

## Minerais ferruginosos e fertilidade natural de solos magnéticos do Vale do Jequitinhonha, Minas Gerais, Brasil

Roberto Vial Costa<sup>1</sup>, Alexandre Christófaros Silva<sup>1</sup>, José Domingos Fabris<sup>1</sup>, Maurício Soares Barbosa<sup>1</sup>, Uidemar Moraes Barral<sup>1</sup>, Daniela Alves de Oliveira Vial<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, MG, Brasil. E-mail: robertovial@agronomo.eng.br (ORCID: 0000-0001-6324-4000); alexandre.christo@ufvjm.edu.br (ORCID: 0000-0003-0418-6175); jdfabris@gmail.com (ORCID: 0000-0002-2427-5995); mausbarbosa@yahoo.com.br (ORCID: 0000-0003-2182-5485); uidemamoraes@gmail.com (ORCID: 0000-0002-6876-2883)

<sup>2</sup> Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, SP, Brasil. E-mail: danialves82@gmail.com (ORCID: 0000-0002-4312-2337)

**RESUMO:** Este estudo teve como objetivo caracterizar as naturezas química e mineralógica de solos derivados de materiais de origem básicos e ácidos do Vale do Jequitinhonha, Minas Gerais, Brasil, com foco na ocorrência de minerais magnéticos e suas relações com a fertilidade natural. Foram descritos, classificados e amostrados Latossolos Vermelhos Distroférricos e Distróficos típicos; Nitossolo Vermelho Distroférrico típico e Chernossolo Argilúvico Órtico saprolítico. Foram realizadas análises granulométricas e determinados os teores de nutrientes vegetais no solo. Para o horizonte diagnóstico de cada perfil foram determinados os teores de ferro, alumínio e manganês pelo ataque sulfúrico de amostras residuais da extração com ditionito-citrato-bicarbonato e oxalato ácido de amônio. Os óxidos de ferro foram identificados por espectroscopia Mössbauer. Maghemita ( $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) foi encontrada em todos os solos e a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) foi identificada apenas no Chernossolo, podendo estar relacionada com o material de origem. Os solos com maiores teores de minerais ferrimagnéticos apresentaram maior fertilidade natural.

**Palavras-chave:** espectroscopia Mössbauer; nutrientes vegetais; óxidos de ferro

## Iron-bearing minerals and natural fertility of magnetic soils of Jequitinhonha Valley, Minas Gerais State, Brazil

**ABSTRACT:** This study aimed at characterizing the chemical and mineralogical nature of soils derived from basic and acidic bedrocks from the Jequitinhonha Valley, Minas Gerais State, Brazil, focusing on the occurrence of magnetic minerals and its relationship with the natural fertility. The following soils were described, classified and sampled, according to the USDA Soil Taxonomy nomenclature: Typic Haplustox, Rhodic Kandistox, Rhodic Haplustox and Typic Argiustoll. Granulometric analyzes and contents of macro and micronutrients were determined. In order to get more insights about each diagnostic soil horizon, the contents of the main metal cation oxides, specifically, iron, aluminum and manganese, were obtained by sulfuric acid digestion, and through their residual extractions with mixtures dithionite - citrate - bicarbonate and oxalate - oxalic acid. The samples were also analyzed by Mössbauer spectroscopy in an attempt to identify the main magnetic iron oxides. Maghemite ( $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) was found in all samples and magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) was identified only for the sample Typic Argiustoll. Soils with higher magnetizations were found to have higher natural fertility.

**Key words:** Mössbauer spectroscopy; vegetal nutrients; iron oxides

## Introdução

A Serra do Espinhaço Meridional (SdEM) ocupa, aproximadamente, 3,7 milhões de hectares. Nos seus 53 municípios, vivem, aproximadamente, 650 mil pessoas. A topografia da SdEM é predominantemente montanhosa e escarpada, onde afloram rochas quartzíticas, associadas a Neossolos, cascalhentos e arenosos. A população rural vive basicamente em áreas onde ocorrem Latossolos Vermelhos Distroféricos, que são magnéticos, originados de rochas básicas, e apresentam atributos químicos e físicos que permitem seu cultivo, tanto para subsistência como para exploração comercial.

O Alto Vale do Jequitinhonha (AVJ) faz limite com a SdEM e estende-se por cerca de 2 milhões de hectares, onde vivem cerca de 275 mil habitantes, divididos em 20 municípios, dos quais por volta de 105 mil habitantes vivem na zona rural (Brasil, 2015). O relevo do AVJ é formado por chapadas, áreas planas ou suavemente onduladas, com altitudes médias em torno de 900 m, que se alternam com áreas dissecadas pelo rio Jequitinhonha e seus afluentes; onde predominam vertentes ravinadas e colinas. A população rural do AVJ vive nas áreas dissecadas, basicamente da agricultura familiar, onde ocorrem solos originados de rochas básicas como Nitossolos Vermelhos Distroféricos e Eutroféricos e Chernossolos, que apresentam elevado potencial produtivo (Almeida-Abreu & Renger, 2002). Nas chapadas, ocorrem Latossolos Distróficos originados de rochas ácidas, que são comercialmente explorados com a eucaliptocultura, cafeicultura e pecuária de corte, em sistemas agrícolas tecnificados conduzidos por grandes e médias empresas.

Solos magnéticos possuem magnetização de saturação maior que  $1 \text{ JT}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ . Têm, comumente, proporções relativamente elevadas de óxidos de ferro, sobretudo os com estrutura ferrimagnética, como maghemita ( $\gamma\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e são identificados pela resposta da massa do solo ao campo magnético, por aderência imediata de partículas minerais a um ímã de mão (Fabris et al., 1998).

Apresentam grande potencial agrícola e apresentam boa resposta às adubações. A razão desse comportamento diferenciado ainda não é completamente conhecida, mas supõe-se que o alto teor relativo de micronutrientes contribua para absorção e metabolismo de outros nutrientes pela planta e que a mineralogia desses solos (ricos em óxidos de ferro de alta magnetização) favoreça a dinâmica de nutrientes, na relação solo-planta, por razões de termodinâmica de superfície (Reis et al., 1995).

Hipoteticamente, a caracterização e a quantificação dos óxidos de ferro de solos derivados de rochas básicas e ácidas do vale do Jequitinhonha e de suas características estruturais magnéticas estão relacionadas com a fertilidade natural e com seu potencial produtivo. Este trabalho teve como objetivo caracterizar quimicamente solos derivados de rochas básicas e ácidas do Vale do Jequitinhonha, Minas Gerais, Brasil, enfatizando suas propriedades estruturais magnéticas e suas relações com a fertilidade natural desses pedoambientes.

## Material e Métodos

### Caracterização da região dos estudos

Os solos estudados estão localizados na Serra do Espinhaço Meridional (SdEM), nas chapadas e em vales do Alto Vale do Jequitinhonha (AVJ). A SdEM e o AVJ compõem o Território Alto Jequitinhonha, em Minas Gerais.

O geossistema denominado SdEM corresponde a um conjunto maciço de relevos estruturais dobrados, quebrados e desnivelados em falhamentos, elaborados em quartzitos ortoquartzíticos e quartzitos conglomeráticos, com intercalações lenticulares de filitos e xistos do Supergrupo Espinhaço. As rochas quartzíticas são cortadas por rochas ígneas básicas, com magnetismo, de eventos datados em  $902 \pm 2$  milhões de anos (Almeida-Abreu & Renger, 2002). De acordo com Dussin & Dussin (1995), a região de Serra Azul de Minas, borda leste da SdEM, apresenta grau de metamorfismo das rochas elevado (fáceis anfibolito superior) e foi acompanhado de migmatização e granitização, no embasamento do craton e da faixa de dobramentos brasileiros.

No AVJ, embasado por litologias do Grupo Macaúbas, encontram-se áreas aplainadas denominadas “Chapadas”, apresentando declividades em seu conjunto sempre inferiores a 10% e altitudes médias em torno de 900 m, separadas por vales dissecados. A Formação Planalto de Minas, do grupo Macaúbas, é composta principalmente por xistos verdes (metabasaltos) e aflora, particularmente, na região dos distritos de Planalto de Minas e Desembargador Otoni, município de Diamantina, e no município de Carbonita (Gradim et al., 2005).

O clima da SdEM é predominantemente mesotérmico, Cwb na classificação Köppen, com precipitação média anual entre de 1.250 e 1.550 mm e a temperatura média anual entre 18 e 19 °C. De acordo com Vilhena et al. (2010) o clima do AVJ é predominantemente Aw, a precipitação oscila entre 600 a 1.200 mm, e a temperatura média anual entre 21 e 24 °C.

A cobertura vegetal da SdEM e no AVJ faz parte do bioma Cerrado. Na SdEM destacam-se as fitofisionomias rupestres (Silva et al., 2005) e no AVJ podem ser encontrados fragmentos de floresta estacional semidecidual nas bordas das Chapadas (Bispo et al., 2011).

### Trabalhos de campo

Foram selecionados, em função do material de origem e estágio de evolução, sete perfis de solo (Figura 1), que foram descritos morfologicamente, amostrados para realização de análises físicas e químicas e classificados de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (Embrapa, 2013). Foram classificados como Latossolo Vermelho Distrófico típico – LVd1, textura argilosa, derivado de material de origem formado por rochas básicas e ácidas, situado em área de relevo ondulado, colonizado por vegetação de cerrado, (coordenadas UTM 662905E 8000597S, altitude 736 m); Nitossolo Vermelho Distrófico típico - NVdf, textura

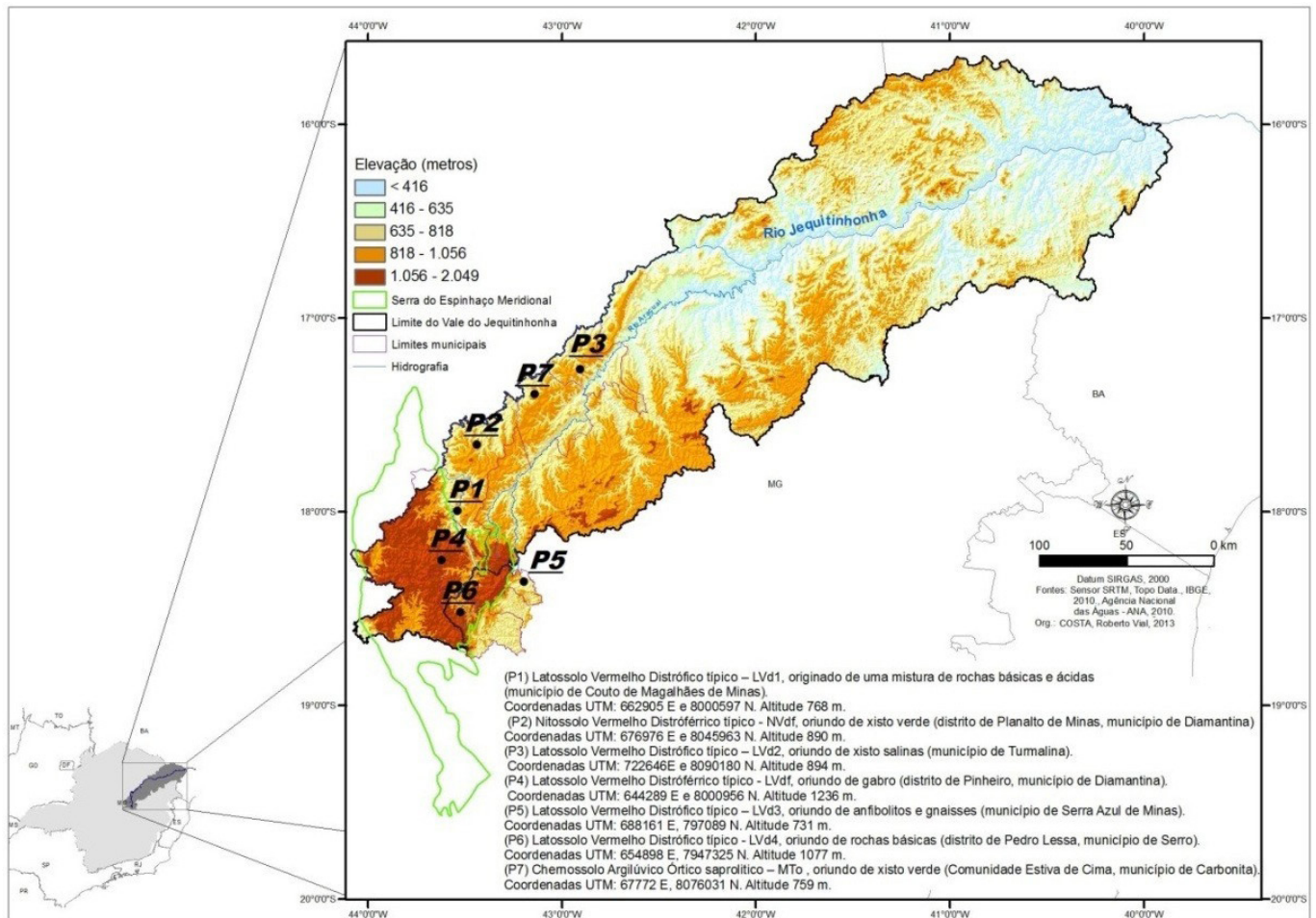
argilosa, oriundo de xisto verde situado em área de relevo suave ondulado, colonizado por vegetação de cerrado (676976E 8045963S, 750 m); Latossolo Vermelho Distrófico típico – LVd2, textura muito argilosa, oriundo de xisto salinas, situado em área de relevo plano, colonizado por vegetação de cerrado (0722646E 8090180S, 894 m); Latossolo Vermelho Distrófico típico - LVdf, textura argilosa, oriundo de gabro, situado em área de relevo ondulado, colonizado por vegetação de floresta estacional semi-decidual (644289E 8000956S, 1052 m); Latossolo Vermelho Distrófico típico – LVd3, textura muito argilosa, derivado de material de origem formado por anfibólitos e gnaisses, situado em área de relevo suave ondulado, colonizado por vegetação de floresta estacional semi-decidual (0688161E 797089S, 745 m); Latossolo Vermelho Distrófico típico - LVd4, textura argilosa, oriundo de gabro, colonizado por vegetação de floresta estacional semi-decidual (0654898E 7947325S, 1124 m); Chernossolo Argilúvico Órtico saprolítico – MTo, textura média/argilosa, situado em área de relevo ondulado/forte ondulado, colonizado por vegetação de cerrado, oriundo de xisto verde (0697715E 8075961S, 746 m).

### Trabalhos de laboratório

Foram realizadas análises granulométricas e químicas de rotina (pH em água, matéria orgânica, P disponível,

$\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{H} + \text{Al}$ ) e determinação dos teores de micronutrientes em todos os horizontes dos sete perfis de solo. A granulometria foi determinada pelo método da pipeta, com tamização da fração areia (Embrapa, 2011). As análises químicas de rotina e a determinação dos teores dos micronutrientes Cu, Zn, Fe, Mn e B foram realizadas de acordo com as metodologias citadas em Embrapa (2011).

Os óxidos cristalinos e as formas de baixa cristalinidade (“amorfos”) de Fe, Al e Mn foram extraídos de amostras do horizonte diagnóstico de cada solo. Utilizou-se a mistura ditionito - citrato - bicarbonato (DCB) de sódio 0,3 mol L<sup>-1</sup> na proporção de 1:40, permanecendo em banho maria a 75 °C sob agitação constante por 15 min, sendo, em seguida, centrifugado a 2.500 rpm por 15 min (Embrapa, 2011). A outra extração foi realizada com oxalato ácido de amônio (OAA) 0,2 mol L<sup>-1</sup> a pH 3,0 na proporção de 1:40, com agitação por 4 h na ausência de luz e centrifugação a 2.500 rpm por 15 min (Schwertmann & Taylor, 1977). A partir dos extratos DCB e OAA foram quantificados os teores de Fe, Al e Mn por espectrofotometria de absorção atômica (EAA). Os teores totais dos óxidos de Fe, Al, Ti, Mn e Si foram determinados após o tratamento de amostras do horizonte diagnóstico de cada solo com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1:1 v:v (ataque sulfúrico), conforme Embrapa (2011). A partir dos teores de óxidos obtidos pelo ataque em ácido sulfúrico foram calculadas as relações



**Figura 1.** Localização dos perfis estudados no Vale Jequitinhonha.

moleculares  $K_i$  ( $\% \text{SiO}_2 \times 1,697 / (\% \text{Al}_2\text{O}_3)$ ) e  $K_r$  ( $\% \text{SiO}_2 \times 1,697 / [(\% \text{Al}_2\text{O}_3) + (\% \text{Fe}_2\text{O}_3 \times 0,64)]$ ).

### Espectroscopia Mössbauer

Em amostras do horizonte diagnóstico de cada solo, a estrutura hiperfina do  $^{57}\text{Fe}$  relativa aos minerais ferruginosos, particularmente dos óxidos de ferro, foi analisada por espectroscopia Mössbauer, na temperatura do ambiente ( $\sim 298 \text{ K}$ ). Os espectros Mössbauer das amostras foram obtidos em modo de transmissão, com variação da velocidade Doppler em regime de aceleração constante da fonte  $^{57}\text{Co}$  em uma matriz de Rh (Fabris et al., 2009). Todos os espectros foram registrados em uma unidade de memória 512 canais MCS com velocidade Doppler na faixa aproximada entre  $\pm 10$  e  $\pm 12 \text{ mm s}^{-1}$ , calibrado com um absorvedor de Fe metálico (folha de  $\alpha\text{Fe}$ ). As amostras foram acondicionadas em pastilhas de acrílico (porta amostra), sendo que as amostras com altos teores de Fe foram dispersas em sacarose, para obter aproximadamente 10 mg de Fe por  $\text{cm}^{-2}$ . Os dados foram ajustados numericamente com a função Lorentziana pelo método dos mínimos quadrados utilizando um programa de computador de ajuste WinNormos-for-Igor®.

### Análises estatísticas

As relações entre os teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  do ataque sulfúrico, teores de Fe extraídos com OAA e DCB, teores de ferro dos espinélios de Fe encontrados por espectroscopia Mössbauer e os atributos químicos e teores de micronutrientes dos solos estudados foram calculadas pelas matrizes de coeficientes de correlação linear de Pearson ( $r$ ).

## Resultados e Discussão

Os resultados da análise granulométrica dos solos estudados encontram-se na Tabela 1. Quanto à composição granulométrica, a fração argila é predominante em quase todos os solos estudados, com teores variando de 290 a 790  $\text{g kg}^{-1}$ . Assim, os solos enquadram-se nas classes texturais muito argilosa, argilosa e média (horizontes A e B) e siltosa (horizonte C), conforme o SiBCS (Embrapa, 2013).

Os menores teores da fração areia foram encontrados para LVdf, LVd2 e MTo, enquanto que os maiores teores de silte foram encontrados nos perfis do MTo (Tabela 1), característica comumente encontrada nessa classe de solos (Troeh & Thompson, 2007). Os latossolos e o nitossolo apresentaram baixa e o chernossolo elevada relação silte/argila.

Os valores de P foram de muito baixos a baixos, segundo os critérios da CFSEMG (1999), em todos os horizontes de todos os solos, exceto no horizonte BA do MTo (Tabela 2). O P é fixado pelos sesquióxidos de Fe e de Al, o que impede sua liberação para a solução do solo. O teor elevado de P no horizonte BA do MTo pode ser resultado de um perfil originado rocha formada por minerais ricos em P (Chaves & Vasconcelos, 2006).

**Tabela 1.** Granulometria de solos do Alto Vale do Jequitinhonha e Serra do Espinhaço Meridional.

Horizonte	Profundidade m	Areia	Silte	Argila	Relação silte/argila
		g $\text{kg}^{-1}$			
P1 - Latossolo Vermelho Distrófico típico - LVd1					
A	0,00 - 0,32	430	200	370	0,54
AB	0,32 - 0,53	430	140	430	0,32
BA	0,53 - 0,78	450	130	420	0,39
Bw	0,78 - 1,20+	430	150	420	0,35
P2 - Nitossolo Vermelho Distroférico típico - NVdf					
A	0,00 - 0,27	150	310	540	0,57
AB	0,27 - 0,57	130	310	560	0,55
B nítico <sub>1</sub>	0,57 - 0,94	110	360	520	0,69
B nítico <sub>2</sub>	0,94 - 1,30+	130	210	660	0,31
P3 - Latossolo Vermelho Distrófico típico - LVd2					
A	0,00 - 0,23	100	170	730	0,23
AB	0,23 - 0,41	100	200	710	0,28
BA	0,41 - 0,74	90	160	750	0,21
Bw	0,74 - 2,0+	90	120	790	0,15
P4 - Latossolo Vermelho Distroférico típico - LVdf					
A	0,00 - 0,26	230	270	500	0,54
AB	0,26 - 0,47	200	230	570	0,40
BA	0,47 - 0,80	190	220	590	0,37
Bw	0,80 - 1,50+	180	280	540	0,51
P5 - Latossolo Vermelho Distrófico típico - LVd3					
A	0,00 - 0,17	280	100	620	0,16
AB	0,17 - 0,28	300	150	550	0,27
BA	0,28 - 0,40	240	160	590	0,27
Bw <sub>1</sub>	0,40 - 0,86	280	40	680	0,05
Bw <sub>2</sub>	0,86 - 1,50+	300	40	660	0,06
P6 - Latossolo Vermelho Distrófico típico - LVd4					
O	0,10 - 0,00	-	-	-	-
A	0,00 - 0,30	400	120	480	0,25
AB	0,30 - 0,63	420	120	460	0,26
Bw <sub>1</sub>	0,63 - 1,18	430	90	480	0,18
Bw <sub>2</sub>	1,18 - 2,00	430	110	460	0,23
CB	2,00 - 4,00+	390	120	490	0,24
P7 - Chernossolo Argilúvico Órtico saprolítico - MTo					
A	0,00 - 0,19	200	480	330	1,45
BA	0,19 - 0,34	110	420	470	0,89
Bt	0,34 - 0,58	140	430	430	1,00
BC	0,58 - 0,74	140	570	290	1,96
CR	0,74 - 0,90+	200	490	310	1,58

Todos os latossolos apresentaram baixos teores de Ca e Mg, segundo os critérios da CFSEMG (1999). O NVdf e o MTo apresentaram os maiores teores de Ca e Mg e no MTo os teores foram muito elevados, segundo os critérios da CFSEMG (1999) (Tabela 2). Os valores de soma de bases (SB), de CTC e dos teores de matéria orgânica decresceram com a profundidade em todos os solos, com exceção do MTo. Em todos os latossolos e no nitossolo a CTC foi maior na superfície, devido aos maiores teores de matéria orgânica (Tabela 2). A CTC do MTo foi muito elevada e pode estar relacionada com a presença de argilas do tipo 2:1 (Silva et al., 2017).

A saturação por bases apresentou tendência de ser mais elevada em solos originados de rochas básicas de ser mais baixa em solos originados de rochas ácidas. Os latossolos apresentaram os menores valores de

**Tabela 2.** Atributos químicos de solos do Vale do Jequitinhonha.

Hor.	M.O. dag kg <sup>-1</sup>	pH H <sub>2</sub> O (1:1)	P disp mg kg <sup>-1</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>						m %	V	
				K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H + Al <sup>+</sup>	SB			T
LVd1												
A	1,4	5,6	1,2	0,1	2,6	1,3	0,5	4,2	4,0	8,7	11	46
AB	0,5	5,2	0,4	0,01	2,0	1,6	0,4	1,5	3,6	5,5	10	66
BA	0,5	5,1	0,5	0,05	1,6	1,1	0,6	4	2,7	7,3	18	37
Bw	0,5	5,1	0,2	0,04	2,0	1,8	0,7	4,5	3,8	9,0	15	42
NVdf												
A	1,2	5,3	1,9	0,06	4,3	2,5	0,3	4,9	6,9	12,1	4	57
AB	1,3	5,5	2,1	0,04	2,7	2,4	0,6	2,1	5,1	7,8	10	66
B nítico <sub>1</sub>	1,1	5,6	0,3	0,52	2,7	1,9	1,1	4,7	5,1	10,9	18	47
B nítico <sub>2</sub>	0,7	5,8	0,3	0,02	2,7	1,9	0,6	5,2	4,6	10,4	11	44
LVd2												
A	3,7	4,5	1	0,05	1,8	1,3	2	9,4	3,2	14,6	39	22
AB	1,3	5,1	0,1	0,01	1,6	1,2	1,3	4,5	2,8	8,6	32	33
BA	0,7	4,6	2,7	0,02	1,8	0,5	0,5	4,7	2,3	7,5	18	31
Bw	0,5	5,0	0,1	0,01	1,7	1,8	0,1	4,6	3,5	8,2	3	43
LVdf												
A	1,1	5,1	1,88	0,07	0,18	0,1	0,93	5,57	0,36	6,86	72	5
AB	0,5	5,3	1,25	0,02	0,08	0,04	0,36	3,84	0,14	4,34	72	3
BA	0,1	5,4	1,96	0,01	0,12	0,08	0,09	2,61	0,21	2,91	30	7
Bw	2,8	5,5	3,22	0,01	0,09	0,03	0,03	1,87	0,12	2,02	19	6
LVd3												
A	4,1	5,1	1,87	0,1	0,4	0,2	1,6	11,1	0,71	13,41	69	5
AB	3,4	5,3	0,89	0,06	0,2	0,2	0,94	8,16	0,46	9,56	67	5
BA	3,0	5,3	0,77	0,04	0,2	0,1	0,74	8,36	0,34	9,44	68	4
Bw <sub>1</sub>	1,9	5,4	0,64	0,06	0,2	0,1	0,56	6,74	0,32	7,62	64	4
Bw <sub>2</sub>	0,9	5,0	1,06	0,01	0,3	0,1	0,38	4,82	0,41	5,61	65	7
LVd4												
A	3,0	5,0	0,72	0,04	0,3	0,2	1,06	9,14	0,54	10,74	66	5
AB	2,1	5,6	0,38	0,01	0,6	0,1	0,44	5,36	0,71	6,51	38	11
Bw <sub>1</sub>	1,0	5,6	0,43	0,01	0,1	0,1	0,08	4,12	0,21	4,41	28	5
Bw <sub>2</sub>	0,7	5,9	0,34	0,01	0,1	0,1	0,02	2,08	0,21	2,31	9	9
CB	1,0	5,6	0,51	0,01	0,2	0,2	0,24	1,26	0,41	1,91	37	21
MTo												
A	1,9	6,1	1,02	0,23	21,2	7,7	0,04	5,2	29,14	34,34	0	85
BA	0,7	6,4	5,62	0,15	21,2	6,3	0,04	3,7	27,66	31,36	0	88
Bt	0,2	6,4	0,34	0,15	20,9	7,2	0,04	3,3	28,25	31,55	0	90
BC	0,1	6,8	0,43	0,15	23,3	6,4	0,06	2,7	29,86	32,56	0	92
CR	0,1	6,7	0,21	0,05	20,8	8,8	0,28	2,4	29,65	32,05	1	93

M.O. Matéria orgânica; SB= soma de bases; T= CTC; m= saturação por alumínio; V= saturação por bases.

saturação por bases (Tabela 2). Bispo et al. (2011) obtiveram valores semelhantes em latossolos do Vale do Jequitinhonha. O MTo apresentou saturação por bases elevada, atingindo 93%. Os altos teores de Ca e Mg elevaram a saturação por bases do MTo (Novais et al., 2007). A saturação por alumínio foi mais elevada nas camadas superficiais, onde se concentra a matéria orgânica dos perfis (Tabela 2) corroborando com os resultados encontrados por Inda Junior et al. (2007).

Os solos apresentaram baixos teores de B (CFSEMG, 1999), em geral ainda menores nos horizontes subsuperficiais (Tabela 3). A maior parte do B disponível no solo está associada com a matéria orgânica (Malavolta, 1981). Minerais de argila e óxidos de Fe também são responsáveis por altas concentrações de B no solo (Shorrocks, 1997), corroborando os resultados encontrados nesse estudo para o LVdf.

O LVd2, oriundo do xisto Salinas, apresentou os menores valores de Cu<sup>2+</sup> (Tabela 3). Os maiores teores de Cu<sup>2+</sup> foram

encontrados no LVdf (Tabela 3) e podem estar associados ao gabro, uma rocha ígnea básica (Novais et al., 2007). O NVdf e o MTo também apresentaram teores de Cu<sup>2+</sup> mais elevados que os demais latossolos, que pode ser oriundo do xisto verde. Biondi et al (2011) encontraram teores de Cu<sup>2+</sup> bem mais baixos em chernossolos, mais elevados em nitossolos e semelhantes em latossolos do estado de Pernambuco (Brasil), enquanto que Heidak et al. (2014) encontraram teores de Cu<sup>2+</sup> bem mais elevados em solos vulcânicos das ilhas Canárias.

Todos os solos estudados apresentaram relativamente teores elevados de Fe<sup>2+</sup> (Tabela 3). Biondi et al (2011) encontraram teores de Fe<sup>2+</sup> bem mais baixos em chernossolos, latossolos e nitossolos de Pernambuco compostos, predominantemente, por rochas metamórficas e sedimentares e sedimentos do Terciário.

Nos solos com caráter férrico, no MTo e no LVd1, foram encontrados os maiores teores de Mn<sup>2+</sup> (Tabela 3). O LVd2

**Tabela 3.** Teores de micronutrientes nos solos do Vale do Jequitinhonha.

Horizonte	B	Cu <sup>2+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>
	mg dm <sup>-3</sup>		g dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	
LVd1					
A	1,26	1,98	107,4	272,4	0,84
AB	1,19	1,12	72,4	82,0	0,26
BA	0,91	1,98	115,1	83,7	0,21
Bw	1,26	1,78	99,3	84,5	0,37
NVdf					
A	1,68	9,34	191,7	97,5	0,79
AB	0,35	9,34	203,1	53,0	0,32
B nítico <sub>1</sub>	1,12	6,95	135,5	41,6	0,42
B nítico <sub>2</sub>	1,05	7,75	210,7	39,2	0,32
LVd2					
A	0,56	0,21	220,2	2,0	0,21
AB	0,98	0,62	328,4	4,5	0,21
BA	0,84	0,24	102,4	1,8	0,42
Bw	1,05	0,27	48,5	1,1	0,58
LVdf					
A	0,70	20,06	109,0	66,0	2,11
AB	1,68	18,67	95,1	51,4	0,32
BA	1,61	15,90	110,8	27,2	0,26
Bw	1,40	13,11	191,7	11,9	0,26
LVd3					
A	1,54	0,79	311,3	20,8	0,74
AB	1,12	0,99	370,1	16,8	0,47
BA	0,91	1,19	451,7	14,5	0,37
Bw <sub>1</sub>	1,19	1,58	429,0	24,3	0,36
Bw <sub>2</sub>	0,77	1,58	125,9	11,7	0,21
LVd4					
A	0,56	2,58	92,4	9,1	0,10
AB	0,56	3,77	252,4	42,3	0,37
Bw <sub>1</sub>	0,42	1,58	109,3	4,3	0,47
Bw <sub>2</sub>	0,28	2,98	349,2	47,2	0,37
CB	0,21	3,18	119,0	24,0	0,26
MTo					
A	0,06	4,37	203,9	57,2	9,24
BA	0,46	9,54	191,7	125,0	3,06
Bt	0,06	9,14	186,0	95,6	2,42
BC	0,17	8,34	329,5	93,3	4,38
CR	0,17	7,15	438,4	60,4	4,70

foi o que apresentou menores teores de Mn<sup>2+</sup> (Tabela 3). A acidez elevada desse solo e a acentuada drenagem podem ter contribuído para a lixiviação desse micronutriente (Novais et al., 2007). Biondi et al. (2011) encontraram teores de Mn<sup>2+</sup> mais elevados em chernossolos e nitossolos

e semelhantes em latossolos. Os solos vulcânicos das Ilhas canárias apresentaram teores de Mn<sup>2+</sup> de 4 a 10 vezes mais elevados (Heidak et al., 2014).

Os teores de Zn<sup>2+</sup> estavam abaixo de 1 mg dm<sup>-3</sup> em todos os solos, com exceção do MTo (Tabela 3), onde alcançaram 9,24 mg dm<sup>-3</sup> e foram sempre maiores na superfície, sugerindo complexação com a matéria orgânica (Abreu et al., 2007). O MTo apresentou os maiores teores de Zn<sup>2+</sup>. Biondi et al. (2011) e Heidak et al. (2014) encontraram teores de Zn<sup>2+</sup> bem mais elevados, respectivamente em solos de Pernambuco e Ilhas Canárias.

O índice Ki foi elevado apenas para o MTo (Tabela 4). Mello & Alleoni (2009) sugeriram a presença de argilominerais 2:1 quando o Ki é maior que 2,2. A análise mineralógica da fração argila do horizonte Bt de MTo do AVJ, realizada por Silva et al. (2017) detectaram a ocorrência de vermiculita. O índice Ki permitiu o enquadramento dos demais perfis na classe dos Latossolos (Ki < 2,2), com exceção do NVdf, que apresentou horizonte B nítico.

Os perfis LVd3 e LVd4 apresentaram baixos teores de SiO<sub>2</sub> e Ki < 0,60 (Tabela 4). A mineralogia da fração argila desferrificada destes solos, caulínica e gibbsítica atesta este elevado estágio de alteração, evidenciando que houve uma intensa dessilicatização (Silva et al., 2017). Resultados semelhantes foram encontrados por Bispo et al. (2011), estudando latossolos do Vale do Jequitinhonha.

Nos horizontes diagnósticos do LVd3 e LVd4, os índices Ki e Kr < 0,75 indicaram mineralogia predominantemente oxidica, enquanto que nos demais latossolos os índices Ki e Kr > 0,75 (Tabela 4) evidenciaram uma mineralogia predominantemente caulínica (Embrapa, 2013). Silva et al. (2017) não detectaram gibbsita na fração argila dos mesmos NVdf e MTo. Bispo et al (2011) encontraram resultados semelhantes para latossolos do Vale do Jequitinhonha.

Os teores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> foram mais elevados nos solos de caráter férrico (Tabela 4).

O LVd1 apresentou os maiores teores de MnO (Tabela 4). Nas proximidades do local onde este solo foi descrito a pirolusita, minério de Mn, é explorada comercialmente, o que indica que pode haver influência desse mineral no LVd1. O LVdf e o MTo apresentaram teores de MnO mais elevados do que os demais solos, uma vez que são originados de rochas básicas. Os maiores teores de TiO<sub>2</sub> foram encontrados no NVdf e no LVdf (Tabela 4) e podem estar associados a minerais ferruginosos herdados de rochas básicas.

**Tabela 4.** Teores totais de elementos químicos expressos na forma dos óxidos correspondentes, provenientes do ataque sulfúrico e índices Ki e Kr do horizonte B de solos do Vale do Jequitinhonha.

Solo	Hz	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	Ki	Kr
	%							
LVd1	Bw	15,70	15,86	6,19	6,16	0,20	1,68	1,34
NVdf	B nítico <sub>1</sub>	19,40	22,03	17,52	26,09	0,04	1,49	0,99
LVd2	Bw	26,40	35,24	10,06	14,64	0,03	1,27	1,07
LVdf	Bw	14,70	20,14	22,51	37,04	0,12	1,24	0,72
LVd3	Bw	7,70	22,33	13,15	1,55	0,03	0,59	0,42
LVd4	Bw <sub>1</sub>	4,10	15,34	11,94	1,53	0,02	0,45	0,30
MTo	Bt	23,00	13,16	12,26	1,69	0,15	2,97	1,85

Os teores de Fe extraídos por oxalato (Feo) variaram entre 1,21 e 4,46 g kg<sup>-1</sup> e foram mais elevados no MTo, LVdf, LVd3 e LVd4 e mais baixos nos solos LVd1, NVdf e LVd2 (Tabela 5). O MTo apresentou maiores teores de Feo, um dos menores teores de Fe extraído por ditionito (Fed) e a maior razão Feo/Fed (Tabela 5), uma vez que, apesar de ter apresentado mais de 12% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Tabela 4), grande parte de seus óxidos de Fe foram de baixa cristalinidade (Kämpf & Curi, 2007). Os solos com maiores teores de Fed e com menores razões Feo/Fed (Tabela 5) foram os que apresentaram caráter férrico (LVdf e NVdf) e elevados teores totais de óxidos de Fe (Tabela 4). De acordo com Kämpf & Curi (2007), elevados teores de Fed indicam a presença de óxidos de Fe de alta cristalinidade. O LVd1 foi o solo com menores teores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Tabela 4), o que refletiu em seus mais baixos teores de Feo e de Fed (Tabela 5).

O MTo apresentou os menores teores de Ald e a maior razão Alo/Ald (Tabela 5), indicando o predomínio de formas de Al mais

amorfas (Andrade et al., 1997). Os solos com caráter férrico (LVdf e NVdf) apresentaram comparativamente teores intermediários de Alo, Ald (Tabela 5) e de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Tabela 4), mas suas razões Alo/Ald foram baixas, indicando o predomínio de formas cristalinas de Al (Alleoni & Camargo, 1994). O MTo apresentou valor um pouco maior, indicando o predomínio de formas mais amorfas. Resultados semelhantes foram encontrados por Bispo et al. (2011) e Ferreira et al. (2010), estudando Latossolos localizados em toposequências do Alto Vale do Jequitinhonha. O LVd4, de mineralogia predominantemente oxidica, apresentou os maiores teores de Ald e a menor razão Alo/Ald (Tabela 5).

Os teores de Mno e Mnd foram mais elevados em LVd1 (Tabela 5).

Com exceção do MTo, em todos os solos foram encontrados hematita, maghemita e Fe<sup>3+</sup>. Adicionalmente, foi encontrado Fe<sup>2+</sup> no LVdf. No MTo foram encontrados magnetita, Fe<sup>2+</sup> e Fe<sup>3+</sup> (Tabela 6).

**Tabela 5.** Teores de Fe, Al e Mn extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato e por oxalato ácido de amônio de solos do Vale do Jequitinhonha.

Solo	Horizonte	OAA			DCB				Al <sub>o</sub> /Al <sub>d</sub>
		Al	Fe	Mn	Al	Fe	Mn	Fe <sub>o</sub> /Fe <sub>d</sub>	
		g kg <sup>-1</sup>			mg kg <sup>-1</sup>				
LVd1	Bw	1,28	1,21	0,07	4,28	22,0	1,25	0,06	0,30
NVdf	B nítico <sub>1</sub>	1,83	1,89	0,07	8,16	50,0	0,34	0,04	0,22
LVd2	Bw	3,10	1,40	0,01	7,86	39,0	0,04	0,04	0,39
LVdf	Bw	1,87	3,50	0,04	10,90	70,0	0,14	0,05	0,17
LVd3	Bw	6,94	4,31	0,03	13,08	45,0	0,05	0,09	0,53
LVd4	Bw <sub>1</sub>	1,46	3,07	0,03	13,21	45,0	0,07	0,07	0,11
MTo	Bt	2,40	4,46	0,10	4,30	31,0	0,97	0,14	0,56

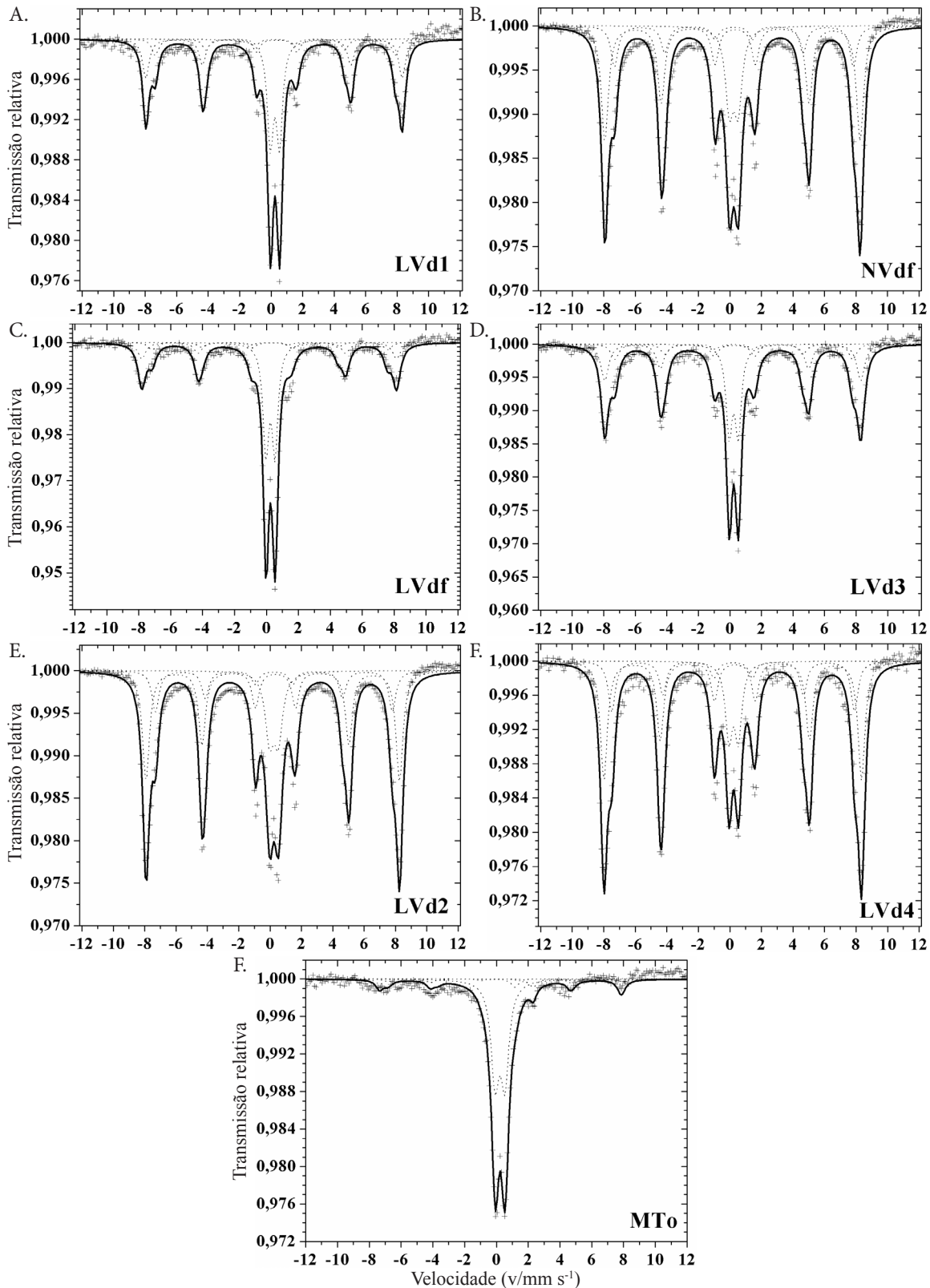
**Tabela 6.** Parâmetros espectrais hiperfinos do <sup>57</sup>Fe na temperatura ambiente (~298 K) dos horizontes diagnósticos dos solos estudados.

Solo	Horizonte	Óxido	Δ (mms <sup>-1</sup> )	ε, Δ (mms <sup>-1</sup> )	Bhf (T <sup>-1</sup> )	AR (%)
LVd1	Bw	Hm	0,265	-0,185	50,38	41,6
		Mh	0,27	0*	47,1	15,1
		Fe <sup>3+</sup>	0,249	0,594		43,3
NVdf	B nítico <sub>1</sub>	Hm	0,261	-0,174	50,11	56,5
		Mh	0,245	0*	46,64	19,5
		Fe <sup>3+</sup>	0,249	0,570		24,0
LVd2	Bw	Hm	0,266	-0,180	50,24	45,6
		Mh	0,213	0*	47,10	31,2
		Fe <sup>3+</sup>	0,251	0,560		23,2
LVdf	Bw	Hm	0,270	-0,200	49,56	25,4
		Mh	0,212	0*	45,9	20,3
		Fe <sup>3+</sup>	0,244	0,549		48,3
		Fe <sup>2+</sup>	1,02	0,622		6,0
LVd3	Bw	Hm	0,249	-0,133	50,22	41,8
		Mh	0,228	0*	46,7	23,2
		Fe <sup>3+</sup>	0,253	0,582		35,0
LVd4	Bw	Hm	0,253	-0,572	51,03	34,1
		Mh	0,227	0*	48,55	48,1
		Fe <sup>3+</sup>	0,246	0,595		17,8
MTo	Bt	Mt <sup>1</sup>	0,25*	0*	47,2	8,40
		Mt <sup>2</sup>	0,55*	0*	45,0	5,05
		Fe <sup>3+</sup>	0,235	0,617		81,76
		Fe <sup>2+</sup>	1,74	1,14		4,8

δ = deslocamento isomérico, em relação ao Fe (todos os valores de δ foram acrescidos de 0,1 mm<sup>-1</sup> que corresponde ao δ do Fe metálico); ε = deslocamento quadrupolar; Δ = desdobramento quadrupolar e AR = área subspectral relativa. Hm = hematita; Mh = maghemita; Mt<sup>1</sup> = Magnetita com sítio tetraédrico; Mt<sup>2</sup> = Magnetita com sítio octaédrico; (\*) = parâmetro fixo.

A análise dos espectros Mössbauer (Figura 2) obtidos sem campo magnético aplicado não foi direta. Algumas informações qualitativas podem, no entanto, ser obtidas de características gerais dos espectros, como os das amostras de LVd1, LVd3 e LVd4, que apresentaram dois sextetos e um duplete. O sexteto mais externo, com maior intensidade,

pode ser atribuível à hematita ( $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). O sexteto de menor campo magnético hiperfino, com linhas de ressonância mais internas pode ser devido à maghemita. O duplete pode ser devido a  $\text{Fe}^{3+}$  paramagnético, da estrutura de silicato ou a óxido de Fe superparamagnético, de partículas muito pequenas (Figura 2).



**Figura 2.** Espectros Mössbauer do  $^{57}\text{Fe}$  a  $\sim 298\text{ K}$  dos horizontes diagnósticos dos solos estudados.



Para as amostras do NVdf e do LVD2, os padrões das contribuições espectrais de espécies magneticamente ordenadas e um duplete central foram parecidos com os encontrados para o LVD1 e o LVD3 (Figura 2), mas as proporções das áreas subspectrais relativas (AR) foram distintas (Tabela 6).

No LVDf foram encontrados dois sextetos, um que pode ser devido à hematita (AR = 25,4%) e outro à maghemita (AR = 20,3%), e dois dupletos, um de Fe<sup>3+</sup> (AR = 48,3%) e outro de Fe<sup>2+</sup> (AR = 6,0%) (Figura 2 e Tabela 6). O subspectro de Fe<sup>2+</sup> pode ser atribuível à ilmenita (FeTiO<sub>3</sub>).

Para a amostra do MTO, o espectro foi totalmente dominado por um duplete central intenso de Fe<sup>3+</sup> (AR = 81,76%). Observou-se, ainda, um duplete de Fe<sup>2+</sup> (AR = 4,8%) (Figura 2 e Tabela 6). No entanto, em razão da baixa intensidade de ressonância, não foi possível um ajuste definitivo para o subspectro de Fe<sup>2+</sup> paramagnético, mais provavelmente, da estrutura de silicato.

Análises de correlação de Pearson resultaram em efeitos positivos para nutrientes: quanto maiores os teores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, maiores foram os teores de P lábil e de Cu<sup>2+</sup>; quanto maiores os teores de Feo, maiores foram os teores de P lábil e quanto maiores os teores de Fe paramagnético, maiores foram as concentrações de K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, de SB, T e m% (Tabela 7).

De acordo com Souza Júnior et al. (2010), solos caracterizados como férricos e perférricos desenvolvidos de rochas máficas funcionam como “fonte” natural de vários nutrientes, entre eles o Mn, Ni, Cu e Zn, sendo maior sua potencialidade agrícola em relação a muitos outros solos do país de textura e mineralogia comparáveis.

**Tabela 7.** Coeficientes de correlação de Pearson entre os teores de ferro extraídos pelo ataque sulfúrico(1), por oxalato(2), por ditionito(3) e Fe<sup>3+</sup> paramagnético(4) e atributos químicos dos horizontes diagnósticos dos solos do Vale do Jequitinhonha.

Teores de Fe/ Atributos químicos	Fe (1)	Fe (2)	Fe (3)	Fe (4)
P	0,80**	0,80**	ns	ns
S	ns	ns	ns	ns
K <sup>+</sup>	ns	ns	ns	0,86**
Ca <sup>2+</sup>	ns	ns	ns	0,86**
Al <sup>3+</sup>	ns	ns	ns	0,77*
Mg <sup>2+</sup>	ns	ns	ns	ns
SB	ns	ns	ns	0,82*
T	ns	ns	ns	0,77*
m	ns	ns	ns	0,77*
V	ns	ns	ns	ns
B	ns	ns	ns	ns
Cu <sup>2+</sup>	0,79**	ns	ns	ns
Fe <sup>3+</sup>	ns	ns	ns	ns
Mn <sup>2+</sup>	ns	ns	ns	0,74**
Zn <sup>2+</sup>	ns	ns	ns	0,80**

\*\* , \* , ns: respectivamente significativos a 1 e 5 % e não significativo. SB = soma de bases; T = CTC a pH 7,0; m = saturação de alumínio; V = saturação de bases; Fe (4)= proporção de Fe<sup>3+</sup> paramagnético de todo Fe encontrado por Espectroscopia Mössbauer.

Em relação aos macronutrientes, houve uma correlação positiva dos teores de P com o Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> do ataque sulfúrico e dos teores de P com os teores de Fe extraídos com ditionito-citrato-bicarbonato. Os óxidos de Fe e de Al apresentaram baixa CTC, porém alta capacidade de adsorver ânions como o fosfato. Na adsorção de P, destacam-se a goethita e a hematita pela sua grande superfície específica e disponibilidade de sítios para a adsorção de P (Resende et al., 2007). Houve ainda correlações positivas dos macronutrientes Ca, K e M, com os teores de Fe dos espinélios encontrados na espectroscopia Mössbauer.

Foram encontradas correlações positivas entre os teores de Mn e Zn. Fabris et al., (1998), comparam a proporção de átomos de Fe, relativamente à ocorrência de outros elementos magnéticos, na crosta terrestre, entre eles o Mn, corroborando com os resultados encontrados nesse estudo.

## Conclusões

Os solos oriundos de rochas básicas apresentaram naturezas magnéticas dependentes do material de origem.

Os solos com maiores teores de minerais magnéticos apresentaram maior fertilidade natural.

## Literatura Citada

- Abreu, C.A.; Lopes, A.S.; Santos, G. Micronutrientes. In: Novais, R.F.; Alvarez, V.H.; Barros, N.F.; Fontes, R.L.F.; Cantarutti, R.B.; Neves, J.C.L. (Eds). Fertilidade do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 645-736.
- Alleoni, L.R.F.; Camargo, O. A. Potencial elétrico superficial e carga elétrica líquida de Latossolos ácidos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.18, n.1, p.181-185, 1994.
- Almeida-Abreu, P.A.; Renger, F.E. Serra do Espinhaço Meridional: um Orógeno de Colisão do Mesoproterozóico. Revista Brasileira de Geociências, v.32, n.1, p.1-14, 2002. <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/10389/9832>. 05 Fev. 2016.
- Andrade, H.; Schaefer, C.E.; Demattê, J.L.I.; Andrade, F.V. Pedogeomorfologia e micropedologia de uma sequência Latossolo – Areia Quartzosa Hidromórfica sobre rochas cristalinas do estado do Amazonas. Geonomos, v.5, n.1, p.55-66, 1997. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v5i1.189>.
- Biondi, C.M; Nascimento, C.W.A.; Neta, A.B.F.; Ribeiro, M.R. Teores de Fe, Mn, Zn, Cu, Ni e Co em solos de referência de Pernambuco. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.35, n.3, p.1057-1066, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000300039>.
- Bispo, F.H.A.; Silva, A.C.; Torrado, P.V. Highlands of the upper Jequitinhonha Valley, Brazil. I - Characterization and classification. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.35, n.4, p.1069-1080, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000400001>.
- Brasil. Secretaria Especial de Agricultura Familiar e do Desenvolvimento Agrário Sistema de informações territoriais. Território do Alto Jequitinhonha-MG. <http://sit.mda.gov.br/mapa.php>. 15 Out. 2015.

- Chaves, L.H.G.; Vasconcelos, A.C.F. Alterações de atributos químicos do solo e do crescimento de plantas de milho pela aplicação de xisto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, n.1, p.84-88, 2006. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662006000100013>.
- Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais - CFSEMG. *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação*. Viçosa: CFSEMG, 1999. 359p.
- Dussin, I.A.; Dussin, T.M. Supergrupo Espinhaço: modelo de evolução geodinâmica. *Geonomos*, v.3, n.2, p.19-26, 1995. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v3i2.210>.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. *Manual de métodos de análise de solo*. 2.ed Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2013. 353p.
- Fabris, J.D.; Coey, J.M.D.; Mussel, W.N. Magnetic soils from mafic lithodomains in Brazil. *Hyperfine Interactions*, v.113, n.1, p.249258, 1998. <https://doi.org/10.1023/A:1012679801308>.
- Fabris, J.D.; Viana, J.H.M.; Schaefer, C.E.G.R.; Wypych, F.; Stucki, J.W. Métodos físicos de análises em mineralogia do solo. In: Melo, V.F.; Alleoni, L.R.F. (Orgs.). *Química e mineralogia do solo. Parte I - Conceitos básicos*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p. 611-695.
- Ferreira, C.A.; Silva, A.C.; Torrado, P.V.; Rocha, W.W. Genesis and classification of Oxisols in a highland toposequence of the Upper Jequitinhonha Valley, MG. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, n.1, p.195-210, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000100020>.
- Gradim, R.J.; Alkmim, F.F.; Pedrosa-Soares, A.C.; Babinski, M.; Noce, C.M. Xistos Verdes do Alto Araçuaí, Minas Gerais: vulcanismo básico do Rifte Neoproterozóico Macaúbas. *Revista Brasileira de Geociências*, v.35, n.4, p.59-69, 2005. [http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/4075/1/ARTIGO\\_%20XistoVerdeAlto.pdf](http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/4075/1/ARTIGO_%20XistoVerdeAlto.pdf). 15 Jan. 2016.
- Heidak, M.O.; Glasmacher, U.A.; Schöler, H.F. A comparison of micronutrients (Mn, Zn, Cu, Mo, Ni, Na) within rocks, soils, and leaves, from fallow agricultural lands and natural laurel forest areas (Tenerife, Canary Islands, Spain). *Journal of Geochemical Exploration*, v.136, n.1, p.55-64, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.10.003>.
- Inda Junior, A.V.; Bayer, C.; Conceição, P.C.; Boeni, M.; Salton, J.C.; Tonin, A.T. Variáveis relacionadas à estabilidade de complexos organo-minerais em solos tropicais e subtropicais brasileiros. *Ciência Rural*, v. 37, n.5, p. 1301-1307, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782007000500013>.
- Kämpf, N.; Curi, N. Óxidos de ferro: Indicadores de ambientes pedogênicos e geoquímicos. In: Novais, R.F.; Alvarez V., V. H.; Schaefer, C.E.G.R. (Eds.). *Tópicos em ciência do solo Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, 2007. v. 5, p. 107-138.
- Malavolta, E. *Manual de química agrícola; adubos e adubação*. São Paulo, Agronômica Ceres, 1981. 596p.
- Mello, V.F.; Alleoni, L.R.F. *Química e mineralogia do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. 1380p.
- Novais, R.F.; Smyth, T.J.; Nunes, F. N. Fósforo. In: Novais, R.F.; Alvarez V., V.H.; Barros, N.F.; Fontes, R.L.F.; Cantarutti, R.B.; Neves, J.C.L. (Eds.). *Fertilidade do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, p. 471-550.
- Reis, C.; Fabris, J.D.; Novais, R.F.; Bahia Filho, A.F.C.; Santana, D.P.; Curi, N.; Coey, J.M.D. Cinética de sorção de fósforo em alguns solos de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.19, n.3, p.337-344, 1995. <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/43653/1/Cinetica-sorcao.pdf>. 25 Jan. 2016.
- Resende, M.; Curi, N.; Rezende, S.B.; Corrêa, G.F. *Pedologia: base para distinção de ambientes*. Lavras: Editora UFLA, 2007. 322p.
- Schwertmann, U.; Taylor, R.M. Iron Oxides. In: Dixon, J.B.; Weed, S.B. (Eds.). *Minerals in soil environments*. Madison: Soil Science Society of America, 1977. p. 145-180.
- Shorrocks, V. The occurrence and correction of boron deficiency. *Plant Soil*, v. 193, n.1-2, p. 121-148, 1997. <https://doi.org/10.1023/A:1004216126069>.
- Silva, A.C.; Pedreira, L.C.V.S.F.; Almeida-Abreu, P.A. *Serra do Espinhaço Meridional: paisagens e ambientes*. Belo Horizonte: O Lutador, 2005. 272p.
- Silva, A. C.; Souza, S.; Fabris, J. D.; Barbosa, S. M.; Barral, U. M.; Costa, R. V. Chemical-mineralogical characterization of magnetic materials from magnetic soils of the Southern Espinhaço Mountain Chain and of the Upper Jequitinhonha Valley, State of Minas Gerais, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.41, e0160274, 2017. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20160274>.
- Souza Júnior, I.G.; Costa, A.C.S.I.; Vilar, C.C.; Hoepers, A. Mineralogia e susceptibilidade magnética dos óxidos de ferro do horizonte B de solos do Estado do Paraná. *Ciência Rural*, v.40, n.3, p. 513-519, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782010000300003>.
- Vilhena, C.F.; Gontijo, M.; Viveiros, N.C.S. Estudo técnico para a extensão dos perímetros do Parque Estadual do Rio Preto e do Parque Estadual do Pico do Itambé na região do Alto Jequitinhonha. Minas Gerais: Instituto Estadual de Florestas, 2010. 46p. [http://www.ief.mg.gov.br/images/stories/consulta\\_publica/nov2010/estudo\\_tecnico\\_ampliacao\\_perpreto\\_itambe.pdf](http://www.ief.mg.gov.br/images/stories/consulta_publica/nov2010/estudo_tecnico_ampliacao_perpreto_itambe.pdf). 10 Jan. 2016.