

GUILHERME FURLAN MIELKI

**DISPONIBILIDADE DE FERRO EM SOLOS TROPICAIS E SUA
ABSORÇÃO PELA PLANTA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2014

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

M631d
2014 Mielki, Guilherme Furlan, 1988-
Disponibilidade de ferro em solos tropicais e sua absorção
pela planta / Guilherme Furlan Mielki. – Viçosa, MG, 2014.
vi, 35f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Roberto Ferreira de Novais.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f.25-35.

1. Solos - Teor de ferro. 2. Deficiência de ferro. 3. Extração
de ferro. 4. Latossolos. 5. Milho. 6. *Zea mays*. 7. Mehlich.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos.
Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas. II. Título.

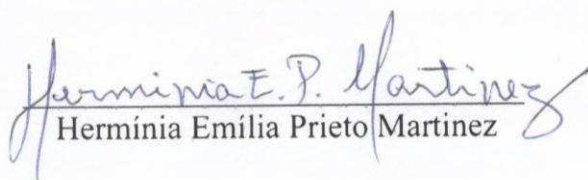
CDD 22. ed. 631.42

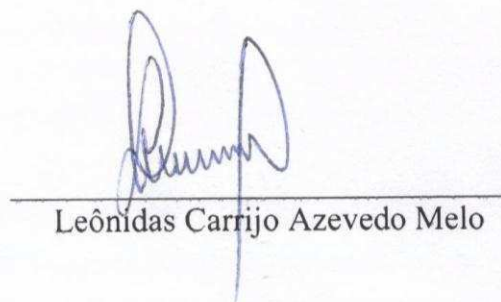
GUILHERME FURLAN MIELKI

**DISPONIBILIDADE DE FERRO EM SOLOS TROPICAIS E SUA
ABSORÇÃO PELA PLANTA**

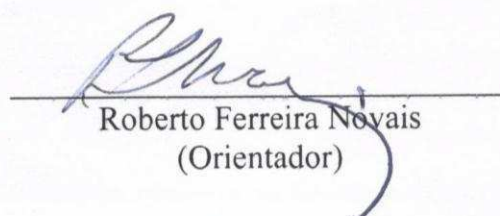
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 27 de novembro de 2014.


Hermínia Emília Prieto Martinez


Leônidas Carrijo Azevedo Melo


João Carlos Ker
(Coorientador)


Roberto Ferreira Novais
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

À toda minha família, pelos momentos compartilhados;

Aos meus pais, Margareth e Willians, meus maiores exemplos de vida, por todo esforço e toda dedicação para me proporcionarem uma educação de qualidade dentro e fora de casa;

Ao meu irmão Bernardo, pelo companheirismo;

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Solos, por poder participar de um programa de pós-graduação de excelência;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado;

Aos professores Roberto Ferreira de Novais, João Carlos Ker e Leonardus Vergütz, pela oportunidade, pelos ensinamentos, pela paciência e dedicação e, acima disso, pelo exemplo como pesquisadores;

A prof.^a Hermínia Martinez e ao prof. Leônidas Melo, por aceitarem o convite e participar da banca e pelas contribuições para a melhoria da dissertação;

Ao professor Victor Hugo, pelos ensinamentos sobre Fertilidade do Solo e Estatística, fundamentais para a realização desse trabalho;

Aos professores, técnicos e amigos do DPS e de outros departamentos, que muito auxiliaram para minha formação profissional e trabalhos em casa de vegetação e laboratório. Em especial, Artur (Tú), Anderson Pacheco, Conrado (Champs), Geovani (Capisce), Gustavo Marcatti (Gustavão), Júlio (Cabo Júlio), Leo Jakson, Luíz Paulo (Xará), Mayara Daher, Roberto (Brodin), Rafael Ramakawa (Rafa) e Silmara (Sil).

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

GUILHERME FURLAN MIELKI, filho de Margareth Helena Furlan Mielki e Willians Lorencett Mielki, nasceu em 25 de outubro de 1988, em Vitória, Espírito Santo.

Em 2007, iniciou o curso de Engenharia Florestal na Universidade Federal de Viçosa e o concluiu em novembro de 2012.

Em 2012, começou o curso de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de dissertação em 27 de novembro de 2014.

SUMÁRIO

RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
INTRODUÇÃO	1
MATERIAL E MÉTODOS.....	4
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	10
CONCLUSÕES.....	24
LITERATURA CITADA	25

RESUMO

MIELKI, Guilherme Furlan, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2014. **Disponibilidade de ferro em solos tropicais e sua absorção pela planta.** Orientador: Roberto Ferreira de Novais. Coorientadores: João Carlos Ker e Leonardus Vergütz.

A deficiência de Fe em plantas cultivadas em solos tropicais tem ocorrido devido ao aumento de produtividade das culturas e à expansão agrícola em solos de baixa fertilidade. Este trabalho objetivou avaliar a disponibilidade de Fe e sua absorção pela planta em diferentes solos. Estudaram-se 13 solos, em duas profundidades. O Fe foi extraído pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3 e em CaCl_2 (Fe-CC). Realizou-se o fracionamento das formas de Fe relacionadas aos oxihidróxidos pedogênicos de baixa (Fe_o) e alta (Fe_d) cristalinidade, bem como aquele ligado a matéria orgânica (Fe_p), utilizando-se, respectivamente, oxalato de amônio, ditionito-citrato e pirofosfato de sódio. Para relacionar a disponibilidade de Fe com os atributos do solo e o crescimento de plantas foi realizado um experimento com plantas de milho (*Zea mays* L.) em sistema semi-hidropônico. Os teores de Fe_d foram altos, entre 5 e 132 g kg^{-1} , e os de Fe-CC, baixos, com média de 3,7 mg dm^{-3} , indicando predomínio de Fe na forma de oxihidróxidos cristalinos e baixo teor de Fe prontamente disponível às plantas. O Mehlich-1 extraiu entre 14 e 196 mg dm^{-3} de Fe, enquanto Mehlich-3, entre 32 e 118, mas ambos com média próxima de 65 mg dm^{-3} . Os extratores apresentaram correlações significativas com diversos atributos do solo, muitos deles comuns a ambos, indicando que estes atuam de forma semelhante. A correlação entre os dois extratores foi altamente significativa, com coeficiente de determinação de 0,75 para a correlação linear simples e tão alto quanto 0,93 para as regressões lineares múltiplas. Esses dois métodos de extração foram ineficientes em avaliar a disponibilidade de Fe para as plantas. Todavia, houve correlação positiva entre matéria seca e teor de Fe na planta, mesmo dentro das faixas de teores no solo e na planta considerados adequados. A produção de matéria seca, o teor e o conteúdo foliar de Fe correlacionaram-se positivamente com o teor de Fe_p , indicando ser a fração Fe ligada aos componentes orgânicos do solo a que mais contribui para a disponibilidade de Fe para a planta.

ABSTRACT

MIELKI, Guilherme Furlan, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, November, 2014. **Iron availability in tropical soils and its absorption by plant.** Adviser: Roberto Ferreira de Novais. Co-advisers: João Carlos Ker and Leonardus Vergütz.

The iron deficiency in plants grown in tropical soils has been frequent given the increase in crop yields and the expansion of agriculture in soils of low fertility. This study aimed to evaluate the Fe availability and its absorption by plant in different soils. We studied 13 soils, in two depths. The iron was extracted by Mehlich-1, Mehlich-3 and CaCl_2 (Fe-CC). We carried out the fractionation of Fe forms related to: low (Fe_o) and high (Fe_d) crystallinity pedogenic oxyhydroxides, and organic matter (Fe_p), using, respectively, ammonium oxalate, dithionite-citrate and sodium pyrophosphate. In order to relate the availability of Fe to soil properties and plant growth was carried out an experiment with maize plants (*Zea mays* L.) in a semi-hydroponic system. Fe_d levels were high, between 5 and 132 g kg^{-1} , and Fe-CC levels were low, with an average of 3.7 mg dm^{-3} , indicating predominance of Fe as crystalline oxyhydroxides and low content of readily available Fe to plants. Mehlich-1 extracted between 14 and 196 mg dm^{-3} of Fe, as Mehlich-3, between 32 and 118, but both with an average of about 65 mg dm^{-3} . Both extractors showed significant correlations with various soil attributes, many common to both, indicating that they act similarly. The correlation between the extractors was highly significant, with a coefficient of determination (R^2) of 0.75 for the linear correlation and as high as 0.93 for multiple linear regressions. The two extractions methods were inefficient to predict the Fe availability to plants. However, there was a positive correlation between dry matter and Fe concentration in shoot, even in soil and plant iron concentrations ranges considered appropriate. The dry matter production, Fe concentration and content in shoot were positively correlated with Fe_p , indicating that the fraction iron linked to soil organic components is the one that contributes most to the availability of Fe to plants.

INTRODUÇÃO

Solos de clima tropical úmido apresentam, de modo geral, reduzido número de espécies minerais e avançado desenvolvimento pedogenético, sendo os mais evoluídos da superfície terrestre (Allen & Hajek, 1989). Nesse contexto, destacam-se os Latossolos, classe de solo de maior distribuição geográfica no Brasil, ocupando mais de um terço da área do país (Lepsch, 2002).

Minerais como caulinita e oxihidróxidos de Fe e Al, como hematita, goethita e gibbsita, predominam nesses solos por serem mais resistentes aos agentes intempéricos (Fontes et al., 2001; White & Dixon, 2002; Manzatto et al., 2002; Souza Júnior et al., 2010). Como consequência de seus variados graus de cristalinidade e por apresentarem cargas variáveis, os oxihidróxidos exercem considerável influência nas propriedades físicas e químicas dos solos (Weber et al., 2005; Vendrame et al., 2011).

O Fe é o quarto elemento e o segundo metal mais abundante no solo, tendo papel importante na litosfera (Zinder et al., 1986). A química do Fe tem grande influência na mobilidade e disponibilidade deste elemento, bem como de outros nutrientes, e até mesmo de elementos-traço potencialmente tóxicos (Karlsson et al., 2013). Alguns Latossolos perférricos chegam a apresentar teores de Fe_2O_3 quantificados pelo ataque sulfúrico superiores a 600 g kg^{-1} (Carvalho Filho et al., 2010). Apesar dos altos teores totais de Fe no solo, esse elemento apresenta-se, originalmente, na estrutura dos minerais primários e, após sofrer oxidação, precipita-se como oxihidróxidos de baixa solubilidade, tornando-se pouco disponível às plantas (Schwertmann & Taylor, 1989; Guerinot & Yi, 1994; Kämpf & Curi, 2000). Essa baixa disponibilidade acentua-se em solos com pH próximo da neutralidade ou alcalino. Por isso, a calagem, como também a adubação fosfatada em altas doses, pode induzir a deficiência desse micronutriente (Bataglia & Raij, 1989; Fageria & Baligar, 2001; Silva et al., 2004). O número de oxidação do Fe, sua ligação com componentes do solo, bem como o grau de cristalinidade do mineral também alteram sua disponibilidade. (Bataglia & Raij, 1989; Abreu et al., 2007).

A forma reduzida (Fe^{2+}) é preferencialmente absorvida pelas plantas (Velloso et al., 1993; Broadley et al., 2012), no entanto, esta predomina em condições de

baixo potencial redox, comuns em solos alagados (Moraes & Dynia, 1992; Velloso et al., 1993). Fato contrário ocorre em solos tropicais bem drenados, como os Latossolos em geral, onde a concentração de Fe em solução é muito baixa e praticamente não detectável (Lindsay & Cox, 1985).

Para que a quantificação da disponibilidade de um micronutriente no solo seja correta é fundamental a seleção de um extrator adequado. Este deve ser capaz de diagnosticar a disponibilidade desse elemento para várias espécies vegetais em diferentes tipos de solos (Mulchi et al., 1991; Roca & Pomares, 1991; Oliveira et al., 2002). No Brasil, ainda há poucos estudos visando definir e padronizar métodos de extração e determinação de micronutrientes (Silva et al., 2009). Uma vez que a concentração de Fe em solução e no complexo de troca do solo são, geralmente, muito baixas (Lindsay & Cox, 1985), o extrator deve ser bastante sensível e preciso.

Os resultados de estudos com extratores de Fe ainda não são consistentes. Os valores de correlação entre os teores no solo e na planta variam desde baixos e não significativos até altos e significativos para diversas culturas (Camargo et al., 1982; Amaral Sobrinho et al., 1993; Rodrigues et al., 2001; Abreu et al., 2004; Moreira et al., 2009). Os métodos tradicionalmente utilizados para extrair Fe do solo envolvem ácidos diluídos e agentes quelantes, sendo Mehlich-1 e DTPA os mais empregados (Raij, 1991; Embrapa, 1997). A solução extratora Mehlich-1 tem sido empregada com relativo sucesso em solos ácidos e com baixos teores de matéria orgânica para extração de diversos nutrientes, dentre eles o Fe (Bernardi et al., 2002; Mylavarapu et al., 2002; Bortolon et al., 2009; Bortolon & Gianello, 2010; Soares et al., 2012). Por se tratar de uma solução diluída de ácidos fortes, esta atua sobre formas lábeis e não lábeis, removendo metais da solução, de formas trocáveis da fase sólida e parte dos complexados (Abreu et al., 2002). Por isso, o método é bastante relevante na avaliação da disponibilidade de metais pesados em solos (Korcak & Fanning, 1978). Soluções extratoras multielementares também têm sido cada vez mais estudadas com o intuito de simplificar os procedimentos analíticos e reduzir os custos das análises (Rodrigues et al., 2001; Bortolon & Gianello, 2009). Nesse contexto, destaca-se o Mehlich-3 (Mehlich, 1984), por ser um extrator versátil e mais apropriado para uso em laboratórios de análises de rotina (Heinrichs et al., 2006; Schoninger et al., 2012).

Técnicas de fracionamento também têm papel importante na previsão da disponibilidade de elementos no sistema solo-planta (Nascimento et al., 2005).

Conhecer sobre as formas de Fe é de interesse para áreas como pedogênese e classificação de solos, por permitir avaliar condições e intensidade de intemperismo e entender o comportamento físico e químico dos solos (Inda Junior & Kämpf, 2003). Para tanto, os teores de Fe no solo têm sido avaliados basicamente sob três formas: constituinte de oxihidróxidos pedogênicos de alta cristalinidade, aqueles de baixa cristalinidade e o constituinte relacionado à matéria orgânica do solo. Os oxihidróxidos pedogênicos de alta cristalinidade (Fe_d) são comumente extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato e os de baixa cristalinidade (Fe_o) por oxalato de amônio. O Fe complexado pelo húmus do solo (Fe_p) pode ser determinado utilizando-se pirofosfato de sódio em meio alcalino (Kämpf et al., 2000).

A relação Fe_o/Fe_d indica quais formas do elemento predominam no solo. Em solos bem drenados e altamente intemperizados, como os Latossolos em geral, essa relação tende a ser bastante baixa, geralmente menor do que 0,05, evidenciando um predomínio de óxidos de Fe de maior cristalinidade (Kämpf et al., 1988; Melo et al., 2001). Por outro lado, em solos mal drenados e ricos em matéria orgânica essa relação é mais elevada devido à inibição da cristalização dos oxihidróxidos (Schwertmann & Taylor, 1989). Embora se saiba da influência da mineralogia, textura e matéria orgânica sobre a dinâmica do Fe no solo, ainda é necessário relacionar os conhecimentos de mineralogia e química do solo com a fertilidade e a nutrição mineral de plantas.

Na literatura, pouco se fala sobre a deficiência de Fe em plantas cultivadas em Latossolos, embora alguns relatos evidenciem em campo sintomas típicos de sua deficiência mesmo em solos ácidos e com altos teores totais de Fe (Moraes, 1998; Nunes et al., 2004; Schulthais, 2013). De fato, pelo aumento da exportação de nutrientes, dada a crescente produtividade das culturas, e a expansão da atividade agrícola em solos de baixa fertilidade natural, é de se esperar maior ocorrência de deficiência de Fe e outros micronutrientes (Fageria et al., 2002; Abreu et al., 2004).

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a disponibilidade de Fe e sua absorção pela planta em diversos solos, visando compreender a deficiência de Fe em plantas cultivadas em solos tropicais, nos quais esse elemento é encontrado, de modo geral, em teores altos.

MATERIAL E MÉTODOS

Optou-se por trabalhar preferencialmente com solos argilosos sob vegetação natural ou em regeneração. Solos arenosos têm como principal mineral o quartzo, e apresentam naturalmente pequenas quantidades de minerais que contém Fe em sua composição (Becegato & Ferreira, 2005; Marques et al., 2004). Por outro lado, solos argilosos apresentam altos teores de Fe devido à presença desse elemento em grande parte dos minerais desses solos (Ferreira et al., 1999; Becegato & Ferreira, 2005; Schaefer et al. 2008). A preferência por áreas não cultivadas se deu pelo fato de os efeitos das práticas de plantio e manejo do solo, como calagem, adubação fosfatada, plantio direto, dentre outras, serem bastante estudados e a deficiência de Fe ser mais bem compreendida nesses casos (Bataglia & Raij, 1989; Cohen et al., 1998; Caires & Fonseca, 2000; Fageria et al., 2002; Nunes et al., 2004; Santos et al., 2008). Por outro lado, não foram encontrados estudos sobre a disponibilidade de Fe em solos naturais ou pouco manejados.

Foram coletadas amostras nas profundidades de 0 a 20 e 20 a 40 cm de 13 solos, principalmente Latossolos, incluindo solos de regiões onde há evidências de sintomas de deficiência de Fe em plantas, como a de Patos de Minas (Quadro 1).

Quadro 1 – Localização das amostras de solo

Solo	Classificação	Localização em MG
1	Latossolo Vermelho	Varjão de Minas
2	Latossolo Vermelho-Amarelo	Coromandel
3	Latossolo Vermelho-Amarelo	Coromandel
4	Latossolo Vermelho	Serra do Salitre
5	Latossolo Vermelho	Lagoa Grande
6	Neossolo Quartzarênico	Bela Vista
7	Latossolo Vermelho	Presidente Olegário
8	Latossolo Vermelho-Amarelo	Presidente Olegário – EPAMIG
9	Latossolo Vermelho-Amarelo*	Coromandel – AGROCERES
10	Latossolo Vermelho*	Patos de Minas
11	Latossolo Vermelho*	Patos de Minas
12	Latossolo Vermelho*	Sete Lagoas – EMPRAPA
13	Latossolo Vermelho*	Lavras

* solos com elevada atração magnética.

As amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas em malha de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). Foi realizada a separação das frações granulométricas areia grossa, areia fina, silte e argila e determinado o

Equivalente de Umidade (EU) de cada solo, conforme Embrapa (1997) (Quadro 2). O pH foi determinado em água, na relação solo:solução de 1:2,5 e o C orgânico, pelo método Walkley-Black modificado (Nelson & Sommers, 1982). Os cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} foram extraídos com KCl 1 mol L^{-1} (Embrapa, 1997) e K, P, Na, Zn, Cu e Mn, pelo extrator Mehlich-1 (De Filippo & Ribeiro, 1997). O P-rem foi determinado segundo Alvarez et al. (2000) e H+Al com solução de acetato de cálcio $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, tamponada com ácido acético a pH 7,0 (Quadro 3).

A extração do Fe por Mehlich-1 (H_2SO_4 $0,0125 \text{ mol L}^{-1}$ + HCl $0,05 \text{ mol L}^{-1}$) foi feita utilizando-se a relação solo:solução de 1:10, com agitação durante 5 min e repouso por 16 h (De Filippo & Ribeiro, 1997). Na extração com Mehlich-3 (HOAc $0,2 \text{ mol L}^{-1}$, NH_4NO_3 $0,25 \text{ mol L}^{-1}$, NH_4F $0,015 \text{ mol L}^{-1}$, HNO_3 $0,013 \text{ mol L}^{-1}$ e EDTA $0,001 \text{ mol L}^{-1}$) e com CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ a relação solo:solução, tempo de agitação e o período de descanso foram iguais aos utilizados para Mehlich-1.

Quadro 2 – Caracterização física das amostras de solo

Solo _{camada}	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	Classe textural	EU⁽¹⁾
cm	-----dag kg⁻¹-----					g kg⁻¹
1 ₀₋₂₀	9	9	7	75	Muito argilosa	279
1 ₂₀₋₄₀	8	10	7	75	Muito argilosa	260
2 ₀₋₂₀	10	9	14	67	Muito argilosa	234
2 ₂₀₋₄₀	10	11	10	69	Muito argilosa	234
3 ₀₋₂₀	6	6	11	77	Muito argilosa	327
3 ₂₀₋₄₀	4	8	11	77	Muito argilosa	326
4 ₀₋₂₀	11	13	6	70	Muito argilosa	223
4 ₂₀₋₄₀	7	11	5	77	Muito argilosa	234
5 ₀₋₂₀	19	19	15	47	Argila	191
5 ₂₀₋₄₀	15	16	16	53	Argila	197
6 ₀₋₂₀	51	37	1	11	Areia-franca	47
6 ₂₀₋₄₀	49	37	4	10	Areia-franca	50
7 ₀₋₂₀	13	9	7	71	Muito argilosa	239
7 ₂₀₋₄₀	11	8	4	77	Muito argilosa	225
8 ₀₋₂₀	6	5	12	77	Muito argilosa	319
8 ₂₀₋₄₀	4	4	10	82	Muito argilosa	305
9 ₀₋₂₀	14	6	31	49	Argila	315
9 ₂₀₋₄₀	12	5	33	50	Argila	359
10 ₀₋₂₀	11	8	27	54	Argila	293
10 ₂₀₋₄₀	11	8	22	59	Argila	257
11 ₀₋₂₀	11	8	29	52	Argila	293
11 ₂₀₋₄₀	10	9	21	59	Argila	277
12 ₀₋₂₀	7	2	10	81	Muito argilosa	307
12 ₂₀₋₄₀	7	2	10	81	Muito argilosa	299
13 ₀₋₂₀	8	4	15	73	Muito argilosa	272
13 ₂₀₋₄₀	9	4	15	72	Muito argilosa	267
Média	13	10	15	61	-	255
CV (%)	88,4	83,9	79,6	33,9	-	29,0

⁽¹⁾ EU, equivalente de umidade

Quadro 3 – Resultados da análise química das amostras de solos

Solo _{camada}	pH H ₂ O	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	t	T	V	m	MO	P-rem
cm		---mg dm ⁻³ ---			-----cmol _c dm ⁻³ -----				---%---			dag kg⁻¹	mg L⁻¹	
1 ₀₋₂₀	4,31	1,9	30	0,37	0,12	1,50	13,20	0,57	2,07	13,77	4,1	72,5	7,73	12,2
1 ₂₀₋₄₀	4,01	1,3	22	0,09	0,06	0,80	6,80	0,21	1,01	7,01	3,0	79,2	3,68	11,2
2 ₀₋₂₀	5,14	1,0	91	0,87	0,56	0,60	7,10	1,66	2,26	8,76	18,9	26,5	4,31	16,2
2 ₂₀₋₄₀	4,86	0,7	30	0,48	0,25	0,60	5,40	0,81	1,41	6,21	13,0	42,6	3,04	13,2
3 ₀₋₂₀	5,07	2,1	97	0,11	0,22	1,30	10,90	0,58	1,88	11,48	5,1	69,1	10,77	8,9
3 ₂₀₋₄₀	5,07	0,7	55	0,04	0,07	0,70	9,70	0,25	0,95	9,95	2,5	73,7	6,08	6,4
4 ₀₋₂₀	4,54	0,6	19	0,06	0,03	0,40	5,60	0,14	0,54	5,74	2,4	74,1	3,55	11,7
4 ₂₀₋₄₀	4,83	0,0	8	0,05	0,02	0,30	4,60	0,09	0,39	4,69	1,9	76,9	2,91	8,7
5 ₀₋₂₀	5,29	1,2	113	0,34	0,75	1,10	6,10	1,38	2,48	7,48	18,4	44,4	2,91	18,4
5 ₂₀₋₄₀	5,41	0,6	59	0,13	0,17	1,30	5,00	0,45	1,75	5,45	8,3	74,3	1,65	12,1
6 ₀₋₂₀	4,25	1,9	9	0,11	0,04	0,90	3,30	0,17	1,07	3,47	4,9	84,1	1,14	41,9
6 ₂₀₋₄₀	4,61	2,1	13	0,12	0,06	0,60	3,80	0,21	0,81	4,01	5,2	74,1	1,27	42,3
7 ₀₋₂₀	4,93	1,1	92	1,43	0,74	0,40	8,70	2,41	2,81	11,11	21,7	14,2	5,07	20,5
7 ₂₀₋₄₀	5,25	0,5	49	0,34	0,22	0,40	6,90	0,69	1,09	7,59	9,1	36,7	3,30	13,5
8 ₀₋₂₀	4,61	15,8	34	0,32	0,19	1,70	15,30	0,60	2,30	15,90	3,8	73,9	8,36	6,1
8 ₂₀₋₄₀	4,82	4,9	8	0,06	0,04	1,10	11,10	0,12	1,22	11,22	1,1	90,2	5,58	6,8
9 ₀₋₂₀	5,74	25,8	494	6,90	2,89	0,00	6,60	11,06	11,06	17,66	62,6	0,0	6,21	18,8
9 ₂₀₋₄₀	5,70	27,1	309	4,70	0,87	0,00	6,90	6,36	6,36	13,26	48,0	0,0	5,58	14,0
10 ₀₋₂₀	6,15	48,8	156	6,63	2,18	0,00	5,90	9,21	9,21	15,11	61,0	0,0	6,72	15,6
10 ₂₀₋₄₀	5,52	41,6	9	0,43	0,35	0,10	7,40	0,80	0,90	8,20	9,8	11,1	2,28	4,2
11 ₀₋₂₀	6,22	22,1	182	8,56	3,29	0,00	3,30	12,32	12,32	15,62	78,9	0,0	6,84	10,3
11 ₂₀₋₄₀	6,28	13,9	69	1,77	2,00	0,00	3,60	3,95	3,95	7,55	52,3	0,0	2,15	3,2
12 ₀₋₂₀	4,87	2,7	31	2,18	0,15	0,90	9,60	2,41	3,31	12,01	20,1	27,2	6,08	10,6
12 ₂₀₋₄₀	4,91	0,6	62	0,11	0,02	1,40	7,1	0,29	1,69	7,39	3,9	82,8	3,17	5,1
13 ₀₋₂₀	4,89	1,3	34	1,27	0,33	0,40	7,30	1,69	2,09	8,99	18,8	19,1	4,56	16,0
13 ₂₀₋₄₀	4,92	0,1	9	0,06	0,04	0,10	3,60	0,12	0,22	3,72	3,2	45,5	2,03	6,6
Média	5,12	8,5	80	1,44	0,60	0,64	7,11	2,25	2,89	9,36	14,8	45,9	4,50	13,6
CV (%)	11,7	160,6	135,0	167,4	152,9	82,2	43,0	155,3	111,8	43,5	120,5	70,8	53,4	70,2

Na extração de Fe dos óxidos pedogênicos de alta cristalinidade (Fe_d), realizou-se uma única extração na fração argila com ditionito-citrato ($Na_3C_6H_5O_7$ 0,2 mol L⁻¹ e 500 mg de $Na_2S_2O_4$) na proporção solo:solução de 1:20. As amostras permaneceram em banho-maria a 70 °C sob agitação constante por 15 min, sendo, em seguida, centrifugadas a 2.500 rpm por 15 min. Para os óxidos pedogênicos de baixa cristalinidade (Fe_o), foi realizada uma única extração na fração argila com oxalato ácido de amônio ($C_2H_8N_2O_4$ 0,2 mol L⁻¹, pH 3,0) na proporção solo:solução de 1:20, com agitação por 4 h na ausência de luz e centrifugação a 2.500 rpm por 15 min (McKeague & Day, 1966). Para extrair o Fe ligado à matéria orgânica do solo (Fe_p), realizou-se uma extração única na TFSA com pirofosfato de sódio em meio alcalino ($Na_4P_2O_7$ 0,1 mol L⁻¹, pH 10,0) na proporção solo:solução de 1:40, com agitação por 2 h e centrifugação a 2.500 rpm por 15 min (Wang, 1978). A determinação do Fe foi realizada por espectrofotometria de absorção atômica.

Para relacionar a disponibilidade de Fe no solo pelos diferentes extratores com a absorção pelas plantas e seu crescimento, foi realizado um experimento com plantas de milho em casa de vegetação. Este seguiu um delineamento em blocos casualizados (DBC), com 26 tratamentos (13 solos, em duas profundidades) e quatro repetições, cada uma com duas plantas por vaso. Para avaliar o suprimento de Fe exclusivamente a partir do solo, desenvolveu-se um sistema análogo ao de vasos geminados, no qual dois vasos com diferentes conteúdos são utilizados pela mesma planta, com parte das raízes em um recipiente e parte em outro. A diferença para o sistema utilizado é que os vasos contendo os solos foram todos pareados a um único recipiente contendo solução nutritiva, na forma de uma canaleta central (Figura 1a). Todas as plantas receberam todos os nutrientes, com exceção do Fe, em quantidades adequadas por meio de uma mesma solução nutritiva, o que não seria possível caso as correções e adubações fossem realizadas individualmente para cada vaso.

As sementes de milho (*Zea mays* L.) foram colocadas para germinar em papel toalha após desinfestação em solução de hipoclorito de sódio (5% m/v) por 15 min e lavagem em água destilada. Três dias após a emergência, a ponta da raiz principal de cada plântula foi cortada para favorecer o crescimento das raízes laterais e as plântulas foram, então, transplantadas para bandejas de plástico que continham solução nutritiva de Hoagland e Arnon (Hoagland & Arnon, 1950), com ¼ da força iônica, sem adição de Fe, sob aeração constante. Sete dias após o transplântio, as

plantas foram selecionadas e transferidas para o sistema semi-hidropônico, sendo suas raízes divididas igualmente entre os dois recipientes (Figura 1b). Os vasos foram preenchidos com 3 dm³ de solo e a canaleta central com 40 L de solução nutritiva com ½ da força iônica, também sem adição de Fe, sob aeração constante. Após sete dias, elevou-se a concentração da solução para uma força iônica.

O pH da solução foi mantido próximo de 6,0 e a solução foi trocada ao longo de todo o experimento, sendo as trocas mais frequentes à medida em que as plantas cresciam. As plantas foram mantidas sob sombrite de 50 % para evitar o ressecamento das raízes que ficavam expostas fora do solo. A irrigação foi efetuada duas vezes ao dia, até próximo à capacidade de campo dos solos. Ao final de 45 dias, o experimento foi desmontado e a parte aérea das plantas foi colhida. O material vegetal foi seco em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C até atingir peso constante e, em seguida, moído em moinho tipo Willey equipado com peneira de 20 mesh (0,841 mm). Os teores de Fe na planta foram determinados após digestão nítrico-perclórica (Johnson & Ulrich, 1959) e quantificados por espectrofotometria de absorção atômica.

Os dados foram submetidos à análise de estatística descritiva e elaborou-se uma matriz de correlação à partir de análises de correlação por regressão linear simples entre as variáveis avaliadas (Pimentel-Gomes, 1990). A partir dessa matriz, as variáveis que apresentaram correlação significativa até 10 % (F de significância inferior a 0,1) foram utilizadas para elaboração de equações por meio de regressão linear múltipla entre os extratores de Fe e as variáveis relacionadas à planta com os demais atributos do solo.

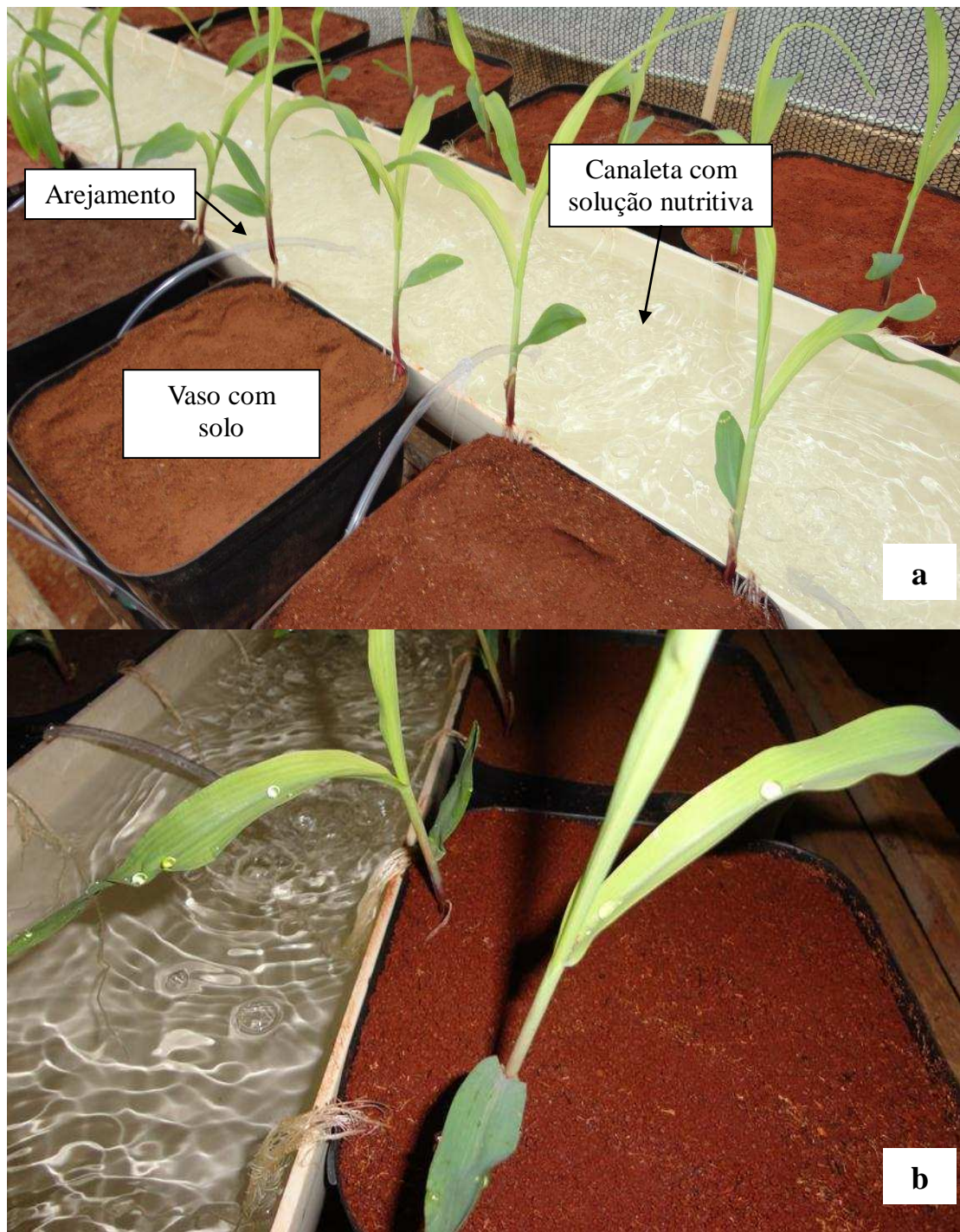


Figura 1 – Sistema semi-hidropônico de vasos com solos pareados à canaleta central contendo solução nutritiva sem adição de Fe (a), com as raízes das plantas crescendo em ambos os recipientes (b).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A adsorção de P é mais intensa em solos argilosos (Novais & Smyth, 1999) e os oxihidróxidos de Fe estão dentre os principais atuantes nesta adsorção (Hernández & Meurer, 1998). A fração argila, com destaque para goethita e hematita, atua como um forte dreno de P devido à sua elevada superfície específica (Novais & Smyth, 1999; Valladares et al., 2003; Ranno et al., 2007). Um atributo que pode medir a atividade sortiva dos solos é o P remanescente (P-rem) (Alvarez V. et al., 2000). Vilar et al. (2010) encontraram correlação altamente significativa entre o P-rem e a capacidade máxima de adsorção de P da fração argila de solos.

Houve correlação entre P remanescente e o teor de argila dos solos, sendo que à medida em que aumenta o teor de argila dos solos, aumenta também a sorção de P pelos mesmos (Figura 2). O solo 6, o mais arenoso (Quadro 2), é o que apresenta maior valor de P-rem (Quadro 3), indicando a capacidade sortiva diferencial de P dos solos em função da textura.

O teor de Fe-pirofosfato (Fe_p) dos solos variou entre 0,98 e 16,36 g kg⁻¹, com valor médio de 5,54 (Quadro 4). Esses valores são condizentes com os encontrados em Latossolos por Vendrame et al. (2011), com exceção dos teores encontrados nos solos 1 e 8.

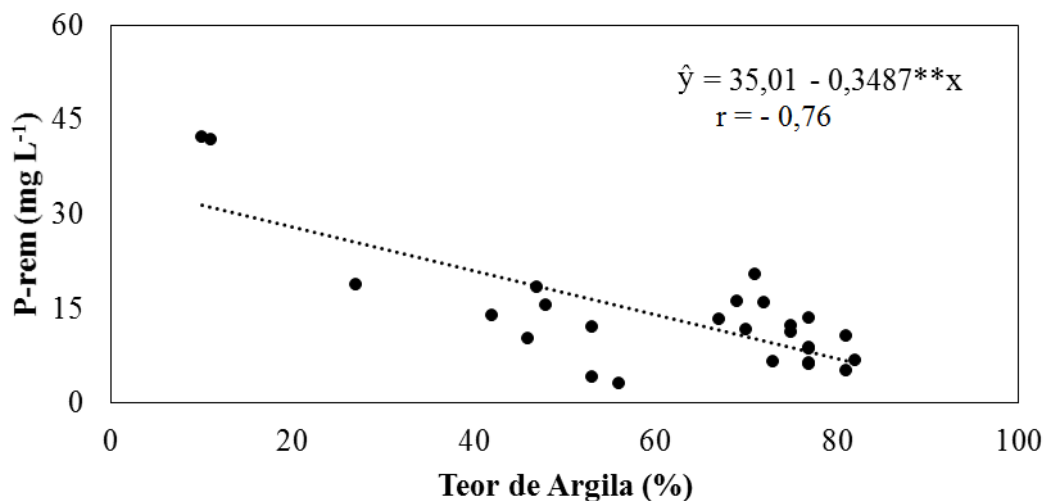


Figura 2 – Relação entre P remanescente (P-rem) e teor de argila dos solos.

** , significativo a 1 % pelo teste F.

Quadro 4 – Teor de Fe extraído por pirofosfato (Fe_p), oxalato de amônio (Fe_o), ditionito-citrato (Fe_d), cloreto de cálcio (Fe-CC), Mehlich-1 e Mehlich-3 e suas relações em amostras de 13 solos, em duas profundidades (0-20 e 20-40 cm)

Solo _{camada}	Fe _p	Fe _o	Fe _d	Fe _p	Fe _o	Fe-CC	Mehlich-1	Mehlich-3	Fe-CC	Mehlich-1
				Fe _d	Fe _d				Mehlich	Mehlich-3
cm	-----g kg ⁻¹ -----			-----mg dm ⁻³ -----						
1 ₀₋₂₀	14,93	2,85	49,96	0,30	0,06	4,32	105,2	116,6	0,04	0,90
1 ₂₀₋₄₀	12,01	2,70	47,17	0,25	0,06	3,06	75,2	59,0	0,05	1,27
2 ₀₋₂₀	3,76	1,78	39,66	0,09	0,04	3,41	44,6	42,1	0,08	1,06
2 ₂₀₋₄₀	6,30	2,08	37,89	0,17	0,06	3,21	44,9	65,3	0,06	0,69
3 ₀₋₂₀	3,44	1,81	6,42	0,54	0,28	2,55	57,3	64,8	0,04	0,88
3 ₂₀₋₄₀	3,20	1,77	5,47	0,59	0,32	3,17	52,6	57,2	0,06	0,92
4 ₀₋₂₀	2,54	2,23	40,21	0,06	0,06	3,29	62,9	57,3	0,05	1,10
4 ₂₀₋₄₀	2,50	1,81	39,21	0,06	0,05	3,13	37,8	41,5	0,08	0,91
5 ₀₋₂₀	4,65	4,05	67,69	0,07	0,06	2,29	196,4	61,8	0,02	3,18
5 ₂₀₋₄₀	4,18	3,23	61,54	0,07	0,05	3,32	150,2	52,1	0,03	2,88
6 ₀₋₂₀	1,16	3,18	19,27	0,06	0,16	5,82	106,5	117,9	0,05	0,90
6 ₂₀₋₄₀	1,07	2,85	26,52	0,04	0,11	4,56	110,4	115,3	0,04	0,96
7 ₀₋₂₀	3,09	2,93	58,26	0,05	0,05	3,72	48,8	65,1	0,07	0,75
7 ₂₀₋₄₀	3,70	2,95	72,80	0,05	0,04	4,19	42,0	51,5	0,09	0,81
8 ₀₋₂₀	14,47	4,90	40,13	0,36	0,12	3,15	106,5	105,5	0,03	1,01
8 ₂₀₋₄₀	16,36	4,67	39,91	0,41	0,12	3,58	99,8	79,1	0,04	1,26
9 ₀₋₂₀	3,91	13,04	74,44	0,05	0,18	3,99	39,8	64,5	0,08	0,62
9 ₂₀₋₄₀	3,48	14,32	77,54	0,04	0,18	3,59	38,4	67,6	0,07	0,57
10 ₀₋₂₀	5,53	7,57	103,45	0,05	0,07	3,34	18,2	58,6	0,09	0,31
10 ₂₀₋₄₀	5,51	9,53	124,82	0,04	0,08	4,14	37,2	52,7	0,09	0,71
11 ₀₋₂₀	2,80	8,45	85,97	0,03	0,10	3,35	14,4	50,9	0,10	0,28
11 ₂₀₋₄₀	4,22	10,96	131,59	0,03	0,08	4,37	44,8	60,6	0,08	0,74
12 ₀₋₂₀	7,18	3,39	51,63	0,14	0,07	3,27	39,0	67,5	0,06	0,58
12 ₂₀₋₄₀	7,31	2,94	51,18	0,14	0,06	3,65	24,0	36,4	0,12	0,66
13 ₀₋₂₀	0,98	3,27	92,86	0,01	0,04	4,65	28,5	32,0	0,15	0,89
13 ₂₀₋₄₀	5,66	4,36	89,44	0,06	0,05	4,39	48,8	51,7	0,09	0,94
Média	5,54	4,75	59,04	0,15	0,10	3,67	64,39	65,17	0,07	0,99
CV(%)	76,9	75,6	54,8	110,6	75,5	20,1	118,9	36,2	45,1	65,2

Considerando que o pirofosfato de sódio em meio alcalino atua sobre o Fe ligado a frações orgânicas do solo, é de se esperar uma correlação positiva entre os valores de Fe_p e o teor de matéria orgânica dos solos (Figura 3). Isso pode explicar os altos teores de Fe_p nos solos 1 e 8, que apresentam altos teores de MO (Quadro 3). A correlação positiva entre Fe_p e o teor de MO do solo também se reflete na relação Fe_p/Fe_d (Figura 4), mostrando que em solos com maiores teores de MO, como o solo 3, grande proporção do Fe encontra-se ligado à fração orgânica. Inda (2013) e Zanelli et al. (2007) explicam que a MO, a umidade e a atividade microbiana podem alterar as condições pedoambientais e a dinâmica de formação dos minerais, favorecendo a dissolução e remobilização dos oxihidróxidos de Fe. Assim, em solos com elevado teor de MO, elevada umidade e maior atividade microbiana, há maior tendência do Fe permanecer em formas menos cristalinas de oxihidróxidos e associar-se a compostos orgânicos, visto que há menor cristalização dos oxihidróxidos (Schwertmann & Kämpf, 1983; Schwertmann & Taylor, 1989).

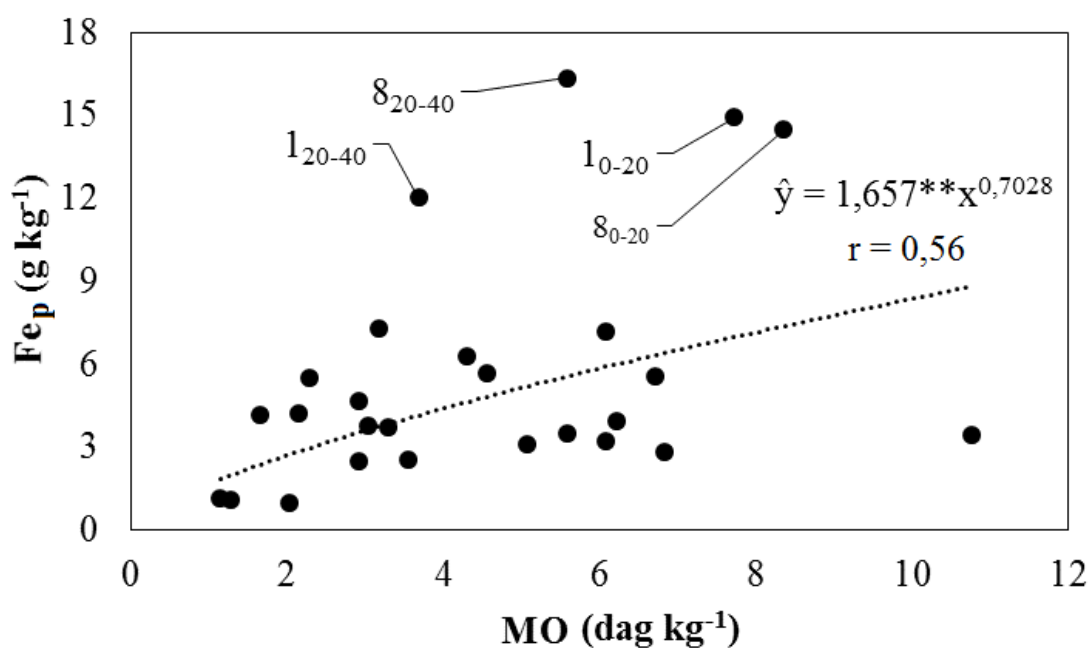


Figura 3 – Relação entre teor de Fe-pirofosfato (Fe_p) e de matéria orgânica (MO) dos solos.

** , significativo a 1 % pelo teste F.

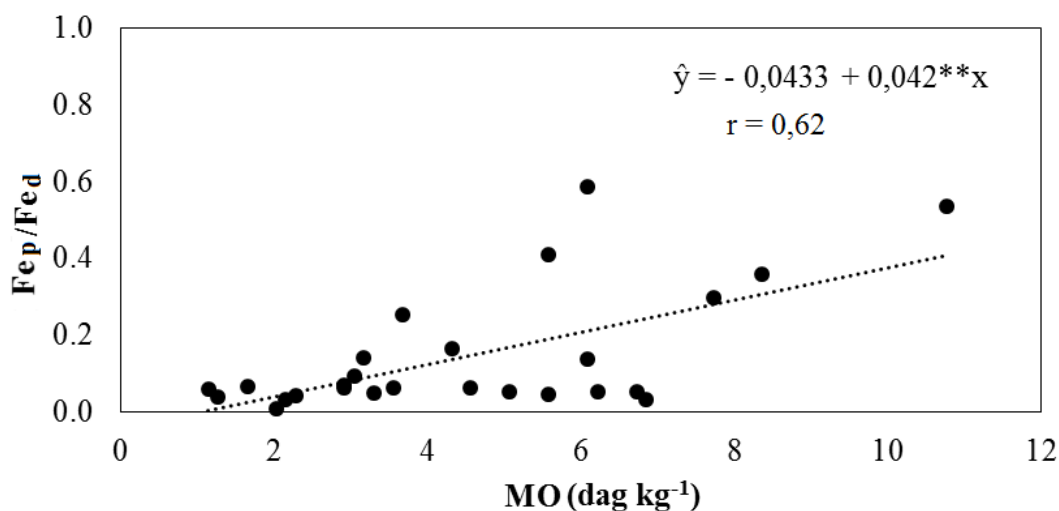


Figura 4 – Relação entre as frações Fe-pirofosfato (Fe_p), Fe-ditionito-citrato (Fe_d) e teor de matéria orgânica dos solos.

** , significativo a 1 % pelo teste F.

Os teores de oxihidróxidos de Fe pedogênicos de baixa (Fe_o) e alta cristalinidade (Fe_d) foram condizentes com os obtidos em Latossolos por vários autores (Curi & Franzmeier, 1984; Melo et al., 2001; Inda Junior & Kämpf, 2003; Ferreira et al., 2007; Vilar et al., 2010 e Vendrame et al., 2011), que encontraram teores de Fe_o entre 0,4 e 6,1 g kg⁻¹ e de Fe_d entre 25,9 e 267,6 g kg⁻¹. Apenas os solos 9, 10 e 11 apresentam teores de Fe_o maiores do que os encontrados por esses autores (Quadro 4). Os elevados teores de Fe_o nos solos 9, 10 e 11 foram acompanhados pelos maiores teores de Fe_d, de maneira que a grande fração do Fe encontra-se em formas minerais cristalinas. De fato, na grande maioria dos solos, com exceção dos solos 1, 3 e 8, as relações Fe_p/Fe_d e Fe_o/Fe_d são bastante baixas (Quadro 4). A média para a relação Fe_p/Fe_d, excluindo-se os solos 1, 3 e 8, é de 0,07 e para a relação Fe_o/Fe_d, média de 0,08, indicando que o Fe dos solos encontra-se associado principalmente aos oxihidróxidos cristalinos. As formas cristalinas de oxihidróxidos de Fe tendem a predominar em solos argilosos e a relação Fe_o/Fe_d diminuir com o aumento do teor de argila (Figura 5).

Os teores de Fe extraído em CaCl_2 foram os mais baixos e variaram pouco entre os solos (C.V. próximo de 20 %), com valores entre 2,29 e 5,82 mg/dm^3 (Quadro 4). O pequeno teor do elemento extraído em solução salina de baixa força iônica seria um indicativo do pequeno teor do elemento prontamente disponível para a planta. Em solos bem drenados, como nos Latossolos em geral, a forma solúvel do elemento ocorre em proporções muito pequenas, exceto em condições de pH muito baixo, próximo de 3,2 a 3,7 (Lindsay, 1979), o que ocorre raramente. Na maioria dos solos estudados, os valores de pH situam-se entre 4,0 e 5,5. Nessas condições, a solubilidade do elemento é controlada pela dissolução de oxihidróxidos e a atividade do Fe em solução se reduz em 1.000 vezes para cada aumento de uma unidade de pH, dentro da faixa de 4 a 9 (Lindsay, 1972).

Outro indicativo do pequeno teor de Fe no solo prontamente disponível às plantas é a relação entre os teores extraídos com a solução CaCl_2 e a média dos teores extraídos por Mehlich-1 e Mehlich-3 (Quadro 4). Os valores da relação Fe-CC/Fe-Mehlich variaram entre 0,02 e 0,15, com média de 0,07, indicando que o teor de Fe de disponibilidade imediata é muito pequeno, como observado por Oliveira et al. (2006). Esses autores realizaram estudos de extração sequencial para caracterização das formas de Fe e concluíram que haveria uma baixa disponibilidade do elemento para plantas, dados os baixos teores na fração trocável e a predominância do elemento ligado a oxihidróxidos cristalinos.

Os teores de Fe extraídos por Mehlich-1 (M-1) variaram entre 14,4 e 196 mg dm^{-3} , condizentes com os reportados em Latossolos por outros autores (Silva et al., 2004; 2009; Ortiz et al., 2005; Oliveira et al., 2006 e Soares et al., 2013). Há relatos de autores que encontraram teores mais elevados de Fe, como Pereira et al. (2001), de até 436 mg dm^{-3} ; Oliveira et al. (2006), que relataram teor de 317 mg dm^{-3} ; e Milagres et al. (2007), que encontraram teores tão altos como 1.520 mg dm^{-3} de Fe. Vale ressaltar que esses últimos trabalhos envolveram diversas classes de solo, além de Latossolos. Os teores de Fe nos solos por M-1 (em mg dm^{-3}) podem ser interpretados, segundo Alvarez et al., (1999), como: muito baixo (≤ 8); baixo (9-18); médio (19-30); bom (31-45) e alto (> 45). Dessa forma, nenhuma amostra estaria na classe muito baixa, uma amostra (11₀₋₂₀) na classe baixa, três (10₀₋₂₀, 12₂₀₋₄₀ e 13₀₋₂₀) na classe média, nove na classe boa e treze na classe alta. Assim, espera-se que a

grande maioria dos solos possa suprir Fe às plantas a curto e médio prazo, havendo pequena chance de ocorrer deficiência.

Os teores de Fe extraídos por Mehlich-3 (M-3) variaram entre 32,0 e 118 mg dm⁻³. Valores maiores, de até cerca de 450 mg dm⁻³ foram encontrados por Rodrigues et al. (2001), Oliveira et al. (2006) e Silva et al. (2009); no entanto, esses trabalhos envolveram outras classes de solo, sendo que na maioria dos Latossolos, os teores extraídos por M-3 foram semelhantes aos obtidos neste estudo. A maior amplitude para M-1 indica que este extrator é mais sensível às características dos solos, sendo, portanto, mais interessante para diferenciar a probabilidade de resposta das plantas ao nutriente. No caso do M-3, na interpretação das diferentes classes de fertilidade do solo, a faixa de valores seriam menores, dada menor amplitude de Fe extraído pelo método.

Houve solos nos quais os teores de Fe extraídos pelos dois extratores foram bastante diferentes. A relação entre os teores extraídos pelos dois extratores (Mehlich-1/ Mehlich-3) teve extremos entre 0,28 e 3,18 (Quadro 4). Para a maioria dos solos, 20 dos 26, a relação entre M-1 e M-3 ficou entre 0,70 e 1,30, indicando que os extratores têm capacidade de extração semelhante. A média dos teores de Fe extraídos, em torno de 65 mg dm⁻³ para ambos, e a relação média entre os extratores, muito próxima de 1,0 (Quadro 4), também indicam que, para muitos solos, os métodos se equivalem, como observado por Silva & Menezes (2010). Alguns autores, como Rodrigues et al. (2001) e Abreu et al. (2004), por outro lado, verificaram teores superiores de Fe na extração com M-3. Considerando que o M-3 atua sobre mais formas de Fe, dada sua natureza ácida e quelante, poderia se esperar que o mesmo extraísse maiores teores de Fe do solo. No entanto, isso não é observado em muitos casos. Uma possível explicação é a maior acidez do M-1 em relação ao M-3 (pH em torno de 1,2 e 2,5, respectivamente), o que aumenta sua capacidade de extração.

Outra evidência da semelhança entre os métodos M-1 e M-3 é a alta correlação entre os extratores e o valor próximo da unidade do coeficiente angular (Figura 6). Correlações positivas entre os dois extratores foram também observadas por Rodrigues et al. (2001), Abreu et al. (2004) e Silva et al. (2009), que obtiveram, respectivamente, coeficientes de correlação de 0,69, 0,97 e 0,89.

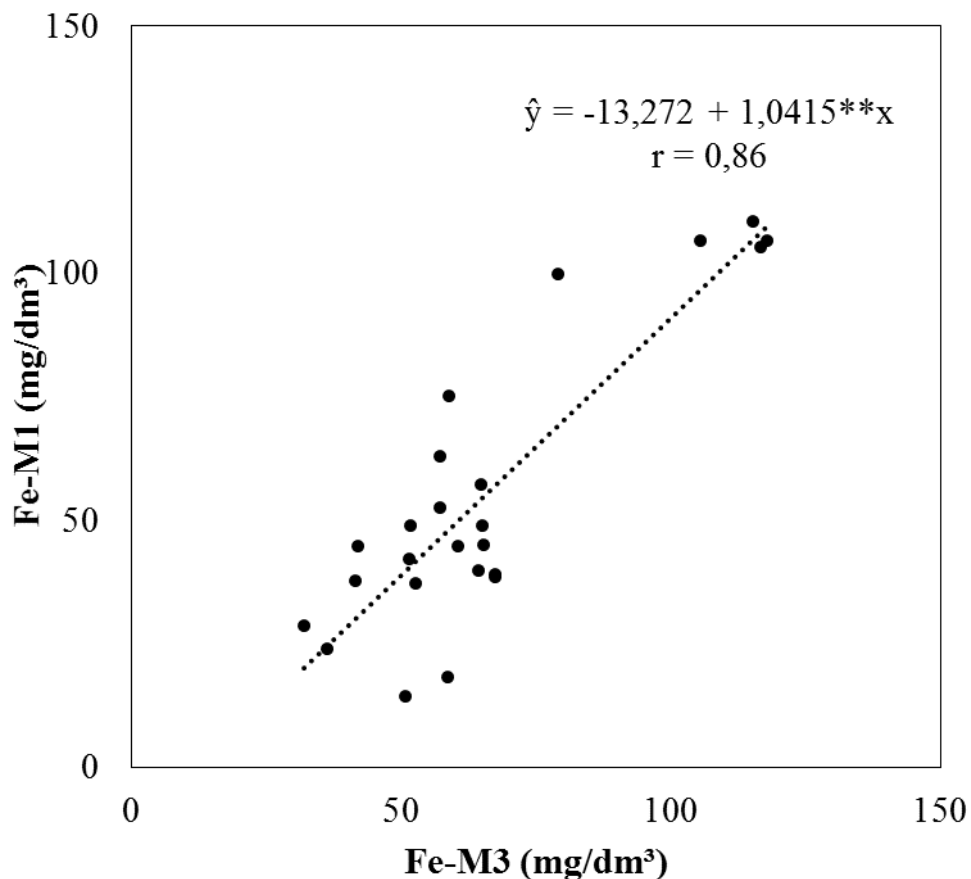


Figura 6 – Correlação entre os teores de Fe obtidos por Mehlich-1 (M-1) e Mehlich-3 (M-3).

**, significativo a 1 % pelo teste F.

Além de estabelecer relações entre os métodos, é interessante compreender como eles se correlacionam com diferentes atributos do solo (Quadro 5). Apesar dos coeficientes de determinação não serem elevados para todos os atributos, estes fornecem importantes informações sobre a influência dos mesmos sobre os extratores. Ambos foram afetados de maneira semelhante pelos atributos do solo e apresentaram oito correlações significativas em comum (pH, Al^{3+} , Fe_d , Fe_p , P-rem, EU, H+Al e Fe_p/Fe_d). Além disso, o M-1 apresentou correlação significativa com 16 dos atributos, enquanto o M-3, com 12, demonstrando que o primeiro extrator é influenciado por um número maior de variáveis, justificando a maior amplitude de valores observados para M-1. De forma geral, pode-se agrupar os atributos que influenciam nos teores de Fe extraídos por M-1 e M-3 em três grupos: (a) fertilidade do solo (pH, teores de cátions e suas relações); (b) textura (teor de argila, P-rem e EU) e (c) disponibilidade e formas de Fe (MO , Fe_p , Fe_d , $Fe-CC$ e suas relações).

Quadro 5 – Correlação entre os teores de Fe obtidos por Mehlich-1 (M-1) e Mehlich-3 (M-3) e os atributos individualizados do solo

Nº	Equação	r
Mehlich-1		
1	M-1 = - 13,272 + 1,041**M-3	0,87
2	M-1 = 223,607 - 32,971**pH	-0,69
3	M-1 = 29,662 + 0,574**m	0,65
4	M-1 = 34,440 + 35,285**Al ³⁺	0,62
5	M-1 = 81,945 - 0,455**Fe _d	-0,52
6	M-1 = 64,343 - 5,846*Ca ²⁺	-0,49
7	M-1 = 64,775 - 4,002*SB	-0,49
8	M-1 = 64,126 - 14,34*Mg ²⁺	-0,47
9	M-1 = 38,104 + 3,058*Fe _p	0,46
10	M-1 = 37,552 + 1,316*P-rem	0,45
11	M-1 = 101,473 - 0,178*EU	-0,45
12	M-1 = 66,569 - 3,808*t	-0,44
13	M-1 = 28,061 + 3,766°H+Al	0,40
14	M-1 = 63,679 - 0,562°V	-0,39
15	M-1 = 44,9109 + 68,368°Fe _p /Fe _d	0,39
16	M-1 = 62,755 - 0,093°K	-0,36
Mehlich-3		
17	M-3 = 26,253 + 0,716**M-1	0,87
18	M-3 = 37,934 + 1,671**P-rem	0,82
19	M-3 = 23,184 + 5,092**H+Al	0,81
20	M-3 = 41,618 + 3,263**Fe _p	0,73
21	M-3 = 36,805 + 5,045**MO	0,61
22	M-3 = 52,937 + 51,715*Fe _p /Fe _d	0,46
23	M-3 = 155,659 - 17,663*pH	-0,45
24	M-3 = 53,179 + 17,782*Al ³⁺	0,41
25	M-3 = 93,957 - 0,470*Argila	-0,41
26	M-3 = 97,483 - 0,127*EU	-0,40
27	M-3 = 81,009 - 0,268°Fe _d	-0,37
28	M-3 = 23,345 + 11,386°Fe-CC	0,36

°, * e **, significativos a 10, 5 e 1 %, respectivamente, pelo teste F.

No grupo dos aspectos relacionados à fertilidade do solo, ocorre uma relação contrária entre os teores de Fe extraídos e o pH dos solos (Eq. 2 e 23). Para M-1, esse atributo explica 48 % das variações dos teores de Fe ($R^2 = 0,48$) e foi o que melhor se correlacionou com o extrator. Já para M-3 apenas 20 % da variação ($R^2 = 0,20$) é explicada pelo atributo, o que indica que o primeiro extrator é mais sensível a variações de pH. De forma semelhante, os teores de cátions básicos (Ca, Mg e K), bem como os atributos derivados desses (SB e V), também têm relação contrária com o teor de Fe extraído, uma vez que acompanham o aumento de pH dos solos (Eq. 6, 7, 8, 14 e 16). Já os atributos que têm relação inversa com o pH (Al³⁺, m e H+Al), têm relação direta com a quantidade de Fe extraída pelos extratores (Eq. 3, 4, 13, 19

e 24). Vale destacar a elevada correlação entre M-1, m e Al^{3+} , sendo que essas variáveis explicam individualmente cerca de 40 % da variação do teor de Fe extraído ($R^2 = 0,42$ e $0,39$, respectivamente), e a elevada correlação entre M-3 e H+Al, sendo que esta variável explica 65 % da variação do teor de Fe extraído.

Com relação aos aspectos referentes à textura, o aumento do teor de argila, e conseqüentemente, do valor de equivalente de umidade (EU) dos solos, leva a uma redução no teor de Fe extraído pelos extratores (Eq. 11, 25 e 26), de forma contrária ao que ocorre com o P-rem, que tem relação inversa com o teor de argila e portanto, correlação positiva com os extratores (Eq. 10 e 18).

No que se refere as formas de Fe no solo, as frações mais disponíveis de Fe, como Fe-CC e Fe_p , correlacionam-se positivamente com os teores extraídos por M-1 e M-3 (Eq. 9, 15, 20, 22 e 28), corroborando os dados encontrados por Oliveira et al. (2006). Esses autores encontraram elevados coeficientes de determinação (R^2) entre os dois extratores e formas de Fe ligadas à matéria orgânica e oxihidróxidos de Fe amorfos. Sharma et al. (2000) e Soumaré et al. (2003) também concluíram que os teores de Fe disponíveis dependem amplamente do teor de carbono dos solos.

O teor de oxihidróxidos de alta cristalinidade (Fe_d) apresentou correlação negativa com os teores de Fe pelos extratores (Eq. 5 e 27), indicando que essas formas de Fe limitam significativamente a disponibilidade de Fe para as plantas. Dessa forma, quanto mais intemperizados e argilosos forem os solos, maior proporção do Fe deve estar associada aos oxihidróxidos cristalinos e portanto, menor deve ser a disponibilidade do elemento às plantas.

Os diversos atributos do solo que apresentaram, individualmente, correlações significativas com os extratores (Quadro 5) foram combinados para desenvolver equações por meio de regressão múltipla (Quadro 6). Verificou-se o aumento do coeficiente de determinação das equações para ambos os extratores para valores tão altos quanto 0,93 para Mehlich-1 e 0,91 para o extrator M-3 (Eq. 29 e 41).

A elaboração de equações por regressão múltipla também permitiu verificar a influência das formas de Fe de forma conjunta sobre os extratores sem influência de outros atributos do solo (Eq. 39, 51 e 52). Pelos valores de R^2 de 0,74 para Eq. 39, 0,61 para Eq. 57 e para a Eq. 52, pode-se perceber que as formas de Fe têm maior correlação e explicam melhor as variações dos teores de Fe extraídos por M-1, do

que por M-3. É interessante notar que o atributo Fe_o , relacionado ao Fe em oxihidróxidos de baixa cristalinidade, não apresentou correlação significativa com qualquer dos dois extratores; no entanto, foi significativo em diversas equações geradas por regressão múltipla (Eq. 29, 30, 32, 35, 36, 41, 42, 44, 51 e 52). Isso significa que individualmente este atributo não é capaz de explicar as variações dos teores de Fe pelos extratores, mas em conjunto tem boa correlação com ambos os métodos.

Além de permitir analisar o efeito de atributos em conjunto sobre os extratores, a regressão múltipla também permite refinar a correlação entre extratores (Quadro 6). A simples inclusão do atributo SB garantiu melhorias significativas na correlação entre M-1 e M-3, elevando o R^2 de 0,75 para 0,89 (Eq. 34). Outros atributos, como teor de argila, pH, m e Al, podem ser inseridos na correlação, garantindo melhorias na correlação entre os extratores (Eq. 31, 33, 43 e 46) e aumentando o coeficiente de determinação para valores tão altos quanto 0,91 para M-1 e 0,86 para M-3. Equações que permitem interconversão dos valores de M-1 e M-3, como as citadas anteriormente, podem ser úteis para comparação ou transformação dos teores de Fe extraídos pelos dois extratores, uma vez que em muitos trabalhos a extração do Fe é realizada seguindo apenas um dos métodos.

A produção de matéria seca da parte aérea, teor e conteúdo de Fe nas plantas de milho são apresentados no Quadro 7. A matéria seca da parte aérea variou entre 14,04 e 41,64 g/vaso, no entanto, na grande maioria dos tratamentos, esse valor ficou próximo de 20 g por planta (Quadro 7).

O teor de Fe nas plantas variou entre 56,5 e 122,9 mg kg^{-1} , semelhantes aos obtidos por Fageria et al. (2002), Abreu et al. (2004), Pigozzo et al. (2008) e Silva et al. (2009). Os teores médios do micronutriente estão inseridos na faixa adequada segundo Raij et al. (1997), Malavolta et al. (1997) e Epstein & Bloom (2005), que afirmam que os teores foliares na matéria seca de milho devem estar entre 30 e 250 mg kg^{-1} .

Quadro 6 – Regressão linear múltipla entres os teores de Fe obtidos por Mehlich-1 (M-1) e Mehlich-3 (M-3) e atributos do solo

Nº	Equação	R ²
29	M-1 = 19,822 + 0,337**m + 5,928**MO + 1,132°P-rem + 2,792**Fe _p + 4,519**Fe _o - 5,850**SB - 0,198°EU	0,93
30	M-1 = 105,837 + 5,678**MO + 3,483**Fe _p + 5,099**Fe _o - 4,508**SB - 0,361**EU - 0,287*Fe _d	0,91
31	M-1 = 33,855 + 0,828**M-3 + 0,256**m - 8,726°pH	0,91
32	M-1 = 75,661 + 0,301*m + 7,530**MO + 2,710**Fe _p + 4,851**Fe _o - 3,963**SB - 0,379**EU	0,90
33	M-1 = - 18,758 + 0,880**M-3 + 0,361**m	0,89
34	M-1 = - 1,792 + 0,978**M-3 - 3,075**SB	0,89
35	M-1 = 98,137 + 4,123**Fe _o + 8,263**MO + 3,251**Fe _p - 0,413**EU - 5,263**SB	0,86
36	M-1 = 67,505 + 4,908**MO + 3,137**Fe _p + 3,000*Fe _o + 0,470**m - 0,340**EU	0,84
37	M-1 = 64,790 + 1,045°P-rem + 4,565**Fe _p - 4,526**SB - 0,620*Argila	0,82
38	M-1 = - 5,180 + 1,766**P-rem + 3,592**Fe _p + 0,367**m	0,78
39	M-1 = - 23,714 + 3,638**Fe _p + 24,237**Fe-CC - 0,551**Fe _d	0,74
40	M-1 = 95,999 - 3,141°SB - 0,128°EU	0,34
41	M-3 = 69,817 + 7,966**MO + 2,329**Fe _p + 4,379**Fe _o + 7,929*Fe-CC - 2,032*SB - 0,341**EU - 0,199*Fe _d	0,91
42	M-3 = 67,679 + 6,280**MO + 2,778**Fe _p + 3,156**Fe _o + 9,193**Fe-CC - 0,314**EU - 0,253*Fe _d	0,88
43	M-3 = 60,231 + 12,096°Al ³⁺ + 0,523**M-1 - 0,489**Argila	0,86
44	M-3 = 54,977 + 3,712**H+Al + 3,435*MO + 1,512*Fe _p + 2,240**Fe _o	0,86
45	M-3 = 69,777 + 6,822**MO - 0,392*Argila - 0,237**EU + 3,027** Fe _p + 8,795*Fe-CC	0,84
46	M-3 = 49,740 + 0,674**M-1 - 0,340**Argila	0,83
47	M-3 = 47,572 + 4,556**H+Al + 1,547*Fe _p - 0,451**Argila	0,80
48	M-3 = 55,527 + 3,187**Fe _p + 12,173**Fe-CC + 2,271°MO - 0,725**Argila - 0,313**Fe _d	0,79
49	M-3 = 44,097 + 6,057**H+Al - 0,428*Argila	0,74
50	M-3 = 28,623 + 3,469**MO + 2,659**Fe _p	0,69
51	M-3 = 44,576 + 3,155**Fe _p + 1,801*Fe _o - 0,180 ^(0,12) Fe _d	0,61
52	M-3 = 8,808 + 2,234*Fe _p + 2,456°Fe _o + 16,987**Fe-CC - 0,510**Fe _d	0,57

** , significativos 1 % pelo teste F.

Quadro 7 – Matéria seca, teor e conteúdo de Fe nas plantas cultivadas em amostras de 13 solos coletadas em duas profundidades

Solo _{camada}	Matéria seca	Teor de Fe	Conteúdo de Fe
cm	g	mg kg⁻¹	mg planta⁻¹
1 ₀₋₂₀	24,23	63,58	1,52
1 ₂₀₋₄₀	26,08	56,51	1,34
2 ₀₋₂₀	25,16	70,57	1,75
2 ₂₀₋₄₀	19,18	94,74	1,84
3 ₀₋₂₀	23,30	60,16	1,37
3 ₂₀₋₄₀	16,63	70,16	1,17
4 ₀₋₂₀	20,71	68,48	1,44
4 ₂₀₋₄₀	19,42	70,37	1,37
5 ₀₋₂₀	23,77	71,04	1,63
5 ₂₀₋₄₀	16,14	68,82	1,15
6 ₀₋₂₀	18,26	68,20	1,28
6 ₂₀₋₄₀	16,71	58,26	0,98
7 ₀₋₂₀	23,44	65,46	1,53
7 ₂₀₋₄₀	16,95	74,41	1,2
8 ₀₋₂₀	19,64	68,04	1,33
8 ₂₀₋₄₀	25,47	122,98	3,15
9 ₀₋₂₀	17,80	77,22	1,36
9 ₂₀₋₄₀	19,50	56,98	1,11
10 ₀₋₂₀	22,85	75,48	1,74
10 ₂₀₋₄₀	19,96	57,52	1,18
11 ₀₋₂₀	14,04	58,92	0,92
11 ₂₀₋₄₀	23,38	88,16	2,11
12 ₀₋₂₀	28,13	89,50	2,47
12 ₂₀₋₄₀	22,32	98,27	2,36
13 ₀₋₂₀	14,75	108,84	1,50
13 ₂₀₋₄₀	41,64	118,09	4,89
Média	21,52	76,18	1,68
CV (%)	23,2	28,1	17,7

Houve correlação positiva entre as variáveis matéria seca e teor de Fe na planta (Quadro 8) indicando que plantas com maiores teores do elemento na parte aérea tendem a produzir mais biomassa (Eq. 53). Assim, ainda há potencial de resposta das plantas ao Fe dentro da faixa de teores foliares considerada adequada, indicando que essa ampla faixa de adequação, entre 30 e 250 mg kg⁻¹, deve ser, na verdade, mais estreita. A produção de matéria seca pelas plantas, o teor e o conteúdo foliar de Fe correlacionaram-se positivamente com o teor de Fe_p (Eq. 54, 56 e 58), indicando que a fração Fe ligado aos componentes orgânicos do solo é a que mais contribui para a disponibilidade do elemento à planta, como constatado por Agbenin (2003) e Wei et al. (2010). O teor de argila do solo também influenciou na produção de

matéria seca (Eq. 55). Santos et al. (2008) também observaram correlação positiva entre produtividade da soja e teor de argila dos solos. Este atributo também apresentou correlação positiva com o teor de Fe, bem como com o conteúdo de Fe nas plantas (Eq. 57 e 59). Apesar dessas correlações não serem altamente significativas e apresentarem baixo coeficiente de determinação (Quadro 8), são indícios da importância da textura do solo na produtividade do milho, bem como na dinâmica do elemento Fe no solo e na planta.

Os métodos M-1 e M-3 foram ineficientes em avaliar a disponibilidade de Fe para as plantas de milho. Não houve correlação entre o teor de Fe no solo pelos extratores e seu teor na planta (0,02^{ns} para M-1 e 0,07^{ns} para M-3) nem com o acúmulo na parte aérea (0,01^{ns} para M-1 e 0,02^{ns} para M-3). Essa falta de correlação já havia sido observada por Abreu et al. (2004). Esses autores trabalharam com milho e soja e os extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Resina, DTPA e AB-DTPA e não obtiveram correlações entre teores e conteúdos de Fe com nenhum dos extratores para ambas as espécies. Guimarães et al. (2014) avaliaram a correlação entre teores de Fe no solo por Mehlich-1 e EDTA e progênies de erva-mate e também não obtiveram correlação com o extrator ácido. Rodrigues et al. (2001) avaliaram a correlação entre teores e conteúdos de Fe e Mn e os extratores M-1 e M-3 em três cultivos sucessivos de arroz e não obtiveram correlações positivas apenas no primeiro cultivo com o elemento Fe, ao contrário do observado por Bataglia & Raij (1989), que não obtiveram correlações positivas com extratores ácidos.

Quadro 8 – Correlação entre matéria seca na parte aérea (MS), teor e conteúdo de Fe na planta e teor de Fe-pirofosfato (Fe_p) e de argila

Nº	Equação	R ²
53	MS = 8,813 + 0,173**TeorFe	0,32
54	MS = 16,42(Fe _p) ^{0,149**}	0,36
55	MS = 15,939 + 0,091°Argila	0,12
56	Teor de Fe = 50,217 + 5,942**Fe _p	0,43
57	Teor de Fe = 56,025 + 0,329°Argila	0,13
58	Conteúdo de Fe = 1,238 + 0,057*Fe _p	0,24
59	Conteúdo de Fe = 0,836 + 0,014°Argila	0,12

°, * e **, significativos a 10, 5 e 1 %, respectivamente, pelo teste F.

CONCLUSÕES

1. Em Latossolos, a maior parte do teor de Fe do solo ocorre na forma de oxihidróxidos pedogênicos de elevada cristalinidade e de baixa solubilidade estando, portanto, pouco disponível às plantas. Por outro lado, o Fe ligado aos componentes orgânicos é a fração que mais contribui para a disponibilidade do elemento para as plantas, sendo que aquelas com maiores teores foliares de Fe produzem maior quantidade de biomassa;
2. Os extratores Mehlich-1 e Mehlich-3 foram ineficientes em avaliar a disponibilidade de Fe para as plantas de milho. A capacidade de extração de Fe dos dois métodos é semelhante e os mesmos apresentam elevada correlação entre si, sendo que a quantidade de Fe extraída pelo Mehlich-1 é mais influenciada por pH, m, Al^{3+} e Fe_d , enquanto Mehlich-3 é mais influenciado por P-rem, H+Al, Fe_p e MO;

LITERATURA CITADA

ABREU, C.A.; ABREU, M.F. & BERTON, R.S. Análise química de solo para metais pesados. In: ALVAREZ, V.V.C.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V. & COSTA, L.M. eds. Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa, Soc. Bras. Ci. Solo, 2002, p.645-692.

ABREU, C.A.; LOPES, A.S. & SANTOS, G.C.G. Micronutrientes. 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, Soc. Bras. Ci. Solo, 2007. p.645-736.

ABREU, C.A.; RAIJ, B. VAN; ABREU, M.F. & PAZ GONZALES, A. Avaliação da disponibilidade de manganês e ferro em solos pelo uso do método modificado da resina de troca iônica. R. Bras. Ci. Solo, 28:579-584, 2004.

AGBENIN, J.O. The distribution and transformation of iron and manganese in soil fractions in a savanna Alfisol under continuous cultivation. Nutr. Cycl. Agroecosys, 66:259-270, 2003.

ALLEN, B.L. & HAJEK, B.F. Mineral occurrence in soil environments. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. Minerals in Soil Environments. Madison, Soil Sci. Soc. Am., 1989. p.199-278.

ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; CANTARUTTI, R.B. & LOPES, A.S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. Viçosa, 1999. p.25-32.

ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E. & OLIVEIRA, J.A. Determinação e uso do fósforo remanescente. Viçosa, Soc. Bras. Ci. Solo, 25:27-33, 2000. (Boletim Informativo)

AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; COSTA, L.M.; DIAS, L.E. & BARROS, N.F. Aplicação de resíduo siderúrgico em um Latossolo: efeitos na correção do solo e na disponibilidade de nutrientes e metais pesados. R. Bras. Ci. Solo, 17:299-304, 1993.

BARBOSA, L.C.A.; FABRIS, J.D.; RESENDE, M.; COEY, J.M.D.; GOULART, A.T.; CADOGAN, J. & SILVA, E.G. Mineralogia e química de um Latossolo Câmbico desenvolvido de rocha pelítica do grupo bambuí, MG. R. Bras. Ci. Solo, 15:259-266, 1991.

BATAGLIA, O.C. & RAIJ, B. Eficiência de extratores de micronutrientes na análise de solo. R. Bras. Ci. Solo, 13:205-212, 1989.

BECEGATO, V.A. & FERREIRA, F.J.F. Gamaespectrometria, resistividade elétrica e susceptibilidade magnética de solos agrícolas no noroeste do estado do Paraná. R. Bras. Geof., 23:371-406, 2005.

BERNARDI, A.C.C.; SILVA, C.A.; PÉREZ, D.V. & MENEGUELLI, N.A. Analytical quality program of soil fertility laboratories that adopt Embrapa methods in Brazil. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 33:2661-2672, 2002.

BORTOLON, L.; GIANELLO, C. & SCHLINDWEIN, J.A. Avaliação da disponibilidade de fósforo no solo para o milho pelos métodos Mehlich-1 e Mehlich-3. Sci. Agríc, 10:305-312, 2009.

BORTOLON, L. & GIANELLO, C. Disponibilidade de cobre e zinco em solos do sul do Brasil. R. Bras.Ci. Solo, 33:647-658, 2009.

BORTOLON, L. & GIANELLO, C. Simultaneous multielement extraction with the Mehlich-1 solution for Southern Brazilian soils determined by ICP-OES and the effects on the nutrients recommendations to crops. R. Bras. Ci. Solo, 34:125-132, 2010.

BROADLEY, M.; BROWN, P.; CAKMAK, I.; RENGEL, Z. & ZHAO, F. Function of nutrients: micronutrients. In: MARSCHNER, P., ed. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants, 3.ed. London, Academic Press Elsevier, 2012. p. 191-248.

CAIRES, E.F. & FONSECA, A.F. Absorção de nutrientes pela soja cultivada no sistema de plantio direto em função da calagem na superfície. Bragantia, 59:213-220, 2000.

CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.S. & DECHEN, A.R. Efeito do pH e da incubação na extração do manganês, zinco, cobre e ferro no solo. R. Bras. Ci. Solo, 6:83-88, 1982.

CARVALHO FILHO, A.; CURI, N. & SHINZATO, E. Relações solo-paisagem no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais. *Pesq. Agropec. Bras.*, 45:903-916, 2010.

COHEN, C.K.; FOX, T.C.; GARVIN, D.F. & KOCHIAN, L.V. The role of iron-deficiency stress responses in stimulating heavy-metal transport in plants. *Plant Physiol.*, 116:1063-1072, 1998.

CURI, N. & FRANZMEIER, D.F. Toposequence of oxisols from the Central Plateau of Brazil. *Soil Sc. Soc. Am. J.*, 48:341-346, 1984.

DE FILIPPO, B.V. & RIBEIRO, A.C. *Análise química do solo*. 2.ed. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1997. 26p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. *Manual de métodos e análises de solo*. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EPSTEIN, E. & BLOOM, A.J. *Mineral nutrition of plants: principles and perspectives*. 2.ed. Sunderland, Sinauer Associates, 2005. 380p.

FAGERIA, N.K. & BALIGAR, V.C. Improving nutrient use efficiency of annual crops in Brazilian acid soils for sustainable crop production. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 32:1303-1319, 2001.

FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C. & CLARK, R.B. Micronutrients in crop production. *Advances in Agronomy*, 77:189-272, 2002.

FERREIRA, M.M; FERNADES, B. & CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:515-524, 1999.

FERREIRA, F.P.; AZEVEDO, A.C.; DALMOLIN, R.S.D. & GIRELLI, D. Carbono orgânico, óxidos de ferro e distribuição de agregados em dois solos derivados de basalto no Rio Grande do Sul - Brasil. *Ciência Rural*, 37:381-388, 2007.

FONTES, M.P.F.; CAMARGO, O.A. & SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. *Sci. Agric.*, 58:627-646, 2001.

FONTES, M.P.F. & WEED, S.B. Iron oxides in selected Brazilian Oxisols: I. Mineralogy. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55:1143-1149, 1991.

GUALBERTO, V.; RESENDE, M. & CURI, N. Química e mineralogia de Latossolos com altos teores de ferro da Amazônia e do Planalto Central. *R. Bras. Ci. Solo*, 11:245-252, 1987.

GUERINOT, M.L. & YI, Y. Iron: Nutritious, noxious, and not readily available. *Plant Physiol.*, 104:815-820, 1994.

GUIMARÃES, J.C.; REISSMANN, C.B; MOTTA, A.C.V.; GAIAD, S.; OLIVEIRA, E.B. & STURION, J.A. Relação de Zn, Fe, Cu e Mn entre solo e progênies de erva-mate. *Cerne*, 20:285-292, 2014.

HEINRICH, R.; MALAVOLTA, E.; MOREIRA, A.; FIGUEIREDO, P.A.M.; CABRAL, C.P. & RUSCHEL, J. Calagem e extratores químicos de manganês e zinco em Latossolo Vermelho e Neossolo Quartzarênico cultivados com soja. *Científica*, 34:66-74, 2006.

HERNÁNDEZ, J. & MEURER, E.J. Adsorção de fósforo e sua relação com formas de ferro em dez solos do Uruguai. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:223-230, 1998.

HOAGLAND, D.R. & ARNON, D.I. The water-culture method for growing plants without soil. *Calif. Agric. Exp. Stn Circ.*, 347:1-32, 1950.

INDA, A.V.; TORRENT, J.; BARRÓN, V.; BAYER, C & FINK, J.R. Iron oxides dynamics in a subtropical Brazilian Paleudult under long-term no-tillage management. *Scientia Agricola*, 70:48-54, 2013.

INDA, A.V; TOMASI, C.A.; OLIVEIRA, J.S. & FINK, J.R. Óxidos de ferro e área superficial de Latossolo subtropical sob campo e floresta nativa. *Ciência Rural*, 44:289-292, 2014.

INDA JUNIOR, A.V. & KÄMPF, N. Avaliação de procedimentos de extração dos óxidos de ferro pedogênicos com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:1139-1147, 2003.

JOHNSON, C.M. & ULRICH, A. Analytical methods for use in plants analyses. *Calif. Agric. Exp. Stn. Bull.*, 766:32-33, 1959.

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, Soc. Bras. Ci. Solo, 2000. p.107-138.

KÄMPF, N.; RESENDE, M. & CURI, N. Iron oxides in Brazilian Oxisols. In: BEINROTH, F.H.; CAMARGO, M.N. & ESWARAN, H., eds. INTERNATIONAL SOIL CLASSIFICATION WORKSHOP - Classification, Characterization and Utilization of Oxisols, Rio de Janeiro. Proceedings. Rio de Janeiro, 1988. p.71-77.

KÄMPF, N.; SCHEINOST, A.C. & SCHULZE, D.G. Oxide minerals. In: SUMNER, M.E., ed. Handbook of soil science. Athens, CRC Press, 2000. p.125-168.

KARLSSON, T.; PERSSON, P.; SKYLLBERG, C.M.M. & GIESLER., R. Characterization of Iron (III) in Organic Soils Using Extended X-ray Absorption Fine Structure Spectroscopy. Environ. Sci. Technol. 42:5449-5454, 2013.

KORCAK, R.F. & FANNING, D.S. Extractability of cadmium, copper, nickel, and zinc by double acid versus DTPA and plant content at excessive soil levels. J. Environ. Quality, 7:506-512, 1978.

LEPSCH, I.F. Formação e Conservação dos Solos. São Paulo, Oficina de Textos, 2002. 178p.

LINDSAY, W.L. Chemical equilibria in soils. New York, John Wiley and Sons, 1979, 449p.

LINDSAY, W.L. Inorganic equilibria affecting micronutrients. In: MORTVEDET, J.J.; GIORDANO, P.M. & LINDSAY, W.L., eds. Micronutrients in agriculture. Madison, Soil Sci. Soc. Am., 1972. p.89-111.

LINDSAY, W.L. & COX, F.R. Micronutrients soil testing for tropics. In: VLEK, P.L.G, ed. Micronutrients in tropical food crop production: developments in plant and soil sciences. Dordrecht, Martinus Nijhoff, 1985. p.169-200.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C. & OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2.ed. Piracicaba, Potafós, 1997. 315p.

MANZATTO, C.V.; FREITAS JÚNIOR, E. & PERES, J.R.R. Uso agrícola dos solos brasileiros. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2002. 174p.

MARQUES, J.J.; SCHULZE, D.G.; CURI, N. & MERTZMAN, S.A. Major element geochemistry and geomorphic relationships in Brazilian Cerrado soils. *Geoderma*, 119:179-195, 2004.

McKEAGUE, J.A. & DAY, J.H. Dithionite and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. *Can. J. Soil Sci.*, 46:13-22, 1966.

MEHLICH, A. Mehlich-3 soil test extractant: a modification of Mehlich-2 extractant. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 15:1409-1416, 1984.

MELO, V.F.; FONTES, M.P.F.; NOVAIS, R.F.; SINGH, B. & SCHAEFER, C.E.G.R. Características dos óxidos de ferro e de alumínio de diferentes classes de solos. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:19-32, 2001.

MILAGRES, J.J.M.; ALVAREZ, V.H.; CANTARUTTI, R.B. & NEVES, J.C.L. Determinação de Fe, Zn, Cu e Mn, extraídos do solo por diferentes extratores e dosados por espectrofotometria de emissão ótica em plasma induzido e espectrofotometria de absorção atômica. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:237-245, 2007.

MORAES, J.F.V. & DYNIA, J.F. Alterações nas características químicas e físico-químicas de um solo Gley pouco húmico sob inundação e após a drenagem. *Pesq. Agropec. Bras.*, 27:223-235, 1992.

MORAES, V.H.F. Ocorrência e correção de deficiência de ferro em (*Arachis pintoi*) em latossolo amarelo. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/Centro de Pesquisa Agroflorestal da Amazônia Ocidental, 10:1-4, 1998. (Comunicado Técnico)

MOREIRA, A.; TEIXEIRA, W.G. & MARTINS, G.C. Extratores e disponibilidade de micronutrientes em Terra Preta de Índio da Amazônia Central. *Cienc. Suelo*, 27:127-134, 2009.

MULCHI, C.L.; ADAMU, C.A.; BELL, P.F. & CHANEY, R.L. Residual heavy metal concentrations in sludge-amended coastal plain soils – I. Comparison of extractants. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 22:919-941, 1991.

MYLAVARAPU, R.; SANCHEZ, J.; NGUYEN, J.; BARTOS, J. Evaluation of Mehlich-1 and Mehlich-3 extraction procedures for plant nutrients in acid mineral soils of Florida. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 33:807-820, 2002.

NASCIMENTO, C.W.A.; LEITE, P.V.V.; NASCIMENTO R.S.M.P. & MELO, E.C.C. Influência da calagem no fracionamento e na disponibilidade de manganês em solos de Pernambuco. *Agropecuária Técnica*, 26:22-28, 2005.

NELSON, D.W. & SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H. & KEENEY, D.R., eds. *Methods of soil analysis - chemical and microbiological properties*. 2.ed. Madison, Am. Soc. Agron. and Soil Sci. Soc. Am., 1982. p.539-579.

NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.

NUNES, F.N.; NOVAIS R.F.; SILVA, I.R.; GEBRIM, F.O. & SÃO JOSÉ, J.F.B. Fluxo difusivo de ferro em solos sob influência de doses de fósforo e de níveis de acidez e umidade. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:423-429, 2004.

OLIVEIRA, F.C.; MATTIAZZO, M.E.; MARCIANO, C.R. & ABREU JÚNIOR, C.H. Fitodisponibilidade e teores de metais pesados em um Latossolo Amarelo distrófico e em plantas de cana-de-açúcar adubadas com composto de lixo urbano. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:737-746, 2002.

OLIVEIRA, A.B.; WILLIAMS, C. & NASCIMENTO, A. Formas de Manganês e Ferro em solos de referência de Pernambuco. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:99-110, 2006.

ORTIZ, F.R.; BRITO, O.R.; BORKERT, C.M. & BRITO, R.M. Procedimentos para obtenção de extratos e determinação de micronutrientes em amostras de solo. *Semina: Ciências Agrárias*, 26:49-52, 2005.

PEREIRA, M.G.; PÉREZ, D.V.; VALLADARES, G.S.; SOUZA, J.M.P.F. & ANJOS, L.H.C. Comparação de métodos de extração de cobre, zinco, ferro e manganês em solos do Rio de Janeiro. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:655-660, 2001.

PEREIRA, T.T.C.; KER, J.C.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. & ALMEIDA, C.C. Gênese de latossolos e cambissolos

desenvolvidos de rochas pelíticas do Grupo Bambuí – Minas Gerais. R. Bras. Ci. Solo, 34:1283-1295, 2010.

PIGOZZO, A.T.J.; LENZI, E.; LUCA JÚNIOR, J.; SCAPIM, C.A.; VIDIGAL FILHO, P.S. & COSTA, A.C.S. Reação do solo e disponibilidade de micronutrientes, em solo de textura média, tratado com lodo de esgoto e cultivado com milho. Acta Sci. Agron., 30:569-579, 2008.

PIMENTEL-GOMES, F. Curso de estatística experimental. 13.ed. Piracicaba, Nobel, 1990. 468p.

RAIJ, B.V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. & FURLANI, A.M.C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2.ed. Campinas, Instituto Agrônômico/ Fundação IAC. 1997. 285p.

RAIJ, B.V. Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba, Agronômica Ceres/Potafós, 1991. 343 p.

RANNO, S.K.; SILVA, L.S.; GATIBONI, L.C. & RHODEN, A.C. Capacidade de adsorção de fósforo em solos de várzea do Estado do Rio Grande do Sul. R. Bras. Ci. Solo, 31:21-28, 2007.

ROCA, J. & POMARES, F. Prediction of available heavy metals by six chemical extractions in a sewage sludge-amended soil. Comm. Soil Sci. Plant Anal., 22:2119-2136, 1991.

RODRIGUES, M.R.L; MALAVOLTA, E. & MOREIRA, A. Comparação de soluções extratoras de ferro e manganês em solos da Amazônia. Pesq. Agropec. Bras., 36:143-149, 2001.

SANTOS, F.C.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; FOLONI, J.M.; ALBUQUERQUE FILHO, M.R. & KER, J.C. Produtividade e aspectos nutricionais de plantas de soja cultivadas em solos de cerrado com diferentes texturas. R. Bras. Ci. Solo, 32:2015-2025, 2008.

SCHAEFER, C.E.G.R.; FABRIS, J.D & KER, J.C. Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): A Review. Clay Minerals, 43:1-18, 2008.

SCHONINGER, E.L; GATIBONI, L.C & LINHARES, D. Método Mehlich 3 como substituinte ao HCl para extração de Cobre e Zinco em solos com alto teor de matéria orgânica do sul do Brasil. Ciência Rural, 42:1200-1203, 2012.

SCHULTHAIS, F. Contribuição de resíduos de milho e de soja para o carbono e suas frações em amostras de solos submetidas a cultivos sucessivos e à aplicação de fósforo. 2013. 64f. Tese (Doutorado em Solos e nutrição de plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

SCHWERTMANN, U. & KÄMPF, N. Óxidos de ferro jovens em ambientes pedogenéticos brasileiros. *R. Bras. Ci. Solo*, 7:251-256, 1983.

SCHWERTMANN, U. & TAYLOR, R.M. Iron Oxides. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. *Minerals in soil environments*. 2.ed. Madison, Soil Sci. Soc. Am., 1989. p.379-438.

SHARMA, B.D.; MUKHOPADHYAY, S.S.; SIDHU, P.S. & KATYAL, J.C. Pedospheric attributes in distribution of total and DTPA-extractable Zn, Cu, Mn, and Fe in Indo-Gangetic plains. *Geoderma*, 96:131-151, 2000.

SILVA, T.O. & MENEZES, R.S.C. Disponibilidade de micronutrientes catiônicos em solo arenoso após adubação orgânica. *R. Bras. Ci. Ag.*, 5:328-335, 2010.

SILVA, M.A.G.; MUNIZ, A.S.; COSTA, A.C.S. & CEGANA, A.C.V. Extratores para a quantificação de Fe em solos cultivados com soja. *Acta Sci. Agron.*, 26:367-371, 2004.

SILVA, M.A.G.; MUNIZ, A.S.; NODA, A.Y.; MARCHETTI, M.E.; MATA, J.D.V. & LOURENTE, E.R.P. Metodologias e eficiência de extratores para zinco, cobre, ferro e manganês. *Acta Sci. Agron.*, 31:537-545, 2009.

SOARES, R.; ESCALEIRA, V.; MONTEIRO, M.I.C.; SANTELLI, R.E. & BERNARDI, A.C.C. Comparação de métodos convencional e alternativo para determinação de sódio, potássio e fósforo em extratos de solos obtidos com solução Mehlich-1. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:105-112, 2012.

SOARES, R.; ESCALEIRA, V.; CAMPOS, D.V.B.; MONTEIRO, M.I.C.; SANTELLI, R.E. & BERNARDI, A.C.C. Comparação de métodos convencional e alternativo para determinar Cu, Fe, Mn e Zn em extratos de solos obtidos com solução de Mehlich-1. *R. Bras. Ci. Solo*, 37:707-714, 2013.

SOUMARÉ, M.; TACK, F.M.G. & VERLOO, M.G. Distribution and availability of iron, manganese, zinc, and copper in four tropical agricultural soils. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 34:1023-1038, 2003.

SOUZA JÚNIOR, I.G.; COSTA, A.C.S.; VILAR, C.C. & HOERPES, A. Mineralogia e susceptibilidade magnética dos óxidos de ferro do horizonte B de solos do Estado do Paraná. *Ciência Rural*, 40:513-519, 2010.

VALLADARES, G.S.; PEREIRA, M.G. & ANJOS, L.H.C. Phosphate sorption in low activity clay soils. *Bragantia*, 62:111-118, 2003.

VELLOSO, A.C.X.; OLIVEIRA, C. & LEAL, J.R. Processos redox em glei húmico do Estado do Rio de Janeiro: variações das concentrações de Fe II e fosfato. *R. Bras. Ci. Solo*, 17:27-33, 1993.

VENDRAME, P.R.S.; EBERHARDT, D.N.E.; BRITO, O.R.; MARCHÃO, R.L.; QUANTIN, C. & BECQUER, T. Formas de ferro e alumínio e suas relações com textura, mineralogia e carbono orgânico em Latossolos do Cerrado. *Semina: Ciências Agrárias*, 21:1657-1666, 2011.

VILAR, C.C.; COSTA, A.C.S.; HOEPERS, A. & SOUZA JUNIOR, I.G. Capacidade máxima de adsorção de fósforo relacionada a formas de ferro e alumínio em solos subtropicais. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:1059-1068, 2010.

WANG, C. Extractable Al, Fe and Mn (and Si if desired). In: McKEAGUE, J.A. ed. *Manual on soil sampling and methods of analysis*. 2.ed. Ottawa, Can. Soc. Soil Sci., 1978. p.98-108.

WEBER, O.L.S.; CHITOLINA, J.C.; CAMARGO, O.A. & ALLEONI, L.R.F. Cargas elétricas estruturais e variáveis de solos tropicais altamente intemperizados. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:867-873, 2005.

WEI, X.; SHAO, M; ZHUANG, J. & HORTON, R. Soil iron fractionation and availability at selected landscape positions in a loessial gully region of northwestern China. *Soil Sci. Plant Nut.*, 56:617–626, 2010.

WHITE, G.N. & DIXON, J.B. Kaolin-Serpentine minerals. In: AMONETTE, J.E.; BLEAM, W.F.; SCHULZE, D.G. & DIXON, J.B., eds. *Soil mineralogy with environmental applications*. Madison, Soil Sc. Soc. Am., 2002, p.389-414.

ZANELLI, R.; EGLI, M.; MIRABELLA, A.; GIACCAI, D & ABDELMOULA, M. Vegetation effects on pedogenetic forms of Fe, Al and Si and on clay minerals in soils in Southern Switzerland and Northern Italy. *Geoderma*, 141:119-129, 2007.

ZINDER, B; FURRER, G. & STUMM, W. The coordination chemistry of weathering: II. Dissolution of Fe(III) oxides. *Geo. Cosmo. Acta* 50:1861-1869, 1986.