



**FERNANDA ALMEIDA BÓCOLI**

**CARACTERIZAÇÃO DE LATOSSOLOS EM  
TOPOSSEQUÊNCIA E DE ARGISSOLOS EM  
HIDROSSEQUÊNCIA COM APOIO DE SENSORES  
PRÓXIMOS**

**LAVRAS – MG**

**2021**

**FERNANDA ALMEIDA BÓCOLI**

**Caracterização de Latossolos em topossequência e de Argissolos em hidrossequência  
com apoio de sensores próximos**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Lavras  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Ciência do Solo, área de  
concentração em Recursos  
Ambientais e Uso da Terra, para  
obtenção do título de Mestre.

**Dr. Sérgio Henrique Godinho Silva**

**Orientador**

**LAVRAS – MG**

**2021**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Bócoli, Fernanda Almeida.

Caracterização de Latossolos em topossequência e de  
Argissolos em hidrossequência com apoio de sensores próximos /  
Fernanda Almeida Bócoli. - 2021.

85 p. : il.

Orientador(a): Sérgio Henrique Godinho Silva.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2021.

Bibliografia.

1. Solos intemperizados em relevo movimentado. 2. Argissolos  
com drenagem distinta. 3. Morfometria digital. I. Silva, Sérgio  
Henrique Godinho. II. Título.

O conteúdo desta obra é de responsabilidade do(a) autor(a) e de seu orientador(a).

**FERNANDA ALMEIDA BÓCOLI**

**CARACTERIZAÇÃO DE LATOSSOLOS EM TOPOSSEQUÊNCIA E DE  
ARGISSOLOS EM HIDROSSEQUÊNCIA COM APOIO DE SENSORES PRÓXIMOS**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Lavras  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Ciência do Solo, área de  
concentração em Recursos  
Ambientais e Uso da Terra, para  
obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 6 de agosto de 2021.

Dr. Nilton Curi UFLA

Dr. Alberto Vasconcellos Inda Junior UFRGS

Dr. Sérgio Henrique Godinho Silva

Orientador

**LAVRAS – MG**

**2021**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que me possibilitou estudar onde eu sonhava, além de estar fazendo o que eu gosto. Agradeço também à minha mãe, Ivana Maria de Almeida, que me ensinou a sonhar e a batalhar por minhas próprias conquistas, sempre me apoiando em cada passo em todas as áreas de minha vida. Aos meus amigos queridos que sempre ficam na torcida para tudo correr bem, eu alcançar meus objetivos e ser feliz.

A cada professor que teve contribuição em minha formação desde os primeiros anos do fundamental até aqui no mestrado, pois tiveram um papel muito importante em minha vida graças aos seus ensinamentos. Em especial ao meu orientador, professor doutor Sérgio Henrique Godinho Silva, que sempre teve muita paciência comigo, me auxiliando em cada dúvida com muita atenção, e com quem aprendi muito. Um agradecimento especial também ao professor doutor Walbert Junior Reis dos Santos que teve uma participação efetiva na minha formação e gosto pelo estudo dos solos. Além disso contribuiu efetivamente com a idealização e desenvolvimento do estudo relação aos Latossolos em topossequência estudados no primeiro artigo, que foi iniciado em minha graduação. Ao IFSULDEMINAS *campus* Muzambinho pela bolsa de estudos fornecida pelo Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica em pesquisa (PIBIC) através do Núcleo Institucional de Pesquisa e Extensão (NIPE), para realização de grande parte desses estudos realizados na área do campus, bem como pela disponibilidade das instalações e equipamentos.

Também a acolhida no grupo de estudos em pedologia que apesar de a maior parte do meu mestrado ter sido à distância por conta da pandemia me auxiliaram sempre que precisei, em especial o Marcelo Mancini me auxiliando na confecção dos mapas de morfometria do segundo artigo aqui apresentado. E a todos colaboradores e técnicos do programa de Ciência do Solo e também das instituições anteriores que estudei que de alguma forma contribuíram com a minha formação, meu muito obrigada.

Agradeço também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) que forneceu a bolsa de estudos para realização destes trabalhos aqui desenvolvidos, bem como a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelos auxílios que contribuíram para a realização do mestrado.

“Ninguém é tão grande que não possa aprender nem tão  
pequeno que não possa ensinar.”  
**(Esopo)**

## RESUMO

Os sensores próximos têm-se mostrado atrativos em diversos estudos pedológicos, reduzindo custos, tempo de análises e volume por amostra coletada, sem geração de resíduos, sendo ambientalmente amigáveis. Ainda são escassos os trabalhos que utilizam a combinação de sensores próximos para investigações pedológicas em regiões tropicais, o que torna necessário um estudo aprofundado acerca desta combinação. Essa combinação pode proporcionar resultados mais robustos para o estudo de perfis de solos em relação à sua formação. Duas áreas com características distintas foram estudadas com auxílio de diferentes sensores e equipamentos. A primeira é uma topossequência onde se esperava encontrar classes de solos menos intemperizados. Entretanto, foram encontrados dois Latossolos Vermelhos-Amarelos Distróficos e um Latossolo Amarelo Distrófico em relevo variando de ondulado a forte ondulado. Nestes Latossolos observaram-se grandes variações nos teores elementares ao longo da topossequência e entre os horizontes dos perfis. A concordância de altitude dos topos observada nas áreas circundantes mais elevadas indica um paleorrelevo plano, ajudando a explicar esta ocorrência não típica de solos antigos em paisagens tropicais acidentadas. O equipamento portátil de fluorescência raios-X (pXRF) possibilitou análises mais refinadas complementando os demais resultados obtidos por análises tradicionais (ex. químicas, físicas). A cor do solo influenciou na reflectância capturada pelo Vis-NIR, auxiliando na caracterização destes solos altamente intemperizados. Na segunda área foi estudada uma topossequência de três Argissolos distintos, Argissolo Vermelho Distrófico nitossólico (PV), Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (PVA) e Argissolo Amarelo Distrófico típico (PA), em relevo ondulado. Nessa área, esses perfis possuem drenagens distintas, sendo em PA a mais limitada. Nestes Argissolos a morfometria digital possibilitou a visualização de diferenças de concentração de elementos dentro dos perfis que visualmente pareciam homogêneos. Além da cor destes solos foi possível discerni-los por seus teores elementares, bem como por seu magnetismo e mineralogia. Dentro de cada estudo o fator observado que mais teve efeito sobre as variáveis foi a posição destes solos na paisagem. Os sensores e equipamentos utilizados trouxeram robustez aos resultados obtidos auxiliando na caracterização destes perfis de Latossolos e Argissolos em condições pouco exploradas em estudos anteriores em solos tropicais.

**Palavras-chave:** Solos intemperizados em relevos movimentados; Argissolos com drenagem distinta; morfometria digital.

## ABSTRACT

The proximal sensors are drawing attention in many pedological studies by reducing costs and time of analyses, without generation of residues, being analyses environmentally-friendly. Studies that use combination of proximal sensors for pedological investigations are still scarce in tropical regions. This makes necessary in-depth studies about these sensors arrangement for obtaining robust results for soil profile studies. We studied two different areas with aid of sensors and other equipment. The first one deals with a toposequence where less weathered soils were expected. However, Oxisols were found on a steep slope, classified as Typic Hapludox (P1 and P2, upper and middle third respectively) and Xanthic Hapludox (P3, lower third), according to Keys of Soil Taxonomy (USST). In the Oxisols, the elemental contents varied on the toposequence and among the soil horizons. The altitudinal concordance of summits observed in the more elevated surrounding areas indicates a flat paleorelief, helping to explain this not typical occurrence of very weathered-leached soils in hilly tropical landscapes. The portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometer complemented the results obtained by traditional analyses (e.g., chemical, physical). The soil color influenced the reflectance captured by Vis-NIR, assisting in the characterization of these highly weathered soils. The second area was composed of three different Ultisols, Typic Rhodudults, Typic Hapludult, and Inceptic Hapludults (USST classification) on an undulated slope. In this area, the drainage regime varies according to the profiles, on which PA is the most limited. The digital morphometrics approach enabled to assess the elemental variability on the Ultisols that seems homogeneous visually. In addition to the color of these soils, it was possible to discern them by the elemental contents, magnetism, and mineralogy. In each study area, we observed that the factor that more intensely influenced the profiles was the position on the landscape. The sensors used brought robustness to the obtained results, helping characterize these Oxisol and Ultisol profiles under a lesser explored approach in previous studies of tropical regions.

**Keywords:** Weathered soils in steep slopes; Ultisols with different drainage; digital morphometrics.



## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I: Introdução e Referencial Teórico.....</b>	<b>14</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Morfometria digital.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Sensores próximos e equipamentos.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.1 PXRF .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.2 Vis-NIR.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.3 Suscetibilímetro magnético.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.4 Difractometria de Raios-X .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.5 Combinação de sensores .....</b>	<b>19</b>
<b>2.3 Solos estudados: Latossolos e Argissolos.....</b>	<b>19</b>
<b>2.4 Fatores de formação do solo.....</b>	<b>21</b>
<b>9 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>22</b>
<b>CAPÍTULO II: Artigos .....</b>	<b>28</b>
<b>Artigo I: Characterization of Oxisols in strongly undulated abnormal relief in the south of Minas Gerais State, Brazil, with support of pXRF and geomorphology .....</b>	<b>29</b>
<b>1.INTRODUCTION .....</b>	<b>32</b>
<b>2.MATERIAL AND METHODS .....</b>	<b>34</b>
<b>2.1. Study area, soil profiles description and sampling.....</b>	<b>34</b>
<b>2.2. Soil texture and fertility analyses.....</b>	<b>35</b>
<b>2.3. Analyses via pXRF spectrometry.....</b>	<b>36</b>
<b>2.4. Statistical analyses and geographic information.....</b>	<b>37</b>
<b>3.RESULTS AND DISCUSSION.....</b>	<b>37</b>

3.1. Morphological, physical and fertility properties of the soil profiles.....	37
3.2. Soil total element contents obtained by Pxf.....	41
3.3. Correlations between texture, fertility attributes and pXRF data.....	45
3.4. Geomorphology and pedogenesis.....	47
4.CONCLUSIONS.....	50
Artigo II: Avaliação da variabilidade espacial de atributos de Argissolos em topossequência com auxílio de pXRF .....	58
RESUMO.....	58
1 INTRODUÇÃO.....	59
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	61
2.1 Área de estudo e amostragem dos perfis.....	61
2.2 Análises laboratoriais.....	62
2.3 Avaliação espacial do perfil de solo .....	64
2.4 Análises estatísticas .....	64
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	65
3.1 Análises químicas .....	65
3.2 Análises granulométricas e de susceptibilidade magnética (SM) .....	68
3.3 Análises com o pXRF .....	70
3.4 Análises com o DRX.....	76
4 CONCLUSÕES.....	79
5 AGRADECIMENTOS.....	79
6 REFERÊNCIAS.....	80

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Artigo I

**Figure 1.** Digital elevation model for the study area located in the Muzambinho municipality, south of Minas Gerais State, Brazil. P1: Profile 1; P2: Profile 2; P3: Profile 3. .... 35

**Figure 2.** Particle size distribution of the soil profiles horizons located at the IFSULDEMINAS, Muzambinho municipality, Minas Gerais State, southeastern Brazil. .... 40

**Figure 3.** Elemental contents obtained by pXRF in the studied horizons of Oxisol profiles located at the IFSULDEMINAS, Muzambinho municipality, Minas Gerais State, southeastern Brazil. .... 42

**Figure 4.** Correlations between soil texture and pXRF data (a) and between soil texture and fertility analyses (b). Data from composite samples of horizons of the Oxisol profiles located at the IFSULDEMINAS, Muzambinho municipality, Minas Gerais State, southeastern Brazil. .... 47

**Figure 5.** Two cross sections showing the concordance of hilltop altitudes around the study area in the Muzambinho municipality, Minas Gerais State, Brazil. Distance is measured from the points A and C to points B and D. The points were chosen arbitrarily. Dashed lines show the location of the study area within the cross sections. P1: Profile 1; P2: Profile 2; P3: Profile 3. .... 49

### Artigo II

**Figura 1.** Localização experimental, declividade e altitude dos três perfis de Argissolos: Argissolo Vermelho (PV), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Argissolo Amarelo (PA), no município de Lavras, Minas Gerais, Brasil. .... 62

**Figura 2.** Pontos de coleta das amostras para as análises espaciais realizadas com pXRF, no município de Lavras, estado de Minas Gerais, Brasil. .... 64

<b>Figura 3.</b> Análise de teores elementares totais médios obtidos com o auxílio do pXRF para os perfis estudados de Argissolo Vermelho (PV), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA) e Argissolo Amarelo (PA), no município de Lavras, Minas Gerais, Brasil. ....	71
<b>Figura 4.</b> Análise espacial de teores elementares totais obtidos com o auxílio do pXRF no Argissolo Vermelho (PV), no município de Lavras, Minas Gerais, Brasil. ....	73
<b>Figura 5.</b> Análise espacial de teores elementares totais obtidos com o auxílio do pXRF no Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), no município de Lavras, Minas Gerais, Brasil. ....	74
<b>Figura 6.</b> Análise espacial de teores elementares totais obtidos com o auxílio do pXRF no Argissolo Amarelo (PA), no município de Lavras, Minas Gerais, Brasil. ....	75
<b>Figura 7.</b> Mineralogia das frações texturais obtida com o DRX no Argissolo Vermelho (PV), no município de Lavras, Minas Gerais, Brasil. ....	76
<b>Figura 8.</b> Mineralogia das frações texturais obtida com o DRX no Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), no município de Lavras, Minas Gerais, Brasil. ....	77
<b>Figura 9.</b> Mineralogia das frações texturais obtida com o DRX no Argissolo Amarelo (PA), no município de Lavras, Minas Gerais, Brasil. ....	78

## ÍNDICE DE TABELAS

### Artigo I

**Table 1.** Soil classes, horizons, depth, Munsell color, and structure of the three profiles located at the IFSULDEMINAS, Muzambinho municipality, Minas Gerais State, southeastern Brazil. .... 38

**Table 2.** Fertility analyses of Oxisol profiles located at the IFSULDEMINAS, Muzambinho municipality, Minas Gerais State, southeastern Brazil. .... 39

**Table 3.** Weathering degree indexes for the studied Oxisol profiles, situated in Muzambinho municipality, Minas Gerais State, Brazil. .... 44

### Artigo II

**Tabela 1.** Resultados de análises químicas e do teor de matéria orgânica (MO) de amostras de Argissolo Vermelho (PV), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA) e Argissolo Amarelo (PA). 66

**Tabela 2.** Resultados de análise granulométrica e de susceptibilidade magnética de amostras de PV, PVA e PA. .... 69

## **CAPÍTULO I: Introdução e Referencial Teórico**

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo a atuação do intemperismo sobre as rochas e sedimentos, através de ações climáticas, atuação de organismos e influência do relevo, os solos vêm sendo formados (KER et al., 2012; KER, NOVAIS, 2011; JENNY, 1941). A presença de solos diversos em grande parte da superfície da crosta terrestre fez com que a agricultura fosse possibilitada, se tornando a base para a maior parte da geração de alimentos. Além disso, nos solos ocorrem diversas reações químicas principalmente por intermédio da água que atua não somente em meios orgânicos, mas também em minerais por reações como hidrólise, dissolução e hidratação (TEIXEIRA et al., 2000). Esse conjunto de reações químicas dissolvem compostos encontrados nos materiais minerais e orgânicos, liberando íons que podem ser absorvidos pelas plantas, adsorvidos a partículas de solo, lixiviados ou mesmo formar outros minerais, como no caso de minerais secundários ou neoformados (ANDRADE et al., 2009).

Os solos ainda nos dias atuais instigam os pedólogos sobre diversos aspectos, sendo que equipamentos cada vez mais sofisticados vêm facilitando a aquisição de dados nessas investigações (SKORUPA et al., 2017; SILVA et al., 2019a; SILVA et al., 2019b). Desta forma é possível aprimorar estudos deste recurso natural iniciados com o cientista russo Vasily Vasili'evich Dokuchaev (1846 – 1903). Com estudos mais detalhados sobre os solos, é possível aumentar a produção agrícola, realizar o manejo adequado de cada tipo de solo, reconhecer áreas que devem ser preservadas para conservação e sustentabilidade dos ecossistemas, entender melhor os processos de formação e aprimorar as técnicas utilizadas para descrever e prever características intrínsecas a cada solo (CAVARARO, 2015).

Tradicionalmente, equipamentos e técnicas laboratoriais empregados em estudos de solos utilizam reagentes químicos que necessitam ser tratados antes do descarte, são onerosos e demandam muito tempo (MANCINI et al., 2019; SILVA et al., 2018; SILVA et al., 2019a; STOCKMANN et al., 2016). Em alguns casos, o tempo para as análises pode atrasar as tomadas de decisão quanto ao manejo dos solos, como operações de adubação e plantio, o que pode acarretar na redução de produtividade. Além disso, por serem onerosas, as análises tradicionais limitam o número de amostras coletadas, reduzem a representatividade do conjunto de dados obtidos para a área de interesse (DUDA et al., 2017).

Nesse sentido o uso de sensores próximos para o estudo dos solos tem se tornado atrativo por proporcionar uma obtenção rápida de dados, sem a necessidade de preparos complexos de amostras em laboratório (IBÁÑEZ-ASENSIO et al., 2013). Análises com

sensores próximos são menos onerosas ao produtor e ou pesquisador, além de serem ambientalmente amigáveis pela não geração de resíduos (SILVA et al., 2020). Além disso, o menor custo e tempo gastos com as análises permitem a coleta de um maior número de amostras na área aumentando sua representatividade (DUDA et al., 2017). Entretanto, ainda não é possível substituir as análises convencionais comumente utilizadas para a caracterização de solos, mas as novas ferramentas podem ser usadas para a complementação dos dados existentes trazendo maior robustez aos resultados obtidos e reduzindo a quantidade de amostras que necessitam passar pelas análises tradicionais.

Considerando que ainda são escassos os trabalhos que utilizam a combinação de sensores próximos para a investigação de perfil de solos tropicais e também em topossequências, estudos mais aprofundados acerca desta combinação para diversos fins pedológicos necessitam ser conduzidos.

Neste sentido, duas áreas com características distintas foram estudadas com auxílio de diferentes sensores e equipamentos. A primeira é representada por uma topossequência de Latossolos desenvolvidos de granito-gnaiss em relevo variando de ondulado a forte ondulado. A segunda, uma topossequência de Argissolos desenvolvidos de gnaiss em relevo ondulado foi estudada.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Morfometria digital**

A morfometria digital do solo é definida pela aplicação de técnicas e ferramentas para mensurar e quantificar os atributos como textura, cores e horizontes do solo e sua variabilidade espacial ao longo do perfil (Hartemink e Minasny, 2014). Esta linha de pesquisa abrange diversos métodos atuais utilizados para caracterização de solos.

Assim é possível fazer a aplicação de tecnologias crescentemente adotadas na Ciência do Solo para realizar a quantificação de atributos que melhor descrevem o comportamento daquele tipo de solo. A terminologia morfologia digital engloba o uso de diversos equipamentos e técnicas utilizados atualmente como a espectroscopia de fluorescência de raios-X portátil (pXRF), espectroscopia na região do visível e infravermelho próximo (Vis-NIR), o sensor de cores Nix-PRO<sup>TM</sup>, radiômetros, resistividade elétrica, radar de penetração no solo, dentre tantos outros. Essas técnicas e equipamentos têm como objetivo facilitar e aprimorar os estudos que vêm sendo realizados sobre os solos e seus atributos.



## **2.2 Sensores próximos e equipamentos**

### **2.2.1 Espectroscopia de fluorescência de raios-X (pXRF)**

Atualmente os trabalhos em solos com a utilização de equipamentos portáteis como o pXRF são crescentes em regiões tropicais, entretanto há ainda muitos campos de estudos a serem explorados. Este equipamento emite resultados quase instantâneos da constituição elementar do solo, podendo ser utilizado em campo ou em laboratório. O pXRF possui diversos usos e dentre eles está o auxílio no mapeamento de solos (MANCINI et al., 2019; SILVA et al., 2016), na avaliação de elementos contaminantes em profundidade, da salinidade de solos (SWANHART et al., 2014), além de estudos sobre nutrientes do solo (LIMA et al., 2019), gênese e classificação de solos (SILVA et al., 2018; STOCKMANN et al., 2016), identificação de diferentes usos de solos (CHAKRABORTY et al., 2019), predição de seus atributos (SILVA et al., 2019a, SILVA et al., 2019b, ZHU et al., 2011), dentre outros, mostrando-se assim uma ferramenta muito útil para estudos com diversas finalidades.

O princípio de funcionamento do pXRF está na aplicação de raios-X na amostra, que causam a excitação dos elétrons que são desalojados de orbitais mais internos; quando esses elétrons retornam para seus orbitais, emitem uma fluorescência que é própria de cada elemento químico. Assim eles podem ser quantificados pelo equipamento (STOCKMANN et al., 2016). Os elementos quantificados pelo pXRF vão do Mg ao U (WEINDORF et al., 2014), sendo quantificados cerca de 45 elementos a depender da constituição da amostra e do limite de detecção e demais configurações do equipamento.

### **2.2.2 Espectroscopia na faixa do visível e infravermelho próximo (Vis-NIR)**

O espectrômetro de refletância difusa na faixa do visível e infravermelho próximo (Vis-NIR) é um equipamento que emite ondas eletromagnéticas de comprimento entre 350 a 2500 nm (KNOX et al., 2015). Quando em contato com material orgânico ou mineral presente no solo, causa agitação entre as ligações moleculares e átomos, e a absorvância de luz correspondente a uma certa quantidade de energia. Todo esse processo vai gerar um espectro de refletância da luz, relacionado à constituição mineral, orgânica e umidade desta amostra, uma vez que são conhecidos os padrões de comprimentos de onda de diferentes minerais e outros componentes do solo (DEMATTE et al., 2000; 2012).

O Vis-NIR também é uma ferramenta para diversos tipos de estudos. Na área de solos, principalmente na pedologia, há vários trabalhos utilizando-o para a caracterização espectral de perfis de solo, alterações causadas pela pedogênese e intemperismo. Como exemplo, Demattê et al. (2000; 2012), Ramos et al. (2020) e Coblinski et al. (2021) utilizaram essa técnica de análise para identificação e diferenciação de atributos dos solos estudados, tais como teores de óxidos e hidróxidos de Fe e Al, as diferentes frações granulométricas do solo e presença de determinados minerais como a caulinita e magnetita. Também nessa linha, Gogé et al. (2014) predisseram o teor de carbono orgânico do solo (COS), enquanto Knox et al. (2015) quantificaram as diferentes frações de C no solo: C total (CT), orgânico (COS), recalcitrante (CR) e hidrolisável (CH). Wijewardane et al. (2016) utilizaram o Vis-NIR para classificação de solo e predição de seus atributos sem a interferência da umidade das amostras combinando com o algoritmo EPO (*External Parameter Orthogonalization*). Terra et al. (2018) avaliaram a influência da pedogênese no espectro do Vis-NIR conseguindo discriminar os solos pelo grau de intemperismo. Lessivagem, dessilicação e ferralitização foram os processos que mais diferiram nos espectros por causarem a alteração das propriedades do solo em profundidade. Assim esse sensor pode ser utilizado para auxiliar tanto em mapeamentos quanto em estudos pedogenéticos.

### **2.2.3 Suscetibilímetro magnético**

O suscetibilímetro magnético, equipamento que quantifica a suscetibilidade magnética (SM), é utilizado em estudos arqueológicos e litológicos, além de auxiliar a caracterização de solos (DEARING, 1999). Entretanto, tem-se mostrado promissor na agricultura de precisão e promovido avanços importantes associado ou não a outros sensores na área de solos, principalmente na identificação da presença de materiais ferrimagnéticos tais como a maghemita e a magnetita (ROSSI et al., 2018, POGGERE et al., 2018; 2020).

A SM quantifica o magnetismo de minerais presentes no material de origem dos solos ou neoformados, quando gera o campo magnético que interage com os elementos neles presentes. O magnetismo emitido de solos desenvolvidos de sedimentos pouco magnéticos depende da composição, concentração e tamanho de grânulos dos minerais neoformados (MATHÉ et al., 2006). Miranda (2019) afirma que em geral solos derivados de rochas máficas são mais magnetizados que aqueles derivados de rochas félsicas ou ricas em silicatos. A hematita e a goethita, dois minerais comuns em solos brasileiros, são classificados como antiferromagnéticos, pois eles apresentam apenas momentos magnéticos fazendo com que o

equipamento capte valores baixos de susceptibilidade magnética (BUTLER, 1992; DEARING, 1999). É possível estabelecer correlações entre a susceptibilidade magnética e diversos atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo, além de relações com seus materiais de origem, uma vez que minerais magnéticos são considerados traçadores de solo (MATHÉ et al., 2006; ZAWADZKI et al., 2015; RAMOS et al., 2020).

Peluco et al. (2013) utilizaram a SM para verificar a capacidade de suporte das áreas estudadas em relação a aplicação de vinhaça, e os resultados demonstraram que é possível a utilização desse equipamento para esse fim por mensurações indiretas e funções de pedotransferência. Lima et al. (2015) encontrando valores maiores para solos derivados de rochas basálticas (Latosolos) e menores para aquelas derivadas de granito-gnaiss (Cambissolos e Argissolos). Além disso identificaram um potencial no equipamento como traçador ambiental indicando as localidades onde ocorrem erosões hídricas verificando onde houve remoção e acúmulo de materiais magnéticos.

#### **2.2.4 Difractometria de Raios-X (DRX)**

Para a obtenção da composição da mineralogia de um solo, uma das principais técnicas utilizadas é a DRX. O princípio que rege seu funcionamento é a interação dos feixes de raios-X com a estrutura cristalina dos minerais que compõem a amostra, através de fótons difratados. A estrutura cristalina se caracteriza pela periodicidade que seus empacotamentos que se repetem em um dado espaço, sendo que cada mineral possui uma estrutura cristalina distinta e por este motivo podem ser detectados por estes fótons que aparecem na análise como reflexões em um comprimento de onda característico, causadas por diferentes angulações da sua estrutura (ANDRADE et al., 2009). Esse espalhamento dos fótons na DRX seguem a lei de Bragg, representada pela fórmula abaixo.

$$n \lambda = 2 d \sin \Theta$$

Em que:  $n$ = ordem de difração;  $\lambda$ = comprimento de onda;  $d$ = distância entre planos de átomos;  $\Theta$ = ângulo medido entre o feixe incidente e determinados planos do cristal.

A DRX possui uso em diversas áreas na ciência do solo, principalmente em estudos de gênese e mineralogia. Nos últimos anos, a DRX tem sido combinada a sensores próximos, deixando os estudos mais robustos, como no caso de trabalhos como o de Santos et al. (2010), que combinaram a DRX com a fluorescência de raios-X para estudo de gênese e classificação

de solos em uma topossequência da região de mar de morros no Rio de Janeiro. Silva et al. (2018), com a combinação da DRX e o pXRF, realizaram um estudo de gênese através da morfometria digital em um perfil de Cambissolo. Silva et al. (2019b), por sua vez, utilizaram o pXRF e a DRX para caracterizar uma topossequência com diferentes graus de intemperismo, indo de Neossolos a Latossolos em Minas Gerais.

### **2.2.5 Combinação de sensores**

Sensores próximos vêm representando um avanço nos estudos de solos tanto por aspectos pedológicos, quanto físicos, químicos e biológicos, auxiliando em predições de atributos e dando maior robustez às análises realizadas (SILVA et al., 2018; LIMA et al., 2019; TEIXEIRA et al., 2021). A combinação desses sensores aumenta a abrangência da faixa espectral analisada e fornece mais informações sobre os solos estudados, já que estes comprimentos de onda interagem com diferentes atributos do solo. O pXRF realiza leitura a nível elementar na faixa espectral dos raios-X, fornecendo leituras do teor total de cerca de 45 elementos, a depender principalmente de seus teores presentes no material analisado e limite de detecção do equipamento (WEINDORF et al., 2014). Outro exemplo é o Vis-NIR que realiza leituras a nível atômico ou molecular nas faixas espectrais do visível e infravermelho próximo, podendo fornecer informações da mineralogia, teor de matéria orgânica, água residual, bem como as frações (areia, silte argila) dominantes em cada amostra (DEMATTE et al., 2000; 2012). Entretanto, ainda existem poucos trabalhos reunindo esses dois sensores próximos para auxiliar a caracterização de solos tropicais, embora resultados dessa união tenham sido satisfatórios.

Nesse sentido, Wang et al. (2015) caracterizaram os solos estudados pelo teor de C e N combinando o pXRF e o Vis-NIR. Com a combinação de sensores, os autores procuraram tornar a avaliação de atributos de solos e as tomadas de decisão na propriedade mais rápidas, com menor custo para o produtor, aumentando a praticidade das análises de solo. Benedet et al. (2020), também utilizando o pXRF e o Vis-NIR, realizaram predição dos subgrupos de Latossolos, Argissolos, Cambissolos, Neossolos e Espodossolos utilizando esses mesmos sensores próximos com algorítmicos em solos tropicais. Esse tipo de estudo é ainda mais incipiente, o que tornam importantes essas análises para aprimorar a acurácia das técnicas utilizadas.

### **2.3 Solos estudados: Latossolos e Argissolos**

Dentre as treze ordens de solos do Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SiBCS) (SANTOS et al., 2018), os Latossolos são a de maior expressão geográfica no país (EMBRAPA, 2011), correspondendo a 31,49% do território brasileiro. No estado de Minas Gerais, dentro do bioma cerrado, os Latossolos correspondem a quase 50% do total (LIMA et al., 2019), sendo um solo de grande importância para a agricultura da região. Os Latossolos também são encontrados em outros biomas com porções expressivas, tais como Amazônia legal e região semiárida do Nordeste, correspondendo a cerca de 46% e 21% respectivamente, do total dos solos nesses locais (KER, 1998).

Latossolos possuem diversos atributos favoráveis à agricultura, com destaque principalmente para a sua boa estruturação, proporção adequada de macro e microporos e são solos profundos, além da sua ocorrência, na maioria das vezes, estar associada a relevos planos e suave ondulados, facilitando a mecanização (KER et al., 2012). Apesar dessas características favoráveis, os Latossolos por serem muito intemperizados, baixos teores de bases trocáveis que auxiliam na nutrição de plantas, uma baixa capacidade de troca catiônica (CTC) e poucos minerais facilmente intemperizáveis. Em suas frações mais finas, os principais minerais encontrados são caulinita, goethita, hematita e gibbsita, enquanto nas frações mais grosseiras, areia e silte, o quartzo predomina, por ser o silicato que apresenta maior resistência ao intemperismo (RESENDE et al., 2014), juntamente com muscovita.

Devido ao avançado grau de intemperismo, nos Latossolos predominam cargas dependentes de pH. Assim, processos de adição de calcário são importantes na agricultura do cerrado, para o aumento do pH do solo, tornando nutrientes mais disponíveis/trocáveis, e melhorando as condições para o desenvolvimento de plantas (LOPES; GUILHERME., 2016). Além disso as práticas de adubação auxiliam na elevação de produtividade dos cultivos associado a outros manejos que podem ser realizados como a irrigação, dependendo da disponibilidade hídrica ou regime pluviométrico local (PRADO et al., 2010). Deve-se atentar, porém, a algumas limitações físicas que podem ocorrer não só nos Argissolos, mas também nos Latossolos, como a coesão, comum nessas classes na região dos Tabuleiros Costeiros.

Santos et al. (2010) afirmam que em ambiente conhecido como Mar de Morros, que possuem como principais materiais de origem rochas ácidas como granito e gnaise, geralmente possuem suas topossequências constituídas por três principais solos: Latossolos, Cambissolos e Argissolos. Esse tipo de formação é muito comum no sudeste do estado de Minas Gerais, mas na região sul do mesmo estado, os Latossolos raramente ocorrem em relevos forte ondulados. O estudo conduzido na primeira área, localizada no *campus* do IFSULDEMINAS em Muzambinho, visa à investigação dessa peculiaridade com auxílio de

sensores próximos.

Os Argissolos ocupam a segunda posição em abundância no país (26%), sendo encontrados em praticamente todo território nacional (EMBRAPA, 2011).

Ao contrário dos Latossolos, cujo conceito central indica solos altamente intemperizados e são a classe dominante no país, a ordem dos Argissolos é a segunda classe em termos de expressão geográfica no país. Os Argissolos são formados pelo processo de lessivagem, em que a argila é translocada dos horizontes superficiais para os subsuperficiais, formando um horizonte Bt (horizonte B textural). Devido a esse processo, alguns Argissolos podem formar uma camada adensada que dificulta o crescimento de raízes em profundidade, ou ainda podem se tornar coesos, como nos Tabuleiros Costeiros, principalmente no período seco do ano (CAVARARO, 2015). Além do horizonte Bt, estes solos apresentam atividade de argila baixa, ou alta quando com uma saturação por bases baixa ou apresentar caráter alumínico (SANTOS et al., 2018). Sua coloração varia de cinzenta a vermelha, mas os matizes mais comuns são os vermelhos e os amarelos (EMBRAPA, 2011).

Na segunda área de estudo, as principais variações entre os perfis de Argissolos na hidrossequência foram causadas pela drenagem, condicionando cores dos perfis alterando de vermelhas a amarelas.

## **2.4 Fatores de formação do solo**

Os fatores de formação de solos são o material parental, os organismos presentes no solo tanto plantas quanto os presentes na micro, meso e macrofauna, o clima e relevo onde estes solos se formam, bem como o tempo de atuação destes fatores (KER et al., 2012; KER, NOVAIS, 2011; JENNY, 1941). Quando existem fatores que são constantes em uma determinada área, aqueles que possuem variação são os responsáveis pelas modificações das propriedades dentro de um perfil de solo, bem como das classes de solos.

Um importante fator que determina a formação de um solo é o relevo, uma vez que ele condiciona o fluxo hídrico que incide na superfície, podendo acarretar em diversos processos de formação, a desestabilização do solo pela erosão, a lixiviação de nutrientes e o transporte de materiais (CAMPOS et al., 2012; CANELLAS et al., 2000; SANTOS et al., 2010). Assim, é um fator primordial a ser estudado quando se trata das particularidades que podem compor um padrão dentro de uma classe do solo (KER et al., 2012).

Os Latossolos ocorrem em relevo geralmente variando de plano a suave ondulado. Entretanto, em algumas situações, são também encontrados em relevos mais íngremes (KER

et al., 1998). A sua ocorrência usual em relevos planos e suave ondulados favorece uma maior infiltração de água no solo, aumentando as taxas de intemperismo, bem como a profundidade desse solo, uma vez que a sua ocorrência está ligada a áreas tropicais com altas temperaturas e umidade (SANTOS et al., 2010). Apesar disso, Latossolos em relevo íngreme já foram também reportados no país. Nesse caso, estes estudos com combinações de sensores podem contribuir para investigação da gênese, bem como as dinâmicas elementares entre horizontes e ao longo da topossequência.

Quanto aos Argissolos, sua ocorrência geralmente está ligada a relevos mais suavizados (BARBOSA et al., 2019; SANTOS et al., 2010). Entretanto, nestes solos, a formação do horizonte Bt pode ser impeditiva para uma drenagem menos eficiente, principalmente em posições planas ou levemente abaciadas, podendo ocorrer o chamado caráter redoximórfico (KÄMPF; CURI, 2012). Desta maneira, a morfometria digital pode auxiliar na caracterização de Argissolos com diferentes situações de drenagem em diferentes posições da paisagem como no local onde se realizou este estudo. Ademais é possível que o uso de sensores acrescente informações importantes àquelas já existentes em ambos estudos.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, J.C.; AZEVEDO, A.C.; BIGHAM, J.M.; CASTILHOS, R.M.V.; COSTA, A.C.S.; CURI, N.; FABRIS, J.D.; KÄMPF, N.; MARQUES JÚNIOR, J.; MARQUES, J.J.; MELLO, J.W.V.; MELO, V.F.; PEREZ, D.V.; PINTO, L.F.S.; SCHAEFER, C.E.G.R.; STUCKI, J.W.; VIANA, J.H.M.; VIDAL-TORRADO, P.; WYPYCH, F.; ZANARDO, A.; **Química e Mineralogia do Solo: Parte 1 - Conceitos Básicos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. 695 p.

BARBOSA, G.S.; MALTONI, K.L.; PANOSSO, A.R. The colors of soil as a parameter to delimitate the environment of a Palm Swampy. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 39, n. 52021, p. 1-25, jan. 2019.

BENEDET, L.; FARIA, W.M.; SILVA, S.H.G; MANCINI, M. GUILHERME, L.R.G.; DEMATTÊ, J.A.M.; CURI, N. Soil subgroup prediction via portable X-ray fluorescence and a visible near-infrared spectroscopy. **Geoderma**, v. 365, p. 1-10, abr. 2020. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114212>.

BUTLER, R.F. **Paleomagnetism: magnetic domains to geologic terranes**. Portland: Blackwell Science Inc., 1992. 249 p.

CAMPOS, M. C. C. et al. Topossequência de solos na transição campos naturais-floresta na região de Humaitá, Amazonas. **Acta Amazônica**, v. 42, n. 3, p. 387–398, 2012.

CANELLAS, L. P. et al. Frações da matéria orgânica em seis solos de uma topossequência no Estado do Rio de Janeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 1, p. 133–143, 2000.

CAVARARO, R. **Manuais Técnicos em Geociências**: manual técnico de pedologia. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. 430 p.

CHAKRABORTY, S. et al. Use of portable X-ray fluorescence spectrometry for classifying soils from different land use land cover systems in India. **Geoderma**, v. 338, p. 5–13, 2019.

COBLINSKI, J. A.; INDA, A. V.; DEMATTÊ, J. A.M.; DOTTO, A. C.; GHOLIZADEH, A.; GIASSON, É. Identification of minerals in subtropical soils with different textural classes by VIS–NIR–SWIR reflectance spectroscopy. **Catena**, v. 203, p. 105334, ago. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2021.105334>.

DEARING, J. Environmental Magnetic Susceptibility. **Using the Bartington MS2 system**, 43 p., 1999.

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

DEMATTÊ, J. A. M.; TERRA, F. DA S.; QUARTAROLI, C. F. Spectral behavior of some modal soil profiles from São Paulo State, Brazil. **Bragantia**, v. 71, n. 3, 413–423, 2012.

DUDA, Bogdan M.; WEINDORF, D.C.; CHAKRABORTY, S.; LI, B.; MAN, T.; PAULETTE, L.; DEB, S. Soil characterization across catenas via advanced proximal sensors. **Geoderma**, v. 298, p. 78-91, jul. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.03.017>.

EMBRAPA. **Os solos do Brasil**. 2011. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-solos-brasileiros/solos-do-brasil>. Acesso em: 12 mar. 2020.

GOGÉ, F.; GOMEZ, C.; JOLIVET, C.; JOFFRE, R. Which strategy is best to predict soil properties of a local site from a national Vis–NIR database? **Geoderma**, v. 213, p. 1-9, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.07.016>.

HARTEMINK, A. E.; MINASNY, B. Towards digital soil morphometrics. **Geoderma**, v. 230-231, p. 305-317, out. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.03.008>.

IBÁÑEZ-ASENSIO, S.; MARQUÉS-MATEU, A.; MORENO-RAMÓN, H.; BALASCH, S. Statistical relationships between soil colour and soil attributes in semiarid areas. **Biosystems Engineering**, v. 116, n. 2, p. 120-129, out. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.07.013>.

JENNY, H., 1941. **Factors of soil formation**: A system of quantitative Pedology. McGraw-Hill Book Co., Inc., New York.

KÄMPF, N.; CURI, N. Formação e evolução do solo (pedogênese). In: KER, J.C.; CURI, N.; SCHAEFER, C.E.G.R.; VIDAL-TORRADO, P. (Eds.). **Pedologia**: fundamentos. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. p. 207-302.

KER, J. C. Latosols do Brasil: uma revisão. **Geonomos**, v. 5, n. 1, p. 17–40, 1998.



KER, J.C.; ANJOS, L.H.C.; ARAÚJO FILHO, J.C.; CURI, N.; FONTES, M.P.F.; JACOMINE, P.K.T.; KÄMPF, N.; L.B. OLIVEIRA; MARQUES, J.J.; OLIVEIRA, J.B.; OLIVEIRA, V.A.; RESENDE, M.; RIBEIRO, M.R.; SANTOS, H.G.; **Pedologia: Fundamentos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. 343 p.

KER, J. C.; NOVAIS, R. F. de. **Fundamentos para desenvolvimento da pedologia e da fertilidade do solo**, 2011. Available in: <<http://jararaca.ufsm.br/websites/classolos/download/TextosSol/Texto03.pdf>> . Access in: May, 25, 2021.

KNOX, N. M.; GRUNWALD, S.; MCDOWELL, M. L.; BRULAND, G. L.; MYERS, D. B.; HARRIS, W. G. Modelling soil carbon fractions with visible near-infrared (VNIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopy. **Geoderma**, v. 239-240, p. 229-239, fev. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.10.019>.

LIMA, P. L. T.; SILVA, M. L. N.; BATISTA, P. V. G.; QUINTON, J.; MAHER, B.; CURI, N. Potencial de uso da susceptibilidade magnética como indicador da erosão hídrica em solos tropicais. In: XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 35., 2015, Natal. **Anais [...]**. Natal: SBCS, 2015. p. 1-4.

LIMA, T. M. de; WEINDORF, D. C.; CURI, N.; GUILHERME, L. R. G.; LANA, R. M. Q.; RIBEIRO, B. T. Elemental analysis of Cerrado agricultural soils via portable X-ray fluorescence spectrometry: Inferences for soil fertility assessment. **Geoderma**, v. 353, p. 264-272, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.06.045>.

LOPES A.S, GUILHERME L.R.G. A Career Perspective on Soil Management in the Cerrado Region of Brazil. **Adv Agron**. 2016, v. 137, p.1-72. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.12.004>

MANCINI, M.; WEINDORF, D. C.; SILVA, S. H. G.; CHAKRABORTY, S.; TEIXEIRA, A. F. dos S.; GUILHERME, L. R. G.; CURI, N. Parent material distribution mapping from tropical soils data via machine learning and portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry in Brazil. **Geoderma**, v. 354, p. 113885, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113885>.

MATHÉ, V.; LÉVÊQUE, F.; MATHÉ, P.E.; CHEVALLIER, C.; PONS, Y. Soil anomaly mapping using a caesium magnetometer: limits in the low magnetic amplitude case. **Journal of Applied Geophysics**, v.58, p.202-217, 2006. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2005.06.004.

MIRANDA, M. N. R. **Estudo magnético e gamaespectrométrico da magnetita e formações ferríferas da Serra das Éguas, Brumado - BA**. 2019. 86 f. TCC (Graduação) - Curso de Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2019.

NAWAR, S.; MOUAZEN, A. M. Optimal sample selection for measurement of soil organic carbon using on-line vis-NIR spectroscopy. **Computers and Electronics In: Agriculture**, v. 151, p. 469-477, ago. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2018.06.042>.

PELUCO, R. G.; MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T.; BARBOSA, R. S.; TEIXEIRA, D. de B.; ADAME, C. R.; CORTEZ, L. A. Suscetibilidade magnética do solo e estimação da capacidade de suporte à aplicação de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 6, p. 661-672, jun. 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2013000600012>.

- PRADO, R. B.; TURETTA, A. P. D.; ANDRADE, A. G. de (Org.). **Manejo e Conservação do Solo e da Água no Contexto das Mudanças Ambientais**. EMBRAPA – SOLOS, Rio de Janeiro, 2010, 486 p.
- POGGERE, G. C.; BARRÓN, V.; INDA, A. V.; BARBOSA, J. Z.; BRITO, A. D. B.; CURI, N. Linking phosphorus sorption and magnetic susceptibility in clays and tropical soils. **Soil Research**, v. 58, n. 5, p. 430, 2020. CSIRO Publishing. <http://dx.doi.org/10.1071/sr20099>.
- POGGERE, G. C.; INDA, A. V.; BARRÓN, V.; KÄMPF, N.; BRITO, A. D. B. de; BARBOSA, J. Z.; CURI, N. Maghemite quantification and magnetic signature of Brazilian soils with contrasting parent materials. **Applied Clay Science**, v. 161, p. 385-394, set. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2018.05.014>.
- RAMOS, P. V.; INDA, A. V.; BARRÓN, V.; SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; TEIXEIRA, D. de B. Color in subtropical brazilian soils as determined with a Munsell chart and by diffuse reflectance spectroscopy. **Catena**, v. 193, p. 104609, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2020.104609>.
- RESENDE, M., CURI, N., REZENDE, S.B., CORRÊA, G.F., KER, J.C., 2014. **Pedologia: Base para distinção de ambientes**, 6th ed. Editora UFLA, Lavras.
- ROSSI, N. das G.; CANTON, L. C.; CAVALCANTE, R. M.; GOMES, F. H.; S. JUNIOR, I. G. de; COSTA, A. C. S. da. Susceptibilidade Magnética e Teores de Ferro Total de Solos do Estado de Rondônia. In: XII REUNIÃO SUL BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 12., 2018, Xanxerê. **Anais [...]**. Xanxerê: SBCS, 2018. p. 1-4.
- SANTOS, A.C.; ANJOS, L.H.C.; BERNINI, T.A.; COOPER, M.; FRANCELINO, M.R.; NUMMER, A.R.; PEREIRA, M.G. Gênese e classificação de solos numa topossequência no ambiente de mar de morros do médio vale do paraíba do sul, RJ. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 34, p.1297-1314, 2010.
- SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2018. 531 p.
- SILVA, E. A.; WEINDORF, D. C.; SILVA, S. H.G.; RIBEIRO, B. T.; POGGERE, G. C.; CARVALHO, T. S.; GONÇALVES, M. G. M.; GUILHERME, L. R. G.; CURI, N. Advances in Tropical Soil Characterization via Portable X-Ray Fluorescence Spectrometry. **Pedosphere**, v. 29, n. 4, p. 468-482, ago. 2019a. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1002-0160\(19\)60815-5](http://dx.doi.org/10.1016/s1002-0160(19)60815-5).
- SILVA, F. M.; WEINDORF, D. C.; SILVA, S. H. G.; SILVA, E. A.; RIBEIRO, B. T.; GUILHERME, L. R. G.; CURI, N. Tropical Soil Toposequence Characterization via pXRF Spectrometry. **Soil Science Society of America Journal**, v. 83, n. 4, p. 1153-1166, jul. 2019b. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2018.12.0498>.
- SILVA, S. H. G., POGGERE, G. C., MENEZES, M. D., CARVALHO, G. S., GUILHERME, L. R. G., CURI, N., 2016. Proximal sensing and digital terrain models applied to digital soil mapping and modeling of Brazilian Latosols (Oxisols). **Remote Sens**. 8, 614–635. <http://dx.doi.org/10.3390/rs8080614>.

- SILVA, S. H. G.; HARTEMINK, A. E.; TEIXEIRA, A. F. dos S.; INDA, A. V.; GUILHERME, L. R. G.; CURI, N. Soil weathering analysis using a portable X-ray fluorescence (PXRF) spectrometer in an Inceptisol from the Brazilian Cerrado. **Applied Clay Science**, v. 162, p. 27-37, set. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2018.05.028>.
- SILVA, S. H. G.; SILVA, E. A.; POGGERE, G. C.; PÁDUA JUNIOR, A. L.; GONÇALVES, M. G. M.; GUILHERME, L. R. G.; CURI, N. Modeling and prediction of sulfuric acid digestion analyses data from PXRF spectrometry in tropical soils. **Scientia Agricola**, v. 77, n. 4, p. 1-12, jan. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1678-992x-2018-0132>.
- SKORUPA, A. L. A.; SILVA, S. H. G.; POGGERE, G. C.; TASSINARI, D.; PINTO, L. C.; ZINN, Y. L.; CURI, N. Similar Soils but Different Soil-Forming Factors: Converging Evolution of Inceptisols in Brazil. **Pedosphere**, v. 27, n. 4, p. 747-757, ago. 2017. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1002-0160\(17\)60443-0](http://dx.doi.org/10.1016/s1002-0160(17)60443-0).
- STOCKMANN, U.; CATTLE, S.R.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Utilizing portable X-ray fluorescence spectrometry for in-field investigation of pedogenesis. **Catena**, v. 139, p. 220-231, abr. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.01.007>.
- SWANHART, S.; WEINDORF, D. C.; CHAKRABORTY, S.; BAKR, N.; ZHU, Y.; NELSON, C.; SHOOK, K.; ACREE, A. Soil Salinity Measurement Via Portable X-ray Fluorescence Spectrometry. **Soil Science**, v. 179, n. 9, p. 417-423, set. 2014. Ovid Technologies (Wolters Kluwer Health). <http://dx.doi.org/10.1097/ss.0000000000000088>.
- TEIXEIRA, A.F. dos S.; SILVA, S.H.G.; WEINDORF, D.C.; CHAKRABORTY, S.; CARVALHO, T.S. de; SILVA, A.O.; GUIMARÃES, A.A.; MOREIRA, F.M. de S. Microbiological indicators of soil quality predicted via proximal and remote sensing. *European Journal of Soil Biology*, v. 104, p. 103315, abr. 2021.
- TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M. de; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (org.). **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 568 p.
- TERRA, F. S.; DEMATTÊ, J. A. M.; ROSSEL, R. A. V. Proximal spectral sensing in pedological assessments: vis-NIR spectra for soil classification based on weathering and pedogenesis. **Geoderma**, v. 318, p. 123-136, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.053>.
- WANG, D.; CHAKRABORTY, S.; WEINDORF, D. C.; LI, B.; SHARMA, A.; PAUL, S.; ALI, Md. N. Synthesized use of VisNIR DRS and PXRF for soil characterization: Total carbon and total nitrogen. **Geoderma**, v. 243-244, n. 1, p. 157-167, abr. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.12.011>.
- WEINDORF, D. C., BAKR, N., ZHU, Y., 2014. Advances in portable X-ray fluorescence (PXRF) for environmental, pedological, and agronomic applications. **Adv. Agron.** 128, 1–45. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-802139-2.00001-9>.
- WIJEWARDANE, N. K.; GE, Y.; MORGAN, C. L.s. Moisture insensitive prediction of soil properties from VNIR reflectance spectra based on external parameter orthogonalization. **Geoderma**, v. 267, p. 92-101, abr. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.12.014>.

ZAWADZKI, J.; FABIJAŃCZYK, P.; MAGIERA, T.; RACHWAŁ, M. Micro-scale spatial correlation of magnetic susceptibility in soil profile in forest located in an industrial area. **Geoderma**, v. 249-250, p. 61-68, jul. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.02.008>.

ZHU, Y.; WEINDORF, D. C.; ZHANG, W. Characterizing soils using a portable X-ray fluorescence spectrometer: 1. soil texture. **Geoderma**, v. 167-168, p. 167-177, nov. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.08.010>.

## **CAPÍTULO II: Artigos**

**Artigo I:**

**Artigo formatado nas normas da revista Ciência e Agrotecnologia**

**Characterization of Oxisols in strongly undulated abnormal relief in the south of Minas**

**Gerais State, Brazil, with support of pXRF and geomorphology**

**Caracterização de Latossolos em raro relevo forte ondulado no Sul de Minas Gerais,**

**Brasil, com apoio de pXRF e geomorfologia**

Fernanda Almeida Bócoli<sup>1</sup>

Walbert Júnior Reis dos Santos<sup>2</sup>

Sérgio Henrique Godinho Silva<sup>1</sup>

Anita Fernanda dos Santos Teixeira<sup>1</sup>

Marcelo Mancini<sup>1</sup>

Nilton Curi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brasil, 37.200-900.

<sup>2</sup>IFSULDEMINAS, Campus Muzambinho, Estrada de Muzambinho, Bairro Morro Preto, Muzambinho, MG, 37.890-000.

\*Corresponding Author: niltcuri@ufla.br

**ABSTRACT**

Oxisols are the main soils in Brazil and they classically occur in stable and gentle geomorphic surfaces. However, in the south of Minas Gerais State, Oxisols have been observed under strongly undulated relief, a very rare condition for these soils in this physiographic region. So, this work aimed to assess the elemental dynamics and relief enhanced with portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry, associated to geomorphology, to understand such abnormality. The studied soils are located in Muzambinho municipality, Minas Gerais State, Brazil. Oxisol profiles were characterized in the upper third (P1), middle third (P2) and lower third (P3) of the hillslope. After morphological description, soil samples were collected in the A, AB and Bo horizons of the profiles. Physical, chemical and pXRF analyses of the soils were carried out in the laboratory. Soil colors have become yellower and darker down the landscape. Soil texture varied between clayey and very clayey. Ti and Fe content (pXRF) had a high correlation with the soil textural fractions. High weathering-leaching degrees were found, although they occur on a steep slope where younger soils (Inceptisols) would be expected in this region. The altitudinal concordance of summits observed in the more elevated surrounding areas indicates a flat paleorelief, helping to explain this unusual occurrence. The soils weathering degree values decreased down the hillslope, indicating silica enrichment through runoff and subsuperficial water flux in the lower landscape positions. The pXRF analyses assisted in the characterization of these old soils in strongly undulated unusual relief in this physiographic region in terms of providing bases for confirming their high weathering degree indexes, evidencing differences in Al and Fe contents of parent materials, and detecting the pre-weathering of the regolith of this very old landscape.

**INDEX TERMS:** Latosols, Steep slopes, Proximal sensors, Tropical soils, weathering.

## RESUMO

Latossolos são os principais solos do Brasil e classicamente ocorrem em superfícies geomórficas suavizadas e estáveis. No entanto, no Sul de Minas Gerais, Latossolos têm sido observados em relevo forte ondulado, uma condição muito rara para estes solos nesta região fisiográfica. Este trabalho teve como objetivo acessar a dinâmica elementar e o relevo com uso de espectrometria de fluorescência de raios-X portátil (pXRF), em associação à geomorfologia, para entender tal anormalidade. Os solos estudados estão localizados no município de Muzambinho, Estado de Minas Gerais, Brasil. Perfis de Latossolo foram caracterizados no terço superior (P1), terço médio (P2) e terço inferior (P3) da encosta. Após a descrição morfológica, amostras de solo foram coletadas nos horizontes A, AB e Bw dos perfis. Foram realizadas análises físicas, químicas e espectrométricas dos solos em laboratório. As cores do solo tornaram-se mais amarelas e escurecidas em direção à parte baixa da paisagem. A textura do solo variou entre argilosa e muito argilosa. Os teores de Ti e Fe (pXRF) tiveram alta correlação com as frações texturais dos solos. Foram encontrados altos graus de intemperismo-lixiviação dos Latossolos, embora ocorram em encosta íngreme onde solos mais jovens (Cambissolos) seriam esperados. A concordância de altitude dos topos observada nas áreas circundantes mais elevadas indica um paleorrelevo plano, ajudando a explicar esta ocorrência anormal. Os valores dos índices de intemperismo dos solos diminuíram ao longo da encosta, indicando o enriquecimento de sílica por escoamento superficial e fluxo de água subsuperficial nas posições mais baixas da paisagem. As análises de pXRF ajudaram na caracterização destes solos velhos em rara topografia forte ondulada nesta região fisiográfica em termos de fornecimento de bases para confirmação dos seus altos graus de intemperismo, evidenciando diferenças no teor de Al e Fe dos materiais de origem e detectando o pré-intemperismo do regolito dessa paisagem muito antiga.



**TERMOS PARA INDEXAÇÃO:** Latossolos, Encostas íngremes, Sensores próximos, Solos tropicais, intemperismo.

## 1. INTRODUCTION

Latosols (SANTOS et al., 2018), Oxisols (SOIL SURVEY STAFF, 2014) or Ferralsols (FAO, 2014) are the most important and widely distributed soils in Brazil. Oxisols are highly weathered-leached, which provokes the residual accumulation of Fe, Al and Ti oxide minerals, and removal of silica and bases, acidifying these soils (KER, 1998). They may have as advantages the microgranular structure in the Bo horizon, good drainage, high effective depth, and adequate balance of macro- and micropores for root system growth and crop development.

A relevant factor for Oxisols formation is the relief (JENNY, 1941), generally occurring under slopes ranging from flat to gently undulated (RESENDE et al., 2014, 2021). The relief conditions the water flow on the surface and subsurface, the water infiltration rate, nutrient leaching, and lateral transportation of soil constituents (CAMPOS et al., 2012; CANELLAS et al., 2000). Accordingly, it is a paramount factor driving soil differentiation across the landscape (KÄMPF; CURI, 2012). However, some Oxisols are found in steep slopes, a not typical condition for their occurrence. Presumably, since Oxisols are intensely weathered and deep, they should need a smoother surface to fully develop, where pedogenetic processes are more intense than erosion, otherwise they would remain as young soils and never develop enough to be classified as Oxisols. Thus, the reasons behind their occurrence in strongly undulated relief are not completely understood by soil scientists.

A possible explanation could be their previous development under a paleorelief. These soils may have formed when landforms were very different from the modern age, when the region was flatter, followed by a later dissection of the landscape, but still maintaining their

classification as Oxisols (RESENDE et al., 2014; REZENDE et al., 2021), unless the thickness of Bo horizon is less than 50 cm, framing them alternatively as Inceptisols, which is not the situation in this study. However, data about such rare cases are very scarce and hence more works are required to help scientists to better comprehend the formation processes of these soils located in southeastern Brazil. Novel technologies might be able to aid this endeavor.

Oxisols have a wide range of Si, Fe and Al contents and they can be measured at low cost, quickly and accurately by the portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry (SILVA et al., 2021; WEINDORF; BAKR; ZHU, 2014). The pXRF has been successfully employed in many soil studies. This methodology provides total elemental content, which can be correlated with the presence of various minerals in the different soil particle size fractions. It has been adopted for the study of several soil properties, such as texture (ZHU; WEINDORF; ZHANG, 2011), soil nutritional analysis (LIMA et al., 2019; PELEGRINO et al., 2021), soil biology (TEIXEIRA et al., 2021), soil mapping (MANCINI et al., 2019; SILVA et al., 2016), soil genesis and classification (GOZUKARA; ZHANG; HARTEMINK, 2021; SILVA et al., 2018, 2021; STOCKMANN et al., 2016; SUN et al., 2020), characterization of different land uses (CHAKRABORTY et al., 2019), soil salinity (SWANHART et al., 2014), soil contamination (HORTA et al., 2021; KEBONYE, 2021), among others, showing up as a useful tool for such studies.

Although in tropical conditions the use of pXRF has increased, without generation of chemical waste (“green analyses”) (SILVA et al., 2021), this approach was not yet applied to investigate and characterize Oxisols that occur in unusual conditions, such as in strongly undulated relief. The inexpensive and agile methods enabled by pXRF could allow for quick and effective analyses, providing important insights regarding the formation of such soils. Thus, this work aimed to assess the aspects of elemental dynamics and geomorphology of old

soils observed under unusual steep relief enhanced by pXRF spectrometry to understand such abnormality. The hypothesis is that the chemical characterization provided by pXRF and its association with geomorphology will improve our knowledge about tropical soils formation, especially under these rare conditions.

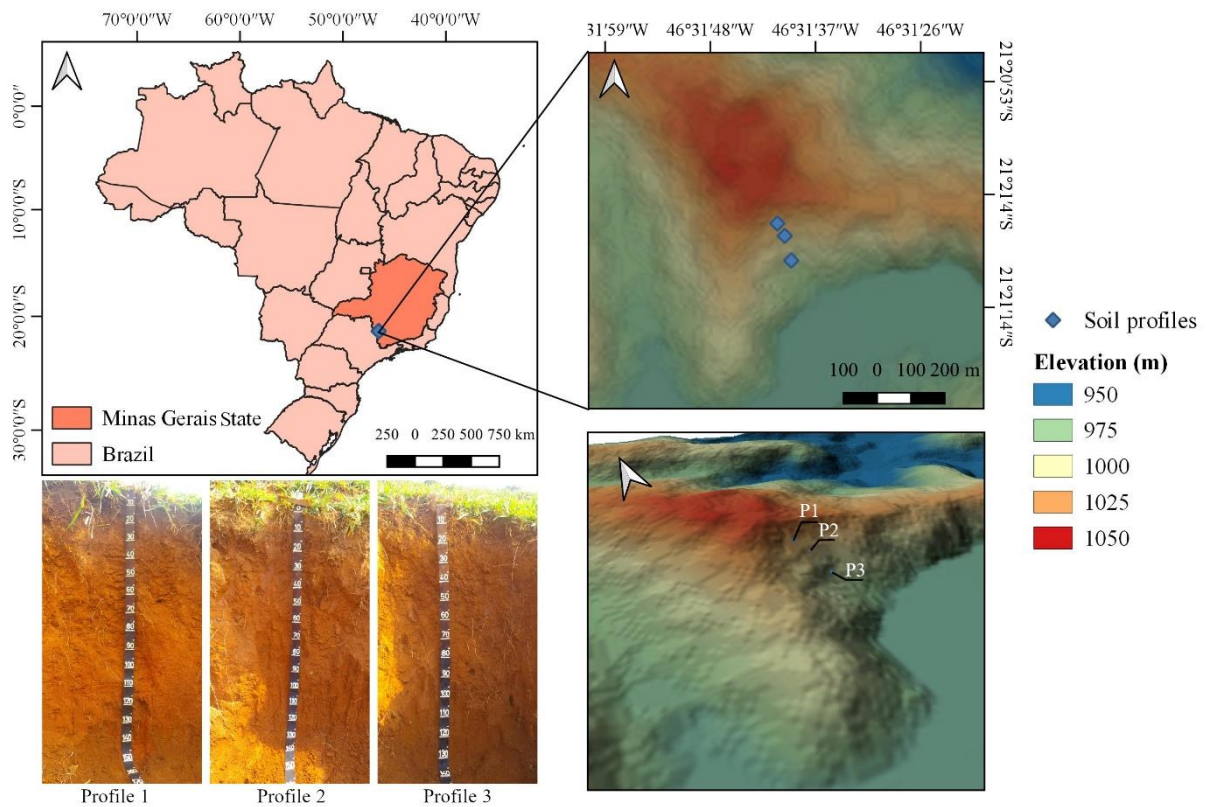
## 2. MATERIAL AND METHODS

### 2.1. Study area, soil profiles description and sampling

The study area is located at the Atlantic Forest biome, in the Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais (IFSULDEMINAS), in the Muzambinho municipality, south of Minas Gerais State, Brazil. In the IFSULDEMINAS *campus*, Oxisols represent 53% of the total area; from them, 11% are located in slopes steeper than 20% (BATISTA; SANTOS, 2017). The parent material of these Oxisols is gneiss. According to Köppen's classification, the climate in this region is Cwb (temperate humid climate, with dry winters and rainy summers). The mean annual temperature is 18°C and the mean annual rainfall is 1,605 mm (APARECIDO et al., 2014). The main native vegetation is represented by the semiperennial tropical forest.

Soil profiles were morphologically described and sampled on a strongly undulated relief under a planted pasture area (Figure 1). Profile 1 (P1) is located in the upper third of the hillslope, coordinates 21°21'06'' S and 46°31'41''W; profile 2 (P2), in the middle third of the hillslope, coordinates 21°21'07'' S and 46°31'40'' W; and profile 3 (P3), in the lower third of the hillslope, coordinates 21°21'09'' S and 46°31'39'' W. The slope on these soil profiles is shown in Figure 1. The altitude ranged from 945 m in P3 to 1,025 m in P1 (Figure 1). The soils were classified as Typic Dystrophic Red-Yellow Latosol (P1 and P2) and Typic Dystrophic Yellow Latosol (P3) (SANTOS et al., 2018), corresponding to Typic Hapludox

(P1 and P2) and Xanthic Hapludox (P3), accordingly to US Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2014), and to Haplic Ferralsol (P1 and P2) and Xanthic Ferralsol (P3).



**Figure 1.** Digital elevation model for the study area located in the Muzambinho municipality, south of Minas Gerais State, Brazil. P1: Profile 1; P2: Profile 2; P3: Profile 3.

Profile morphological description was conducted as suggested by Santos et al. (2015). Composite samples of the A, AB, and Bo horizons were collected to perform the chemical, physical and pXRF analyses.

## 2.2. Soil texture and fertility analyses

The collected samples were air-dried and sieved (2 mm) (air-dried fine earth -ADFE) for the chemical and texture analyses. The pH was obtained in water (soil:water ratio of 1:2.5) (DONAGEMA et al., 2011). Exchangeable contents of  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , and  $\text{Al}^{3+}$  were obtained by

extraction with 1 mol L<sup>-1</sup> KCl (MCLEAN et al., 1958). Available contents of K<sup>+</sup> and P were obtained by extraction utilizing Mehlich-1 solution (MEHLICH, 1953); H<sup>+</sup>+Al<sup>3+</sup> were determined by the SMP extractor (SHOEMAKER; MCLEAN; PRATT, 1961). The available B was determined using hot water as proposed by Berger and Truog (1939) and the available Cu, Zn, Mn, and Fe were extracted with Mehlich-1 solution and measured through the atomic absorption spectrometry (DEFILIPO; RIBEIRO, 1997).

Soil organic matter (SOM) content was determined according to Walkley and Black (1934). Cation exchange capacity (CEC) was calculated by the sum of Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Al<sup>3+</sup> and H<sup>+</sup> contents. Particle size distribution analysis was performed by the pipette method according to Gee and Bauder (1986).

### 2.3. Analyses via pXRF spectrometry

The pXRF analyses of ADFE samples were conducted on a DP-600 (Olympus Waltham, MA) spectrometer, during 60 seconds, operating in Soil Mode (SILVA et al., 2021; WEINDORF; CHAKRABORTY, 2016). To ensure the efficiency of this proximal sensor, two soil materials certified by the National Institute of Standards and Technology (NIST), 2710a, and 2711a, and a material provided by the pXRF manufacturer (check sample) were analyzed by pXRF and the obtained contents were compared with the certified values.

Five elements were used in this study due to their importance as soil weathering indicators (KER; NOVAIS, 2011; RESENDE et al., 2019): Ti, Mn, Si, Al and Fe. All the recovery values of these elements (content yielded by pXRF/certified content x 100) were higher than 70%. From these results, the following soil weathering indices were calculated using oxide total values obtained by pXRF:

$$Di = \frac{SiO_2}{(Al_2O_3+Fe_2O_3+TiO_2)} \quad (\text{SINGH; PARKASH; SINGHVI, 1998}) \quad (1)$$

$$Ri = \frac{SiO_2}{Al_2O_3} \text{ (RUXTON, 1968)} \quad (2)$$

$$Zi = \frac{SiO_2}{(Al_2O_3 + Fe_2O_3)} \text{ (ZHANG, HARTEMINK, 2019)} \quad (3)$$

## 2.4. Statistical analyses and geographic information

Pearson's correlation between the elements obtained by pXRF analyses and both texture and soil fertility results were calculated with the aid of the R software (R CORE TEAM, 2021), using the package *corrplot* (WEI; SIMKO, 2021) that also calculated the significance of the results. A digital elevation map for the region was applied to analyze the morphology of the landscapes and it was obtained from the Alaska Satellite Facility Distributed Active Archive Data Center (ASF DAAC), with a resolution of 12.5 m. The analyses were performed via the software QGIS (version 3.12.3). By according to the authors knowledge, this approach was not used in tropical conditions.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1. Morphological, physical and fertility properties of the soil profiles

The soil structure found in the three profiles was granular in the A horizon, and microgranular in the Bo horizon. In all the analyzed profiles, roots were observed in depth, which indicates adequate porosity for soil aeration and good drainage, attributes compatible with clayey Oxisols with such structure. Table 1 shows the main morphological attributes identified in the three soil profiles.

**Table 1.** Soil classes, horizons, depth, Munsell color, and structure of the three profiles located at the IFSULDEMINAS, Muzambinho municipality, Minas Gerais State, southeastern Brazil.

Profile	Soil	Horizon	Depth (cm)	Moist color	Structure
1	Typic Dystrophic Red-Yellow Latosol	A	0-20	Dark reddish brown (5YR 3/3)	Granular
		AB	20-27	Reddish brown (5YR 5/4)	Granular
		Bo	27-300+	Yellowish red (5YR 5/6)	Microgranular
2	Typic Dystrophic Red-Yellow Latosol	A	0-13	Reddish brown (5YR 4/3)	Granular
		AB	13-27	Reddish brown (5YR 4/4)	Granular
		Bo	27-300+	Yellowish red (5YR 5/7)	Microgranular
3	Typic Dystrophic Yellow Latosol	A	0-20	Dark brown (7.5YR 3/3)	Granular
		AB	20-27	Strong brown (7.5YR 5/6)	Granular
		Bo	27-300+	Brown (7.5YR 4/4)	Microgranular

Profiles 1 and 2 present a dominant red-yellow color, while profile 3 presents a yellow color in the Bo horizon (Table 1). There are several aspects to be considered in pedogenic studies that influence soil color, such as soil mineralogy, drainage class, soil water regime, soil organic matter (SOM), past and current climate, among others (IBÁÑEZ-ASENSIO et al., 2013; KER et al., 2012; LEPSCH, 2010; RESENDE et al., 2011). In this context, the iron oxide minerals have remarkable importance. The clay fraction of soil profiles 1 and 2 have both hematite and goethite, while profile 3 presents only goethite (data not shown), which is in accordance with their colors.

In the P1 and P2 profiles, the hue in the superficial horizons is brown, but not below. In the P3 profile, all the horizons are brown, reflecting a subtle hydrosequence of soils conditioned by the relief (CURI; FRANZMEIER, 1984).

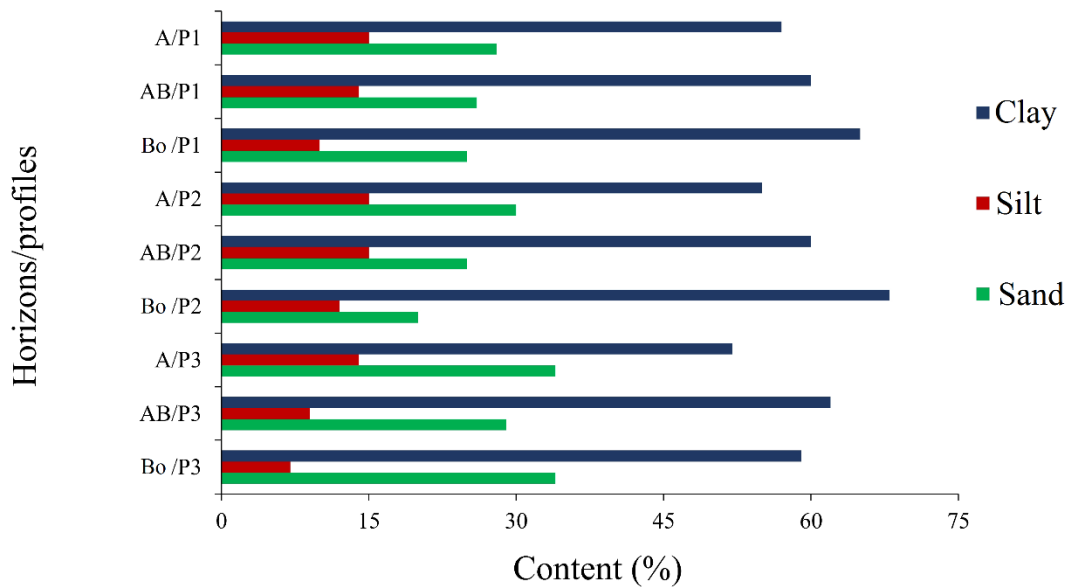
Slight texture variations were observed among the soil profiles (Figure 2). The texture of the soil profiles varied between clayey and very clayey, indicating the high degree of weathering of these soils (RESENDE et al., 2019), derived from gneiss.

**Table 2.** Fertility analyses of Oxisol profiles located at the IFSULDEMINAS, Muzambinho municipality, Minas Gerais State, southeastern Brazil.

Soil	Hor.	pH	H+Al	Al <sup>3+</sup>	CEC	SOM	P	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	BS	AS	Fe	Mn	Zn	Cu	B
		-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----			dag kg <sup>-1</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	-----%-----		-----mg dm <sup>-3</sup> -----							
P1	A	6.54	3.38	0.15	5.5	2.48	0.6	26	1.95	0.11	38.67	6.59	82.4	8.9	0.9	2.3	0.16
	AB	5.63	3.38	0.28	4	1.64	0.6	15	0.5	0.04	14.46	32.62	42.8	3.4	0.2	2.3	0.18
	Bo	5.59	2.29	0.06	2.4	0.54	0.2	0	0.1	0.02	5.00	33.33	18.6	1.4	0.2	1.7	0.11
P2	A	6.98	1.65	0	7.9	3	1.2	29	4.46	1.77	79.80	0	57.3	19.6	1.1	1.8	0.18
	AB	6.81	1.84	0	4.6	1.52	0.6	9	2.36	0.4	60.50	0	27.3	4	0.2	2.1	0.2
	Bo	5.74	2	0	2.4	0.86	0.2	4	0.37	0.02	16.68	0	21	1.5	0.2	1.5	0.15
P3	A	6.69	3.08	0.18	4.8	2.36	0.9	32	1.32	0.31	35.67	9.51	74.6	14.6	0.6	2.1	0.2
	AB	5.6	3.08	0.41	3.3	1.18	0.2	8	0.22	0.02	7.89	61.15	32	3.8	0.2	1.7	0.16
	Bo	5.52	3.56	0.37	3.7	0.97	2.1	0	0.13	0.02	4.05	71.15	34.5	5.3	0.2	1.4	0.15

CEC: Cation exchange capacity; SOM: Soil organic matter; BS: Base saturation; AS: Aluminum saturation.





**Figure 2.** Particle size distribution of the soil profiles horizons located at the IFSULDEMINAS, Muzambinho municipality, Minas Gerais State, southeastern Brazil.

Soil fertility analyses (Table 2) showed that the superficial horizons of three profiles had pH values higher than the ones commonly found in Oxisols under natural conditions, which tend to be more acidic (LOPES; GUILHERME, 2016). These high pH values along with the  $\text{Ca}^{2+}$  contents in the superficial horizons indicate that these planted pasture areas have received limestone.

Both SOM and CEC decrease with depth, as expected, reinforcing the great importance of the SOM on the generation of negative superficial charges for retaining bases in these low-activity clay soils. SOM increases down the slope in Bo, being highest in P3. This indicates a slight poorer drainage in P3 helping to preserve SOM. These soils contain kaolinite, gibbsite, hematite (except in profile 3) and goethite in the clay fraction which have very low CEC. Fe and Al mineral oxides, such as hematite, goethite and gibbsite at pH values below 7.0 tend to present anion exchange capacity (AEC) greater than CEC (FAGERIA, 2012). Conversely, in soils with such pH values SOM and kaolinite generate negative

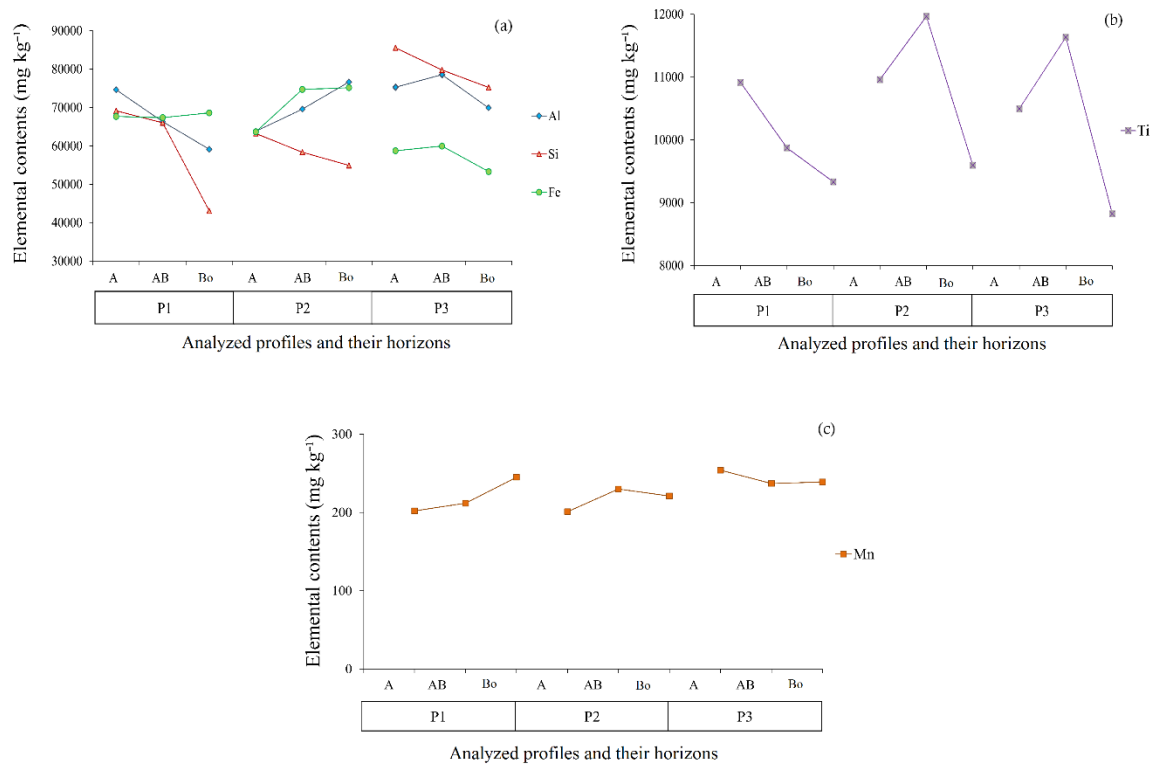
superficial charges, thus contributing to the increase of CEC (FRANKS et al., 2021; INDA JUNIOR et al., 2017).

The base saturation (BS) values, except for the superficial horizons, are low, as expected for Oxisols. In the A horizon, the liming application helps to explain the higher values. The low aluminum saturation (AS) values are related to Al constant consumption for gibbsite formation (CURI; FRANZMEIER, 1984) in addition to liming application in the superficial horizons.

### **3.2. Soil total element contents obtained by pXRF**

Figure 3 presents the pXRF results for Al, Si, Fe, Ti and Mn. In P1, there was a high content of Al in comparison with Si (Figure 3a), evidencing the high weathering degree in this soil profile. During the weathering process, easily-weatherable primary minerals (EWPM) suffer hydrolysis and hence can form kaolinite and iron and aluminum oxides (INDA JUNIOR et al., 2017). Campos et al. (2012) studied the soil-landscape relationships and verified that clay minerals formation, their persistence and the elemental contents were mainly conditioned by the relief, under similar environmental conditions including the same parent material, as in the current study.

From P1 to P3, there was an increment in the Si content (Figure 3a), evidencing a relative decrease in the soil weathering degree, associated with a longer water residence time, conditioned by the relief (lower third of the landscape) through silica addition from runoff and subsuperficial water flux (MONIZ; BUOL, 1982).



**Figure 3.** Elemental contents obtained by pXRF in the studied horizons of Oxisol profiles located at the IFSULDEMINAS, Muzambinho municipality, Minas Gerais State, southeastern Brazil.

Different patterns of Al and Fe across horizons for each profile probably reflect the variation of parent material chemical traits (Figure 3a). P3 had a higher Si content compared with Al and Fe. Silva et al. (2020) found lower contents of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiO<sub>2</sub> and greater contents of SiO<sub>2</sub> in soils derived from gneiss compared to soils developed from itabirite, basalt, gabbro and tuffite. In this study, including soils derived only from gneiss, differential Si contents among the profiles may indicate their differential weathering degrees driven mainly by the relief conditions (Figures 3a and 3b).

The Fe content was almost constant in the soils in upper and middle third of the landscape, while in the lower third there was a drastic reduction. During fieldwork, it was observed that the hues were redder in P1 and P2 and yellower in P3. In the lower third of the

landscape, where more water tends to accumulate, in addition to the lower Fe content, the formation of goethite over hematite is favored, making this soil yellower than the others (Figure 3a). Table 2 shows more available Fe content in the Bo horizon of P3, which is possibly due to a greater moisture degree, favoring some seasonal reduction of Fe(III) and consequent increase of Fe(II) compounds (RESENDE et al., 2021; KÄMPF; CURI, 2012; SCHWERTMANN; TAYLOR, 1989).

The index proposed by Singh, Parkash and Singhvi (1998) (Di) relates the oxides that residually remain in soil following the weathering processes ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  and  $\text{TiO}_2$ ) and silica ( $\text{SiO}_2$ ), which is gradually leached as soils develop (Eq. 1). The silica/alumina and silica/(alumina+ $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ratios play similarly, indicating the amount of leached silica compared to residual oxides (Eqs. 2 and 3). Hence, for all mentioned indexes, lower values indicate higher weathering degree (SANTOS et al., 2018).

Values of silica/alumina ratio for Bo horizons were 0.83 in P1, 0.81 in P2, and 1.22 in P3 (Table 3). The other indices show a similar behavior, indicating higher weathering degree in the Bo horizon, which was completely unexpected. This trend can be observed in all three studied soil profiles (Table 3) and indicates a pre-weathering of these soils, facilitated by the mafic lamellae of the gneiss (MANCINI et al., 2021), probably in a flatter paleorelief, in accordance with the geomorphology (section 3.4).

According to the weathering degree indices, in P3 the weathering is less intense than in P1 and P2, corroborating the aforementioned discussions. Overall, the studied profiles tend to be less weathered down the slope. The decreasing weathering degree order was:  $\text{P1} > \text{P2} > \text{P3}$  (Table 3). Additionally, P1 and P2 show increasing weathering degree from A to Bo, whilst in P3 the AB horizon is more weathered than Bo. This trend is likely an indication that soils are getting closer to the parent material and/or are less weathered due to poorer drainage compared to P1 and P2, as previously discussed.

**Table 3.** Weathering degree indexes for the studied Oxisol profiles, situated in Muzambinho municipality, Minas Gerais State, Brazil.

Soil	Horizon	Di <sup>1</sup>	Ri <sup>2</sup>	Zi <sup>3</sup>
P1	A	0.67	1.05	0.71
	AB	0.69	1.13	0.73
	Bo	0.48	0.83	0.51
P2	A	0.70	1.12	0.73
	AB	0.57	0.95	0.61
	Bo	0.51	0.81	0.53
P3	A	0.87	1.29	0.91
	AB	0.78	1.15	0.82
	Bo	0.83	1.22	0.87

<sup>1</sup>(SINGH; PARKASH; SINGHVI, 1998); <sup>2</sup>(RUXTON, 1968); <sup>3</sup>(ZHANG, HARTEMINK, 2019).

The Al behavior was different in each soil profile (Figure 3a). Aluminum has high concentration in old soils as a residual element, mainly associated with gibbsite and kaolinite in the clay fraction, and in micas, mainly muscovite, in the sand fraction (BRINATTI et al., 2010). The Al random distribution in these soils, assessed by pXRF, is probably related to the alternating felsic and mafic laminae of the gneiss, as observed by Mancini et al. (2021) in this region.

In Figure 3b, we can see that Ti contents have a maximum value of 12,000 mg kg<sup>-1</sup>. Titanium is a less mobile element in soils, being frequently used as a fingerprint of soil parent material (MANCINI et al., 2021), and these Oxisols derived from gneiss have lower contents compared to other Oxisols derived from mafic rocks (KER; NOVAIS, 2011). The Ti oxide minerals frequently found in soils, such as ilmenite (FeTiO<sub>3</sub>) and anatase (TiO<sub>2</sub>), are originated from the weathering of silicates like biotite, hornblende, and augite; Ti can also be found as isomorphous substituent of Fe and Al in the crystalline structure of oxide minerals (ANDRADE et al., 2009; ARAUJO et al., 2014).

The manganese (Figure 3c) showed little variation across the soil profiles. It was observed a little enrichment with depth in P1 and P2 compared with the Mn superficial

quantity: A horizon (P1=202; P2=212 mg kg<sup>-1</sup>) and Bo (P1=254; P2=237 mg kg<sup>-1</sup>). This element has a large abundance in the terrestrial crust, occurring a great diversity of Mn-bearing minerals in soils and parent materials, such as plagioclases, olivines, pyroxenes, amphiboles and biotites (ANDRADE et al., 2009). In this study, small differences in the accessory minerals in soils parent material composition help to explain the observed results (RESENDE et al., 2019).

### **3.3. Correlations between texture, fertility attributes and pXRF data**

The correlation between total Fe and Ti contents (pXRF) with the sand fraction content was high and negative (-0.92 and -0.87, respectively), probably due to the fact the dominant minerals in this soil fraction of Oxisols are quartz and muscovite (Figure 4a), which do not contain such elements in their crystalline structure. Conversely, clay (0.53 and 0.48) and silt (0.52 and 0.54, respectively) fractions had a positive correlation with these elements contents, due to the presence of hematite (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), maghemite (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), goethite (FeOOH), ilmenite (FeTiO<sub>3</sub>), rutile (TiO<sub>2</sub>) and anatase (TiO<sub>2</sub>) in these soil fractions of Oxisols. Iron is usually strongly correlated to soil texture (Figure 4a), mainly to the clay fraction, which was also observed by O'Rourke et al. (2016).

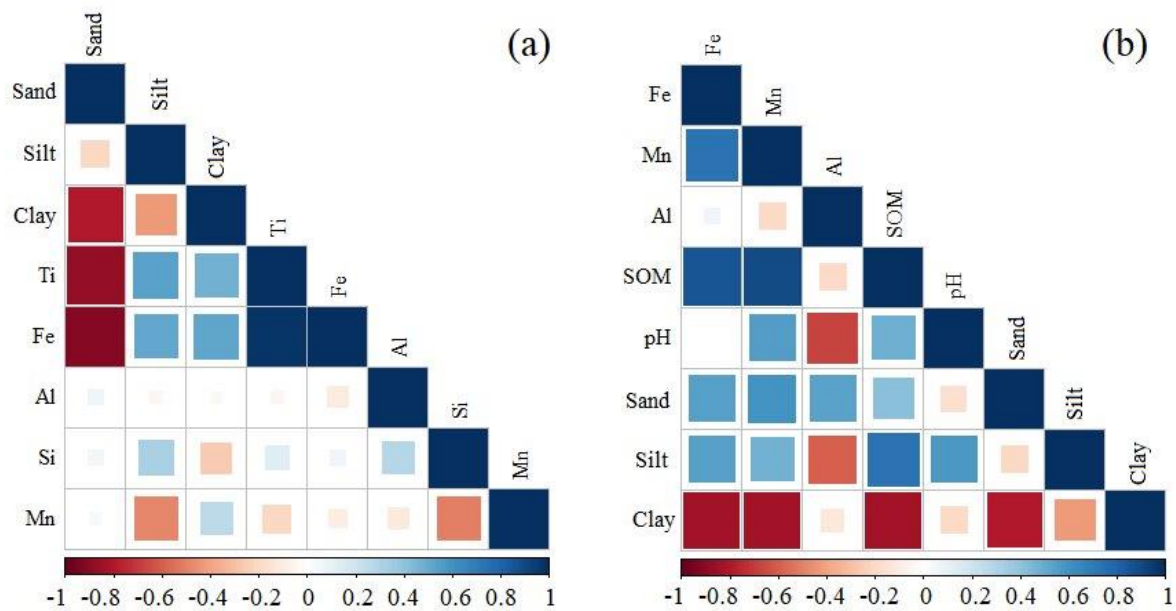
A strong and positive correlation (0.98; p<0.05) between Fe and Ti total contents was observed, which is explained by their similar behavior, residually accumulating in Oxisol profiles (Figure 4a). For Al, Mn and Si contents, weak correlations were found to any textural fraction, probably because they occur in minerals of multiple particle size fractions. For instance, Al may be present in the muscovite crystalline structure in the sand (more common) and silt (less common) fractions, as well as in kaolinite, gibbsite and Fe oxide minerals in the silt and clay fractions of Oxisols. Manganese may be isomorphous substituent of Fe in the oxide minerals in the latter soil fractions of Oxisols. Muscovite, kaolinite and quartz also

present Si in their composition, and as these minerals can occur in different particle size fractions of Oxisols (KÄMPF; MARQUES; CURI, 2012), strong and positive correlations between this element and the particle size fractions of these soils do not happen.

Available contents of Fe and Mn had a strong correlation with the SOM (Figure 4b: 0.86 and 0.90, respectively;  $p < 0.05$ ), which can be explained by their adsorption onto SOM, due to their opposite superficial electrical charges (FRANKS et al., 2021; LANA et al., 2014). The available contents of Fe and Mn were negatively correlated to the clay fraction (-0.83 and -0.84;  $p < 0.05$  respectively), probably because of the low-activity clays in these soils. The relationships between available Fe and Mn contents were strong and positive (0.73;  $p < 0.05$ ) because of their similar behavior in Oxisols.

The relations found in Figure 4b between texture and SOM differed from Zinn; Lal and Resck (2005), who detected strong positive correlations between clay + silt fractions and the SOM in Brazilian Cerrado soils when modeling SOM contents in depth. Yet, in this study, the clay content has a high negative (-0.83;  $p < 0.05$ ) correlation with SOM and the native vegetation of the Oxisols studied here is Atlantic Forest biome, which is much different in comparison with the Cerrado biome in several attributes (CURI et al., 2017).

As expected, the exchangeable  $Al^{3+}$  content had a negative correlation (-0.67;  $p < 0.05$ ) with soil pH because of the dominance of hydroxide forms of Al as the pH increases, favored by liming application in the superficial horizons of soils in this area (LOPES; GUILHERME, 2016).



**Figure 4.** Correlations between soil texture and pXRF data (a) and between soil texture and fertility analyses (b). Data from composite samples of horizons of the Oxisol profiles located at the IFSULDEMINAS, Muzambinho municipality, Minas Gerais State, southeastern Brazil.

### 3.4. Geomorphology and pedogenesis

Oxisols are usually associated with stable and flat surfaces and hot and humid climates. At the beginning of their formation, when the fresh rock was starting to weather, there should have been no structure developed enough to stop particles from being transported in case the rock was situated in a steep slope. Hence, for the rock to be weathered under hot and humid climate without having its particles eroded away and deposited elsewhere (pedogenesis < erosion), the soils studied here must have formed and deepened for a long period under smooth surfaces (pedogenesis > erosion).

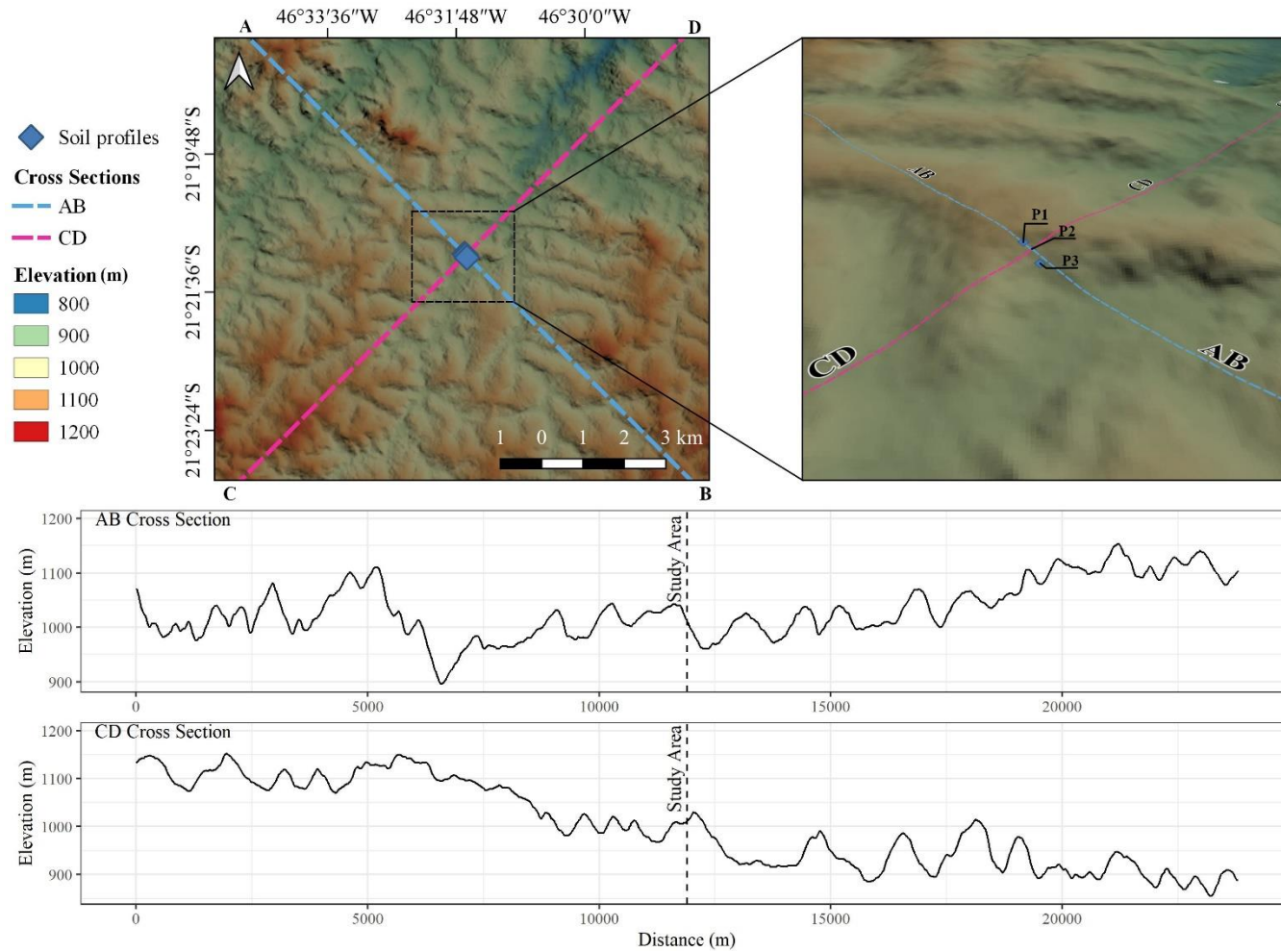
The studied soils, however, are nowadays situated in a very steep slope (Figure 1). Their paradoxical depth and landscape position indicate two aspects: i) they were certainly formed under past landforms; and ii) a lot of weathering and formation happened before these landforms changed significantly. These soils likely developed in a preceding flat surface



during intense periods of weathering-leaching. Today, they are progressively exposed as present-day landforms are carved and become steeper (BIGARELLA, MOUSINHO, SILVA, 2016; RESENDE et al., 2014). This interpretation is reinforced by the fact that since a long time ago the Brazilian territory has been submitted to very intense water erosion, and as a consequence some strata from the geologic column, common in another parts of world, are absent in Brazil (RESENDE et al., 2019).

It is true that soils from temperate regions commonly begin their pedogenetic processes as glaciers recede and form new erosional surfaces (SANBORN, 2016; TSAI et al., 2016) – that is, soils are more closely related to erosion surfaces and their ages. However, soils from the studied area and similar tropical regions in southeastern Brazil have developed continuously since ancient times and are now becoming shallower in some cases, as landforms are carved by recent drainage systems. Many soil classes are thus less related to their respective erosional surfaces, since they were formed previously and are now being dissected.

An important evidence to consolidate this idea is the coinciding altitude of hilltops throughout the region (KING, 1956; RESENDE et al., 2019) (Figure 5). Although altitude differences between regions may exist due to subsidence and other geological processes, many hilltops across large areas have barely the same altitude. This is a clear indication that in the past this region had large portions of flatter relief. The strongly undulated relief observed now indicates an erosion resumption, caused by the lowering of the base level during a somewhat drier climate (RESENDE et al., 2021). The old, weathered and flat landforms were hence dissected and resulted in a rugged landscape with absence of rock outcrops and many deep, nutrient-poor soils, even in steep slopes.



**Figure 5.** Two cross sections showing the concordance of hilltop altitudes around the study area in the Muzambinho municipality, Minas Gerais State, Brazil. Distance is measured from the points A and C to points B and D. The points were chosen arbitrarily. Dashed lines show the location of the study area within the cross sections. P1: Profile 1; P2: Profile 2; P3: Profile 3.

#### 4. CONCLUSIONS

Soils were successfully characterized quickly and at low cost with the aid of pXRF. Chemical analysis highlighted traits of the parent material (e.g., Al and Fe contents) and showed that all three studied soils are dystrophic despite the steep relief, even P3, which is located down the slope and relatively closer to the parent material. This is evidence of a deep, nutrient-poor regolith even in lower positions of the hill. P3 (on the lower portion of the landscape) showed slightly different color and more SOM content, possibly due to deposition from upper portions of the landscape and/or poorer drainage compared to P1 and P2.

The soil weathering indexes calculated from pXRF data highlighted the advanced stage of aging of these soils even in strongly undulated relief. Weathering degree was higher in Bo horizon than in superficial horizons indicating pre-weathering of these soils. The weathering degree tended to decrease down the slope. The lower weathering degree of P3 indicated deposition of Si in relation to less mobile elements (e.g., Fe and Ti). The decreasing weathering degree order for the studied soils was:  $P1 > P2 > P3$ .

The great depth and dystrophic nature of these soils even in the steepest parts of the slope are evidence that pedogenesis happened mainly prior to current landforms, when the relief was smoother. The idea of a flat paleorelief is supported by the absence of rock outcrops and the concordance of altitude of the surrounding summits, and helps to explain the abnormal soil-landscape relationships observed today in this physiographic region. After their formation, the resumption of erosional processes dissected the landscape, exposing deeper parts of these ancient soils, but not yet reaching the parent rock (gneiss).

## AUTHOR CONTRIBUTION

Conceptual idea: Bócoli, F.A.; Santos, W.J.R.; Silva, S.H.G.; Curi, N.; Methodology design: Bócoli, F.A.; Santos, W.J.R.; Data collection: Bócoli, F.A.; Santos, W.J.R.; Data analysis and interpretation: Bócoli, F.A.; Silva, S.H.G.; Teixeira, A.F.S.; Mancini, M.; Curi, N.; and writing and editing: Bócoli, F.A.; Teixeira, A.F.S.; Mancini, M.; Curi, N.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the Programa Institucional de Bolsa de Iniciação Científica (PIBIC) of the Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, *Campus Muzambinho*, and the institution facilities and equipments availability to this study realization. Also, we acknowledge CNPq, CAPES and FAPEMIG for financial research support.

## REFERENCES

- ANDRADE, J. C. et al. **Química e Mineralogia do Solo: Parte 1 - Conceitos Básicos**. Viçosa- MG: SBCS, 2009. 695 p.
- APARECIDO, L. E. D. O. et al. Análise Climática Para a Região de Muzambinho - MG. In: **IX Workshop de Pós-Graduação e Pesquisa do Centro Paula Souza**, 2014. Available in: <<http://www.pos.cps.sp.gov.br/files/artigo/file/448/988359afb8f7f48f991981ae72f35943.pdf>>. Accessed in: May, 25, 2021.
- ARAUJO, M. A. et al. Paragênese mineral de solos desenvolvidos de diferentes litologias na região sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 38, (1):11–25, 2014.
- BATISTA, R. M.; SANTOS, W. J. R. **Mapeamento Semi-Detalhado de Solos do IFSULDEMINAS-Campus Muzambinho por Meio de Técnicas de Mapeamento Digital de Solos**. Available in: <<https://jornada.ifsuldeminas.edu.br/index.php/jcmch4/>>

jcch4/paper/viewFile/3249/2396>. Accessed in: May, 25, 2021.

- BERGER, K. C.; TRUOG, E. Boron Determination in Soils and Plants. **Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition**, 11(10):540–545, 1939.
- BIGARELLA, J.J., MOUSINHO, M.R., da SILVA, J.X. Pediplanos, Pedimentos e seus Depósitos Correlativos no Brasil. **Espaço Aberto**, 6(2):165–196, 2016.
- BRINATTI, A. M. et al. Mineralogical characterization of a highly-weathered soil by the Rietveld Method. **Scientia Agricola**, 67(4):454–464, 2010.
- CAMPOS, M. C. C. et al. Topossequência de solos na transição campos naturais-floresta na região de Humaitá, Amazonas. **Acta Amazonica**, 42, (3): 387–398, 2012.
- CANELLAS, L. P. et al. Frações da matéria orgânica em seis solos de uma topossequência no Estado do Rio de Janeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 35, (1): 133–143, 2000.
- CHAKRABORTY, S. et al. Use of portable X-ray fluorescence spectrometry for classifying soils from different land use land cover systems in India. **Geoderma**, 338:5–13, 2019.
- CORNELIS, J.; DELVAUX, B., Soil processes drive the biological silicon feedback loop. **Functional Ecology**, 30(8):1298–1310, 2016.
- CURI, N. et al. **Mapeamento de Solos e Magnetismo no Campus**. Lavras: Editora UFLA, 2017. 148 p.
- CURI, N.; FRANZMEIER, D. P. Toposequence of Oxisols from the Central Plateau of Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, 48(2): 341–346, 1984.
- DEFILIPPO, B. V.; RIBEIRO, A. C. **Análise química do solo – metodologia**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1997. 26 p.
- DONAGEMA, G. K. et al. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p.
- FAGERIA, N. K. Role of Soil Organic Matter in Maintaining Sustainability of Cropping Systems. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 43(16): 2063–2113, 2012.
- FAO. **World reference base for soil resources/ International soil classification system**

- for naming soils and creating legends for soil maps.** Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2014. 191 p.
- FRANKS, M. et al. Role of Fe- and Mn-(oxy)hydroxides on carbon and nutrient dynamics in agricultural soils: A chemical sequential extraction approach. **Chemical Geology**, 561: 120035, 2021.
- GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis.** Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 383–412.
- GOZUKARA, G.; ZHANG, Y.; HARTEMINK, A.E. Using vis-NIR and pXRF data to distinguish soil parent materials – An example using 136 pedons from Wisconsin, USA. **Geoderma**, 396:115091, 2021.
- GRAU, O. et al. Nutrient-cycling mechanisms other than the direct absorption from soil may control forest structure and dynamics in poor Amazonian soils. **Scientific Reports**, 7:45017, 2017.
- HORTA, A. et al. Integrating portable X-ray fluorescence (pXRF) measurement uncertainty for accurate soil contamination mapping. **Geoderma**, 382:114712, 2021.
- IBÁÑEZ-ASENSIO, S. et al. Statistical relationships between soil colour and soil attributes in semiarid areas. **Biosystems Engineering**, 116(2): 120–129, 2013.
- INDA JUNIOR, A. V. et al. **Fundamentos de Química do Solo.** 6. ed. Porto Alegre: Biblioteca Setorial da Faculdade de Agronomia da UFRGS, 2017. 266p.
- JENNY, H. **Factors of soil formation: A system of quantitative Pedology.** New York: McGraw-Hill Book Co., Inc., 1941. 281 p.
- KÄMPF, N.; CURI, N. Formação e evolução do solo (Pedogênese). In: **Pedologia Fundamentos.** 1. ed. Viçosa, MG: SBCS, 2012. p. 207-302.
- KÄMPF, N.; MARQUES, J.J.; CURI, N. Mineralogia de Solos Brasileiros. In: **Pedologia Fundamentos.** 1. ed. Viçosa, MG: SBCS, 2012. p. 81-146.
- KEBONYE, N.M. et al. Comparison of multivariate methods for arsenic estimation and mapping in floodplain soil via portable X-ray fluorescence spectroscopy. **Geoderma**, 384:114792, 2021.

- KER, J. C. Latosols do Brasil: uma revisão. *Geonomos*. **Geonomos**, 5(1): 17–40, 1998.
- KER, J. C. et al. **Pedologia: Fundamentos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. 343 p.
- KER, J. C.; NOVAIS, R. F. DE. **Fundamentos para desenvolvimento da pedologia e da fertilidade do solo**, 2011. Available in: <http://jararaca.ufsm.br/websites/classolos/download/TextosSol/Texto03.pdf>. Accessed in: May, 25, 2021.
- KING, L. C. A geomorfologia do Brasil oriental. *Revista Brasileira de Geografia*, 18(2): 147–265, 1956.
- LANA, R. M. Q. et al. Ferro e manganês no perfil do solo em *Saccharum officinalis* fertilizada com resíduos orgânicos. *Bioscience Journal*, 30(1):131–140, 2014.
- LEPSCH, I. F. **Formação e Conservação dos Solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 216 p.
- LIMA, T. M. DE et al. Elemental analysis of Cerrado agricultural soils via portable X-ray fluorescence spectrometry: Inferences for soil fertility assessment. *Geoderma*, 353:264–272, 2019.
- LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. A career perspective on soil management in the Cerrado region of Brazil. In: **Advances in Agronomy**. Academic Press, v. 137, p. 1–72, 2016.
- MANCINI, M. et al. Formation and variation of a 4.5 m deep Oxisol in southeastern Brazil. *Catena*, 216:105492, 2021.
- MANCINI, M. et al. Parent material distribution mapping from tropical soils data via machine learning and portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry in Brazil. *Geoderma*, 354:113885, 2019.
- MCLEAN, E. O. et al. Aluminum in Soils: I. Extraction Methods and Magnitudes in Clays and Ohio Soils<sup>1</sup>. *Soil Science Society of America Journal*, 22(5):382, 1958.
- MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH<sub>4</sub>**. Raleigh: North Carolina Soil Testing Division, 1953. 16 p.

- MONIZ, A.C.; BUOL, S.W. Formation of an oxisol-ultisol transition in São Paulo, Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, 46:1228–1232, 1982.
- O'ROURKE, S. M. et al. An assessment of model averaging to improve predictive power of portable vis-NIR and XRF for the determination of agronomic soil properties. **Geoderma**, 279:31–44, 2016.
- PELEGRINO, M.H.P. et al. Prediction of soil nutrient content via pXRF spectrometry and its spatial variation in a highly variable tropical area. **Precision Agriculture**, 2021.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2021. Available in: <<https://www.r-project.org/>>. Accessed in: January, 18, 2021.
- RESENDE, M. et al. **Mineralogia de Solos Brasileiros: Interpretação e Aplicações**. 2. ed. Lavras - MG: Editora UFLA, 2011. 201 p.
- RESENDE, M. et al. **Pedologia: Base para distinção de ambientes**. 6. ed. Lavras: Editora UFLA, 2014. 378 p.
- RESENDE, M. et al. **Da rocha ao solo: enfoque ambiental**. 1. ed. Lavras - MG: Editora UFLA, 2019. 513 p.
- RESENDE, M. et al. **Pedologia, fertilidade, água e planta: Inter-relações e aplicações**. 2. ed. Lavras - MG: Editora UFLA, 2021. 263 p.
- RUXTON, B.P. Measures of the degree of chemical weathering of rocks. **Journal of Geology**. 76:518-527, 1968.
- SANBORN, P. The imprint of time on Canadian soil landscapes. **Quaternary International**, 418:165–179, 2016.
- SANTOS, H. G. DOS et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos** 5<sup>a</sup> ed. Brasília: Embrapa, 2018. 589 p.
- SANTOS, R. D. DOS et al. **Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo**. 6. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015. 102 p.
- SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R. M. Iron oxides. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Eds.). **Minerals in soil environments**. 2nd. ed. Madison: Soil Science Society of America,



1989. p. 379–438.
- SHOEMAKER, H. E.; MCLEAN, E. O.; PRATT, P. F. Buffer Methods for Determining Lime Requirement of Soils With Appreciable Amounts of Extractable Aluminum<sup>1</sup>. **Soil Science Society of America Journal**, 25(4):274, 1961.
- SILVA, S. et al. Proximal sensing and digital terrain models applied to digital soil mapping and modeling of Brazilian Latosols (Oxisols). **Remote Sensing**, 8:614–635, 2016.
- SILVA, S. H. G. et al. Soil weathering analysis using a portable X-ray fluorescence (PXRF) spectrometer in an Inceptisol from the Brazilian Cerrado. **Applied Clay Science**, 162:27–37, 2018.
- SILVA, S. H. G. et al. Modeling and prediction of sulfuric acid digestion analyses data from PXRF spectrometry in tropical soils. **Scientia Agricola**, 77(4), 2020.
- SILVA, S. H. G. et al. pXRF in tropical soils: Methodology, applications, achievements and challenges. In: **Advances in Agronomy**. Academic Press, 2021. p. 1–62.
- SINGH, L.P.; PARKASH, B.; SINGHVI, A.K. Evolution of the Lower Gangetic Plain landforms and soils in West Bengal, India. **Catena**, 33(2):75–104, 1998.
- SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12. ed. United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service, 2014. v. 12. 410 p.
- STOCKMANN, U. et al. Utilizing portable X-ray fluorescence spectrometry for in-field investigation of pedogenesis. **Catena**, 139:220–231, 2016.
- SUN, F. et al. Enhanced soil profile visualization using portable X-ray fluorescence (PXRF) spectrometry. **Geoderma**, 358: 113997, 2020.
- SWANHART, S. et al. Soil salinity measurement via portable x-ray fluorescence spectrometry. **Soil Science**, 179(9): 417–423, 2014.
- TEIXEIRA A.F. dos S. et al. Soil physicochemical properties and terrain information predict soil enzymes activity in phytophysionomies of the Quadrilátero Ferrífero region in Brazil. **Catena**, 199:105083, 2021.
- TSAI, H., HSEU, Z.Y., KUO, H.Y., HUANG, W.S., CHEN, Z.S. Soilscape of west-central Taiwan: Its pedogenesis and geomorphic implications. **Geomorphology**, 255:81–94,

2016.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, 1934,v. 37, n. 1. p. 29–38.

WEI, T; SIMKO, V. **R package 'corrplot': Visualization of a Correlation Matrix**. 2021 Available in: <<https://cran.r-project.org/web/packages/corrplot/index.html>>. Accessed in: January, 20, 2021.

WEINDORF, D. C.; BAKR, N.; ZHU, Y. Advances in Portable X-ray Fluorescence (PXRF) for Environmental, Pedological, and Agronomic Applications. In: **Advances in Agronomy**. Academic Press, 2014 p. 1–45.

WEINDORF, D. C.; CHAKRABORTY, S. Portable X-ray fluorescence spectrometry analysis of soils. In: HIRMAS, D. (Ed.). . **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society America, 2016. p. 1–8.

ZHANG, Y.; HARTEMINK, A.E. Digital mapping of a soil profile. **European Journal of Soil Science**, 70:27–41, 2019.

ZHU, Y.; WEINDORF, D.C.; ZHANG, W. Characterizing soils using a portable X-ray fluorescence spectrometer: 1. Soil texture. **Geoderma**, 167–168: 167–177, 2011.

ZINN, Y. L.; LAL, R.; RESCK, D. V. S. Texture and organic carbon relations described by a profile pedotransfer function for Brazilian Cerrado soils. **Geoderma**, 127, (1–2):168–173, 2005.

## Artigo II:

### **Avaliação da variabilidade espacial de atributos de hidrossequência de Argissolos com auxílio de pXRF**

Fernanda Almeida Bócoli<sup>1</sup>, Walbert Júnior Reis dos Santos<sup>2</sup>, Alberto Vasconcellos Inda<sup>3</sup>, Sérgio Henrique Godinho Silva<sup>1</sup>, Nilton Curi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brasil, 37.200-900.

<sup>2</sup>IFSULDEMINAS, Campus Muzambinho, Estrada de Muzambinho, Bairro Morro Preto, Muzambinho, MG, 37.890-000.

<sup>3</sup>Departamento de solos, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, 90.001-970.

#### **RESUMO**

No Brasil os Argissolos cobrem extensas áreas, sendo a segunda classe de maior expressão geográfica no país. Tal classe também é frequente no estado de Minas Gerais (MG), principalmente na região sul do estado. Esse estudo foi realizado a fim de avaliar a variabilidade espacial em três perfis de Argissolos, sob um aspecto de morfometria digital, em situações de drenagem distintas em área de mata nativa: Argissolo Vermelho Distrófico nitossólico (PV), Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (PVA) e Argissolo Amarelo Distrófico típico (PA). A área de estudo se localiza no *campus* da Universidade Federal de Lavras (UFLA), Minas Gerais, Brasil. Para realizar a morfometria digital dos perfis foram utilizados dados de sensores próximos que têm se mostrado úteis para obtenção rápida de dados, sem geração de resíduos e sem destruição das amostras. Nos três perfis estudados, foram coletadas amostras de cada horizonte para as análises tanto físicas como químicas, com o espectrômetro portátil de fluorescência raios-x (pXRF), a susceptibilidade magnética (SM) e o difratometria de raios-X (DRX). Para as análises com o pXRF, as amostras foram coletadas seguindo um grid de dimensões 20 x 20 cm nos perfis, a fim de se mapear a distribuição dos elementos entre e dentro dos horizontes dos perfis. A interpolação do conteúdo elementar utilizou o *multilevel B-spline*, com o *software* QGIS 3.16. As análises químicas mostraram diferenças principalmente quanto ao pH, teores de matéria orgânica (MO) e disponibilidade de nutrientes. O PVA apresentou maiores teores de MO, P-rem e pH mais adequados ao crescimento de plantas entre os solos estudados. As análises espaciais dos perfis demonstraram grandes variações de distribuição dos teores dos elementos estudados. Padrões mais claros foram observados somente para o PA para os elementos K, Zr, Ti e Ca que se encontram principalmente nos horizontes superficiais (A e AB). Nas análises de DRX os minerais que predominam em todos perfis são a caulinita e o quartzo, com presença de óxidos de Fe em diferentes proporções de acordo com o perfil. No PA foram encontrados

maiores teores de minerais facilmente intemperizáveis na fração silte. Os sensores permitiram uma descrição mais detalhada do comportamento espacial dos elementos e minerais nos perfis de solos, sendo possível identificar inúmeras variações horizontais e verticais, complementando as análises morfológicas.

**Palavras-chave:** Sensores próximos. Análise espacial de perfis. Dinâmica de elementos químicos.

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil a classe dos Argissolos é a segunda mais abundante, enquanto no estado de Minas Gerais (MG) ela ocupa o terceiro lugar, e no município de Lavras-MG, onde se realizou esta pesquisa, é a principal classe de solos (CURI et al., 2020; SANTOS et al., 2018), o que indica sua grande importância para a agricultura do país. Os solos do estado de Minas Gerais passaram por uma combinação de processos geológicos durante a sua formação, podendo-se citar a inversão de relevo, desgaste acentuado das superfícies aflorando rochas de seu embasamento geológico, soerguimento do terreno pela formação da cordilheira dos Andes, feições de rifteamento que dividiu o estado em quatro blocos, entre outros (PEDROSA-SOARES et al., 1964). Tais processos influenciaram direta e indiretamente do relevo regional dos solos, o fluxo e a drenagem de água, etc.

A fim de aprimorar o detalhamento das informações que se tem desses Argissolos para seu melhor uso, entendimento dos efeitos que seus processos de formação causaram ao longo do perfil de solo e suas dinâmicas elementares são necessários mais estudos. Embora análises tradicionais no campo e no laboratório sejam muito empregadas e úteis para o estudo dos solos, possuem desvantagens como o uso de reagentes químicos com potencial de causar poluição ambiental, são onerosas e demoradas (BENEDET et al., 2020). Essas questões, em alguns casos, podem atrasar tomadas de decisão na propriedade, como operações de adubação e plantio, o que pode acarretar em grandes prejuízos com a redução de produtividade. Outro ponto a ser considerado é que como essas análises são onerosas, muitas vezes, haverá limitações no número de amostras coletadas, o que pode reduzir a representatividade deste conjunto de dados obtidos para a área (DUDA et al., 2017).

Nesse sentido o uso de sensores próximos para o estudo dos solos tem se tornado atrativo para obtenção rápida de dados, sem a necessidade de preparos complexos em laboratório e nem a obtenção de um volume elevado de solo por amostra, já que em sua maioria são métodos não destrutivos (IBÁÑEZ-ASENSIO et al., 2013). São análises menos

onerosas e não geram resíduos (RIBEIRO et al., 2017; SILVA et al., 2020). O menor custo e tempo gastos com as análises permitem a coleta de um maior número de amostras na área aumentando sua representatividade (DUDA et al., 2017). O uso destas novas ferramentas pode complementar os dados existentes trazendo maior robustez aos resultados obtidos (STOCKMANN et al., 2016).

A heterogeneidade do solo, principalmente em profundidade, é um fator conhecido da maioria dos pesquisadores. Entretanto, poucos são os estudos que analisam variações que não são possíveis de serem detectadas a olho nu, como exemplo as variações nos teores elementares ou de minerais, que ocorrem em diferentes profundidades ao longo de um perfil (GAUER-GRAY, HARTEMINK, 2018; SILVA et al., 2018; SUN et al., 2020, MANCINI et al., 2021). Entender esse comportamento dinâmico espacial do perfil do solo pode auxiliar em diversos estudos sejam eles pedogênicos e/ou para fins agrícolas.

Nesse sentido, Hartemink e Minasny (2014) propuseram uma técnica para esse tipo de análise, a morfometria digital do solo que é definida pela aplicação de ferramentas que mensuram e quantificam os atributos de perfis de solos, bem como suas variabilidades espaciais. Na morfometria digital são utilizados sensores próximos como o espectrômetro portátil de fluorescência de raios-X (pXRF), o espectrômetro na faixa do visível e infravermelho próximo (Vis-NIR), o difratômetro de raios-X (DRX), o suscetímetro magnético (SM), dentre outros (GRAUER-GRAY, HARTEMINK, 2018; MANCINI et al., 2021; SILVA et al., 2018; SUN et al., 2020).

Atualmente os trabalhos em solos com a utilização de equipamentos portáteis como o espectrômetro de fluorescência de raios-X (pXRF) são crescentes em regiões tropicais, entretanto há ainda muitos campos de estudos a serem explorados. Esse equipamento emite resultados quase instantâneos da constituição elementar do solo, podendo ser utilizado em campo ou em laboratório (WEINDORF et al., 2014). O pXRF possui diversos usos na área de pedologia, como no mapeamento de solos (MANCINI et al., 2019; SILVA et al., 2016), estudos de áreas potencialmente salinizadas (SWANHART et al., 2014) e do potencial nutricional dos solos (LIMA et al., 2019), da gênese e classificação dos solos (SILVA et al., 2018; STOCKMANN et al., 2016), da identificação de diferentes usos e manejos (CHAKRABORTY et al., 2019), da predição de atributos físicos e químicos (DUDA et al., 2017, SILVA et al., 2019a, SILVA et al., 2019b, ZHU et al., 2011), e biológicos (TEIXEIRA et al., 2021), dentre outros.

Além disso, ainda são escassos os trabalhos que utilizam a combinação de sensores próximos e equipamentos como os aqui utilizados, o pXRF, o SM e o DRX, para a

investigação do comportamento de atributos espacializados através do perfil de solo. Especialmente em estudos sobre Argissolos com diferentes situações de drenagem e em diferentes posições da paisagem, como no local onde se realizou este estudo. Assim estudos detalhados podem permitir um melhor entendimento de como ocorreram as diferenciações de atributos desses solos ao longo da paisagem. Como hipótese tem-se que as variações de atributos são regidas pela posição na paisagem e que os sensores irão auxiliar na identificação das variações de atributos dentro e entre horizontes.

Deste modo, este trabalho avaliou três perfis de Argissolos distintos, sob diferentes condições de drenagem e posições na paisagem, utilizando-se a técnica da morfometria digital, sendo eles: Argissolo Vermelho (PV), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Argissolo Amarelo (PA). O objetivo foi investigar as causas das diferenças desses três perfis ao longo de uma hidrossequência e caracterizar e avaliar os atributos que mais variaram entre os três Argissolos, com auxílio de sensores próximos associados à descrição morfológica. Para tanto, os dados obtidos pelo pXRF, SM e DRX serão analisados individualmente e combinados para embasar o entendimento da gênese e das interações elementares e mineralógicas dentro de cada perfil de solo.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

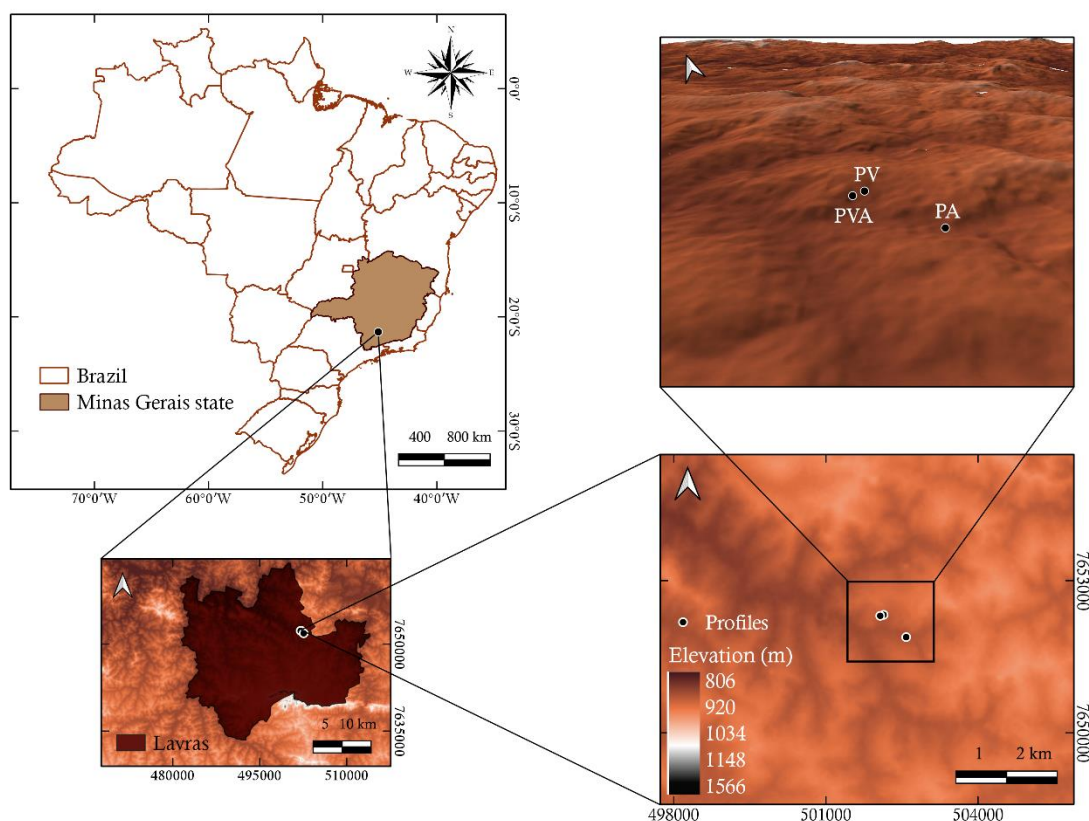
### **2.1 Área de estudo e amostragem dos perfis**

A área de estudo se localiza em região de transição entre os biomas Cerrado e Mata Atlântica, no *campus* da Universidade Federal de Lavras (UFLA), no município de Lavras, Minas Gerais. Foram analisados três perfis de Argissolos: Argissolo Vermelho Distrófico nitossólico (PV), Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (PVA) e Argissolo Amarelo Distrófico típico (PA) (SANTOS et al., 2018). As coordenadas para o perfil de PV são 7652328 mS de latitude e 502136 mO de longitude; enquanto o perfil de PVA 7652308 mS de latitude e 502069 mO de longitude; e por fim para o PA 7651888 mS de latitude e 502581 mO de longitude, todos na projeção UTM, fuso 23K, e *datum* WGS 84 (Figura 1). Segundo Curi et al. (2018), o relevo no *campus* varia de plano a suave ondulado, cujos materiais de origem dos solos são gabros e gnaisses. A altitude varia em torno de 920 m. Os perfis de PV, PVA e PA se localizam sob mata nativa cujo material de origem é o gnaiss. A classe dos Argissolos no município de Lavras é predominante, com 39% do total dos solos ali existentes e desses, aproximadamente, 33% são Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos (e

Epieutrófico) típico (CURI et al., 2018; CURI et al., 2020). Segundo a classificação de Köppen o clima de Lavras-MG é classificado como Cwa, temperatura média anual de 19 °C e precipitação média anual de 1530mm, com estação chuvosa no verão (Alvares et al., 2013; Dantas et al., 2007).

Para cada horizonte nos perfis de Argissolos (PV, PVA e PA), foram coletadas amostras compostas, misturadas e acondicionadas em sacos plásticos, para as análises granulométricas e químicas, com os sensores próximos SM e pXRF. As análises de DRX foram realizadas apenas nos horizontes principais A e B.

**Figura 1.** Localização, topografia e altitude dos três perfis de Argissolos: Argissolo Vermelho (PV), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Argissolo Amarelo (PA), no município de Lavras, Minas Gerais, Brasil.



## 2.2 Análises laboratoriais

O material coletado foi seco ao ar e peneirado (2 mm) para se obter a fração terra fina seca ao ar (TFSA) e submetido às análises químicas e físicas: pH em água com auxílio de um pHmetro após uma hora, momento em que se atingiu o equilíbrio (DONAGEMA et al.,

2011). Os teores trocáveis elementares de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , e  $\text{Al}^{3+}$  foram extraídos com uma solução de KCl a  $1 \text{ mol L}^{-1}$  (MCLEAN et al., 1958); os teores disponíveis de  $\text{K}^+$  e P foram obtidos pela extração se utilizando a solução Mehlich-1 (MEHLICH, 1953); o teor de P remanescente (P-Rem) foi quantificado pela colorimetria do azul do molibdato de amônio (ALVAREZ et al., 2000);  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$  pelo extrator SMP (SHOEMAKER; MCLEAN; PRATT, 1961); e o teor de matéria orgânica do solo (MOS) foi mensurada através da metodologia de Walkley and Black (1934). A capacidade de troca de cátions (CTC), foi calculada através da soma dos teores de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ , e  $\text{H}^+$ . As análises granulométricas foram realizadas conforme Gee e Bauder (1986) para se quantificar as frações areia, silte e argila (método da pipeta).

Para se analisar a susceptibilidade magnética das amostras dos horizontes foram utilizados 10 g da fração TFSA, colocados em tubos preenchendo-os por completo para que as ondas eletromagnéticas passassem pelo centro da amostra e realizassem a leitura. As amostras foram submetidas à leitura com o auxílio do suscetibilímetro Bartington MS2B no modo *low frequency* (LF). Os resultados foram aplicados à seguinte fórmula:

$$\text{SM} = \text{leitura LF} / \text{massa da amostra}$$

Onde: SM = suscetibilidade magnética ( $10^{-7} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ); leitura LF=leitura obtida no equipamento; massa da amostra= massa (g).

Para as análises com pXRF utilizaram-se de 15 a 20 g de TFSA. As amostras foram submetidas à leitura do espectrômetro portátil de fluorescência raios-X (pXRF) Bruker® modelo S1 Titan LE, contendo um tubo de Rh X-ray com 50 keV e 100  $\mu\text{A}$ , utilizando o modo “Trace”, a leitura foi realizada em triplicata, levando 60 s (WEINDORF e CHAKRABORTY, 2016; BENEDET et al., 2020). Para a verificação da acurácia da leitura dos elementos pelo equipamento foram realizadas leituras de amostras certificadas pelo NIST (National Institute of Standards and Technology) e de amostra fornecida pelo fabricante para eventuais necessidades de calibração do aparelho. Esse procedimento foi realizado para se mensurar a taxa de recuperação dos elementos pelo equipamento (PEINADO et al., 2010; SILVA et al., 2016; SILVA et al., 2018; WEINDORF et al., 2014).

Para as análises de mineralogia com o uso do DRX, separaram-se as frações areia, silte e argila dos horizontes principais A e B, após sua dispersão com o uso da solução de NaOH  $1 \text{ mol L}^{-1}$ . A composição mineralógica de cada fração textural foi obtida através das análises de DRX, realizadas pelo difratômetro Bruker D2 PHASER, equipado com o



LYNXEYE™, um modelo linear praticamente instantâneo, que utiliza o software DIFFRAC·SUITE™. As análises realizadas com a radiação  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda=1.541838 \text{ \AA}$ ), equipado com um filtro de Ni, voltagem de 30 kVA e a intensidade da corrente de 10 mA. O preparo das amostras em pó não orientadas das diferentes frações foi realizado com um almofariz de ágata para irradiação variando de  $2-70^\circ 2\theta$  à  $0.02^\circ 2\theta \text{ s}^{-1}$ . O software Diffract Suite Eva foi utilizado para a obtenção dos padrões de DRX e os resultados interpretados através das tabelas elaboradas por Brindley e Brown (1980).

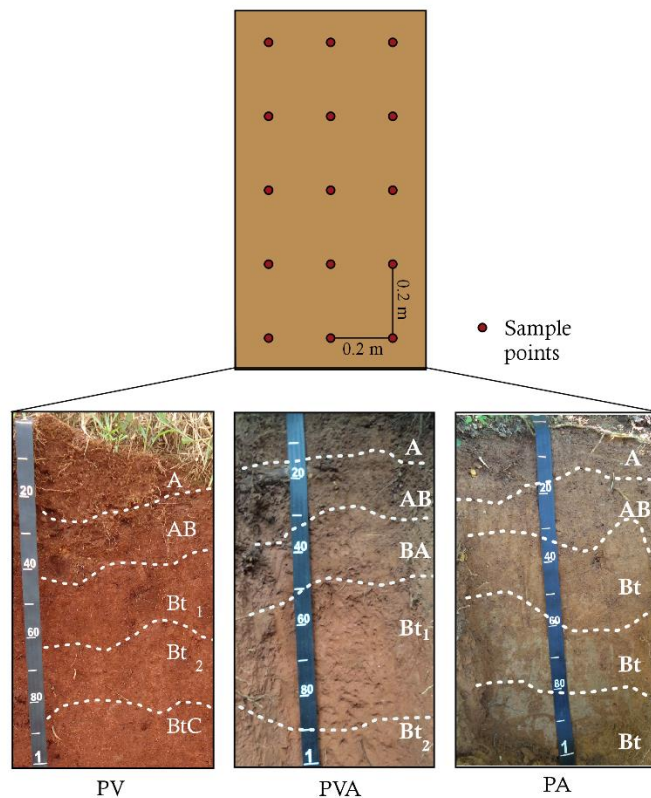
### 2.3 Avaliação espacial do perfil de solo

As coletas das amostras nos perfis seguiram um grid de dimensões 20 x 20 cm. Como os perfis foram analisados até a profundidade de aproximadamente 1 metro e a largura de 60 centímetros, totalizaram-se 15 amostras por perfil.

### 2.4 Análises estatísticas

Para o mapeamento da distribuição dos elementos entre e dentro dos horizontes dos perfis foi utilizado software QGIS 3.16 (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2021), para a realização da interpolação do conteúdo elementar das amostras pelo método *multilevel B-spline* (LEE; WOLBERG; SHIN, 1997). A Figura 2 ilustra como foram coletados os pontos de amostragem nos Argissolos e a separação dos horizontes dos três perfis.

**Figura 2.** Pontos de coleta das amostras para as análises espaciais realizadas com pXRF, no município de Lavras, estado de Minas Gerais, Brasil.



### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Análises químicas

Nas análises químicas (Tabela 1) pode-se observar que o PA apresentou valores de pH menores que o PVA. Entretanto é observado um padrão tanto em PA quanto em PVA onde o pH superficial é maior que nos horizontes subsuperficiais. Já no PV o pH se mostra quase constante e com elevada acidez, fazendo com que altos teores de  $Al^{3+}$  fiquem disponíveis na solução do solo (MIGUEL et al., 2010). A disponibilidade de nutrientes por sua vez, acompanha essa distribuição do pH nos horizontes dos três perfis, sendo mais ou menos disponíveis à medida que o pH atinge valores dentro da faixa de disponibilidade de cada nutriente que, em geral, é próximo de 6,5 (FRANKS et al., 2021).

**Tabela 1.** Resultados de análises químicas e do teor de matéria orgânica (MO) de amostras de Argissolo Vermelho (PV), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA) e Argissolo Amarelo (PA).

Solo	Hor.	Prof. (cm)	pH	K	P	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al <sup>3+</sup>	SB	t	T	V	m	MO	P-Rem
			--mg dm <sup>-3</sup> --				----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----				--- % ---		dag kg <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>		
PV	A	0-24	3,8	38,0	2,9	0,4	0,2	1,5	5,8	0,7	2,2	6,5	11	68	1,9	15,9
	AB	24-42	3,6	38,0	1,1	0,6	0,3	1,5	11,0	1,0	2,5	12,0	8	60	1,4	14,2
	Bt1	42-63	3,8	34,0	0,8	0,7	0,4	1,5	6,2	1,2	2,7	7,4	16	56	1,2	5,6
	Bt2	63-85	3,9	28,0	0,6	0,5	0,2	1,5	9,3	0,8	2,3	10,1	8	66	0,2	14,2
	BtC	85-112	3,2	20,0	0,3	0,1	0,1	1,7	7,1	0,3	2,0	7,4	3	87	1,8	12,9
PVA	A	0-20	5,6	127,0	3,5	4,1	1,5	0,1	5,2	5,9	6,0	11,1	53,3	1,7	5,2	32,8
	AB	20-40	5,1	84,5	0,7	0,8	0,6	0,3	7,0	1,6	1,9	8,6	18,4	16,0	2,6	24,4
	BA	40-60	5,0	69,1	0,1	0,4	0,3	0,5	6,9	0,9	1,4	7,8	11,7	35,2	1,9	17,4
	Bt <sub>1</sub>	60-80	4,6	62,2	0,1	0,2	0,2	0,0	4,0	0,6	0,6	4,6	12,5	0,0	0,7	4,2
	Bt <sub>2</sub>	80-100+	4,9	61,1	0,1	0,4	0,4	0,0	2,9	0,9	0,9	3,8	23,6	0,0	0,7	3,9
PA	A	0-10	4,9	60,0	1,4	1,9	0,8	0,2	3,0	2,9	3,1	5,8	49	7	2,4	19,4
	AB	10-30	4,2	26,0	0,3	0,6	0,3	0,5	5,7	1,0	1,5	6,7	15	34	1,1	15,5
	Bt <sub>1</sub>	30-50	4,2	18,0	0,0	1,0	0,3	0,3	2,8	1,4	1,7	4,2	32	18	0,5	7,0
	Bt <sub>2</sub>	50-70	4,5	16,0	0,3	1,5	0,2	0,1	3,9	1,7	1,8	5,6	31	5	0,4	15,5
	Bt <sub>3</sub>	70-100+	3,9	22,0	0,6	1,7	0,2	0,1	4,2	2,0	2,1	6,2	32	5	0,4	16,9

Hor.: horizontes; Prof.: profundidade; SB: soma de bases; t: CTC efetiva; T: CTC potencial; V: saturação por bases; m: saturação por Al<sup>3+</sup>; MO: matéria orgânica.

Os teores de  $\text{Al}^{3+}$  não se encontram em níveis tóxicos para as plantas na grande maioria dos horizontes do PVA e PA, entretanto no PV, os teores excedem o limite tolerado pela grande maioria das plantas cultiváveis. Para corrigir o pH do solo, bem como a toxicidade do  $\text{Al}^{3+}$  para as plantas geralmente são recomendadas práticas como a calagem e gessagem, que auxiliam na correção da acidez e condicionamento do solo, respectivamente. Como a calagem age nos primeiros centímetros do solo, a gessagem é utilizada para carrear o  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  para maiores profundidades, onde reduzem a ação do  $\text{Al}^{3+}$  (MIGUEL et al., 2010).

À medida que o  $\text{Al}^{3+}$  na solução do solo se precipita, ele pode formar gibbsita. Esse processo pode ser mais ou menos intenso a depender da intensidade com que o intemperismo age no solo (ANDRADE et al., 2009). Quanto mais intenso, maior a quantidade de gibbsita na mineralogia desse solo bem como outros minerais mais resistentes ao intemperismo como o quartzo e óxidos de Fe.

O PVA e o PA apresentam maior teor de matéria orgânica (MO) em superfície, provavelmente pela biociclagem existente nessa área de floresta nativa, tendo também a SB e o P-Rem mais elevados em superfície. Tayeby et al. (2021), analisando variáveis que controlam os estoques de carbono ao longo do tempo e em profundidade através de algoritmos e imagens de satélite, também verificaram um comportamento semelhante com maiores teores de COS em superfície e verificaram que o uso do solo tem forte influência no estoque de carbono do solo.

Wang et al. (2017) avaliando o carbono orgânico do solo (COS) em um perfil de Alfisol, observou variações dentro do perfil, no caso por feições de bioturbação, segregando o COS pontualmente, acumulando em profundidade como crotovinas, que representaram um acréscimo de 8% no COS total do perfil de 4,5 m. Essa bioturbação aumentou o teor de COS em profundidade, nesse estudo não foram encontradas feições de bioturbação e nem o incremento de MO em profundidade no PVA e no PA, ao contrário do que foi notado para o PV, explicando seu considerável aumento de MO na profundidade de 85-112 cm.

Pode-se observar que os teores de P nos perfis analisados são bastante baixos, o que é comum em grande parte dos solos brasileiros sob vegetação nativa (Resende et al., 2021). Entretanto no P remanescente (P-Rem), verifica-se que o PVA, apresenta teores mais elevados acompanhando os teores de MO. Essa tendência foi verificada com os demais perfis onde menores teores de MO significam menos P disponível no solo. O P em solos tropicais tem a sua disponibilidade reduzida, ainda que alguns solos tenham altos teores deste

nutriente, pois fica fortemente aderido aos seus coloides do solo e só é liberado para as plantas quando complexado com a MO, já que ela é capaz de reduzir a sorção de P pelas argilas (FAGERIA, 2012).

O PVA e o PA foram os solos mais ricos em nutrientes comparados ao PV. No PV se observa que o teor de cátions básicos, como  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , são mais baixos que nos demais perfis. Isso demonstra a intensidade com que essas bases foram lixiviadas nesse perfil de solo diferentemente dos outros perfis analisados.

A soma de bases (SB) acompanha a disponibilidade dos nutrientes em cada solo, assim como os índices CTC efetiva (t) e potencial (T). A saturação por bases (V) para os perfis PVA e PA foi mais elevada no horizonte A que em profundidade. Isto se deve ao pH mais próximo de 6, pH em que a maioria dos nutrientes está disponível para serem absorvidos, e maior teor de MO em superfície. Esses atributos refletem o constante aporte de material vegetal em áreas sob floresta, havendo maior ciclagem de nutrientes em superfície que em profundidade (TAYEBY et al., 2021). No PV não foram encontrados padrões para a saturação de bases, provavelmente pelos baixos valores de pH e elevados de saturação por  $\text{Al}^{3+}$  (m) diferenciando este dos demais perfis. Esse resultado pode estar associado à sua posição na paisagem, terço superior, sendo mais intemperizado que os demais perfis.

### **3.2 Análises granulométricas e de susceptibilidade magnética (SM)**

Na Tabela 2 os horizontes superficiais e intermediários são aqueles que possuem maior teor de areia, o que é característico da classe dos Argissolos que são formados pela lessivagem, i.e., translocação de argila dos horizontes superficiais para os horizontes subsuperficiais, formando o Bt (KÄMPF; CURI, 2012).

**Tabela 2.** Resultados de análise granulométrica e de susceptibilidade magnética de amostras de PV, PVA e PA.

Solo	Horizonte	Profundidade	Argila	Silte	Areia	SM*
		-----cm-----	----- % -----			x 10 <sup>-7</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup>
PV	A	0-24	44	14	42	7,7
	AB	24-42	55	17	28	9,9
	Bt1	42-63	53	21	25	7,5
	Bt2	63-85	55	22	23	5,9
	BtC	85-112	41	29	30	4,6
PVA	A	0-20	36	14	50	5,3
	AB	20-40	52	6	42	4,6
	BA	40-60	48	10	42	3,9
	Bt <sub>1</sub>	60-80	64	12	24	3,3
	Bt <sub>2</sub>	80-100+	64	7	29	3,9
PA	A	0-10	43	7	50	8,5
	AB	10-30	45	6	49	5,5
	Bt <sub>1</sub>	30-50	58	10	32	3,8
	Bt <sub>2</sub>	50-70	60	8	32	2,9
	Bt <sub>3</sub>	70-100+	60	7	33	2,3

\*SM: susceptibilidade magnética.

Os Argissolos aqui estudados são derivados de gnaiss e se encontram em diferentes posições da paisagem e situações de drenagem. O gnaiss, quando submetido ao intenso intemperismo das regiões tropicais, possibilitou a formação de minerais secundários como a hematita e goethita. Estes minerais são conhecidos como antiferromagnéticos tornando a SM do solo baixa, já que eles possuem apenas momentos magnéticos (BUTLER, 1992). Lima et al. (2015) obtiveram sucesso no uso da SM encontrando valores maiores para solos derivados de rochas basálticas (Latosolos) e menores para aquelas derivadas de granito-gnaiss (Cambissolos e Argissolos). Neste mesmo trabalho os dados obtidos por SM associados aos de outros sensores auxiliaram na identificação dos locais onde ocorriam erosões hídricas pela remoção e acúmulo de materiais. Em todos os perfis foram encontrados maiores valores de SM em superfície e estes foram reduzindo com o aumento da profundidade dos horizontes. No PVA e PA, isso pode ser devido à deposição de sedimentos provenientes de outros solos derivados de rochas máficas com minerais magnéticos em sua constituição, tais como a magnetita e maghemita (DEARING, 1999), que são presentes na área de estudo (CURI et al., 2017). Foi observado nas análises com pXRF (Figura 3) que os teores de Fe tendem a ter um

decréscimo em profundidade, explicando em partes o porquê do magnetismo destes perfis também apresentar este comportamento.

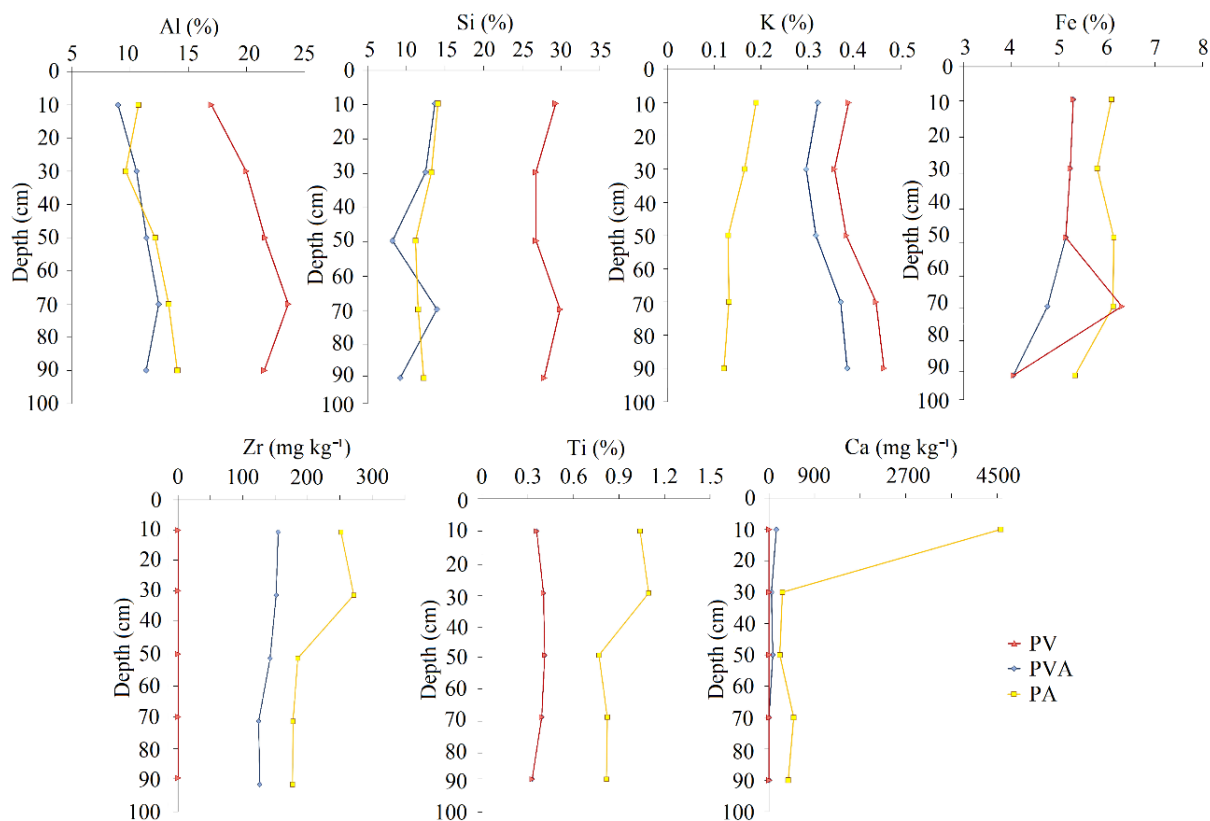
O PA se encontra na parte mais baixa da paisagem, possibilitando a deposição de sedimentos, e é aquele que possui o maior valor de SM em superfície (8.5), horizonte A (Tabela 2).

Já no PV o horizonte que teve maior valor para a SM foi o AB (9.9), e em superfície apresentou o segundo maior valor (7.7) em comparação com PVA e PA (Tabela 2). O magnetismo de solos desenvolvidos de minerais pouco magnéticos depende da composição, concentração e tamanho de grânulos dos minerais neoformados (MATHÉ et al., 2006). Como esse perfil se encontra numa área mais elevada que lhe permita melhor drenagem pode ter favorecido a formação de mais minerais magnéticos que nos outros dois perfis e com isso aumentando sua magnetização. Outra possibilidade é a hematita ter um momento magnético maior que o da goethita, já que o PV se mostrou mais intemperizado, tanto por sua posição mais elevada na paisagem quanto por sua melhor drenagem, podendo dessa forma possuir mais hematita. Além disso, pode se tratar de uma descontinuidade geológica do gnaiss do PV para o PVA e o PA, modificando sua composição mineralógica e elementar.

### **3.3 Análises com o pXRF**

Na Figura 3 pode-se observar que em geral os teores elementares totais são mais elevados para o PA em comparação ao perfil de PVA, com exceção do K que se mostrou mais elevado em PVA. Entretanto, este elemento não apresentou grandes modificações em profundidade em ambos os perfis, sendo presente em pequenos percentuais. Enquanto isso, no PV, teores totais de Al, Si e K são mais elevados que nos outros dois perfis. Solos mais intemperizados geralmente possuem maior teor de elementos menos móveis tais como o Al, Ti e Fe em relação ao teor de elementos com maior mobilidade (ex. Si, K e Ca), justamente pelos últimos serem lixiviados com maior facilidade (STOKMANN et al., 2016). Entretanto, o teor destes elementos será condicionado aos processos de formação predominantes e também a possíveis pequenas variações no material parental do solo.

**Figura 3.** Análise de teores elementares totais médios obtidos com o auxílio do pXRF para os perfis estudados de Argissolo Vermelho (PV), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA) e Argissolo Amarelo (PA), no município de Lavras, Minas Gerais, Brasil.



O Fe nos três perfis possui valores mais elevados em superfície que vão decaindo à medida que a profundidade aumenta, com suaves variações. Entretanto o PV a 70 cm tem um teor mais elevado do que os perfis de PVA e PA, provavelmente por sua melhor drenagem favorecer a formação de hematita em relação à goethita. Apesar de PV apresentar colorações mais vermelhas que os outros dois perfis não se observaram maiores teores de Fe como seria esperado. Nas análises de DRX verificou-se que o mineral pigmentante presente nesse solo é somente a hematita (Figura 7). Esse mineral é capaz de dar cores vermelhas ao solo mesmo quando em pequenas quantidades. Além disso o perfil possui uma boa drenagem fazendo com que a hematita fosse preservada da degradação pela água ou anoxia (KÄMPF; CURI, 2012). Já o PA teve grande parte da hematita reduzida, uma vez que possui drenagem deficiente, fazendo com que a goethita predomine como agente pigmentante do solo (ANDRADE et al., 2009), ou o pedoambiente favoreceu a formação de goethita em detrimento da hematita. E no PVA houve expressão de ambos os óxidos.



O material parental, clima, organismos, relevo e tempo de atuação dessas variáveis têm forte influência na formação e constituição do solo (JENNY, 1941). Simon et al. (2021) desenvolvendo um novo sistema de classificação de solos que englobe tanto aspectos geológicos quanto pedogênicos dão uma atenção especial ao material parental pela sua forte influência em características geoquímicas e físicas do solo. Aqui o gnaiss como material parental, proporcionou baixos teores totais médios de Ti, Zr e o Ca para o PV e PVA que se mantiveram praticamente inalterados ao longo do perfil, por ser pobre nesses elementos já que se trata de uma rocha félsica (KER et al, 2012; SANTOS et al., 2010).

O Ti e o Zr têm sido utilizados em estudos como marcadores de material de origem indicando, por exemplo, descontinuidades litológicas por conta de serem considerados imóveis no solo (STOCKMANN et al., 2016; MANCINI et al., 2021). Considerando essa afirmação vemos que tanto para o PV quanto para o PVA há uma uniformidade em profundidade considerando seus valores totais. Já o PA apresenta um teor mais alto destes elementos em superfície que em profundidade, o que pode indicar mudanças nesse material.

Para o PV observaram-se valores praticamente nulos de Zr e Ca, o último elemento teve comportamento semelhante para o PVA. Os teores elementares totais de Ti, por outro lado, coincidiram para os perfis de PV e PVA.

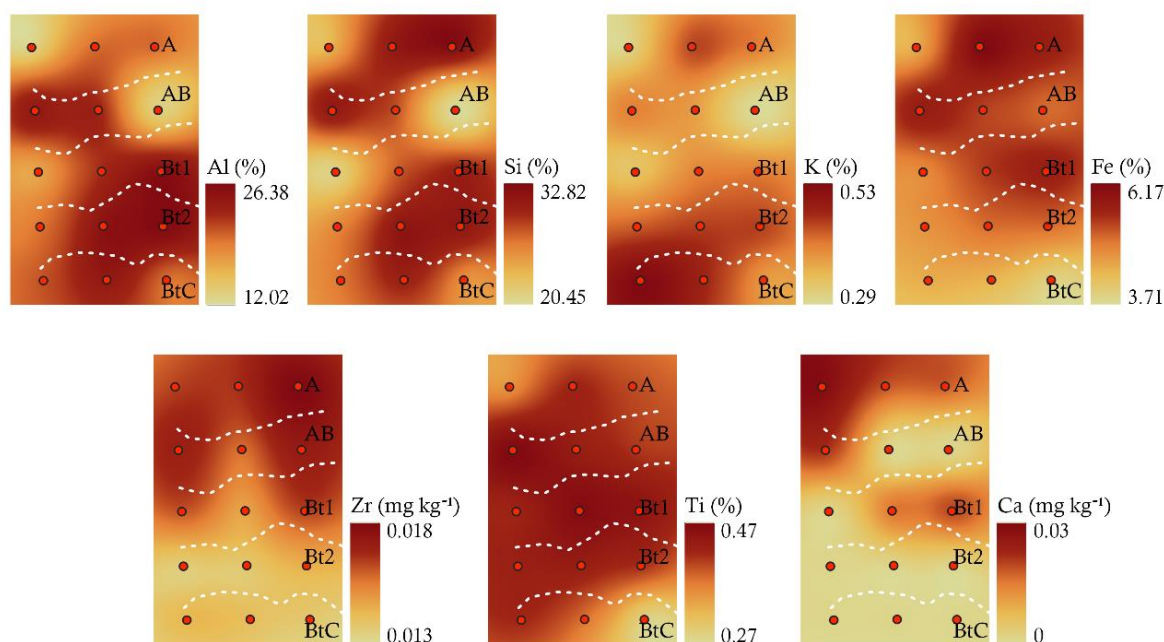
Os teores de Si, Zr e Ti tiveram comportamentos semelhantes para o PA, sendo praticamente estáveis até aproximadamente 30 cm, depois decaindo seus valores em profundidade. Grauer-Gray e Hartemink (2018) estudando três perfis de diferentes classes de solo, os Mollisols, Alfisols e Entisols também verificaram esta estabilidade do Si ao longo do perfil, havendo pequenos decréscimos com o aumento de profundidade principalmente nos solos predominantemente minerais. Já o Al possui uma tendência contrária com menores teores em superfície e maiores em subsuperfície, principalmente a partir de 50 cm de profundidade, tal fato ocorre devido ao processo de lessivagem já que o Al está presente em argilominerais e foi transportado juntamente com a argila do horizonte A para Bt.

Silva et al. (2020) verificaram que aqueles solos de seu estudo que apresentavam gnaiss como material parental possuíam mais  $\text{SiO}_2$  do que  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$  comparando com outros solos desenvolvidos de itabirito, basalto, gabro e tulfito. Nesse trabalho, o conteúdo total de Si também predominou em relação aos de Fe e Ti em solos derivados de gnaiss. Ao observar o comportamento do Si no PVA vê-se grande variação ao longo do perfil, reduzindo seu teor até 50 cm, para depois se elevar em 70 cm e novamente apresentar uma redução expressiva. Entretanto o elemento que teve a maior variação foi o Ca em PA, sendo muito

mais elevado nos horizontes superficiais que em profundidade, possivelmente à maior ciclagem de nutrientes.

Analisando-se a Figura 4, tem-se que os teores de Ca, K e Zr são muito baixos. Entretanto, sua distribuição ao longo do perfil é variada, a distribuição do Zr, por exemplo, é semelhante à observada do PVA (Figura 5) com concentrações maiores em superfície, com teores menores em profundidade. O Ca se concentra principalmente em superfície enquanto o K nas maiores profundidades aqui analisadas (80 a 100cm).

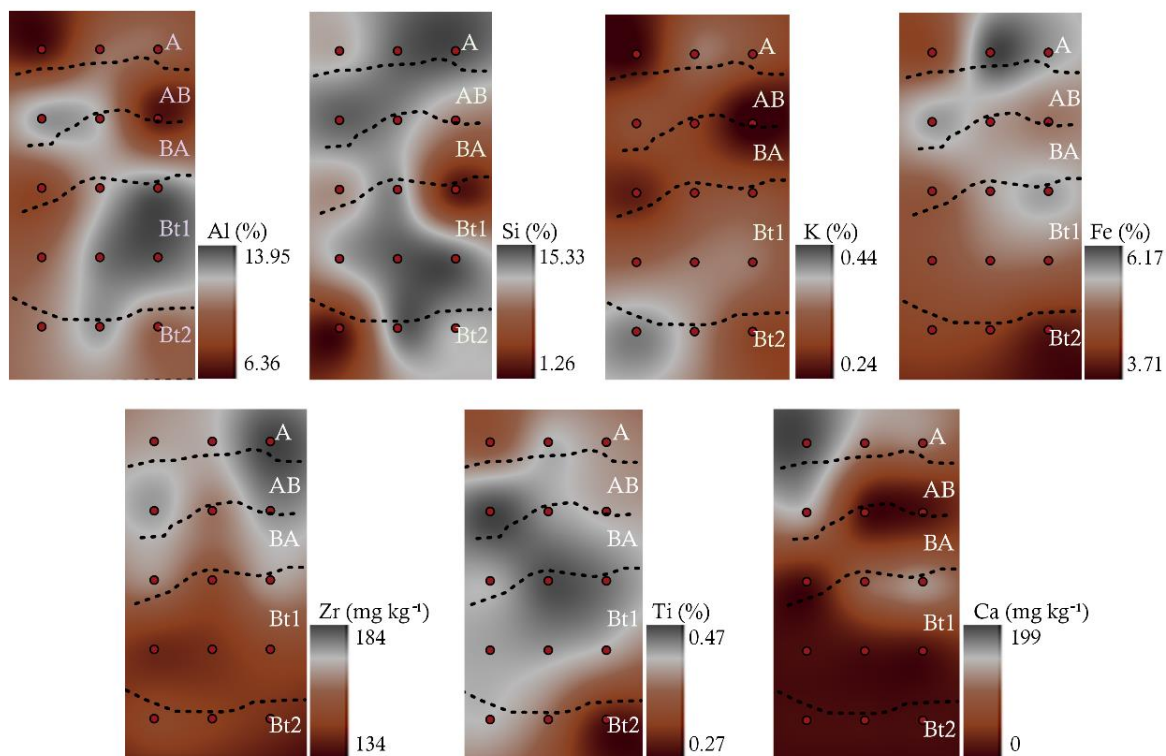
**Figura 4.** Análise espacial de teores elementares totais obtidos com o auxílio do pXRF no Argissolo Vermelho (PV), no município de Lavras, Minas Gerais, Brasil.



O Fe e o Si apresentam distribuições próximas principalmente em superfície, sendo mais abundantes nessa região, ocorrendo teores semelhantes em manchas no horizonte Bt e seus subhorizontes. O Al se concentra principalmente em profundidade acompanhando o comportamento do Si, provavelmente pela lessivagem que é o processo de formação desses solos, carregando esses elementos, presentes na caulinita, para horizontes subsuperficiais.

No PVA, o Ti tem suas maiores concentrações na parte central do perfil, muito semelhante ao que ocorre na Figura 5.

**Figura 5.** Análise espacial de teores elementares totais obtidos com o auxílio do pXRF no Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), no município de Lavras, Minas Gerais, Brasil.

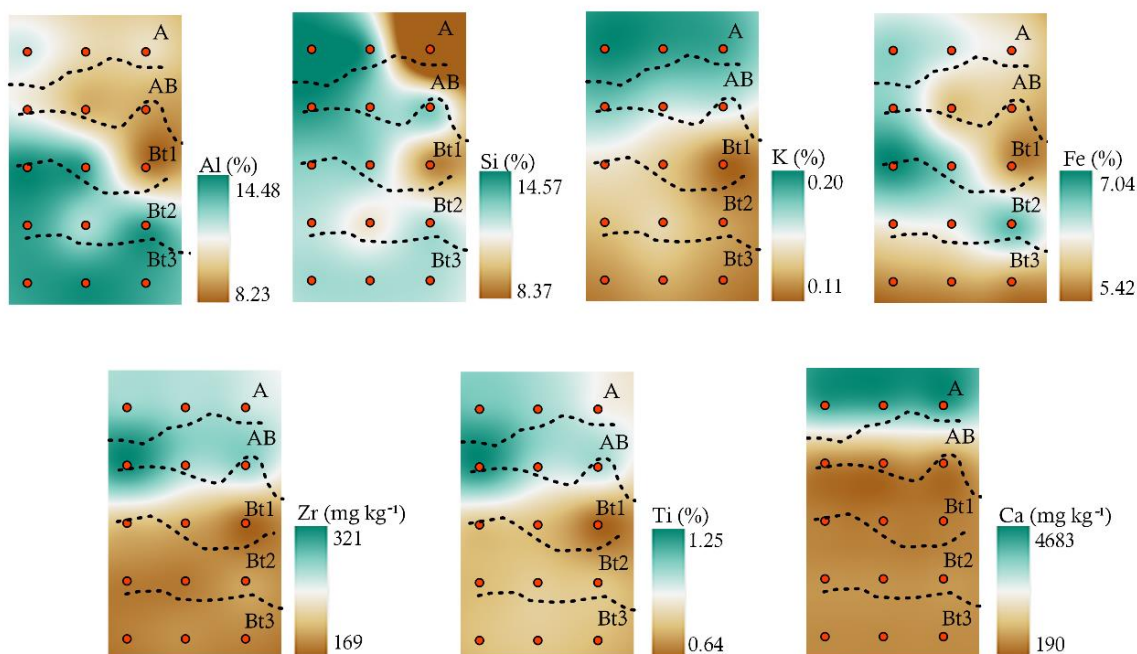


Na Figura 5, observa-se que Ca, Zr e Fe possuem maiores concentrações na superfície e menores em profundidade. Os teores mais elevados de Ti estão mais concentrados na poção média do perfil entre os horizontes AB e Bt1. O K concentrou-se nas maiores profundidades amostradas, e superficialmente apresentou teores mais baixos. O Si teve as maiores concentrações obtidas em superfície e na parte central do perfil, além disso uma grande variação no seu teor percentual de 1.23% a 15.33%. Isso se deve a textura mais arenosa nos horizontes superficiais (Tabela 2) composta basicamente por quartzo (Figura 8). Nos demais horizontes os teores de Si se devem à presença da caulinita que tem menos Si em sua constituição.

O Al apresentou-se em concentrações mais elevadas principalmente no horizonte Bt1 e parte do AB, também apresentando variações relevantes em concentração de 6.36% a 13.95%. Ainda que o pXRF leia teores totais, esse Al da matriz do solo pode ficar disponível caso haja redução do pH desse solo, por exemplo, a valores menores que 5 (MIGUEL et al., 2010). Essa heterogeneidade do perfil de solo mostra como este ecossistema é complexo e essas variações afetam os organismos presentes no solo, bem como os cultivos, mostrando a importância de se estudar as variações que ocorrem espacialmente e em profundidade.

Observando os mapas de teores elementares totais ao longo do perfil de PA (Figura 6), pode-se considerar que K, Zr, Ti e Ca apresentam maiores teores nos horizontes mais superficiais (A e AB), como já mostrado anteriormente na Figura 3. O Ca que se acumulou somente no horizonte A, devido à ciclagem de nutrientes pelas plantas. Já o Zr e o Ti tiveram maiores concentrações em superfície podendo indicar acúmulo de sedimentos de solos formados a partir de outros materiais de origem.

**Figura 6.** Análise espacial de teores elementares totais obtidos com o auxílio do pXRF no Argissolo Amarelo (PA), no município de Lavras, Minas Gerais, Brasil.

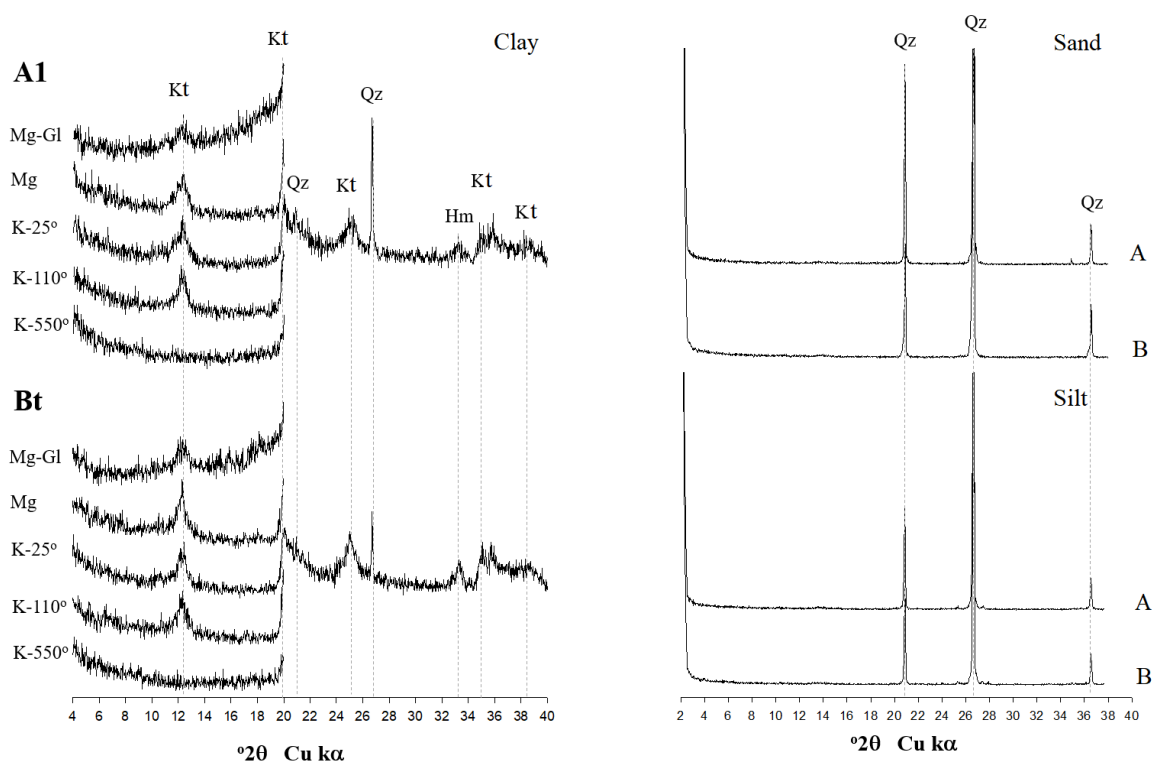


O Al, apesar de ser residual também, não apresenta o mesmo comportamento do Zr e Ti pela presença de altos teores de Ca. Assim, ele apresentou menores percentuais de conteúdo elementar nos horizontes superficiais A, AB e parte do Bt1. Enquanto isso aqueles elementos que mais variaram horizontalmente foram o Si e o Fe. O Si apresentou em geral valores intermediários de conteúdo elementar possuindo extremos em superfície, a direita os menores valores e a esquerda os maiores. O Fe teve seus menores valores em profundidade e ao lado direito do perfil.

### 3.4 Análises com o DRX

Ao observar a análise de DRX do PV (Figura 7) se observa que o quartzo, mineral contendo Si, está bem distribuído em todas as frações texturais e em ambos os horizontes amostrados.

**Figura 7.** Mineralogia das frações texturais obtida com o DRX no Argissolo Vermelho (PV), no município de Lavras, Minas Gerais, Brasil.

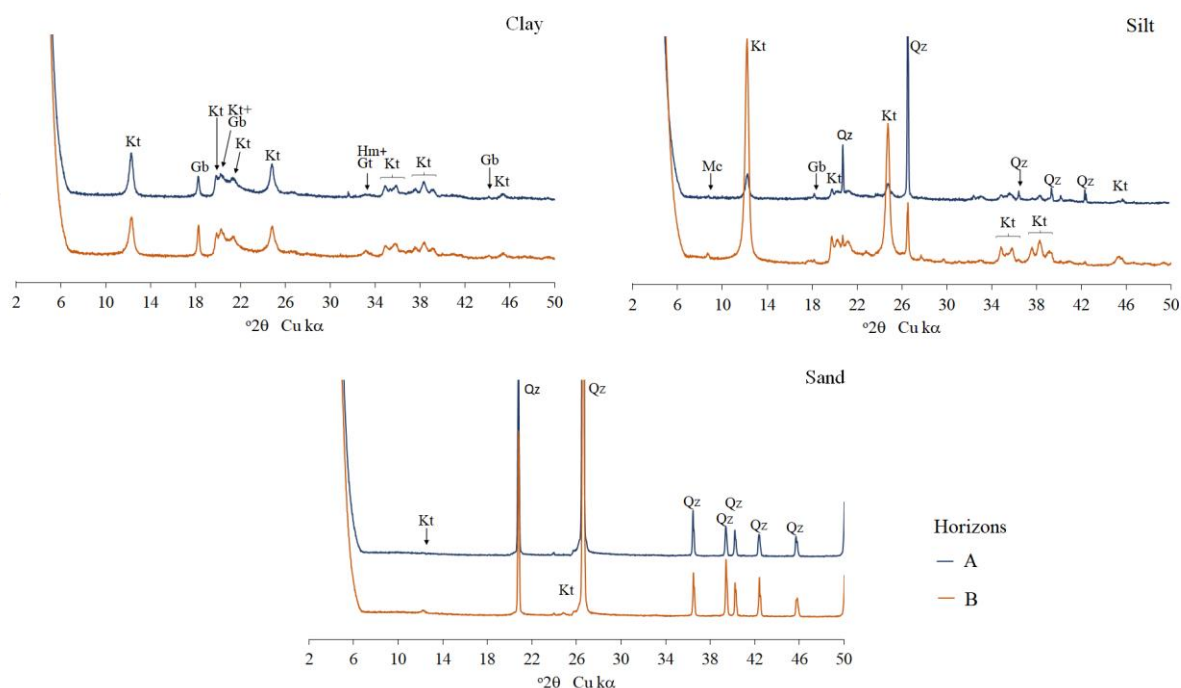


Nesse perfil de PV o agente pigmentante dominante é a hematita, que dá colorações avermelhadas ao solo, evidenciada com a análise de DRX. A caulinita se encontra presente somente na fração argila em ambos horizontes. Apesar do PV ser o mais intemperizado dos perfis estudados, a DRX não detectou a presença da gibbsita, o que é um indicativo da diferença da composição do gnaisse que compõe o PV em relação aos demais perfis. Mancini et al. (2021) encontraram também grandes variações na composição do gnaisse estudando um perfil de Latossolo de 4,5m, verificando laminações mais ricas em biotita, outras em muscovita, em uma localização próxima a hidrossequência de Argissolos aqui estudada.

É possível perceber que no PVA (Figura 8) na fração argila tanto do horizonte A como B há predomínio de caulinita e gibbsita, além disso, em menor teor, representado por menores picos na difração, detectaram-se óxidos de Fe, goethita e hematita, com picos um

pouco mais elevados, no horizonte B. Os óxidos de Fe juntamente com o quartzo são altamente resistentes ao intemperismo por isso são os minerais mais encontrados em solos tropicais altamente intemperizados como os do presente estudo (REZENDE, 1980; ANDRADE et al., 2009). A presença de óxidos de Fe que dá coloração ao perfil, nesse caso, a presença de cores Vermelho-Amarelas indica a presença destes óxidos, com predominância da goethita sobre a hematita (VISCARRA; ROSSEL, 2010).

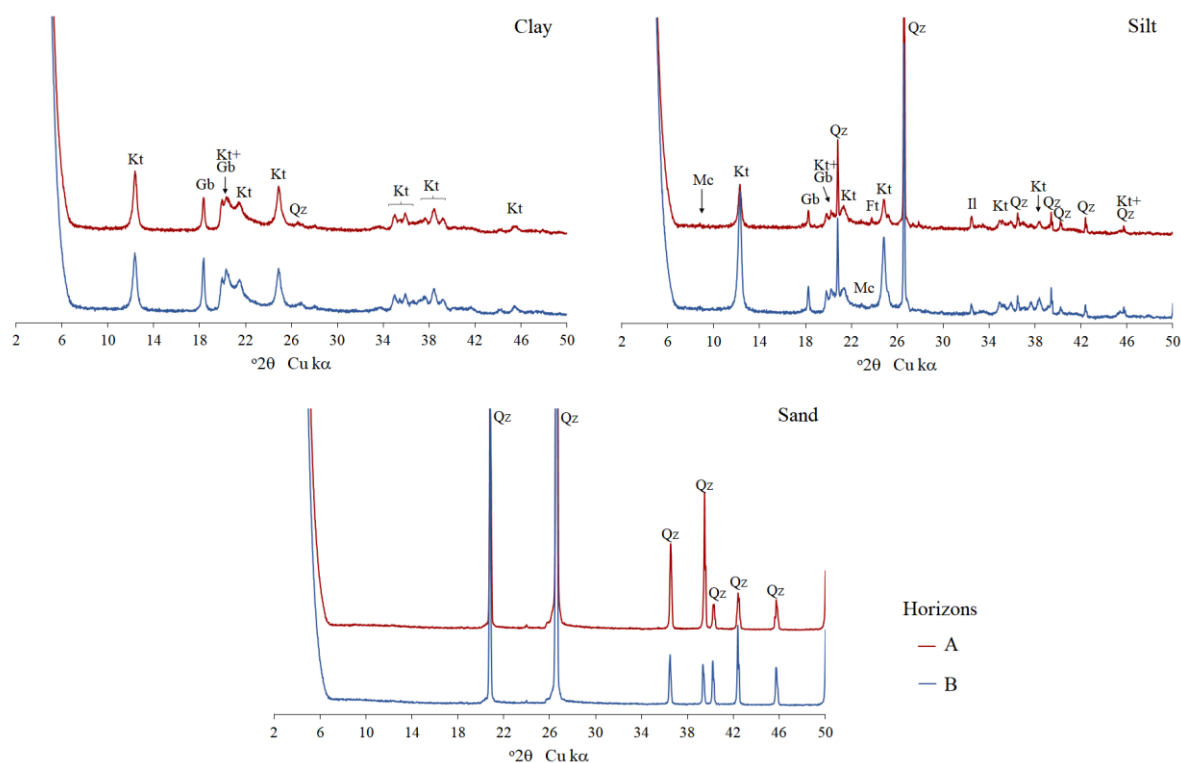
**Figura 8.** Mineralogia das frações texturais obtida com o DRX no Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), no município de Lavras, Minas Gerais, Brasil.



Já na fração silte os minerais encontrados em maior quantidade foram o quartzo, no horizonte A, e caulinita, gibbsita e mica. No horizonte B, há predomínio de caulinita. Já na fração areia há uma preponderância de quartzo nos dois horizontes, com pouca expressão da caulinita. A caulinita é formada a partir do intemperismo de outros minerais, como feldspatos (monossilização, relação Si:Al de 1:1). Entretanto, caso o solo passe por um processo mais intenso de remoção de Si (alitização ou ferralitização, remoção da sílica) óxidos e hidróxidos de Al e Fe estão entre os minerais que podem ser formados (KER et al., 2012). O clima da região onde se encontram esses Argissolos proporciona condições ideais para os dois tipos de intemperismo citados anteriormente, conforme já foi relatado em outros trabalhos como o de Becker et al. (2012).

Na fração argila do PA (Figura 9) é onde se encontram mais picos de caulinita. Observaram-se também picos de gibbsita e o quartzo, nesta mesma fração. Essa distribuição destes minerais se mante praticamente uniforme para os dois horizontes. Esse fato de na fração argila não terem sido encontrados óxidos de Fe não significa que eles não estão presentes nessa fração, mas sim que são quantidades limitadas, sendo que a sua detecção poderia ser possível com a utilização de pré-tratamentos que não foram utilizadas nestas análises. Entretanto, sabe-se que quando se trata de locais com drenagem limitada ocorre a redução/degradação da hematita restando apenas a goethita, que possui uma estrutura mais estável, conferindo uma coloração amarelada ao solo (REZENDE, 1980). Em situações em que ocorrem essa anoxia por longos períodos de tempo até a goethita é dissolvida por redução dando ao solo colorações acinzentadas como no caso dos Gleissolos (BARBOSA et al., 2019).

**Figura 9.** Mineralogia das frações texturais obtida com o DRX no Argissolo Amarelo (PA), no município de Lavras, Minas Gerais, Brasil.



Enquanto na fração silte vê-se a presença de diferentes minerais tais como mica, ilita, feldspato, quartzo e caulinita, sendo os dois últimos minerais os que ocorrem em maior quantidade. Nos dois horizontes essa ocorrência de minerais foi bastante semelhante talvez se

diferenciando pelo horizonte B haver mais picos de mica. A mica provavelmente é herdada do material parental, o gnaiss, enquanto a illita é gerada a partir da mica existente no solo (INDA et al., 2017). Geralmente na fração silte é onde se encontra a maioria dos minerais facilmente intemperizáveis em solos brasileiros mais intemperizados, como aqui ocorreu, podendo ser detectados a ocorrência de mica, illita e feldspatos. Silva et al. (2018) também encontraram maiores teores de minerais facilmente intemperizáveis nessa fração textural, estudando um Inceptisol derivado de filito. Quanto à fração areia vê-se somente a presença do quartzo em ambos horizontes, o que é comum em solos tropicais onde o intemperismo atua com maior intensidade lixiviando outros minerais menos resistentes a este processo (INDA et al., 2017).

Nas análises de DRX, os minerais que predominam em todos perfis são a caulinita e o quartzo, com presença de óxidos de Fe em diferentes proporções de acordo com o perfil.

#### **4 CONCLUSÕES**

Mesmo sendo perfis morfologicamente homogêneos, foi possível verificar diferenças ao longo dos perfis, dentro e entre horizontes, com auxílio dos sensores próximos. Os perfis se diferenciaram por sua cor, drenagem, mineralogia e dinâmica da distribuição elementar.

Apesar de serem derivados do gnaiss, a área parece ter uma descontinuidade litológica no PV em relação aos demais perfis. Assim, os gnaisses que deram origem a estes solos possuem composições distintas tanto mineralógicas quanto elementares. O PA pode ter sofrido deposição de sedimentos das áreas à montante pela sua composição elementar, susceptibilidade magnética e mineralogia terem sido diferentes daquelas presentes em seus horizontes subsuperficiais.

As análises espaciais do perfil, principalmente com dados do pXRF, mostraram que mesmo dentro de um mesmo horizonte morfologicamente homogêneo há grande variação na distribuição de alguns elementos tais como o Fe, Si e o Al.

#### **5 AGRADECIMENTOS**

Especialmente ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), juntamente com Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo



apoio financeiro que possibilitou a realização desta pesquisa, tanto pelas análises e materiais como pela bolsa de estudos.

## REFERÊNCIAS

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 1 dez. 2013. Schweizerbart. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 27-32, 2000.

ANDRADE, J.C.; AZEVEDO, A.C.; BIGHAM, J.M.; CASTILHOS, R.M.V.; COSTA, A.C.S.; CURI, N.; FABRIS, J.D.; KÄMPF, N.; MARQUES JÚNIOR, J.; MARQUES, J.J.; MELLO, J.W.V.; MELO, V.F.; PEREZ, D.V.; PINTO, L.F.S.; SCHAEFER, C.E.G.R.; STUCKI, J.W.; VIANA, J.H.M.; VIDAL-TORRADO, P.; WYPYCH, F.; ZANARDO, A.; **Química e Mineralogia do Solo: Parte 1 - Conceitos Básicos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. 695 p.

BARBOSA, G.S.; MALTONI, K.L.; PANOSSO, A.R. The colors of soil as a parameter to delimitate the environment of a Palm Swampy. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 39, n. 52021, p. 1-25, jan. 2019.

BECKER, E.L.S.; BURIOL, G.A.; STRECK, N.A. Clima e Intemperismo na Formação dos Solos do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, n. 1, p. 33-46, 7 jan. 2012.

BENEDET, L.; FARIA, W.M.; SILVA, S.H.G.; MANCINI, M. GUILHERME, L.R.G.; DEMATTÊ, J.A.M.; CURI, N. Soil subgroup prediction via portable X-ray fluorescence and visible near-infrared spectroscopy. **Geoderma**, v. 365, p. 1-10, abr. 2020. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114212>.

BRINDLEY, G.W., BROWN, G., 1980. **Crystal Structures of Clay Minerals and their X-ray Identification**, first ed. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, London.

BUTLER, R.F. **Paleomagnetism: magnetic domains to geologic terranes**. Portland: Blackwell Science Inc., 1992. 249 p.

CHAKRABORTY, S.; LI, B.; WEINDORF, D.C.; DEB, S.; ACREE, A.; DE, P.; PANDA, P. Use of portable X-ray fluorescence spectrometry for classifying soils from different land use land cover systems in India. **Geoderma**, v. 338, p. 5-13, mar. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.11.043>.

CURI, N., SILVA, E., GOMES, F.H., MENEZES, M.D., SILVA, S.H.G., TEIXEIRA, A.F. dos S., 2020. Mapeamento de solos, aptidão agrícola e taxa de adequação do uso das terras do município de Lavras (MG), 1st ed. Editora UFPA, Lavras.

CURI, N.; SILVA, S.H.G.; POGGERE, G.C.; MENEZES, M.D. de. **Mapeamento de solos e magnetismo no campus da UFLA como traçadores ambientais**. Lavras: UFLA, 2018. 147 p.

DANTAS, A.A.A.; CARVALHO, L.G. de; FERREIRA, E. Classificação e tendências climáticas em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 6, p. 1862-1866, dez. 2007. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-70542007000600039>.

DEARING, J. Environmental Magnetic Susceptibility. **Using the Bartington MS2 system**, 43 p., 1999.

DONAGEMA, G.K., CAMPOS, D.V.B., CALDERANO, S.B., TEIXEIRA, W.G., VIANA, J.H.M., 2011. **Manual de Métodos de Análise de Solo**, 2 ed. Embrapa Solos, Rio de Janeiro.

DUDA, Bogdan M.; WEINDORF, D.C.; CHAKRABORTY, S.; LI, B.; MAN, T.; PAULETTE, L.; DEB, S. Soil characterization across catenas via advanced proximal sensors. **Geoderma**, v. 298, p. 78-91, jul. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.03.017>.

FAGERIA, N.K. Role of Soil Organic Matter in Maintaining Sustainability of Cropping Systems. **Communications In Soil Science And Plant Analysis**, v. 43, n. 16, p. 2063-2113, set. 2012. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/00103624.2012.697234>.

FRANKS, M.; DUNCAN, E.; KING, K.; VÁZQUEZ-ORTEGA, A. Role of Fe- and Mn-(oxy)hydroxides on carbon and nutrient dynamics in agricultural soils: a chemical sequential extraction approach. **Chemical Geology**, v. 561, p. 120035, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.120035>.

GEE, G.W., BAUDER, J.W., 1986. Particle-size analysis. In: Klute, A. (Ed.), **Methods of Soil Analysis**. American Society of Agronomy, Madison, pp. 383–412.

GRAUER-GRAY, J.; HARTEMINK, A.E. Raster sampling of soil profiles. **Geoderma**, v. 318, p. 99-108, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.029>.

HARTEMINK, A.E.; MINASNY, B. Towards digital soil morphometrics. **Geoderma**, v. 230-231, p. 305-317, out. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.03.008>.

IBÁÑEZ-ASENSIO, S.; MARQUÉS-MATEU, A.; MORENO-RAMÓN, H.; BALASCH, S. Statistical relationships between soil colour and soil attributes in semiarid areas. **Biosystems Engineering**, v. 116, n. 2, p. 120-129, out. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.07.013>.

INDA JUNIOR, A.V.; BISSANI, C.A.; CERETTA, C.A.; COSTA, C. das N.; LIMA, C.V.S.; RHEINHEIMER, D.; MEURER, E.J.; KLAMT, E.; GIASSON, E.; CARMONA, F.C.; CAMARGO, F.A. de O.; ANGHINONI, I.; SILVA, L.S. da; VAHL, L.C.; NASCIMENTO, P.C. DO; SELBACH, P.A.; SOUSA, R.O. DE. S., ROSELE C. dos. **Fundamentos de Química do Solo**, 6ª ed. 2017. 270 p.

KÄMPF, N.; CURI, N. Formação e evolução do solo (pedogênese). In: KER, J.C.; CURI, N.; SCHAEFER, C.E.G.R.; VIDAL-TORRADO, P. (Eds.). **Pedologia: fundamentos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. p. 207-302.

KER, J.C.; ANJOS, L.H.C.; ARAÚJO FILHO, J.C.; CURI, N.; FONTES, M.P.F.; JACOMINE, P.K.T.; KÄMPF, N.; L.B. OLIVEIRA; MARQUES, J.J.; OLIVEIRA, J.B.; OLIVEIRA, V.A.; RESENDE, M.; RIBEIRO, M.R.; SANTOS, H.G.; **Pedologia: Fundamentos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. 343 p.

LEE, S.; WOLBERG, G.; SHIN, S.Y. (1997): **Scattered Data Interpolation with Multilevel B-Splines**. IEEE Transactions On Visualisation And Computer Graphics, v.3, n.3., p.228-244.

LIMA, T.M. de; WEINDORF, D.C.; CURI, N.; GUILHERME, L.R.G.; LANA, R.M.Q.; RIBEIRO, B.T. Elemental analysis of Cerrado agricultural soils via portable X-ray fluorescence spectrometry: Inferences for soil fertility assessment. **Geoderma**, v. 353, p. 264-272, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.06.045>.

MANCINI, M.; WEINDORF, D.C.; SILVA, S.H.G.; CHAKRABORTY, S.; TEIXEIRA, A.F. dos S.; GUILHERME, L.R.G.; CURI, N. Parent material distribution mapping from tropical soils data via machine learning and portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry in Brazil. **Geoderma**, v. 354, p. 113885, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113885>.

MANCINI, M.; SILVA, S.H.G.; HARTEMINK, A.E.; ZHANG, Y.; FARIA, Á.J.G. de; SILVA, F.M.; INDA, A.V.; DEMATTÊ, J.A.M.; CURI, N. Formation and variation of a 4.5 m deep Oxisol in southeastern Brazil. **Catena**, v. 206, p. 105492, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2021.105492>.

MATHÉ, V.; LÉVÊQUE, F.; MATHÉ, P.E.; CHEVALLIER, C.; PONS, Y. Soil anomaly mapping using a caesium magnetometer: limits in the low magnetic amplitude case. **Journal of Applied Geophysics**, v.58, p.202-217, 2006. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2005.06.004.

MCLEAN, E.O., HEDDLESON, M.R., BARTLETT, R.J., HOLOWAYCHUK, N., 1958. Aluminum in soils: I. Extraction methods and magnitudes in clays and Ohio soils 1. **Soil Science Society of America Journal**, J. v. 22, n. 5, p. 382–387. <https://doi.org/10.2136/sssaj1958.03615995002200050005x>.

MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH<sub>4</sub>**. North Carolina Soil Testing Division, Raleigh, NC. 1953.

MIGUEL, P.S.B.; GOMES, F.T.; ROCHA, W.S. D. da; MARTINS, C.E.; CARVALHO, C.A. de; OLIVEIRA, A.V. de. Efeitos tóxicos do alumínio no crescimento das plantas: mecanismos de tolerância, sintomas, efeitos fisiológicos, bioquímicos e controles genéticos. **CES Revista: Biologia**, Juíz de Fora, v. 24, n. 1, p. 12-30, 2010.

PEDROSA-SOARES A.C., DARDENNE M.A., HASUI Y., CASTRO F.D.C., CARVALHO M.V.A. **Nota Explicativa dos Mapas Geológico, Metalogenético e de Ocorrências Mineraiis do Estado de Minas Gerais**, escala 1:1.000.000. Belo Horizonte, COMIG, 97 p., 1994.

PEINADO, F.M., RUANO, S.M., GONZÁLEZ, M.G.B., MOLINA, C.E., 2010. A rapid field procedure for screening trace elements in polluted soil using portable X-ray fluorescence (PXRF). **Geoderma** 159, 76–82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.06.019>.

QGIS Development Team, 2021. **QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation. <https://qgis.org/en/site/>

RIBEIRO, B.T.; SILVA, S.H.G.; SILVA, E.A.; GUILHERME, L.R.G. Portable X-ray fluorescence (pXRF) applications in tropical Soil Science. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 41, n. 3, p. 245-254, jun. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1413-70542017413000117>.

REZENDE, S.B. Geomorphology, mineralogy and genesis of four soils on gneiss in southeastern Brazil. Purdue University (1980).

SANTOS, A.C.; ANJOS, L.H.C.; BERNINI, T.A.; COOPER, M.; FRANCELINO, M.R.; NUMMER, A.R.; PEREIRA, M.G. Gênese e classificação de solos numa topossequência no ambiente de mar de morros do médio vale do paraíba do sul, RJ. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 34, p.1297-1314, 2010.

SANTOS, H.G. dos; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C. dos; OLIVEIRA, V.A. de; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A. de; ARAÚJO FILHO, J.C. de; OLIVEIRA, J.B. de; CUNHA, T.J.F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2018. 531 p.

SHOEMAKER, H.E.; MCLEAN, E.O.; PRATT, P.F. Buffer Methods for Determining Lime Requirement of Soils With Appreciable Amounts of Extractable Aluminum. **Soil Science Society of America Journal**. Lafayette, p. 274-277. ago. 1961.

SILVA, E.A.; WEINDORF, D.C.; SILVA, S.H.G.; RIBEIRO, B.T.; POGGERE, G.C.; CARVALHO, T.S.; GONÇALVES, M.G.M.; GUILHERME, L.R.G.; CURI, N. Advances in Tropical Soil Characterization via Portable X-Ray Fluorescence Spectrometry. **Pedosphere**, v. 29, n. 4, p. 468-482, ago. 2019a. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1002-0160\(19\)60815-5](http://dx.doi.org/10.1016/s1002-0160(19)60815-5).

SILVA, F.M.; WEINDORF, D.C.; SILVA, S.H.G.; SILVA, E.A.; RIBEIRO, B.T.; GUILHERME, L.R.G.; CURI, N. Tropical Soil Toposequence Characterization via pXRF Spectrometry. **Soil Science Society of America Journal**, v. 83, n. 4, p. 1153-1166, jul. 2019b. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2018.12.0498>.

SILVA, S.H.G., POGGERE, G.C., MENEZES, M.D., CARVALHO, G.S., GUILHERME, L.R.G., CURI, N., 2016. Proximal sensing and digital terrain models applied to digital soil mapping and modeling of Brazilian Latosols (Oxisols). **Remote Sens**. 8, 614–635. <http://dx.doi.org/10.3390/rs8080614>.

SILVA, S.H.G.; HARTEMINK, A.E.; TEIXEIRA, A.F. dos S.; INDA, A.V.; GUILHERME, L.R.G.; CURI, N. Soil weathering analysis using a portable X-ray fluorescence (PXRF) spectrometer in an Inceptisol from the Brazilian Cerrado. **Applied Clay Science**, v. 162, p. 27-37, set. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2018.05.028>.

SILVA, S.H.G.; SILVA, E.A.; POGGERE, G.C.; PÁDUA JUNIOR, A.L.; GONÇALVES, M.G.M.; GUILHERME, L.R.G.; CURI, N. Modeling and prediction of sulfuric acid digestion analyses data from PXRF spectrometry in tropical soils. **Scientia Agricola**, v. 77, n. 4, p. 1-12, jan. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1678-992x-2018-0132>.

STOCKMANN, U.; CATTLE, S.R.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Utilizing portable X-ray fluorescence spectrometry for in-field investigation of pedogenesis. **Catena**, v. 139, p. 220-231, abr. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.01.007>.

SUN, F.; BAKR, N.; DANG, T.; PHAM, V.; WEINDORF, D. C.; JIANG, Z.; LI, H.; WANG, Q. Enhanced soil profile visualization using portable X-ray fluorescence (PXRF) spectrometry. **Geoderma**, v. 358, p. 1-11, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113997>.

SWANHART, S.; WEINDORF, D. C.; CHAKRABORTY, S.; BAKR, N.; ZHU, Y.; NELSON, C.; SHOOK, K.; ACREE, A. Soil Salinity Measurement Via Portable X-ray Fluorescence Spectrometry. **Soil Science**, v. 179, n. 9, p. 417-423, set. 2014. Ovid Technologies (Wolters Kluwer Health). <http://dx.doi.org/10.1097/ss.0000000000000088>.

TAYEBI, M.; ROSAS, J. T. F.; MENDES, W. de S.; POPPIEL, R. R.; OSTOVARI, Y.; RUIZ, L. F. C.; SANTOS, N. V. dos; CERRI, C. E. P.; SILVA, S. H. G.; CURI, N.; SILVERO, N. E. Q.; DEMATTÊ J. A. M. Drivers of Organic Carbon Stocks in Different LULC History and along Soil Depth for a 30 Years Image Time Series. **Remote Sensing**, v. 13, n. 11, p. 2223, 7 jun. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs13112223>.

TEIXEIRA, A.F. dos S.; SILVA, S.H.G.; WEINDORF, D.C.; CHAKRABORTY, S.; CARVALHO, T.S. de; SILVA, A.O.; GUIMARÃES, A.A.; MOREIRA, F.M. de S. Microbiological indicators of soil quality predicted via proximal and remote sensing. *European Journal of Soil Biology*, v. 104, p. 103315, abr. 2021.

VISCARRA ROSSEL, R.A.; BUI, E.N.; CARITAT, P. de; MCKENZIE, N.J. Mapping iron oxides and the color of Australian soil using visible–near-infrared reflectance spectra. **Journal Of Geophysical Research**, v. 115, p. F04031, 15 dez. 2010. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2009jf001645>.

WALKLEY, A.; I.A. BLACK. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Sci.** 37:29–38. doi:10.1097/00010694-193401000-00003.

WANG, Q.B.; HARTEMINK, A.E.; JIANG, Z.D.; JIN, N.X.; SUN, Z.X. Digital soil morphometrics of krotovinas in a deep Alfisol derived from loess in Shenyang, China. **Geoderma**, v. 301, p. 11-18, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.010>.

WEINDORF, D.C., BAKR, N., ZHU, Y., 2014. Advances in portable X-ray fluorescence (PXRF) for environmental, pedological, and agronomic applications. **Adv. Agron.** 128, 1–45. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-802139-2.00001-9>.

WEINDORF, D.C.; CHAKRABORTY, S. Portable X-ray Fluorescence Spectrometry Analysis of Soils. **Methods of Soil Analysis**, v. 1, n. 1, p. 1–8, 2016.