, porém, a análise discriminante mostrou potencial para delinear áreas de manejo, com o uso da variável SM. A delimitação de áreas de manejo torna-se uma alternativa para identificação de locais de amostragem de solo (Li et al., 2007) e para recomendação de adubação das culturas.

Tabela 4. Médias para cada agrupamento de clusters.

Cluster	Agrupamento	Média
1	17	0.56
2	23	0.68
3	24	0.47
4	10	0.41
5	26	0.54

**Figura 15.** Análise discriminante de clusters dos diferentes ambientes encontrados na área.

Com base nos teores de SM do solo foi possível criar um mapa com os cinco ambientes encontrados (Figura 16). Enaltecendo mais uma vez a importância de entender o comportamento e distribuição dos minerais magnéticos do solo ajuda a distinguir a influência do material de origem e, ainda, os ambientes que apresentam elevada concentração de SMbx, possibilitando a recomendação de adubos e correções (Zawadzki et al., 2012).

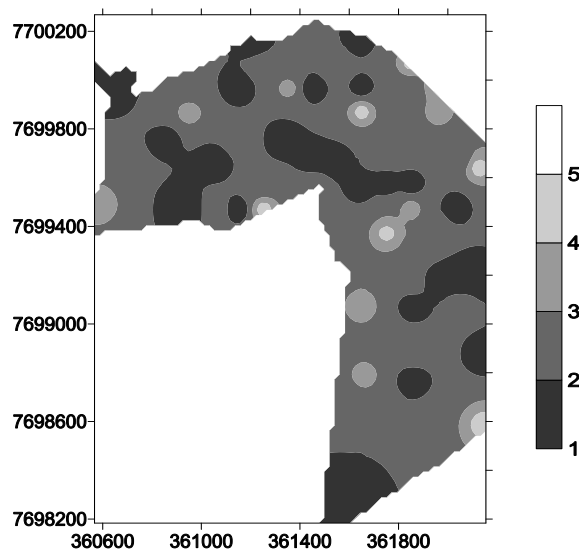


Figura 16. Mapa dos ambientes com base nos teores de suscetibilidade magnética do solo encontrados na área.

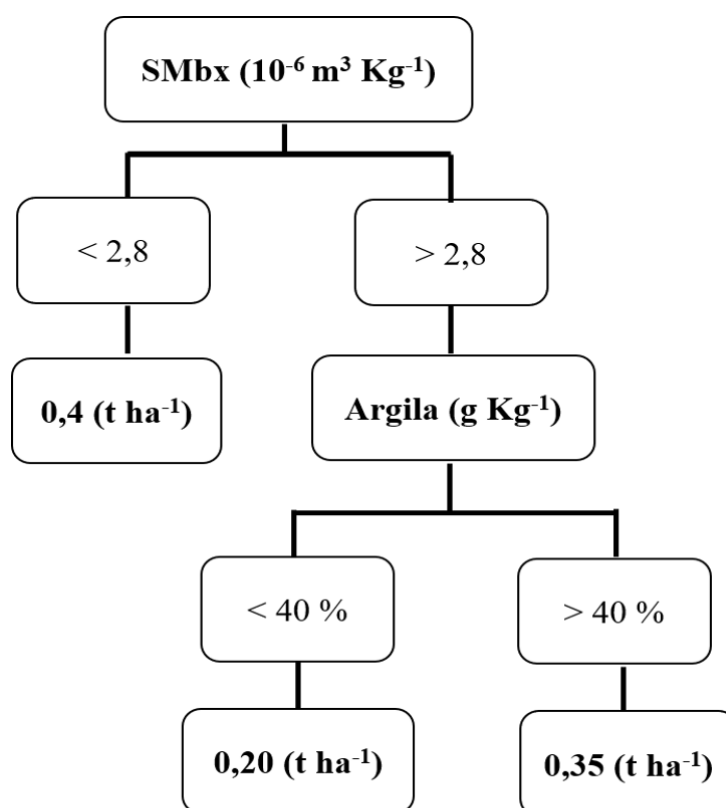
A geologia e a paisagem são fatores extremamente importantes que condicionam a variabilidade do solo (Legros, 2006). Os minerais magnéticos do solo por sua vez enaltecem o efeito decisivo do delineamento das áreas, reafirmando a influência do manejo nos minerais magnéticos. A sensibilidade da SM permite seu uso como uma ferramenta eficiente para identificar áreas com contrastes produtivos (Sanzhez et al., 2012; Matias et al., 2015).

A SMbx do solo é uma técnica eficiente, que apresenta praticidade e causa menor impacto ao meio ambiente. Quando utilizada para a predição da NC mostra um potencial de recomendação de forma racional na paisagem, em termos de quantidade adequada, principalmente quando associada ao mapeamento da variabilidade espacial do solo.

4.4. Aplicações

Com base nos resultados obtidos no modelo estudado, foi gerada uma recomendação de calagem com base nos teores de SMbx e argila do solo. Esses atributos foram os que apresentaram maior influência no modelo da AR. Neste contexto, os valores foram ajustados para maior entendimento e praticidade (Figura

17). Quando os teores de SMbx forem $< 2,8$, recomenda-se aplicar $0,4 \text{ t ha}^{-1}$. Mas quando esses valores forem $> 2,8$ deve-se observar os teores de argila. Quando argila $< 400 \text{ g kg}^{-1}$ deve-se aplicar $0,20 \text{ t ha}^{-1}$ e os valores $> 400 \text{ g kg}^{-1}$ recomenda-se aplicar $0,35 \text{ t ha}^{-1}$. As recomendações sugeridas neste estudo mostram que a SMbx é uma técnica eficiente de predição, barata e prática. A SMbx auxilia na caracterização dos minerais da fração argila do solo, e está diretamente relacionada com os minerais predominantes, como a Mh e Mt.



Aplicação de calagem

Figura 17. Recomendação de calagem com base nos teores de suscetibilidade magnética do solo (SMbx) e argila.

As recomendações de calagem pela SM do solo utilizada como método indireto, pode ser uma alternativa efetiva e viável, visto que é um método menos intrusivo e que garante a redução dos impactos ambientais. E quando associamos essa técnica ao mapeamento da variabilidade espacial do solo garantimos o gerenciamento das aplicações de doses adequadas ao longo da paisagem.

5. CONCLUSÃO

A suscetibilidade magnética do solo permite diferenciar a origem dos sinais magnéticos em lito-pedogenéticos, especialmente a magnetita e a maghemita; podendo ainda associá-los com os atributos do solo.

O algoritmo utilizado para predição da árvore de regressão permitiu elaborar um protocolo alternativo de necessidade de calagem, utilizando os valores de suscetibilidade magnética e os teores de argila do solo.

Foi possível identificar cinco ambientes de manejo com base nos teores de suscetibilidade magnética do solo e recomendar doses eficientes de calagem.

6. REFERÊNCIAS

- Alcarde JA, Rodella AA (2003) Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos. In: Curi N, Marques JJ, Guilherme LRG, Lima JM, Lopes AS, Alvares VVH (EDS) **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, Sociedade brasileira de Ciência do Solo, p.291-334.
- Bambolim A, Caione G, Souza NF, Seben JGF, Ferbonink GF (2015) Calcário líquido e calcário convencional na correção da acidez do solo. **Revista de Agricultura Neotropical** 2:34-38.
- Barrios RM, Marques JJ, Matias SSR, Panosso AR, Siqueira DS, Scala Junior N (2017) Suscetibilidade magnética como indicador de qualidade do solo em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Caatinga** 30: 287-295.
- Barrón V (2017) Curso de magnetismo. Comunicação pessoal.
- Barrón V, Torrent J (1986) Use of the Kubelka-Munk theory to study the influence of iron oxides on soil color. **Journal of Soil Science** 37:499-510.
- Batista MRS (2019) A utilização de algoritmos de aprendizado de máquina em problemas de classificação. 109 f. Dissertação (Mestrado em matemática, Estatística e Computação Aplicadas à Industrial), Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo.
- Bekker GFH, Van G (2019) Using machine learning to identify the geographical drivers of *Ceratitris capitata* trap catch in an agricultural landscape. **Computers and Electronics in Agriculture** 162:582–592.
- Breiman L, Friedman J, Olshen R, Stone C (1984) Classification and regression trees. **Wadsworth International Group**, 37:237-251.
- Brilhante SA, Santos JCB, Santos JVS, Araújo JKS, Filho MRR, Corrêa MM (2017) Weathering of rhyolites and soil formation in an atlantic forest frangment in Northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 47:1-18.
- Brito GLM, Schuster HDM, Srinivasan VS (2008) **Estimation of Annual Ground Water Recharge in the Sedimentary Basin of the River Peixe, Paraíba, Brazil**. In.: 16 th Asian Pacific Division Congress of IAHR, Nanjing 1:269-274.
- Brown DJ, Shepherd KD, Walsh MG Mays MD, Reinsch TG (2006) Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, 132:273-290.
- Burrough PA, McDonnel, RA (2000) Principles of Geographical Information Systems.
- Caires EF, Garbuio FJ, Churka S, Barth G, Corrêa JCL (2008) Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. **European Journal of Agronomy** 28:57-64.

Camargo LA, Marques Júnior J, Barrón V, Alleoni LRF, Barbosa RS, Pereira GT (2015) Mapping of clay, iron oxide and adsorbed phosphate in Oxisols using diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, 251/252:124-132.

Camargo LA, Marques Júnior J, Pereira GT, Alleoni LRF (2012) Spatial correlation between the composition of the clay fraction and contents of available phosphorus of an Oxisol at hillslope scale. **Catena** 100: 100-106.

Canizo BV, Escudero LB, Pellerano RG, Wuilloud RG (2019) Data mining approach based on chemical composition of grape skin for quality evaluation and traceability prediction of grapes. **Computers and Electronics in Agriculture** 162:514–522.

Coleman NT, Thomas GW (1967) The basic chemistry of soil acidity. In: Pearson, RW, Adams F eds. **Soil acidity and liming**. Madison, American Society of Agronomy, p.1-41.

Cortez La, Marques Júnior J, Peluco RG, Teixeira DB, Siqueira DS (2011) Suscetibilidade magnética para identificação de áreas de manejo específico em citricultura. **Energia na agricultura** 26: 60-79.

Costa ACS, Bigham JM, Rhoton FE, Traina SJ (1999) Quantification and characterization of maghemite in soils derived from volcanic rocks in southern Brazil. **Clay and Clay Minerals** 47: 466-473.

Costa ACS, Bigham, JM (2009) Óxidos de Ferro. In.: Melo FM, Aleoni LRF. **Química e mineralogia do solo** Parte I, SBCS. Viçosa, p. 506 – 572.

Costa CHM, Crusciol CAC, Neto JF, Castro GSA (2016) Residual effects of superficial liming on tropical soil under no-tillage system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 51: 1633-1642.

Costa NR, Andreotti M, Araújo UM, Costa BS, Pariz CM, Cavasano FA, Filho MCMT (2015) Produtividade da soja sobre palhada de forrageiras semeadas em diferentes épocas e alterações químicas no solo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias** 10: 8-16.

Curi N, Franzmeier DP (1984) Toposequência de Latossolos do Planalto Central do Brasil. **Soil Science Society of America Journal** 48: 341-346.

De'ath G, Fabricius KE. (2000). Classification and regression trees: A powerful yet simple technique for ecological data analysis. **Ecology** 81: 3178-3192.

Dearing JA (1999) Holocene environmental change from magnetic proxies in lake sediments. In.: Maher BA, Thompson R (Eds.), **Quaternary Climates, Environments and Magnetism**. Cambridge: Cambridge University Press, p. 231– 278.

Dearing JA, Hay KL, Baban SMK, Huddlest OAS, Wellingt OEMH, Lo-Veland PJ (1996) Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conicting theories using a national data set. **Geophysical Journal International** 127: 728–734.

Demirhan H (2014) The problem of multicollinearity in horizontal solar radiation estimation models and a new model for Turkey. **Energy Conversion and Management** 84:334–345.

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2015) **Recomendações para correção da acidez do solo para cana-de-açúcar no cerrado**. Brasília: Embrapa Cerrados. (Embrapa Cerrados. Comunicado Técnico 177).

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2017) **Manual de métodos de análise de solos**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 3ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 573p.

Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2013) **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília, 353p.

Fageria NK (2001) Efeito da calagem na produção de arroz, feijão, milho e soja em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 36:1419-1424.

Fassbender H, Igue Y (1967) Comparación de radiométricos y colorimétricos em estúdios sobre retención y transformación de fosfatos em el suelo. **Turrialba** 17:284-287.

Ferreira SAD, Santana DP, Fabris JD, Curi N, Nunes Filho E, Coey JMD (1994) Relações entre magnetização, elementos traços e litologia de duas sequências de solos do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 18:167-174.

Fontes MPF, Camargo OAD, Sposito G (2001). Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Scientia Agricola** 58:627-646.

Fontes MPF, Oliveira TS, Costa LM, Campos AAG (2000) Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials. **Geoderma** 96: 81–99.

Frogbrook ZL, Oliver MA (2007) Identifying management zones in agricultural fields using spatially constrained classification of soil and ancillary data. **Soil Use And Management** 23: 40-51.

Grimley DA, Arruda NK, Bramsted MW (2004) Using magnetic susceptibility to facilitate more rapid, reproducible and precise delineation of hydric soils in the midwestern USA. **Catena** 58:183-213.

Grubinger T, Kobel C, Pfeiffer K. (2010). Regression tree construction by bootstrap: Model search for DRG-systems applied to Austrian helath-data. **BCM Medical Informatics and decision making** 10.

Guzmán G, Barrón V, Gómez JA (2010) Evaluation of magnetic iron oxides as sediment tracers in water erosion experiments. **Catena** 82:126–133.

Han J (2001) Data mining: concepts and techniques. Canadá: Morgan Kaufmann Publishers, 550 p.

Han J, Kamber M (2001) Data Mining: Concepts and Techniques. 3rd. ed. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 703p.

Hanesch M, Scholger R (2005) The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles. **Geophysical Journal International** 161:50–55.

Hanesch M, Stanjek H, Petersen N (2007) Thermomagnetic measurements of soil iron minerals: the role of organic carbon. **Geophysical Journal International** 165: 53-61.

Heilbron M, Valeriano CDM, Pereira RM, Almeida JCHD, Duarte BP, Turbay C, Castro C (2007) **Geologia da folha Alpinópolis SF. 23-VBV.**

Hudson BD (1992) The soil survey as a paradigm-based science. **Soil Science Society American Journal** 56:836-841.

Inda Júnior AV (2002) **Caracterização de goethita e hematita em solos poligenéticos.** 123 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Inda Júnior AV, Kämpf N (2005) Variabilidade de goethita e hematita via dissolução redutiva em solos de região tropical e subtropical. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 29:851-866.

Jong E, Pennock DJ, Nestor PA (2000) Magnetic susceptibility of soils in different slope positions in Saskatchewan. **Catena** 40:291-305.

Facelli K et al. (2011) Inteligência Artificial: Uma Abordagem de Aprendizagem de Máquina. LTC, 394p.

Kaminski J. (1989) Acidez do solo e a fisiologia das plantas. In.: Kaminski J, Volkweiss J, Becker FC. SEMINÁRIO SOBRE CORRETIVOS DA ACIDEZ DO SOLO, 2., Santa Maria, **Seminário...** Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, p.39-61.

Kämpf N, Curi N. (2000) Óxidos de ferro: Indicadores de ambientes pedogênicos. In: Novais RF, Alvarez VVH, Schaefer CEGR, Editor. **Tópicos em ciência do solo.** Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p. 107-138.

Kämpf N, Klant E, Schneider P (1988) Óxidos de ferro em Latossolos do Brasil sudeste e sul. In.: REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORREÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÃO DE APTIDÃO AGRÍCOLA. 3, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Serviço Nacional de Levantamento e Classificação do Solo, p. 15-183.

Kucukkacoaglu G, ALP OS (2011) IPO mechanism slection by using Classification and Regression Trees. **Qual Quant** 46: 873-888.

Lacerda RD, Mendes JS, Chaves LHG (2006) Manejo de solos ácidos: Comparação de métodos para avaliar a necessidade de calcário dos solos do Estado da Paraíba. **Revista de Biologia e Ciências da Terra** 6:34-38.

Landell MGA, Prado H, Vasconcelos ACM, Perencin D, Rosseto R, Bidoia MAP, Silva MA, Xavier MA (2003) Oxisol subsurface chemical attributes related to sugarcane productivity. **Scientia Agricola** 60:741-745.

Lark RM, Minasny B (2018) Classical Soil Geostatistics. In.: McBratney AB, Minasny B, Stockmann U (Eds.) **Pedometrics, Progress in Soil Science**. Gewerbestrasse: Springer Nature, p. 291-340.

Legros JP (2006) Mapping of the soil. Science Pub Inc, 411 p.

Lepsch IF (2011) 19 lições de pedologia. São Paulo: Oficina de Textos.

Li Y, Zhou S, Feng L, Hong-Yi L (2007) Delineation of site-specific management zones using fuzzy clustering analysis in a coastal saline land. **Computers Electronics in Agriculture** 56:174-186.

Little TM, Hills FJ (1978) Agricultural experimentation. New York: John Wiley & Sons. 350p.

Long X, Ji J, Balsam W, Barrón V, Torrent J (2015) Grain growth and transformation of pedogenic magnetic particles in red Ferralsols. **Geophys** 42:5762–5770.

Lopes AS, Guilherme LRG (199) **Acidez do solo e calagem**. 3ª Ed., São Paulo, ANDA, 22p. (Boletim Técnico,1).

Lopes AS, Cox FR (1979) Relação de características físicas, químicas e mineralógicas com fixação de fósforo em solos sob cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 3:82-88.

Lu SG, Xue QF, Zhu L, Yu JY (2008) Mineral magnetic properties of weathering sequence of soils derived from basalt in Eastern China. **Catena** 73:23-33.

Luchese EB, Favero LOB, Lenzi E (2001) Fundamentos de química do solo. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 182 p.

Luque ECL (2008) **Propriedades magnéticas de los óxidos de hierro en suelos mediterráneos**. 2008. 179f. Tese (Doutorado) Universidad de Córdoba.

Luxburg U, Von Schölkopf B (2011) Statistical Learning Theory: Models, Concepts, and Results. **Handbook of the History of Logic** 10: 651–706.

Maher BA (1986) Characterization of soils by mineral magnetic measurements. *Physics of The Earth and Planetary Interiors* 42: 76-92

Malavolta E (1979) ABC da Adubação. Editora Agronômica CERES Ltda. São Paulo (SP) 256 p.

Malavolta E (1987) Manual de calagem e adubação das principais culturas. São Paulo, Ceres, 496p.

Mantovanelli BC, Campos MCC, Alho LC, Franciscan U, Nascimento MF, Santos LA C (2016) Distribuição espacial dos componentes da acidez do solo em área de campo natural na região de Humaitá, Amazonas. **Revista de Ciências Agro- Ambientais** 14: 01-09.

Mantovanelli BC, Santana A, Rezende J, Dantas M, Oliveira E (2019) Calcário líquido e convencional na correção da acidez ativa de solos com diferentes texturas. **Revista EDUCamazônia** 12:125-139.

Marques Junior J, Siqueira DS, Camargo LA, Teixeira DDB, Barrón V, Torrent J (2014) Magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to characterize the spatial variability of soil properties in a Brazilian Haplustalf. **Geoderma** 219-220:63-71.

Martín NF, Bollero GA, Bullock DG (2005) Associations between field characteristics and soybean plant performance using canonical correlation analysis. **Plant and Soil** 273:39-55.

Matias SSR, Marques Junior J, Pereira GT, Siqueira DS (2015) Ferramentas matemáticas, suscetibilidade magnética e modelos de paisagem aplicados na delimitação de áreas de manejo específico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 39:968-980.

Matias SSR, Marques Júnior J, Siqueira DS, Pereira GT (2013) Modelos de paisagem e susceptibilidade magnética na identificação e caracterização do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 43:93-103.

Maule RF, Mazza JA, Martha Jr, Bueno G (2001) Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. **Scientia Agrícola** 58:295-301.

Mcbratney AB, Odeh IOA, Bishop TFA, Dunbar MS, Shatar TM (2000). An overview of pedometric techniques for use in soil survey. **Geoderma** 97: 293-327.

Mcbratney AB, Webster R (1986) Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **European Journal of Soil Science** 37: 617-639.

Mehlich A (1942) The significance of percentage base saturation and pH in relation to soil differences. **Soil Science Society of America, Proceedings** 7:167-173.

Mehra OP, Jackson MC (1960) Iron oxide removal from soil and clay by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: NATIONAL CONFERENCE ON CLAY MINERALS, 7, **Anais...** New York.

Melo VF, Corrêa GF, Maschio PA, Ribeiro AN, Lima VC (2003) Importância das espécies minerais no potássio total da fração argila de solos do Triângulo Mineiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 27: 807-819.

Minato Nakazawa (2007) **Pacote fmsb2018**. Disponível em: <<https://cran.rproject.org/web/packages/fmsb/index.html>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

Moreira A, Fageria NK (2010) Liming influence on soil chemical properties, nutritional status and yield of alfalfa grown in acid soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 34:1231-1239.

Moreira SG, Kiehl JC, Prochnow LI, Pauletti V (2001) Calagem em sistema de semeadura direta e efeitos sobre a acidez do solo, disponibilidade de nutrientes e produtividade de milho e soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 25:71-81.

Mullins CE (1977) Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science - a review. **Journal of Soil Science** 28:223-246.

Natale W, Rozane D, Parent LE, Parent SÉ (2012) Acidez do solo e calagem em pomares de frutíferas tropicais. **Revista Brasileira de Fruticultura** 34:1294-1306.

Nolla A (2004) Correção da acidez do solo com silicatos. In: SIMPÓSIO SOBRE SILÍCIO NA AGRICULTURA. 3., Uberlândia. Palestras. Uberlândia, GPSi/ICIAG/UFU, 2004. CD-ROM

Obi JC, Ogunkunle AO (2009) Influence of termite infestation on the spatial variability of soil properties in the Guinea savanna region of Nigeria. **Geoderma** 148: 357–363.

Pauletti V, Pierri L, Ranzan T, Barth G, Motta ACV (2014) Efeito em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 38:495-505.

Peluco RG, Marques Júnior J, Siqueira DS, Pereira GT, Barbosa RS, Teixeira DDB, Adame CR, Cortez LA (2013) Suscetibilidade magnética do solo na estimação da capacidade de suporte à aplicação de vinhaça. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira** 48: 661-672.

Peters C, Dekkers MJ (2003) Selected room temperature magnetic parameters as a function of mineralogy, concentration and grain size. **Physics and Chemistry of the Earth** 23: 659–66.

Petrovský E, Kapicka A, Jordanova N, Knab M, Hoffmann V (2000) Low-ed magnetic susceptibility: a proxy method of estimating increased pollution of diferente environmental systems. **Environmental Geology** 39:312–318.

Poggere GC, Inda AV, Barrón V, Kämpf N, Brito ADB, Barbosa JZ, Curi N (2018) Quantificação de maghemita e assinatura magnética de solos brasileiros com materiais parentais contrastantes. **Applied Clay Science** 38:53-94.

Raij BV, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JÁ (2001) Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, Instituto Agrônomo , 285p.

Raliya R, Pratim Biswas JCT (2016) Enhancing the Mobilization of Native Phosphorus in the Mung Bean Rhizosphere Using ZnO Nanoparticles Synthesized by Soil Fungi. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 64: 3111.

Reis C, Fabris JD, Novais RF, Bahia Filho AFC, Santana DP, Curi N, Coey JMD (1995) Cinética de sorção de fósforo em alguns solos de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 19:337-344.

Resende M, Santana DP, Franzmeier DP, Coey JMD (1988) Magnetic properties of Brazilian Oxisols. In: International soil classification workshop. 8 ed. Rio de Janeiro: Embrapa, p.78-108.

Rolim Neto FC, Schaefer CEGR, Costa LM, Corrêa MM, Fernandes Filho EI, Ibraimo MM (2003) Adsorção de fósforo, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 28:953-964.

Rowntree KM, Waal BW, Pulley S (2017) Magnetic susceptibility as a simple tracer for fluvial sediment source ascription during storm events. **Journal Environmental Management** 194: 54–62.

Rstudio Team (2015) RStudio: Integrated Development Environment for R. RStudio Inc., Boston, MA. Disponível em <http://www.rstudio.com> Acesso em: 01 fev. 2020.

Sanchez MGB (2009) **Relação solo relevo em áreas sob cultivo de café no sudoeste de Minas**. 90 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

Sanchez RB, Marques Júnior J, Pereira GT, Baracat Neto J, Siqueira DS, Souza ZM (2012) Mapeamento das formas do relevo para estimativa de custos de fertilização em cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola** 32:280-292.

Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Lumberras JF, Coelho MR, Cunha TJF (2018) Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, DF: Embrapa; 356p.

Santos HL, Júnior JM, Matias SSR, Siqueira DS, Pereira GT (2011) Suscetibilidade magnética na identificação de compartimentos da paisagem em uma vertente. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias** 6: 710-716.

Schwertmann U (1964) Differenzierung der eisenoxide des bodens durch extraktion mit ammoniumoxalat-lösung. **Z Pflanz Bodenkunde** 105: 194-202.

Schwertmann U (1985) The effect of environments on iron oxide minerals. **Advances in Soil Science** 1:172–200.

Schwertmann U, Cornell RM (1991) Iron oxides in laboratory. New York: Cambridge, VCH, 137p.

Schwertmann U, Fechter H (1984) The influence of aluminium on iron oxides: XI. Aluminium substituted maghemite in soils and its formation. **Soil Science Society of America Journal** 48: 1462-3.

Schwertmann U, Herbillon, AJ (1992) Some aspects of fertility associated with the mineralogy of highly weathered tropical soils. In: LAL, R.; SANCHEZ, P. **Myths and science of soils of the tropics**. Madison, Soil Science Society America, p.47-59. (Special Publ. n.29).

Semeraro G, Kay JF, Esposito, D, Malerba (1997) A comparative analysis of methods for pruning decision trees. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **IEEE Transactions** 19:476–49.

Siqueira DS, Marques Jr J, Pereira GT, Teixeira DDB, Vasconcellos V, Carvalho Jr O, Martins E (2015) Detailed mapping unit design based on soil landscape relation and spatial variability of magnetic susceptibility and soil color. **Catena** 135:149 -162.

Siqueira DS, Marques Júnior J, Pereira GT (2010) The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma** 155:55-66.

Siqueira DS, Marques Júnior J, Teixeira DB, Matias SSR, Camargo LA, Pereira GT (2016) Magnetic susceptibility for characterizing areas with different potentials for sugarcane production. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 5:9-25.

Sousa Júnior JÁ, Dematte JAM, Genú AM (2008) Comportamento espectral dos solos na paisagem a partir de dados coletados por sensores terrestre e orbital. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32:727-738.

Sousa DMG, Lobato E (Eds.) (2004) Cerrado: correção do solo e adubação. 2. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 416p.

Souza ZM, Souza GS, Marques Júnior J, Pereira GT (2014) Número de amostras na análise geoestatística e na krigagem de mapas de atributos do solo. **Ciência Rural** 44:261-268.

Sparks DL (1995) **Environmental soil chemistry**. Academic Press, New York.

Marsland, S (2015) *Machine learning An Algorithmic Perspective*. 2. Ed.

Taconeli CA, Zocchi SS, Dias CTS (2009) Extensões do algoritmo de árvores de classificação para a análise de dados categorizados multivariados utilizando coeficientes de dissimilaridade e entropia. **Revista Brasileira de Biometria** 27:93-114.

Tedesco MJ, Gianello C (2000) Escolha do corretivo da acidez do solo. In: **Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto**. Pelotas: SBCS - Núcleo Regional Sul, p.95-113.

Therneau T (2012). **coxme: mixed effects Cox models**. R package version 2.2- 3. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.

Torrent J, Liu Q, Bloemendal J, Barrón V (2007) Magnetic enhancement and iron oxides in the upper Luochuan loess–paleosol sequence, Chinese Loess Plateau. **Soil Science Society American Journal** 71:1-9.

Ventura Júnior E, Nearing MA, Norton LD (2001) Developing a magnetic tracer to soil study erosion. **Catena** 43:277-291.

Vieira SR (2000) Geoestatística em estudos de variabilidade especial do solo. In: Novais, RF, Alvarez VVH, Schaefer CEG (Ed.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo 1:1-54.

Vieira SR, Hatfield JL, Nielsen DR, Biggar JW (1983) Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia** 51:1-75.

Viscarra Rossel RA, Walvoort DJJ, Mcbratney AB, Janik LJ, Skjemstad JO (2006) Visible, near-infrared, mid-infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma** 131: 59-75.

Warrick AW, Nielsen DR (1980) Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel D, Editor. **Application of soil physics**. Nova Iorque: Academic Press, p. 319-344.

Williams Mm, Davis As, Rabaey TI, Boerboom CM (2009). Linkages among agronomic, environmental and weed management characteristics in North American sweet corn. **Field Crops Research** 113: 161-169.

Witten IH, Ian H, Frank E, Hall MA, Mark A (2011) **Data mining: practical machine learning tools and techniques**. [s.l.] Morgan Kaufmann.

Zandoná RR, Beutler NA, Burg GM, Barreto CF, Schmidt MR (2015) Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 45:128-137.

Zawadzki J, Magiera T, Fabijańczyk P, Kusza G (2011) Geostatistical 3-dimensional integration of measurements of soil magnetic susceptibility. **Environmental Monitoring and Assessment** 184:1-12.