

Óxidos de ferro de solos formados sobre gnaiss do Complexo Bação, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais

Múcio do Amaral Figueiredo⁽¹⁾, José Domingos Fabris⁽²⁾, Angélica Fortes Drummond Chicarino Varajão⁽¹⁾, Paulo Rogério da Costa Couceiro⁽³⁾, Ivan Soares Loufí⁽¹⁾, Izabel de Souza Azevedo⁽⁴⁾ e Vijayendra Kumar Garg⁽⁵⁾

⁽¹⁾Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Dep. de Geologia, CEP 35400-000 Ouro Preto, MG. E-mail: m67f@yahoo.com.br, angelica@degeo.ufop.br, ivanlouf@hotmai.com ⁽²⁾Universidade Federal de Minas Gerais, Campus Pampulha, Dep. de Química, CEP 31270-901 Belo Horizonte, MG. E-mail: jdfabris@ufmg.br ⁽³⁾Universidade Federal do Amazonas, Campus Coroado, Dep. de Química, CEP 69077-000 Manaus, AM. E-mail: couceiro@ufam.edu.br ⁽⁴⁾Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, CEP 22290-180 Rio de Janeiro, RJ. E-mail: izabel@cbpf.br ⁽⁵⁾Universidade de Brasília, Instituto de Física, CEP 70919-970 Brasília, DF. E-mail: garg@unb.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi efetuar a caracterização mineralógica dos óxidos de ferro de horizontes B de três perfis de solos desenvolvidos sobre gnaiss do geodomínio do Complexo Bação, no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. As amostras foram coletadas ao longo dos segmentos de alta, média e baixa vertente. As frações de terra fina (diâmetro médio, $\phi = 2$ mm) foram separadas, em todas as amostras. A composição química dos elementos maiores foi determinada por meio da técnica de fluorescência de raios X; a análise mineralógica foi realizada com difratometria de raios X e espectroscopia Mössbauer. Todas as amostras têm composição mineralógica similar, cuja ocorrência geral corresponde à seqüência quartzo >> gibbsita > caulinita > goethita. Os resultados Mössbauer a 4,2 K confirmam a coexistência de goethita (majoritária) e hematita. Os conteúdos de alumínio isomórfico foram deduzidos dos valores de campos hiperfinos e correspondem às seguintes fórmulas químicas das goethitas: $\alpha\text{Fe}_{0,79}\text{Al}_{0,21}\text{OOH}$ (alta vertente), $\alpha\text{Fe}_{0,75}\text{Al}_{0,25}\text{OOH}$ (meia vertente) e $\alpha\text{Fe}_{0,78}\text{Al}_{0,22}\text{OOH}$ (baixa vertente). A dinâmica de transformação dos óxidos de ferro nos horizontes B ao longo da vertente é um indicador das oscilações paleoclimáticas na área: goethita mais aluminosa é um indicador do paleoambiente úmido, e goethita menos aluminosa revela condições pedogênicas mais secas.

Termos para indexação: hematita, goethita, espectroscopia Mössbauer, substituição de alumínio.

Iron oxides of soils formed on gneiss of the Bação Complex geodomain, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil

Abstract – The objective of this work was to characterize iron oxides from B-horizons of three soil profiles developing on gneiss of the Bação Complex geodomain in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Samples were collected from the upper, middle and lowest segments along the slope. The earth fine fractions (mean diameter, $\phi = 2$ mm) were separated for all samples. The chemical composition of the major elements was determined with the X-ray fluorescence technique; the mineralogical analysis was performed with powder X-ray diffractometer and Mössbauer spectroscopy. All samples have similar mineralogical composition, with a general occurrence corresponding to the sequence quartz >> gibbsite > kaolinite > goethite. From the 4.2 K-Mössbauer results, the coexistence of goethite (major) and hematite is confirmed. The isomorphic aluminum contents, as they were deduced from the hyperfine fields, lead to the following chemical formulas for goethites: $\alpha\text{Fe}_{0,79}\text{Al}_{0,21}\text{OOH}$ (upslope), $\alpha\text{Fe}_{0,75}\text{Al}_{0,25}\text{OOH}$ (midslope) and $\alpha\text{Fe}_{0,78}\text{Al}_{0,22}\text{OOH}$ (downslope). The iron oxides transformation dynamics in B horizons along the slope is a useful indicator of the paleo-climatic oscillations in this area: aluminous goethite is an indicator of humid paleo-environments, whereas aluminous-poorer goethite reveals drier pedogenic conditions.

Index terms: hematite, goethite, Mössbauer spectroscopy, aluminium substitution.

Introdução

O horizonte B geralmente testemunha parte significativa das alterações ocorridas durante o processo evolutivo dos solos e pode revelar indícios da

paleodinâmica ambiental do pedoambiente. O estudo da conjugação de características físicas, mineralógicas e químicas é fundamental para subsidiar interpretações dessas interações.

Muitos estudos de horizontes B ferruginosos têm apresentado resultados que estabelecem estreita relação entre a mineralogia dos óxidos de ferro (termo genérico que denota também hidróxidos ou oxidróxidos), processos de microagregação de partículas (Arduino et al., 1989; Goldberg, 1989; Colombo & Torrent, 1991; Píñheiro-Dick & Schwertmann, 1996; Alekseeva et al., 1999) e susceptibilidade erosiva (Galvão & Schulze, 1996; Rhoton et al., 1998; Figueiredo et al., 1999), além de servir de traçador na reconstituição da paleodinâmica ambiental (Arduino et al., 1984; Arduino et al., 1986).

Diversas técnicas têm sido empregadas na caracterização mineralógica dos óxidos de ferro de amostras de solos. Entre essas, destacam-se a difratometria de raios X (DRX; método do pó) e a espectroscopia Mössbauer, cuja especificidade permite a identificação e a quantificação das fases mineralógicas dos óxidos de ferro mais comumente encontradas em geomateriais complexos, como os de solos (Murad & Johnston, 1987; Fabris & Coey, 2002).

O objetivo deste trabalho foi efetuar a caracterização mineralógica dos óxidos de ferro de horizontes B de três perfis de solos desenvolvidos sobre gnaisse do geodomínio do Complexo Bação, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais.

Material e Métodos

A área de estudo localiza-se entre os paralelos 20°20'0" e 20°23'16"S e os meridianos 43°38'32" e 43°42'16"W, cobrindo aproximadamente 38 km². O Complexo Bação situa-se ao sul do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, Sudeste do Brasil (Figura 1). O embasamento cristalino granito-gnáissico-migmatítico, base de todas as unidades geológicas do Quadrilátero Ferrífero, aflora na área de investigação. Localmente, essa unidade litológica tem como características básicas maior bandamento, migmatização e riqueza em biotita (Salaroli, 1999; Vilela, 1999). As bases geomorfológicas gerais da área investigada podem ser descritas como colinas policonvexas de baixa declividade. Os regolitos são espessos, principalmente a zona saprolítica, demonstrando intensa atuação de intemperismo químico. A rede de drenagem desenvolve-se sob controle estrutural, com planícies de agradação sedimentar recentes (Bacellar, 2000). Todos os vales fluviais têm fundo plano – em virtude da grande acumulação de sedimentos – e o contato entre a planície fluvial e os segmentos de baixa vertente ocorre de forma abrupta, em ruptura de declive.

Procedeu-se à amostragem de material pedológico, para análises laboratoriais, de três horizontes B – Bi no segmento de alta vertente e Bw nos segmentos de meia e baixa vertente – de solos gnáissicos da referida área. As amostras foram coletadas em trincheiras com 1,9 m de profundidade média, nos segmentos a alta (VH2B), meia (VH3B) e baixa vertente (VH4B). Detalhes morfológicos dos perfis pedológicos são descritos por Figueiredo et al. (2004). No laboratório, as amostras foram secadas, destorroadas e peneiradas em peneiras de malha de 2 mm. Com o material obtido, foram efetuadas análises granulométricas, de acordo com método de rotina (pipeta) com argila dispersa em solução de NaOH 1 mol L⁻¹, conforme metodologia descrita em Embrapa (1997). A composição química total em Al₂O₃, SiO₂, Fe₂O₃, K₂O e TiO₂ foi determinada por fluorescência de raios X (FRX) em um equipamento Rigaku, modelo Geigerflex 3064, com curvas de calibração específicas para cada elemento químico.

Essa técnica de determinação multielementar evoluiu extraordinariamente nas últimas décadas. Os instrumentos de FRX modernos são capazes de produzir análises quantitativas de materiais complexos, como os geomateriais, com precisão que se iguala ou excede à dos métodos clássicos ou instrumentais, que requer ou disponibilidade de padrões de calibração que aproximam as amostras em propriedades químicas e físicas, ou métodos matemáticos satisfatórios para lidar com efeitos interelementares (Skoog et al., 1998; Schimidt et al., 1999; Wêgrzynek et al., 2003). A perda ao fogo (PF) foi determinada gravimetricamente, depois do aquecimento da amostra a 1.000°C por 1 hora.

O material obtido depois do peneiramento em malha de 2 mm foi tratado com NaOH 5 mol L⁻¹ (Norrish & Taylor, 1961; Kämpf & Schwertmann, 1982) para eliminação seletiva de silicatos e gibbsita, pela adição de 100 mL de solução NaOH 5 mol L⁻¹, em aproximadamente 1 g de amostra, em béquer de teflon. A mistura foi fervida por 1 hora em banho de areia, depois centrifugada a 3.000 rpm, por 10 minutos. O sobrenadante foi descartado e o resíduo submetido a lavagens seqüenciais: (i) com solução de NaOH 5 mol L⁻¹; (ii) com solução de HCl 0,5 mol L⁻¹ (15 a 20 minutos de contato); e (iii) com solução de (NH₄)₂CO₃ 0,5 mol L⁻¹ (duas repetições). O resíduo final foi secado em estufa a 110°C por 2 horas.

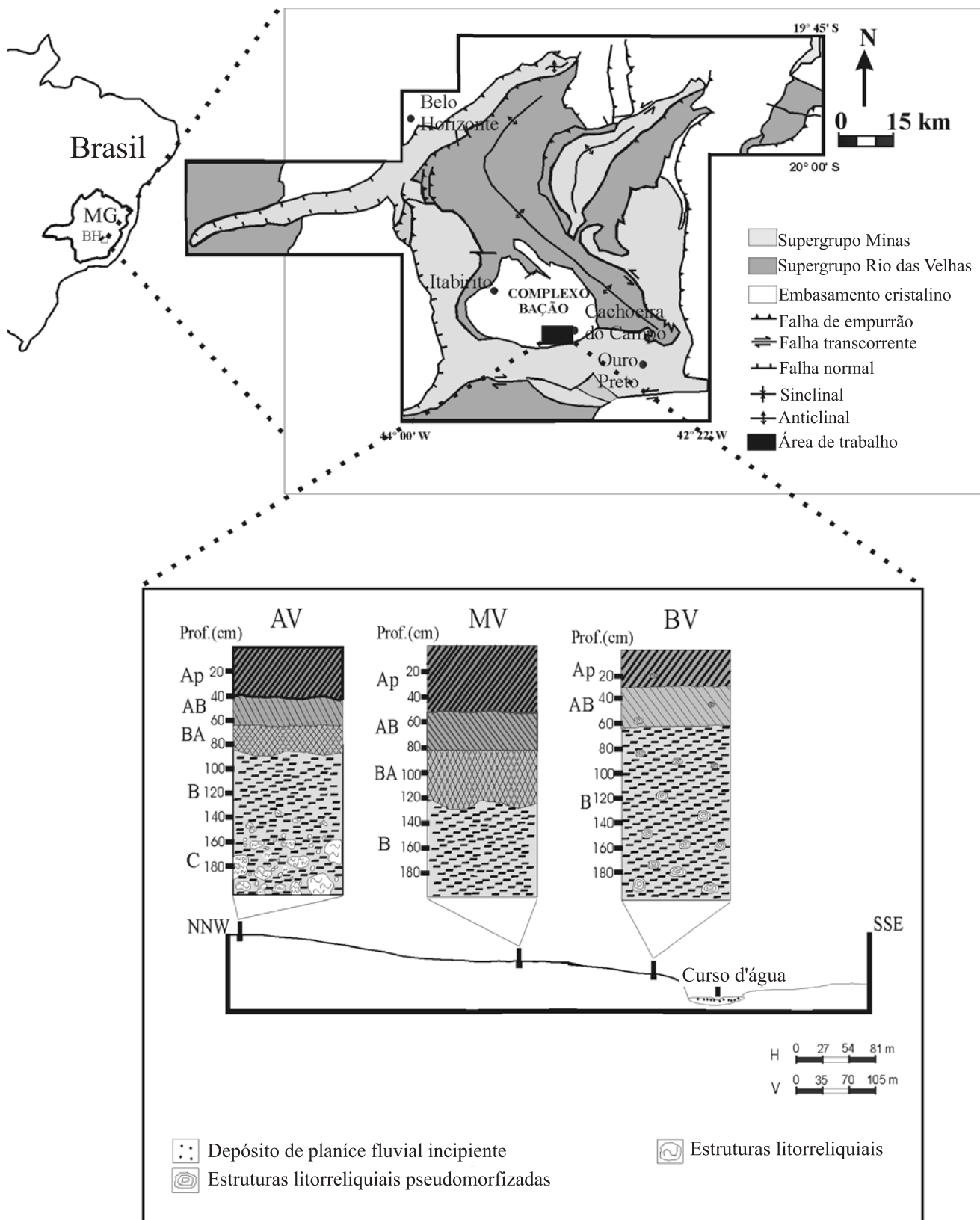


Figura 1. Mapa geológico, de localização e de amostragem dos perfis pedológicos. AV: alta vertente; MV: meia vertente; BV: baixa vertente.

O material in natura e o tratado com NaOH 5 mol L⁻¹ foram submetidos à análise de DRX (método do pó). Os difratogramas foram obtidos em um difratômetro Rigaku modelo Geigerflex, com tubo de cobre e monocromador de grafite, a uma taxa de velocidade de varredura de 4° 2θ min⁻¹, entre 20° e 80° 2θ, utilizando-se o NaCl como padrão interno. As medidas Mössbauer de ⁵⁷Fe das amostras in natura foram realizadas em espectrômetro convencional com geometria de transmissão e aceleração constante da fonte, para medidas com amostras nas temperaturas do ambiente (298 K) e do nitrogênio líquido (80 K), e por função de onda senoidal, para medidas na temperatura do hélio líquido (4,2 K). Foram utilizadas fontes de radiação ⁵⁷Co/Rh. Valores de deslocamento isomérico são expressos em relação ao αFe.

Resultados e Discussão

A classificação granulométrica foi obtida a partir do diagrama de classe textural de solo (Embrapa, 1997), em que a granulometria variou pouco: de muito argilosa (amostra VH3B) a argilosa (VH2B e VH4B), correspondendo às expectativas, para horizontes B ferruginosos. O valor encontrado de matiz Munsell foi 2,5 YR nas três amostras analisadas (Tabela 1), determinado em campo, à luz do dia, no momento da coleta das amostras, por meio da comparação entre torrões umedecidos de solo e a caderneta de cores Munsell (Munsell Color, 2000). Segundo Schwertmann (1988), a matiz indica ocorrência de mistura de óxidos de ferro, provavelmente de goethita (majoritária) e hematita (Tabela 1). O resultado da análise química por FRX (Tabela 1) indicou conteúdos elevados de SiO₂, seguido dos de Al₂O₃ e de Fe₂O₃. Os conteúdos residuais de TiO₂ e de K₂O podem estar associados a eventuais minerais primários relictos, sendo que os de potássio podem ser atribuídos a pedoambientes de baixa acumulação de bases.

Os difratogramas de raios X das amostras in natura revelam a dominância tanto de minerais resistentes ao intemperismo, quanto de minerais advindos do processo de intemperismo, como geralmente ocorre em solos intertropicais (Figura 2). As reflexões diagnósticas de intensidades mais expressivas, em 0,335 nm (26,61° 2θ), 0,358 nm (24,89° 2θ) e 0,427 nm (20,80° 2θ), confirmam a presença relativamente abundante de quartzo (politipo SiO₂) e, em menor proporção, de minerais secundários: caulinita (fórmula ideal, Al₂Si₂O₅(OH)₄) e gibbsita (αAl(OH)₃), respectivamente. Goethita (αFe(OH)₃) pode ser inferida pelo reflexo diagnóstico de baixa intensidade em 0,422 nm (21,05° 2θ), mostrado na região ampliada dos difratogramas entre 20,00 e 21,75° 2θ (Figura 2). As reflexões de goethita são mais claramente observáveis nos difratogramas das amostras tratadas com NaOH (Figura 2). A ocorrência de hematita é duvidosa, embora um reflexo incipiente apareça nos difratogramas, em torno de 33° 2θ. Semiquantitativamente, os minerais foram dispostos na seguinte ordem de ocorrência: quartzo >> gibbsita > caulinita > goethita.

A análise Mössbauer permite detalhamento da ocorrência dos óxidos de ferro em baixos conteúdos, como observado pelo resultado de análise química (Tabela 1). Os espectros Mössbauer a 298 K das amostras in natura mostram essencialmente intenso duplete central (Figura 3), característico de Fe³⁺ paramagnético de alto *spin*, como em estrutura de silicatos, ou superparamagnético, em óxidos de ferro magneticamente ordenados, que se comporta como paramagnético, em virtude dos pequenos tamanhos de partículas. As intensidades desses dupletos centrais diminuem com a redução da temperatura de 298 K para 80 K e, mais ainda, nos espectros a 4,2 K (Figura 4).

O espectro de seis linhas, característico de óxidos de ferro magneticamente ordenados, praticamente não aparece na medida a 298 K; apenas na amostra VH2B, aparecem evidências incipientes de ordem magnética.

Tabela 1. Análises físicas (cor Munsell e granulometria) e químicas (composição e índice de intemperismo) das amostras in natura.

Amostra ⁽¹⁾	Cor Munsell (úmida)	Granulometria (g kg ⁻¹)			Classe textural	Composição química (g kg ⁻¹)					PF ⁽²⁾
		Argila	Silte	Areia		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	
VH2B	2,5YR 5/8	409	262	328	Argiloso	396	330	45,2	2,8	6,0	210
VH3B	2,5YR 4/8	632	123	245	Muito argiloso	337	330	57,3	1,0	7,9	255
VH4B	2,5YR 4/8	487	209	304	Argiloso	464	303	40,5	2,2	7,2	180

⁽¹⁾VH2B: amostra coletada do horizonte Bi da alta vertente; VH3B: Bw da meia vertente; VH4B: Bw da baixa vertente. ⁽²⁾PF: perda ao fogo.

Nos espectros a 80 K, o padrão gráfico de seis linhas torna-se mais evidente, na proporção equivalente da diminuição das intensidades dos dupletos centrais. Esse comportamento, na escala de campo hiperfino observada, é diagnosticado na transição do estado superparamagnético, do espectro a 298 K, para o padrão do magneticamente ordenado, do espectro a 80 K, característico da hematita (Figura 3).

A tendência de bloqueio da relaxação superparamagnética é confirmada nos espectros das medidas a 4,2 K (Figura 4), em que aparecem as estruturas hiperfinas magnéticas características da hematita e da goethita. Os parâmetros hiperfinos (Tabela 2) correspondentes podem, então, ser numericamente deduzidos e a contribuição relativa de cada um desses óxidos pode ser estimada, com base nas áreas subspectrais (AR): na amostra VH2B, a razão (R) das áreas relativas, obtida por $AR_{\text{hematita}} / (AR_{\text{hematita}} + AR_{\text{goethita}})$, foi 0,30; na amostra VH3B, R foi 0,22 e em VH4B, R foi 0,33.

Os valores de AR, no entanto, podem não refletir precisamente a distribuição quantitativa de ferro nos minerais. É plausível, neste caso, considerar a correção dos valores das áreas relativas a 4,2 K pelos valores das frações livres de recuo à temperatura de 80 K, $f_{\text{hematita}} = 0,923$ e $f_{\text{goethita}} = 0,912$ (De Grave & Van Alboom, 1991). A partir das proporções de hematita e de goethita nas massas das amostras apresentadas na Tabela 3, a razão hematita/(hematita + goethita) foi 0,27 para a VH2B, 0,21 para a VH3B e 0,31 para a VH4B. Os valores assim encontrados são discrepantes dos estimados por atributos de cor Munsell, como os dados pela razão hematita/(hematita + goethita) = $(FV - 3,5)/8,33$ (Santana, 1984), em que FV é o índice de vermelho, definido como $FV = M^* + (C/V)$, em que M^* assume valores complementares de matiz relativos ao vermelho; C é o croma; e V é o valor. Para o matiz 2,5YR, M^* assume o valor de 7,5. Outros modelos de correlação entre padrão de cor e teor de hematita são citados por Cornell & Schwertmann (2003).

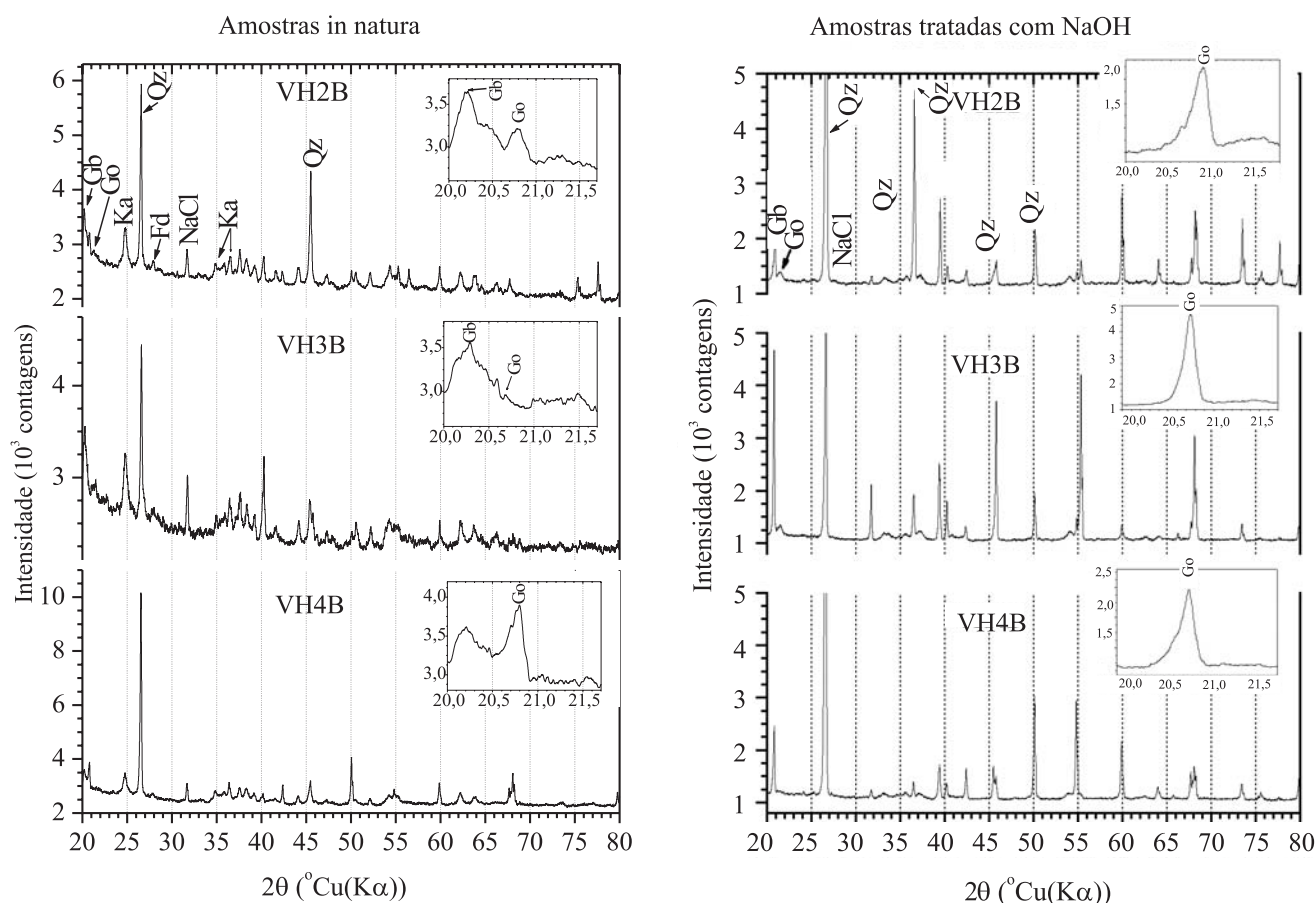


Figura 2. Difratoformas de raios X (método do pó) das amostras in natura e após tratamento com NaOH 5 mol L⁻¹. Ka: caulinita; Gb: gibbsita; Go: goethita; Qz: quartzo; NaCl: padrão interno.

Uma explicação para a variação pode estar nas diferenças individuais para atribuição comparativa da cor, feita pelo pesquisador, em trabalhos de campo com a caderneta Munsell. Os principais fatores são: interpolações imprecisas, falta de reprodutibilidade nas determinações e outros erros subjetivos (Campos, 2001; Campos et al., 2003). Estudos sistemáticos mostram essa incerteza e recomendam que os melhores métodos para determinação da mineralogia do solo a partir da cor são a colorimetria e a radiometria (Campos, 2001; Campos & Demattê, 2004). Os resultados mostram subjetividade na avaliação da cor do solo pelo olho humano, podendo dar margem a divergências na classificação dos solos. O segundo nível de categorias de classes de solos da Embrapa (1999), por exemplo, preconiza a notação do matiz Munsell em algumas classes (Campos & Demattê, 2004). Uma variação de acuidade visual na percepção do pesquisador no momento da notação do matiz pode levá-lo a um equívoco.

Ainda de acordo com as análises Mössbauer, outro ponto interessante é o fato de os valores dos campos

hiperfinos (B_{hf}), tanto da hematita quanto da goethita, da amostra VH3B, serem ligeiramente mais baixos do que os das amostras das partes superior e inferior da vertente. A mesma tendência é observada nos valores de deslocamento quadrupolar (Tabela 2). Por sua vez, o padrão espectral Mössbauer de linhas de ressonância relativamente largas pode sugerir que há distribuição de população de goethitas, com diferentes proporções de alumínio, na mesma amostra. Se assim for, os valores de campo hiperfino propostos e, conseqüentemente, os valores de alumínio isomorficamente substituinte, refletem apenas uma proporção média, em torno dessa distribuição. Goethitas com tamanhos médios de partículas menores do que 15–20 nm são superparamagnéticas na temperatura do ambiente; as menores do que 8 nm permanecem superparamagnéticas mesmo a 77 K (Janot et al., 1973). Este é o padrão observado em todas as três amostras.

O valor do campo hiperfino medido a 4,2 K para a goethita é correlacionado à proporção de Al substitucional (Al_s , em mol mol⁻¹) e ao comprimento médio coerente

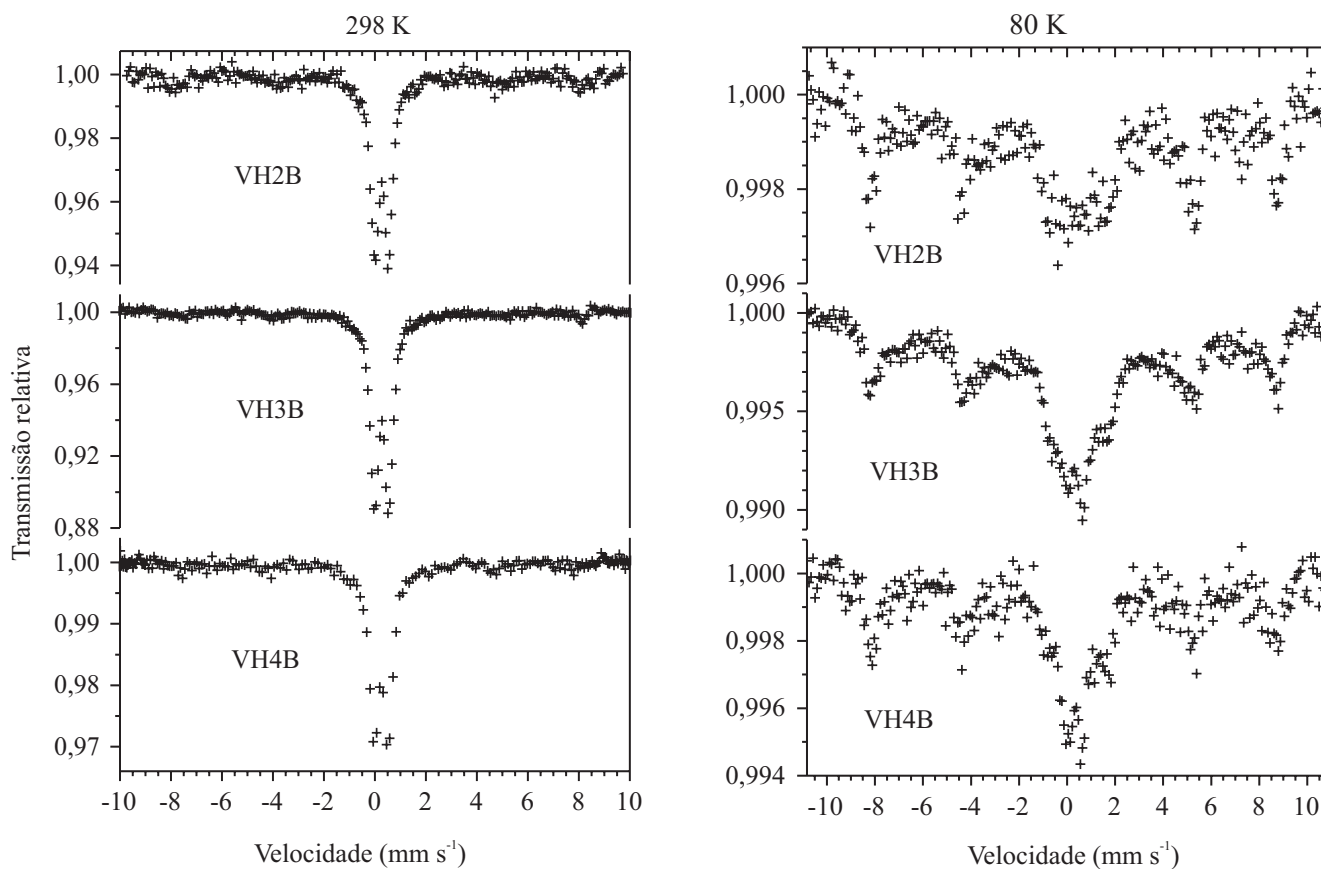


Figura 3. Espectros Mössbauer das amostras in natura a 298 K e 80 K.

na direção [111] (CMC_{111} , em nm; “Mean Coherence Length”, MCL) (Cornell & Schwertmann, 2003), a partir da equação proposta por Murad & Schwertmann (1983), $B_{hf}^{4,2K} = 50,65 - 4,2Al_s - (8,7/CMC_{111})$. Se, pelos argumentos apresentados, o quociente do termo do tamanho médio da partícula for considerado 8 nm (limite máximo), a fração $8,7/CMC_{111} \approx 1,09$ reduz a equação a $B_{hf}^{4,2K} = 49,56 - 4,2Al_s$. As substituições de alumínio podem ser estimadas com base nos valores de B_{hf} (Tabela 2) e a fórmula química correspondente pode ser alocada, conforme algoritmo descrito por Fabris et al. (1998): $\alpha Fe_{0,79}Al_{0,21}OOH$ para a VH2B, $\alpha Fe_{0,75}Al_{0,25}OOH$ para a VH3B e $\alpha Fe_{0,78}Al_{0,22}OOH$ para a VH4B. Ainda que estes valores de Al_s possam estar superestimados, pela consideração do valor médio $CMC = 8$ nm, é possível relacionar maiores ou menores índices de Al_s , assim estimados, na goethita a ambientes oxidantes ou redutores, respectivamente. A ocorrência de pedoambientes bem drenados favorece maiores valores de Al_s na goethita (Schwertmann, 1988).

Os valores de Al_s , associados à posição topográfica dos pontos de coleta, servem como indicadores de pedoambientação pretérita, ao longo da evolução

Tabela 2. Parâmetros Mössbauer obtidos a 4,2 K dos subspectros ajustados das amostras in natura.

Amostra ⁽¹⁾	Mineral	δ ⁽²⁾ (mm s ⁻¹)	ϵ ⁽³⁾ (mm s ⁻¹)	B_{hf} ⁽⁴⁾ (T)	AR ⁽⁵⁾ (%)
VH2B	Hematita	0,47	-0,20	52,8	26
	Goethita	0,49	-0,20	48,7	61
VH3B	Hematita	0,49	-0,15	52,6	20
	Goethita	0,46	-0,18	48,5	69
VH4B	Hematita	0,49	-0,20	52,8	29
	Goethita	0,47	-0,22	48,6	58

⁽¹⁾VH2B: amostra coletada do horizonte Bi da alta vertente; VH3B: horizonte Bw, meia vertente; VH4B: horizonte Bw, baixa vertente. ⁽²⁾ δ : deslocamento isomérico relativo ao αFe . ⁽³⁾ ϵ : deslocamento quadrupolar. ⁽⁴⁾ B_{hf} : campo hiperfino. ⁽⁵⁾AR: área relativa subspectral.

Tabela 3. Proporções de hematita e goethita na massa das amostras de solo estimadas pelos dados Mössbauer a 4,2 K.

Amostra ⁽¹⁾	Hematita (g kg ⁻¹)	Goethita (g kg ⁻¹)
VH2B	13,4	35,4
VH3B	13,2	50,8
VH4B	13,5	30,2

⁽¹⁾VH2B: amostra coletada do horizonte Bi da alta vertente; VH3B: Bw, meia vertente; VH4B: Bw, baixa vertente.

pedogeomorfológica da paisagem local. A partir da constatação de proporções distintas de substituição isomórfica nas goethitas com diferentes proporções de Al, infere-se que esse pedoambiente passou por períodos cíclicos, de maior e menor umedecimento, e que a formação de baixos conteúdos de hematita esteja relacionada a oscilações paleoclimáticas regionais de climas subúmidos para climas semi-áridos e vice-versa, ao longo do Quaternário tardio. Registros geomorfológicos e sedimentológicos, estudados em outras regiões de Minas Gerais (Lichte, 1991; Moreira, 1992; Bacellar, 2000), sugerem diferenciação do regime climático atual predominante em regiões tropicais, com sazonalidade de duas estações bem marcadas ao longo do ano, uma seca e outra úmida. Esses mecanismos de formação dos óxidos de ferro atuam como indicadores pedogênicos (Arduino et al., 1984, 1986). Os baixos valores de ferro total verificados nos resultados de composição química (Tabela 1),

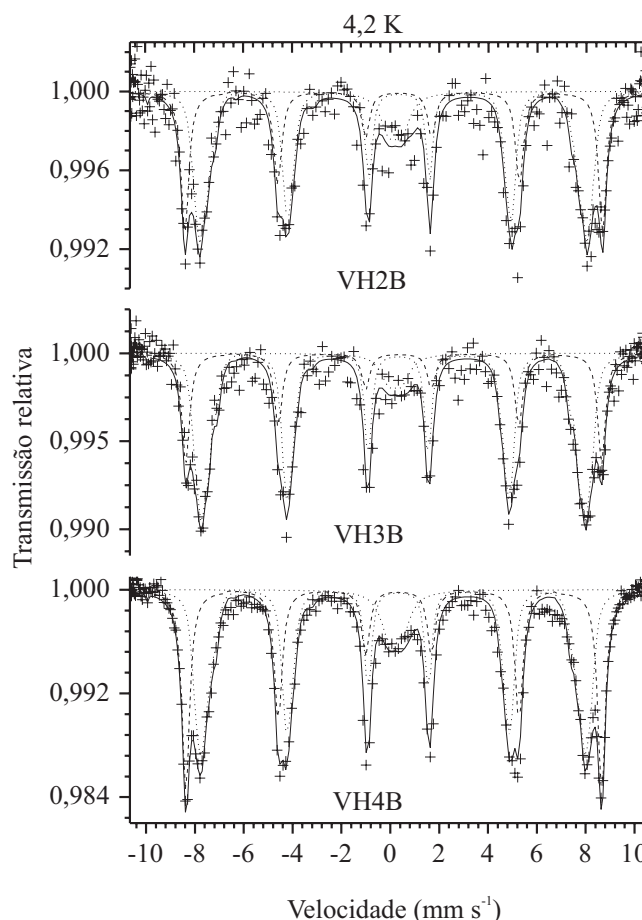


Figura 4. Espectros Mössbauer das amostras in natura a 4,2 K.

complementados pelos resultados da análise Mössbauer (Figura 4 e Tabela 2), sugerem um estágio de retomada da pedogênese na área investigada.

Conclusões

1. Valores estimados de Al_S em goethitas variam entre 0,21 e 0,25 mol mol⁻¹, o que permite descrever as suas correspondentes fórmulas químicas para as amostras, $\alpha Fe_{0,79}Al_{0,21}OOH$ (VH2B; alta vertente), $\alpha Fe_{0,75}Al_{0,25}OOH$ (VH3B, meia vertente) e $\alpha Fe_{0,78}Al_{0,22}OOH$ (VH4B, baixa vertente).

2. O alto conteúdo de Al_S nas goethitas sugere ambientes pretéritos mais úmidos do que o atual.

3. As quantidades absolutas de hematita e de goethita, na massa da amostra de solo, são mais seguramente obtidas por espectroscopia Mössbauer a baixa temperatura do que pela cor Munsell.

Agradecimentos

À Capes, Fapemig e CNPq, pelo apoio financeiro; à Dra. Juliana Oliveira do Dep. de Química da UFMG, pela ajuda na obtenção dos difratogramas de raios X.

Referências

- ALEKSEEVA, T.V.; ALEKSEEV, A.O.; SOKOLOWSKA, Z.; HAJNOS, M. Relationship between mineralogical composition and physical properties of soils. *Eurasian Soil Science*, v.32, p.548-557, 1999.
- ARDUINO, E.; BARBERIS, E.; AJMONE MARSAN, F.; ZANINI, E.; FRANCHINI, M. Iron oxides and clay minerals within profiles as indicators of soil age in Northern Italy. *Geoderma*, v.37, p.45-55, 1986.
- ARDUINO, E.; BARBERIS, E.; BOERO, V. Iron oxides and particle aggregation in B horizons of some Italian soils. *Geoderma*, v.45, p.319-329, 1989.
- ARDUINO, E.; BARBERIS, E.; CARRARO, F.; FORNO, M.G. Estimating relative ages from iron-oxide/total-iron ratios of soils in the western Po Valley, Italy. *Geoderma*, v.33, p.39-52, 1984.
- BACELLAR, L. de A.P. **Condicionantes geológicos, geomorfológicos e geotécnicos dos mecanismos de voçorocamento na bacia do Rio Maracujá, Ouro Preto, MG.** 2000. 226p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- CAMPOS, R.C. **Determinação da cor do solo e sua utilização na predição dos teores de hematita.** 2001. 59p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.
- CAMPOS, R.C.; DEMATTÊ, J.A.M. Cor do solo: uma abordagem da forma convencional de obtenção em oposição à automatização do método para fins de classificação de solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p.853-863, 2004.
- CAMPOS, R.C.; DEMATTÊ, J.A.M.; QUARTAROLI, C.F. Determinação indireta do teor de hematita no solo a partir de dados de colorimetria e radiometria. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.38, p.521-528, 2003.
- COLOMBO, C.; TORRENT, J. Relationships between aggregation and iron oxides in terra rossa soils from Southern Italy. *Catena*, v.18, p.51-59, 1991.
- CORNELL, R.M.; SCHWERTMANN, U. **The iron oxides: structure, properties, reactions, occurrence, and uses.** Weinheim: Wiley VCH, 2003. 664p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo.** 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Brasília: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa-CNPq, 1999. 412p.
- FABRIS, J.D.; COEY, J.M.D. Espectroscopia Mössbauer do ⁵⁷Fe e medidas magnéticas na análise de geomateriais. In: ALVAREZ VENEGAS, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F. de; MELLO, J.W.V. de; COSTA, L.M. da (Ed.). **Tópicos em ciência do solo.** Viçosa: SBCS, 2002. v.2, p.47-102.
- FABRIS, J.D.; COEY, J.M.D.; MUSSEL, W. da N. Magnetic soils from mafic lithodomains in Brazil. *Hyperfine Interactions*, v.113, p.249-258, 1998.
- FIGUEIREDO, M. do A.; AUGUSTIN, C.H.R.R.; FABRIS, J.D. Mineralogy, size, morphology and porosity of aggregates and their relationship with soil susceptibility to water erosion. *Hyperfine Interactions*, v.122, p.177-184, 1999.
- FIGUEIREDO, M. do A.; VARAJÃO, A.F.D.C.; FABRIS, J.D.; LOUTFI, I.S.; CARVALHO, A.P. Alteração superficial e pedogeomorfologia no Sul do Complexo Bação - Quadrilátero Ferrífero (MG). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p.713-729, 2004.
- GALVÃO, T.C. de B.; SCHULZE, D.G. Mineralogical properties of a collapsible lateritic soil from Minas Gerais, Brazil. *Soil Science Society of America Journal*, v.60, p.1969-1978, 1996.
- GOLDBERG, S. Interaction of aluminum and iron-oxides and clay-minerals and their effect on soil physical-properties - a review. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v.20, p.1181-1207, 1989.
- GRAVE, E. de; VAN ALBOOM, A. Evaluation of ferrous and ferric Mössbauer fractions. *Physics and Chemistry of Minerals*, v.18, p.337-342, 1991.
- JANOT, C.; GIBERT, H.; TOBIAS, C. Caractérisation de kaolinites ferrifères par spectrométrie Mössbauer. *Bulletin de la Société Française de Minéralogie et de Cristallographie*, v.96, p.281-291, 1973.
- KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. The 5 M NaOH concentration treatment for iron oxides in soils. *Clays and Clay Minerals*, v.30, p.401-408, 1982.

- LICHTE, M. Arid processes in the SE Brazilian relief evolution during the last glacial. **Boletim Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo**, v.8, p.201-211, 1991.
- MOREIRA, C.V.R. **Fatores condicionantes das voçorocas na sub-bacia do rio Santo Antônio, bacia do rio Grande, MG**. 1992. 163p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- MUNSELL COLOR. **Munsell soil color charts**. New Windsor: GretagMacbeth, 2000. Não paginado.
- MURAD, E.; JOHNSTON, J.H. Iron oxides and oxyhydroxides. In: LONG, G.J. (Ed.). **Mössbauer spectroscopy applied to inorganic chemistry**. New York: Plenum, 1987. v.2, p.507-582.
- MURAD, E.; SCHWERTMANN, U. The influence of aluminium substitution and crystallinity on the Mössbauer-spectra of goethite. **Clays and Clay Minerals**, v.18, p.301-312, 1983.
- NORRISH, K.; TAYLOR, R.M. The isomorphous replacement of iron by aluminium in soil goethites. **Journal of Soil Science**, v.12, p.294-306, 1961.
- PINHEIRO DICK, D.; SCHWERTMANN, U. Microaggregates from oxisols and inceptisols: dispersion through selective dissolutions and physicochemical treatments. **Geoderma**, v.74, p.49-63, 1996.
- RHOTO, F.E.; LINDBO, D.L.; RÖMKENS, M.J.M. Iron oxides erodibility interactions for soils of the Memphis catena. **Soil Science Society of America Journal**, v.62, p.1693-1703, 1998.
- SALAROLI, I.S. **Mapeamento litoestrutural da região de Santo Antônio do Leite Ouro Preto**. 1999. 68p. Monografia (Graduação) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- SANTANA, D.P. **Soil formation in a toposequence of oxisols from Patos de Minas region, Minas Gerais State, Brazil**. 1984. 129p. Thesis (Ph.D.) - Purdue University, West Lafayette.
- SCHMIDT, F.; BUENO, M.I.M.S.; EINZWEILER, J. Determinação de alguns metais em solos por espectroscopia de fluorescência de raios X de energia dispersiva com modelagem por redes neurais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE REDES NEURAS, 4., 1999, São José dos Campos. **Anais**. São José dos Campos: ITA, 1999. p.396-399.
- SCHWERTMANN, U. Occurrence and formation of iron oxides in various pedoenvironments. In: STUCKI, J.W.; GOODMAN, B.A.; SCHWERTMANN, U. (Ed.). **Iron in soils and clay minerals**. Dordrecht: D. Reidel, 1988. p.267-308.
- SKOOG, D.A.; HOLLER, F.J.; NIEMAN, T.A. **Principles of instrumental analysis**. 5th ed. Philadelphia: Saunders College, 1998. 700p.
- VILELA, R. A. **Geologia de um segmento do Complexo Metamórfico Bação: área entre Glaura e Cachoeira do Campo, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. 1999. 77p. Monografia (Graduação) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- WÊGRZYNEK, D.; MARKOWICZ, A.; CHINEA-CANO, E.; BAMFORD, S. Evaluation of the uncertainty of element determination using the energy-dispersive x-ray fluorescence technique and emission-transmission method. **X-Ray Spectrometry**, v.32, p.317-335, 2003.

Recebido em 17 de maio de 2004 e aprovado em 27 de julho de 2005