

FORMAS EXTRAÍVEIS DE FERRO EM SOLOS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO⁽¹⁾

M. G. PEREIRA⁽²⁾ & L. H. C. ANJOS⁽²⁾

RESUMO

No estado do Rio de Janeiro, destacam-se três feições geomorfológicas: as formações constituídas por rochas do Complexo Cristalino, expostas ou capeadas por seus produtos de alteração; os tabuleiros costeiros, compostos pelos sedimentos da Formação Barreiras, e, por último, as planícies aluvionares, que são formações quaternárias. As diferenças entre os materiais de origem e as classes de relevo e sua influência na formação dos solos têm constituído o tema principal dos estudos de gênese realizados no Rio de Janeiro. Este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento das formas extraíveis de ferro, Feo, Fed e Fes, e as relações entre elas em função do grau de pedogênese dos solos. Para estes solos, as formas de ferro e relações Fed/Fes e Feo/Fed expressaram variações na mineralogia do material de origem, grau de intemperismo dos solos e do material formador, ou classe de drenagem, mais do que a intensidade de pedogênese. Assim, as formas extraíveis de Fe e respectivas relações para avaliar o grau de pedogênese, nos solos do Rio de Janeiro, requerem uma interpretação conjunta das demais propriedades do solo, com ênfase para a morfologia e classes de drenagem.

Termos de indexação: intemperismo, gênese de solos, solos tropicais.

SUMMARY: *EXTRACTABLE IRON FORMS IN SOILS FROM THE STATE OF RIO DE JANEIRO, BRAZIL*

The state of Rio de Janeiro, Brazil, is characterized by three main geomorphologic formations, the landform constituted by crystalline rocks, exposed or covered by their alteration products; coastal tablelands, formed by Barreiras Formation Tertiary sediments; and alluvial floodplain sediments of Quaternary age. Differences between parent material and topography and their influence on soil genesis have been the main subject of studies in Rio de Janeiro.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor, apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ, Seropédica (RJ). Recebido para publicação em fevereiro e aprovado em novembro de 1998.

⁽²⁾ Professor do Departamento de Solos, UFRRJ. CEP 23890-000 Seropédica (RJ).

The objective of this study was to analyze the behavior of extractable forms of iron, Feo, Fed and Fes, and their respective ratios as related to the pedogenesis degree of Rio de Janeiro soils. The iron forms and Fed/Fes and Feo/Fed ratios expressed variations in the mineralogical nature of the parent material, degree of weathering of the soils and parent material, or drainage class, more than pedogenesis intensity. The use of the extractable forms of iron and respective ratios to measure pedogenesis degree in the soils of Rio de Janeiro State requires an association with other soil properties, especially morphology and drainage class.

Index terms: extractable forms of iron, weathering, soil genesis, tropical soils.

INTRODUÇÃO

Os óxidos de ferro no solo são constituídos, em sua maioria, de produtos de neoformação provenientes da alteração de sedimentos e materiais de solo. Esses óxidos formam-se sob a influência de diversos fatores ambientais (temperatura, umidade, teor de matéria orgânica, pH e E_h , entre outros) e, devido a isto, refletem as condições de pedogênese sob as quais eles teriam sido cristalizados (Schwertmann, 1966; Schwertmann, 1985; Schwertmann & Taylor, 1989; Cornell & Schwertmann, 1996).

A identificação dos óxidos de ferro pode ser feita diretamente por métodos de difração de raio-X (Cornell & Schwertmann, 1996) ou inferida pela quantificação de formas extraíveis de ferro em amostras de solo ou na fração argila (Gianluppi, 1979; Espírito Santo, 1988; Kämpf, 1988).

Dentre os métodos indiretos, destaca-se a extração de ferro com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB) (Mehra & Jackson, 1960), que dissolve os óxidos de ferro com estrutura cristalina definida, como hematita e goethita, além daqueles menos cristalinos. Nesse método, o ferro é reduzido pelo ditionito, complexado pela solução de citrato e o bicarbonato atua como tampão (Mehra & Jackson, 1960). A avaliação de formas de óxidos menos ordenadas, como, por exemplo, a ferridrita e certas lepidocrocitas, é feita usando-se o teor de ferro extraído com oxalato ácido de amônio (Schwertmann, 1964; McKeague & Day, 1966), simbolizado por ferro oxalato (Feo). Uma terceira forma de avaliação indireta é aquela que utiliza ácidos fortes, como na digestão com H_2SO_4 1:1 (EMBRAPA, 1979), aqui representada como ferro do ataque sulfúrico (Fes). Neste caso, estariam incluídos tanto os óxidos quanto os minerais silicatados que contêm ferro na sua estrutura cristalina (Espírito Santo, 1988).

A relação entre os teores do elemento Fe extraído com oxalato ácido de amônio e com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Feo/Fed) vem sendo usada como índice qualitativo do grau de cristalinidade dos

óxidos (Kämpf, 1988). A relação entre os teores de Fe determinados com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio e com ácido forte (Fed/Fes) indica a reserva do elemento ferro em outros grupos de minerais que, por meio da ação do intemperismo, pode ser liberada da estrutura cristalina e, eventualmente, transforma-se em óxidos (Cornell & Schwertmann, 1996). Tais relações, apesar de não serem definidas como características diferenciais para distinção taxonômica de solos, como o são os índices k_i , k_r e relação silte/argila, são freqüentemente utilizadas na avaliação do grau de pedogênese em várias classes de solos (Torrent et al., 1980; Espírito Santo, 1988; Pereira, 1996; Bech et al., 1997).

Dentre as características físicas, químicas e mineralógicas que são citadas como índices do grau de intemperização dos solos, apenas o k_i é estabelecido como atributo diagnóstico em classes de solos como a dos Latossolos (EMBRAPA, 1988).

Este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento das formas extraíveis de ferro, Feo, Fed e Fes, e as relações entre elas em classes de solos do estado do Rio de Janeiro, considerando o grau de pedogênese.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados materiais de solo provenientes de estudos anteriores (Anjos, 1985; Fonseca, 1986; Santos, 1986; Ravelli Neto, 1989; Duarte, 1992; Silva, 1993). Os perfis de solo, cuja localização aproximada está indicada na figura 1, foram escolhidos conforme a natureza comum de seu material de origem, rochas de caráter ácido e sedimentos delas derivados, e elevada expressão geográfica e intensidade de uso agrícola no estado do Rio de Janeiro.

Os perfis, agrupados quanto ao material de origem, são apresentados no quadro 1, com as respectivas classificações, características da paisagem e identificação dos horizontes diagnósticos estudados.

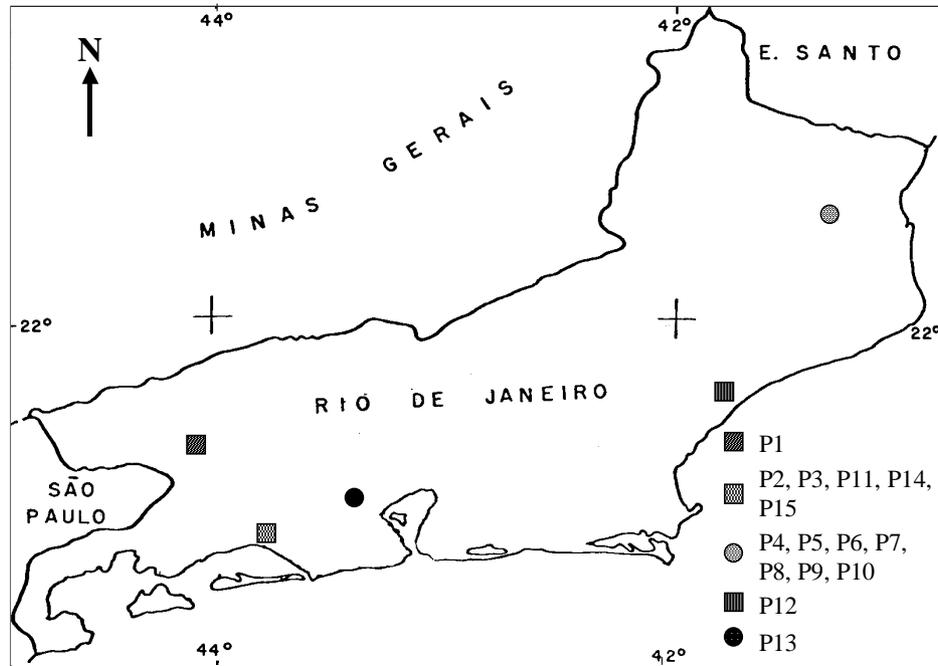


Figura 1. Localização aproximada dos perfis estudados no estado do Rio de Janeiro.

Geologia e relevo

No estado do Rio de Janeiro, três feições geomorfológicas podem ser destacadas: as maiores elevações constituídas por rochas do Complexo Cristalino, expostas ou capeadas por seus produtos de alteração; os tabuleiros, material de natureza sedimentar, tendo como principal representante a Formação Barreiras; e as planícies da baixada, formações quaternárias resultantes da deposição de sedimentos transportados pelo mar ou de alúvios, com diferentes graus de estratificação.

Os materiais de origem do Complexo Cristalino, nos perfis estudados, constituem-se de rochas graníticas e gnaisses com diferentes graus de metamorfismo, predominando gnaisses graníticos, biotíticos e charnoquíticos, e localizam-se em áreas onde o relevo varia de forte ondulado/montanoso (perfil P1) a ondulado e suave ondulado (perfis P2 e P3) (Brasil, 1958; Santos, 1986; Duarte, 1992).

Segundo Anjos (1985) e Fonseca (1986), os sedimentos da Formação Barreiras são formados de material argilo-arenoso de natureza quartzocaulinítica, sendo a goethita o principal óxido de ferro na fração argila. A uniformidade na granulometria desses sedimentos indica-os como originados em ambiente terrestre, uma vez que não apresentam estratificação regular. Eles ocorrem em área de relevo suave ondulado e com superfície côncava (Brasil, 1958). Os materiais sedimentares que constituem as planícies da baixada têm natureza granulométrica, química e mineralógica variada e, em geral, são estratificados (Ravelli Neto, 1989; Silva, 1993).

Vegetação e clima

No perfil P1, a vegetação de maior porte é representada pela floresta tropical subperenifólia e, no perfil P2, pela floresta perenifólia em vertentes úmidas (Santos, 1986). Na região dos tabuleiros, nos perfis P4, P5, P6 e P7, a vegetação original era de floresta tropical subperenifólia e os perfis P8, P9 e P10 estão localizados em área de floresta tropical subperenifólia de várzea. Nestes dois grupos de perfis, o principal uso agrícola é a cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp), com menor expressão geográfica de pastagem e cultivos de subsistência (Ravelli Neto, 1989).

Quanto às áreas dos demais perfis (P12, P13 e P3; P11, P14 e P15), a cobertura original era de floresta subperenifólia e subcaducifólia (Ramos, 1970; Duarte, 1992). A atual cobertura é formada por diversas comunidades de gramíneas onde predominam o capim-gordura (*Melinis minutiflora*) e o capim-colônião (*Panicum maximum*) (Brasil, 1958; Duarte, 1992; Silva, 1993).

Apesar de localizados em diferentes regiões do estado, os perfis estudados, em sua maioria, apresentam clima Aw, segundo a designação de Köppen. Este é definido como clima quente e úmido, sem inverno pronunciado, com a média do mês mais frio superior a 18°C, e o regime pluviométrico tem um período de chuvas no verão e de estiagem no inverno (Brasil, 1958). Sendo exceção aos demais, o perfil P1 localiza-se em área de clima mesotérmico, Cfa, sempre úmido, com verões quentes e amenos e invernos frescos, caracterizando toda a vertente atlântica da Serra do Mar (Brasil, 1958).

Descrição de perfis e caracterização analítica

Os perfis foram descritos e coletados segundo as normas preconizadas no Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo (Lemos & Santos, 1984). As análises químicas, físicas e mineralógicas necessárias à classificação dos perfis seguiram o método adotado pela Embrapa Solos nos levantamentos de solos, padronizado por meio do Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 1979).

Os teores de ferro na fração terra fina foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica, após extração com solução de ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB), segundo Mehra & Jackson (1960), modificado por Schulze (1984), e com solução de oxalato ácido de amônio 0,2 mol L⁻¹ no escuro, de acordo com Schwertmann (1964).

A identificação e a semiquantificação dos minerais da fração argila foram feitas por difratometria de raios-X (DRX), usando-se lâminas orientadas e radiação K α de λ 0,15.405 nm,

produzidas por tubo de cobre, 20 Kv e 30 mA. As amostras de argilas foram saturadas por K, aquecidas e saturadas por Mg e glicerol, visando identificar os argilominerais expansíveis e com intercalação de polímeros de Al.

As amostras da fração argila também foram tratadas com NaOH 5 mol L⁻¹ para a concentração dos óxidos de ferro, conforme Kämpf & Schwertmann (1982). A identificação dos óxidos foi feita por DRX, usando-se suportes para o material em pó e radiação K α de λ 0,17902 nm (25 mA, 35 Kv) produzida por catodo de cobalto.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a discussão dos resultados, foram formados quatro grupos de solos quanto à natureza do material de origem (Quadro 1), definidos a seguir:

Quadro 1. Classificação dos solos e caracterização da paisagem, material originário e horizontes diagnósticos

Perfil	Horizonte	Classificação ⁽¹⁾	Relevo	Drenagem ⁽²⁾	Solum ⁽³⁾
Grupo I - Material de origem - Granito e Gnaiss					
P1	Aep Bw2	LV	Ondulado/forte ondulado	AD	370
P2	Aep 2Bt2	PV	Suave ondulado	MD	88
P3	Ap Bt2	PV	Suave ondulado	BD	124
Grupo II - Material de origem - Formação Barreiras					
P4	Ap Bt2	PA	Suave ondulado	BD	200
P5	Ap Bw	LA	Suave ondulado	BD	95
P6	Ap Bw	LA	Suave ondulado	BD	148
P7	Ap Bt2	PA	Suave ondulado	BD	140
Grupo III - Material de origem - Sedimentos Aluviais					
P8	Ap Bi2	C	Plano	ID	135
P9	Ap Bi2	C	Plano	ID	156
P10	Hp Cg2	GHS	Plano	MMD	-
P11	Ap Cg2	GPH	Plano	MMD	15
Grupo IV - Material de origem - Sedimentos Coluviais					
P12	Ap1 Bt2	PA	Suave ondulado	BD	246
P13	Ap Bt2	PA	Suave ondulado	BD	95
P14	Ap Bt2	PA	Suave ondulado	MD	180
P15	A1 Bt2	PL	Suave ondulado	ID	140

⁽¹⁾ PV = Podzólico Vermelho-Amarelo; LV = Latossolo Vermelho-Amarelo; PA = Podzólico Amarelo; LA = Latossolo Amarelo; C = Cambissolo; GPH = Glei Pouco Húmico; GHS = Glei Húmico Salino; e PL = Planossolo. ⁽²⁾ AD = Acentuadamente drenado; BD = Bem drenado; MD = Moderadamente drenado; ID = Imperfeitamente drenado; MMD = Muito mal drenado. ⁽³⁾ Espessura do solum, em cm.

Grupo I - Este grupo compreende perfis de solo que apresentam, como material de origem, as rochas de natureza granítica e gnáissica ou o produto de decomposição destas 'in situ'. Os solos pertencentes a este grupo foram incluídos nas classes Latossolo Vermelho-Amarelo e Podzólico Vermelho-Amarelo.

Grupo II - Abrange os perfis que contêm como material de origem os sedimentos da Formação Barreiras; correspondendo às classes Latossolo Amarelo e Podzólico Amarelo.

Grupo III - Inclui os perfis de solo que apresentam, como material de origem, sedimentos de natureza aluvial e que revelam drenagem imperfeita ou são muito mal drenados. Os representantes deste grupo estão incluídos nas classes Cambissolo, Glei Pouco Húmico e Glei Húmico Salino.

Grupo IV - Formado por perfis que apresentam sedimentos coluviais como principal material de origem. Os solos deste grupo incluem-se nas classes Planossolo e Podzólico Amarelo.

Propriedades dos solos e grau de pedogênese e de intemperismo

As seguintes características foram usadas para comparar o grau de pedogênese e a intensidade de intemperismo dos solos: profundidade do solum, desenvolvimento de estrutura e cor, distribuição de argila em profundidade, relação silte/argila, k_i e CTC da fração argila. As propriedades de cada grupo de material de origem e condições em cada ambiente de formação foram também consideradas. Essas características, o teor de ferro extraído com ácido forte (Fes) e as relações entre as formas extraíveis de ferro (Fed/Fes e Feo/Fed) e a relação Fed/argila, para os horizontes diagnósticos subsuperficiais dos perfis examinados, são apresentadas nos quadros 1, 2 e 3 e nas figuras 2, 4, 6, e 8. Também foram analisadas a mineralogia da fração argila (Quadro 4) e dos óxidos de ferro (Figuras 3, 5, 7 e 9) presentes nesta fração.

Os perfis apresentaram cores variáveis (Quadro 2), de acordo com o material de origem e drenagem, com predomínio de matizes mais

Quadro 2. Principais características morfológicas e físicas do horizonte diagnóstico subsuperficial dos perfis estudados

Perfil/ Horizonte ⁽¹⁾	Cor Munsell úmida	Estrutura			Granulometria		Relação Silte/Argila
		Grau	Tamanho	Tipo ⁽²⁾	Argila	Silte	
Grupo I							
P1- Bw2	7,5YR 5,5/8	fraco	ultra pequena	gran.	620	60	0,10
P2- 2Bt2 ⁽³⁾	2,5YR 4/8	moderado	média	bl.sbang	430	210	0,49
P3- Bt2 ⁽⁴⁾	5YR 5/6	moderado	pequena, média	bl.sbang	530	141	0,26
Grupo II							
P4- Bt2	10YR 5/6	moderado	pequena, média	bl.sbang	360	60	0,17
P5- Bw	10YR 5/7	moderado	média	bl.ang.	490	30	0,06
P6- Bw	10YR 5/7	moderado	pequena, média	bl.ang.	380	50	0,13
P7- Bt2	10YR 4/4	moderado	pequena	bl.ang	460	30	0,07
Grupo III							
P8- Bi2	10YR 5/8 e 10YR 5/3	moderado e forte	média	bl.sbang	480	420	0,88
P9- Bi2	9YR 5/6	moderado moderado	média média	prism. bl.sbang	460	330	0,72
P10- Cg2	N 2/ e 2,5YR 4/6	-	-	maciça	790	190	0,24
P11- Cg2	2,5YR 3,5/0	-	-	maciça	690	110	0,16
Grupo IV							
P12- Bt2	7,5YR 5/6	moderado moderado	muito pequena ultra pequena e muito pequena	bl.ang, sbang. gran.	550	60	0,11
P13- Bt2	5YR 5/6	moderado moderado	muito pequena, pequena ultra pequena	bl.ang, sbang. gran.	580	60	0,10
P14- Bt2	10YR 6/8	moderado	pequena a média	bl.ang.	540	60	0,11
P15- Bt2	10YR 5/1	moderado	pequena	poligonal ⁽⁵⁾	420	0	0,00

⁽¹⁾ Símbolos de acordo com EMBRAPA, 1988. ⁽²⁾ gran. = granular, bl. = blocos, ang. = angulares, sbang. = subangulares. ⁽³⁾ cerosidade fraca e pouca e com grau forte nas superfícies verticais; ⁽⁴⁾ cerosidade moderada e comum; ⁽⁵⁾ poligonal = padrão associado à presença de fragipan, as unidades estruturais em forma de polígonos são delimitadas pela presença de cores distintas da matriz do solo, indicando drenagem preferencial ao longo destas.

vermelhos e cromas mais altos nos perfis do Grupo I, rochas de natureza granítica e gnáissica e solos com drenagem livre. Nos demais grupos, predominou o matiz 10YR e, nos solos formados sob condições de hidromorfismo, matiz neutro ou cromas menores que dois. As variações de matiz e croma no horizonte diagnóstico subsuperficial são geralmente relacionadas com o teor e tipo de óxidos de ferro pedogênicos presentes no solo. Cores mais vermelhas, quando há predomínio de hematita, cores vermelho-amarelas, quando os teores de goethita e hematita se aproximam, e cores amarelas, quando há predomínio de goethita (Kämpf, 1988; EMBRAPA, 1995).

A presença e o grau de desenvolvimento de estrutura pédica (com agregação) constituem critérios diagnósticos de processos de formação de solos adotados de forma complementar na definição de algumas classes de solos (EMBRAPA, 1988). Como, por exemplo, a macroestrutura granular, fortemente desenvolvida nos Latossolos. Nos perfis examinados, o grau de desenvolvimento de estrutura foi, em geral, moderado, e predominaram blocos angulares e subangulares. As principais variações entre os perfis foram observadas no tamanho dos agregados e no tipo de estrutura dos solos formados em condições de drenagem impedida (P10 e P11).

A maioria dos solos apresentou valores da relação silte/argila inferiores a 0,3 (Quadro 2), à exceção dos perfis P2, P8 e P9, indicando elevado grau de intemperismo do material do solo. Ainda, se considerado o limite máximo de 0,6 para a definição

da classe dos Latossolos (EMBRAPA, 1988), apenas os perfis P8 e P9, Cambissolos, tiveram relação silte/argila superior a este limite.

A CTC estimada da fração argila (Quadro 3) mostrou maior frequência dos perfis abaixo do limite de 130 mmol_c kg⁻¹ de argila, usado como atributo diagnóstico na classe dos Latossolos (EMBRAPA, 1988) para representar o elevado grau de pedogênese e intemperismo desta classe. Apenas os perfis 8 e 9 apresentaram comportamento distinto, enquadrando-se dentro do conceito de argila de atividade média (CTC da fração argila entre 130 e 240 mmol_c kg⁻¹ de argila), conforme proposto por Ramos & Cunha (1985). No perfil P10, os elevados teores de carbono orgânico não permitiram o cálculo preciso da CTC da fração argila, pelo método de Bennema (1966).

Quanto à distribuição de ki (Quadro 3), a maioria dos perfis teve valores dentro da faixa de 1,7 a 2,2, intervalo associado à presença de caulinita como principal mineral na fração argila (Nascimento, 1989). Os perfis P1 e P3 (Grupo I) e P10, P12 e P14 (Grupos III e IV) tiveram valores de ki que revelam a presença de gibbsita; entretanto, apenas nos perfis P1 e P2 (Grupo I) este mineral foi detectado na fração argila (Quadro 4). Nos perfis P8 e P9, Cambissolos (Grupo III), os teores de silte mais elevados (420 e 330 g kg⁻¹, respectivamente) e a ocorrência de ilita na fração argila (Quadro 4) foram, provavelmente, responsáveis pelos maiores valores de ki em relação às demais classes de solos.

Quadro 3. Características químicas dos horizontes diagnósticos subsuperficiais

Perfil	Horizonte	Valor S	Valor T	CTC ⁽¹⁾	C orgânico	ki	Fes ⁽²⁾	Fed/ Fes	Feo/Fed	Fed/Arg x100
		mmol _c kg ⁻¹	TFSA	mmol _c kg ⁻¹	g kg ⁻¹		g kg ⁻¹			
Grupo I										
P1	Bw2	1	33	53	2,8	1,05	72,0	0,88	0,01	10,2
P2	2Bt2	16	43	100	2,8	2,09	33,6	0,59	0,17	4,6
P3	Bt2	32	51	60	4,8	1,64	55,2	0,77	0,04	8,0
Grupo II										
P4	Bt2	4	27	42	2,8	1,95	22,4	0,75	0,07	4,7
P5	Bw	4	34	24	5,1	2,02	31,5	0,92	0,04	5,9
P6	Bw	6	33	47	3,5	2,02	15,4	0,91	0,09	4,5
P7	Bt2	14	48	65	4,1	1,95	21,7	1,00	0,09	4,7
Grupo III										
P8	Bi2	88	111	187	4,8	2,10	56,6	0,90	0,16	10,7
P9	Bi2	69	98	159	5,7	2,24	65,0	0,96	0,13	13,6
P10	Cg2	155	505	-	117,3	1,57	16,1	0,28	0,62	0,6
P11	Cg2	42	97	112	4,9	1,72	16,8	0,24	0,56	0,6
Grupo IV										
P12	Bt2	6	45	46	4,6	1,46	38,5	0,96	0,06	6,7
P13	Bt2	22	55	70	3,3	1,81	28,7	0,92	0,04	4,4
P14	Bt2	5	44	53	3,8	1,72	33,2	0,93	0,02	5,6
P15	Bt2	10	46	94	2,3	1,73	22,4	0,64	0,17	3,4

⁽¹⁾ CTC da fração argila descontada a contribuição do C orgânico segundo método gráfico (Bennema, 1966). ⁽²⁾ Fes = teor de Fe extraído pelo ataque sulfúrico e expresso em termos de Fe₂O₃.

A relação Fed/Arg (Quadro 3) apresentou maiores valores nos perfis P1, P3, P8 e P9, independentemente do material de origem ou classe de drenagem. Os mesmos solos apresentaram valores de Fes superiores a 55 g kg⁻¹ de solo, mais altos que os dos demais perfis. Nos perfis P10 e P11, a relação Fed/Arg (x 100) de apenas 0,6 evidenciou a baixa contribuição dos óxidos de ferro na fração argila.

Formas extraíveis de ferro e grau de pedogênese

A baixa relação silte/argila (0,10) e o reduzido ki (1,05) no perfil P1, Latossolo Vermelho-Amarelo, são indicadores do elevado grau de intemperismo desse solo. Neste perfil, observaram-se características, tais como: grande espessura do solum, pequena diferença entre subhorizontes B (isotropia vertical) e macroestrutura ultrapequena granular (Quadro 2), que denotam elevado grau de pedogênese. O reduzido teor de bases (valor S = 1 mmol_c kg⁻¹) e o baixo valor de ki assinalam intensa lixiviação e dessilicatação (Quadro 3). No perfil P1, os valores obtidos para as relações Fed/Fes (0,88) e Feo/Fed (0,01) indicam o predomínio de ferro na forma de óxidos com maior grau de cristalinidade que nos demais solos.

O perfil P2, Podzólico Vermelho-Amarelo, apresentou horizonte de máxima eluviação (horizonte E), formado provavelmente pelo processo

de lessivage (Fanning & Fanning, 1989) (Figura 2). A translocação de argila foi confirmada pela ocorrência de cerosidade, de grau forte nas superfícies verticais, no horizonte diagnóstico subsuperficial (Quadro 2). Entretanto, este pareceu não ser o único mecanismo para a formação do gradiente textural neste solo. Santos (1986) destacou a presença de linha de pedra na zona de transição entre A e B, indicando que a descontinuidade litológica e a adição lateral de argila também contribuíram para a diferença textural.

O perfil P3, Podzólico Vermelho-Amarelo, apresentou características similares às do P2. O processo de eluviação/iluviação de argila foi determinante na sua gênese, sendo evidenciado pela presença de cerosidade moderada e comum no horizonte B e pelo incremento no teor de argila de A para B (Quadro 2, Figura 2), em grau suficiente para identificar um horizonte B textural (EMBRAPA, 1988, 1997). A estrutura em blocos moderadamente desenvolvida, observada nos perfis P2 e P3, foi outro indicio do maior grau de evolução pedogenética desses solos. No entanto, a convexidade da superfície onde estavam localizados os perfis P2 e P3 favoreceu a remoção de material das camadas superficiais, com o aumento do fluxo superficial da água no solo e menor percolação de água, resultando em menor profundidade do solum.

As relações Fed/Fes (Quadro 3), para os horizontes diagnósticos subsuperficiais, nos perfis P1 (Bw2, 0,88), P2 (2Bt2, 0,59) e P3 (Bt2, 0,77), indicam que a maior parte do ferro presente nestes horizontes apresenta-se sob a forma de óxidos. Nos difratogramas dos óxidos de ferro na fração argila

Quadro 4. Mineralogia da fração argila dos horizontes diagnósticos subsuperficiais

Perfis	Horizontes	Mineralogia de argila ⁽¹⁾
Grupo I		
P1	Bw2	Caulinita, goethita, gibbsita, e VHE
P2	2Bt2	Caulinita, goethita, gibbsita, e VHE
P3	Bt2	Caulinita, goethita, e VHE
Grupo II		
P4	Bt2	Caulinita, ilita, goethita, e VHE
P5	Bw	Caulinita, haloisita, goethita, e VHE
P6	Bw	Caulinita, haloisita, goethita, e VHE
P7	Bt2	Caulinita, haloisita, goethita, e VHE
Grupo III		
P8	Bi2	Caulinita, ilita, goethita, e VHE
P9	Bi2	Caulinita, ilita, goethita, e VHE
P10	Cg2	Caulinita, quartzo, e VHE
P11	Cg2	Caulinita, ilita, goethita, e VHE
Grupo IV		
P12	Bt2	Caulinita, goethita, ilita, e VHE
P13	Bt2	Caulinita, goethita, ilita, e VHE
P14	Bt2	Caulinita, goethita, e VHE
P15	Bt2	Caulinita, haloisita, goethita, e VHE

⁽¹⁾ VHE = Vermiculita com hidróxido de Al na entrecamada. Os minerais estão listados em ordem decrescente de ocorrência na fração argila.

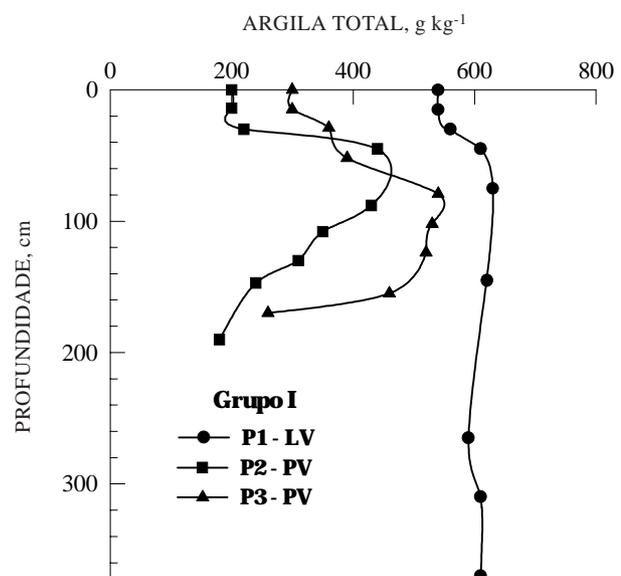


Figura 2. Curvas de distribuição da argila total em profundidade nos perfis desenvolvidos de rochas graníticas e gnáissicas.

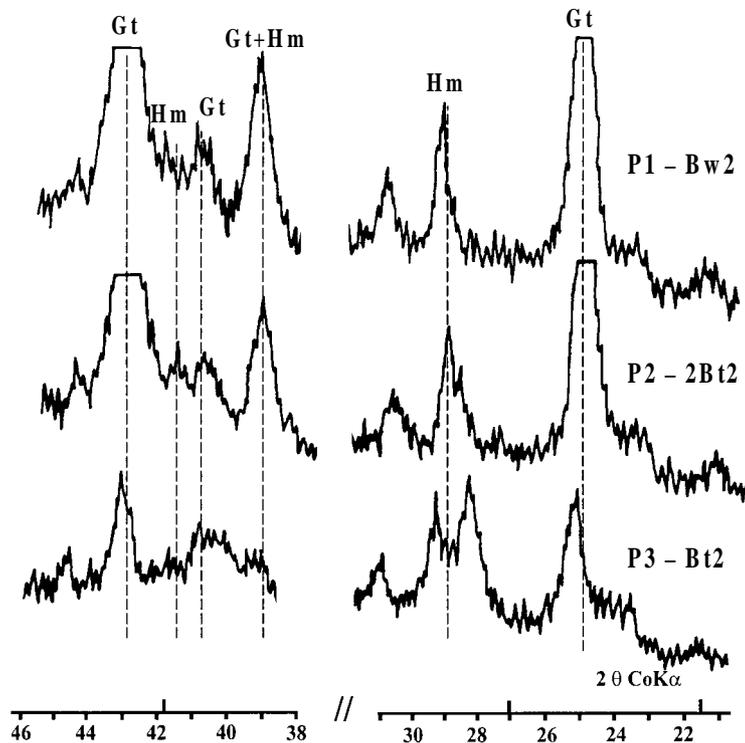


Figura 3. Difratogramas de raio-X da fração argila concentrada com NaOH 5M (não orientada) dos horizontes diagnósticos subsuperficiais dos perfis desenvolvidos de rochas graníticas e gnáissicas (Hm: Hematita e Gt: Goethita).

(Figura 3), observa-se melhor expressão dos picos devidos a hematita (0,370, 0,268 e 0,249 nm) e goethita (0,413, 0,268 e 0,244 nm) no perfil P1 em relação aos dos perfis P2 e P3.

A relação Fed/Fes não permite diferenciar o Latossolo Vermelho-Amarelo e os solos Podzólicos Vermelho-Amarelos, originados de rochas graníticas e gnáissicas (Grupo I), de Cambissolos formados a partir de sedimentos aluviais (Grupo III). Dentro do mesmo material de origem, as relações Fed/Fes, Feo/Fed e Fed/Arg seguem a tendência dos índices k_i , relação silte/argila e CTC da fração argila.

Cronologicamente, a segunda superfície geomórfica foi representada pelos materiais sedimentares da Formação Barreiras, que originou os solos do Grupo II (P4, P5, P6 e P7).

Os perfis desenvolvidos a partir dos sedimentos da Formação Barreiras (Grupo II) apresentaram maior homogeneidade nas suas características morfológicas, na baixa relação silte/argila (Quadro 2), na distribuição de argila em profundidade (Figura 4) e em algumas propriedades químicas (Quadro 3) e mineralógicas (Quadro 4 e Figura 5) que os perfis desenvolvidos de sedimentos em outros Grupos (III e IV).

Apesar do aumento do teor de argila do horizonte A para o B (perfis P4 e P7), não foram observados filmes de argila revestindo as unidades estruturais. As variações de textura entre os horizontes A e B

podem ter sido devidas à perda de argila dos horizontes superficiais, pelo processo de erosão diferencial ou pela destruição dos minerais de argila, sob influência da matéria orgânica, mecanismos propostos como responsáveis pela formação de

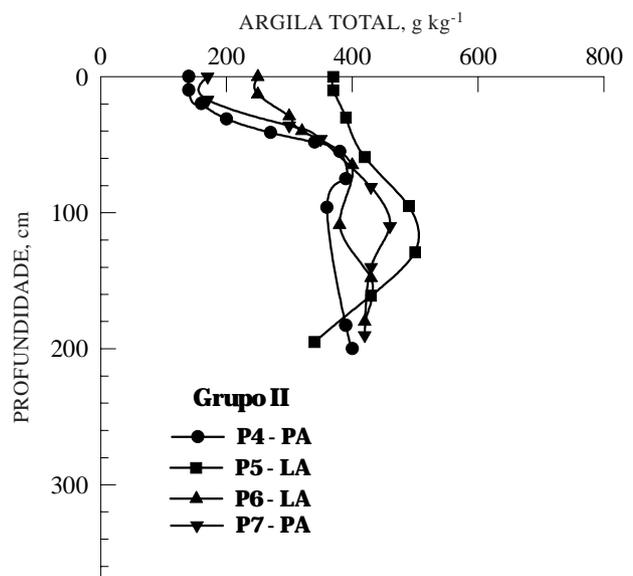


Figura 4. Curvas de distribuição da argila total em profundidade nos perfis desenvolvidos de sedimentos da Formação Barreiras.

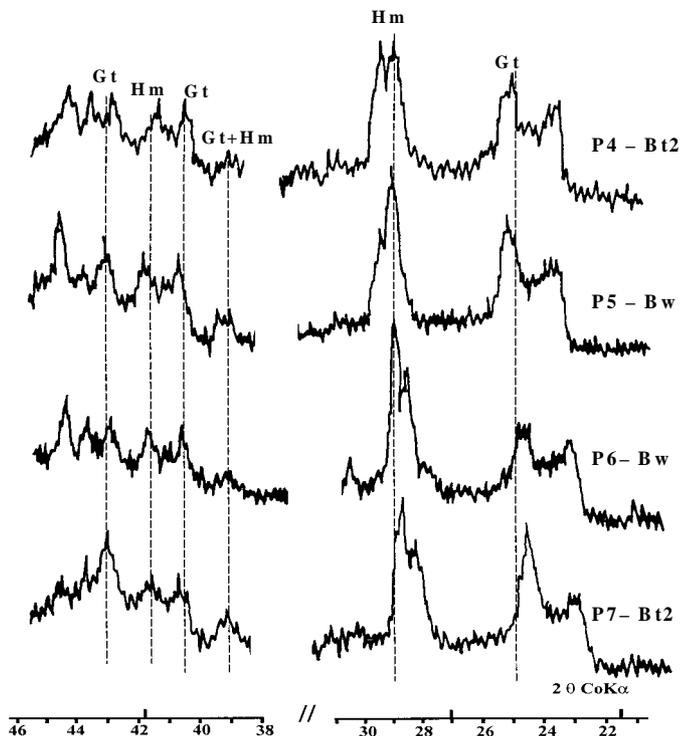


Figura 5. Difratomogramas de raio-X da fração argila concentrada com NaOH 5M (não orientada) dos horizontes diagnósticos subsuperficiais dos perfis desenvolvidos de sedimentos da Formação Barreiras (Hm: Hematita e Gt: Goethita).

horizonte B textural sem a presença de cerosidade (EMBRAPA, 1995). A baixa relação silte/argila, o índice k_i e a mineralogia da fração argila refletiram o grau de intemperismo dos próprios sedimentos da Formação Barreiras, material formador do solo. Tais características foram verificadas nos horizontes identificados como C e são referidas na literatura como propriedades do material originário (Anjos, 1985; Fonseca, 1986; EMBRAPA, 1995).

Os perfis do Grupo II apresentaram elevados valores da relação Fed/Fes no horizonte diagnóstico subsuperficial: P4, Bt2 - 0,75; P5, Bw - 0,92; P6, Bw - 0,91 e P7, Bt2 - 1,00. Tal comportamento é geralmente associado a um elevado grau de intemperismo dos solos; porém, considerando as características do material de origem (Anjos, 1985; Fonseca, 1986; EMBRAPA, 1995), nota-se que o intemperismo pós-deposicional pouco influenciou as propriedades químicas e mineralógicas dos solos deste grupo. Neste caso, a relação Fed/Fes estaria expressando as características dos sedimentos da Formação Barreiras.

A baixa relação Feo/Fed (Quadro 3) mostra o predomínio de óxidos de ferro cristalinos na fração argila dos solos do Grupo II. Os difratogramas de raio-X (Figura 5) indicam a presença dos óxidos de ferro goethita (0,413 e 0,268 nm) e hematita (0,358, 0,268 e 0,250 nm). Porém, assim como as relações silte/argila e o índice k_i , Feo/Fed refletem a natureza do material de origem (Anjos, 1985; EMBRAPA, 1995).

Os perfis P8, P9, P10 e P11, formados a partir de sedimentos aluviais, Grupo III, situam-se na superfície mais recente e têm classes de drenagem que variam de imperfeitamente a muito mal drenado. Para este grupo de solos foi feita uma subdivisão onde os perfis P8 e P9, classificados como Cambissolos, apresentaram maior grau de evolução pedogenética quando comparados aos perfis P10 e P11, classificados como solos Glei. A principal característica morfológica que indicou essa diferenciação foi o desenvolvimento de macroestrutura pédica, maior nos perfis P8 e P9 (Quadro 2). A distribuição de argila em profundidade (Figura 6) foi bastante irregular nos perfis do Grupo III, denotando a estratificação do material de origem destes solos.

No Grupo III, os valores da relação Fed/Fes (Quadro 3) são maiores nos perfis P8 e P9, Cambissolos, que nos perfis com menor grau de pedogênese (perfis P10 e P11). O inverso ocorre com a relação Feo/Fed , os solos Glei Pouco Húmico e Glei Húmico Salino apresentam os maiores valores dentre todos os perfis examinados, refletindo as condições de drenagem impedida, que favoreceram a redução e solubilização do Fe^{3+} e impediram a formação dos óxidos pedogênicos (Schwertmann & Kämpf, 1983; Kämpf & Dick, 1984). Os difratogramas de raio-X (Figura 7) mostram pequena expressão dos picos por causa das hematita (0,358, 0,268 e 0,250 nm) e goethita (0,414, 0,268, 0,256 e 0,234 nm) nos perfis P10 e P11.

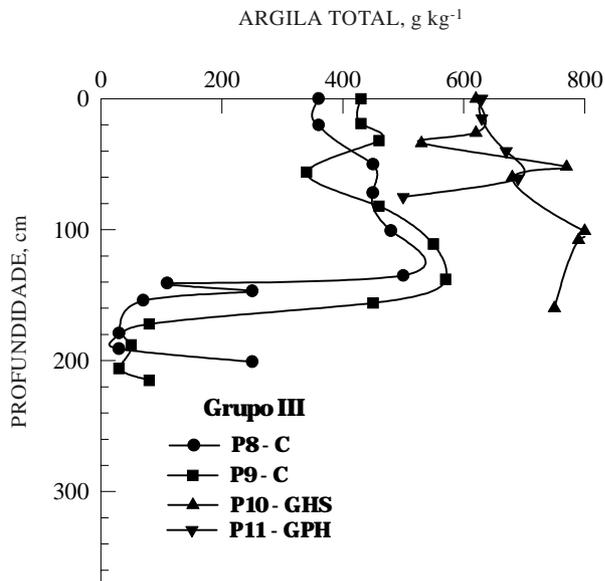


Figura 6. Curvas de distribuição da argila total em profundidade nos perfis desenvolvidos de sedimentos aluviais.

Os solos do Grupo IV, formados a partir de cobertura sedimentar coluvial (P12, P13 e P14) e colúvio/aluvional (P15), apresentam relação textural suficiente (Figura 8) para caracterizar o horizonte B textural (EMBRAPA, 1988, 1997). Entretanto, a cerosidade não foi observada em grau suficiente para caracterizar o processo de eluviação/iluviação de argila nestes solos. Uma possível razão para essa distribuição de argila seria a destruição do material mais fino em superfície e, ou, remoção superficial desse material por erosão (Duarte, 1992; Silva, 1993).

Nos solos do Grupo IV, as relações entre as formas extraíveis de ferro (Quadro 3) parecem ter refletido a classe de drenagem. Os valores de F_{ed}/F_{es} foram de 0,9 para os perfis bem drenados e moderadamente drenados, Podzólico Amarelo, e de 0,6, para o perfil P15, imperfeitamente drenado, Planossolo. A relação F_{eo}/F_{ed} também diferenciou os solos em dois conjuntos quanto à classe de drenagem, o perfil P15 teve o maior valor (0,17) dentro deste grupo de solos. Os difratogramas de raio-X (Figura 9) mostraram pequena expressão dos picos devidos à goethita (0,414 e 0,244 nm) no perfil P15, quando comparados aos dos demais perfis deste grupo.

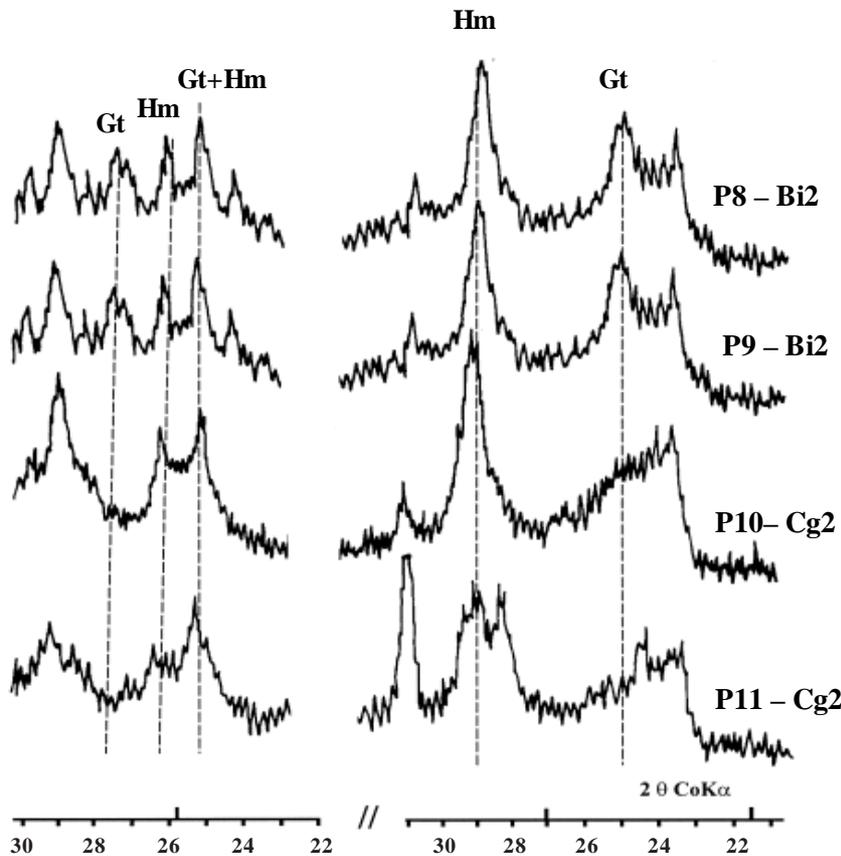


Figura 7. Difratogramas de raio-X da fração argila concentrada com NaOH 5M (não orientada) dos horizontes diagnósticos subsuperficiais dos perfis desenvolvidos de sedimentos aluviais (Hm: Hematita e Gt: Goethita).

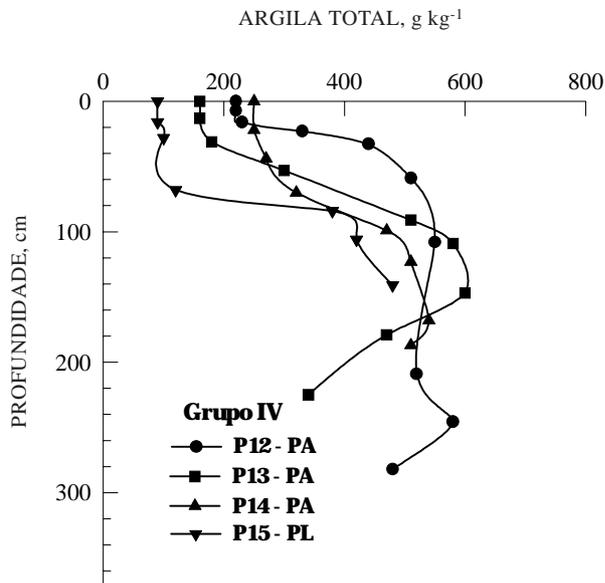


Figura 8. Curvas de distribuição da argila total em profundidade nos perfis desenvolvidos de sedimentos coluviais.

CONCLUSÃO

1. As formas extraíveis de ferro e as relações Fed/Fes e Fed/Feo expressaram variações na mineralogia do material de origem, grau de intemperismo dos solos e do material formador, ou classe de drenagem, mais do que a intensidade de pedogênese. As diferentes formas extraíveis de ferro e as relações entre elas para avaliar o grau de pedogênese, nos solos do estado do Rio de Janeiro, requerem uma interpretação conjunta das demais propriedades do solo, com ênfase para a morfologia e classes de drenagem.

AGRADECIMENTOS

Aos pesquisadores e professores O.O.M. Fonseca, H.G. Santos e M.N. Duarte - Embrapa Solos; A. Ravelli Neto - UFRRJ/IA - Departamento de Solos; e M.B. e Silva - UEMA, por consentir no uso das amostras de solo e parte dos dados analíticos dos respectivos trabalhos de pesquisa.

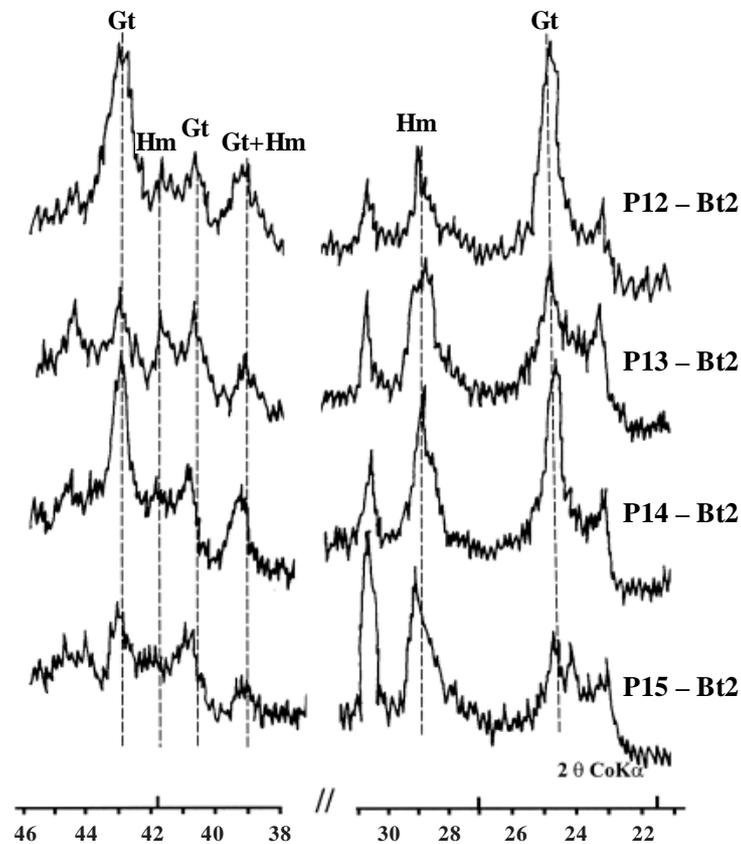


Figura 9. DifratoGRAMAS de raio-X da fração argila concentrada com NaOH 5M (não orientada) dos horizontes diagnósticos subsuperficiais dos perfis desenvolvidos de sedimentos coluviais (Hm: Hematita e Gt: Goethita).

LITERATURA CITADA

- ANJOS, L.H.C. Caracterização, gênese, classificação e aptidão agrícola de uma seqüência de solos do terciário na região de Campos, RJ. Seropédica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1985. 194p. (Tese de Mestrado)
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Serviço Nacional de Pesquisas Agronômicas. Comissão de Solos. Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Rio de Janeiro e Distrito Federal. Rio de Janeiro, 1958. 350p. (Boletim, 11)
- BECH, J.; RUSTULLET, J.; GARRIGÓ, J.; TOBÍAS, F.J. & MARTÍNEZ, R. The iron of some red Mediterranean soils from northeast Spain and its pedogenic significance. *Catena*, 28:211-229, 1997.
- BENNEMA, J. The calculation of CEC for 100 grams clay with correction for organic carbon. In: *Classification of Brazilian soils*. Roma, FAO, 1966. p.27-30. (EPTA Report, 2197)
- CORNELL, R.M. & SCHWERTMANN, U. The Iron Oxides; structure, properties, reactions, occurrence and uses. Weinheim, VCH, 1996. 573p.
- DUARTE, N.M. Caracterização e classificação de solos desenvolvidos de cobertura quaternária sobre embasamento cristalino na região litorânea do estado do Rio de Janeiro-RJ. Seropédica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1992. 281p. (Tese de Mestrado)
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1979. não paginado.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Critérios para distinção de classes de solos e de fases de unidades de mapeamento; normas em uso pelo SNLCS. Rio de Janeiro, 1988. 67p. (Documentos - SNLCS, 11)
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Anais da IV Reunião de Classificação, Correlação e Aplicação de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 1995. 157p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solo: 4ª aproximação. Rio de Janeiro, 1997. 169p.
- ESPÍRITO SANTO, F.R.C. Distribuição de óxidos de ferro em uma catena de solos derivados de granito na região fisiográfica da Depressão Central no estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1988. 141p. (Tese de Mestrado)
- FANNING, D.S. & FANNING, M.C.B. Soil morphology, genesis and classification. New York, John Wiley & Sons, 1989. 395p.
- FONSECA, O.O.M. Caracterização e classificação de solos latossólicos e podzólicos desenvolvidos nos sedimentos do terciário no litoral brasileiro. Seropédica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1986. 185p. (Tese de Mestrado)
- GIANLUPPI, D. Morfologia e gênese de solos do litoral-norte do estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1979. 106p. (Tese de Mestrado)
- KÄMPF, N. & SCHWERTMANN, U. The 5-M-NaOH concentration treatment for iron oxides in soils. *Clays Clay Miner.*, 30:401-408, 1982.
- KÄMPF, N. O ferro no solo. In: REUNIÃO SOBRE FERRO EM SOLOS INUNDADOS, 1., Goiânia, 1988. Anais. Goiânia, EMBRAPA/CNPAF, 1988. (Documentos, 22)
- KÄMPF, N. & DICK, D.P. Óxidos de ferro em Cambissolos Brunos do Rio Grande do Sul e Sul de Minas Gerais. *R. Bras. Ci. Solo*, 8:183-188, 1984.
- LEMOS, R.C. & SANTOS, R.D. Manual de descrição e coleta de solos no campo. 2. ed. Campinas, SBCS/EMBRAPA - SNCLS, 1984. 46p.
- McKEAGUE, J.A & DAY, J.H. Dithionite and oxalate-extractable Fe e Al as aids in differentiating various classes of soils. *Can. J. Soil. Sci.*, 46:13-22, 1966.
- MEHRA, O.P. & JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soil and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clay Miner.*, 5:317-327, 1960.
- NASCIMENTO, R.A.M. Correlação entre o valor ki e outras variáveis em Latossolos. Seropédica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1989. 256p. (Tese de Mestrado)
- PEREIRA, M.G. Formas de Fe, Al e Mn como índices de pedogênese e adsorção de fósforo em solos do estado do Rio de Janeiro. Seropédica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1996. 211p. (Tese de Doutorado)
- RAMOS, D.P. Levantamento detalhado de solos da área da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, com base em fotografias aéreas e prospecção do terreno. Seropédica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1970. 128p. (Tese de Mestrado)
- RAMOS, D.P. & CUNHA, L.H. Caracterização de solos afetados por sais em condições não hidromórficas da região de Campos (RJ). *R. Bras. Ci. Solo*, 9:155-159, 1985.
- RAVELLI NETO, A. Caracterização e classificação de uma seqüência de solos da Baixada dos Goitacazes (RJ). Seropédica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1989. 188p. (Tese de Mestrado)
- SANTOS, H.G. Solos intermediários entre Latossolo Vermelho-Amarelo argila de atividade baixa: conceituação e distinção. Seropédica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1986. 293p. (Tese de Doutorado)
- SCHWERTMANN, U. The differentiation of iron oxide in soil by a photochemical extraction with acid ammonium oxalate. *Z. Pflanzenernahr. Dung. Bodenkd.*, 105:104-201, 1964.
- SCHWERTMANN, U. Inhibitory effect of soil organic matter on the crystallization of amorphous ferric hydroxide. *Nature*, 212:645-646, 1966.
- SCHWERTMANN, U. & KÄMPF, N. Óxidos de ferro jovens em ambientes pedogenéticos brasileiros. *R. Bras. Ci. Solo*, 7:251-255, 1983.
- SCHWERTMANN, U. The effect of pedogenic environments on iron oxides minerals. *Adv. Soil Sci.*, 1:171-200, 1985.
- SCHWERTMANN, U. & TAYLOR, R.M. Iron oxides. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. *Minerals in soil environments*. 2.ed. Madison, Soil Science Society of America, 1989. p.379-438.
- SCHULZE, D.G. The influence of aluminum on iron oxides. VII. Unit-cell dimensions of Al- substituted goethites and estimation of Al from them. *Clays Clay Miner.*, 1:27-39, 1984.
- SILVA, M.B. Caracterização dos solos em uma toposseqüência no campus da UFRRJ. Seropédica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1993. 141p. (Tese de Mestrado)
- TORRENT, J.; SCHWERTMANN, U. & SCHULZE, D.J. Iron oxide mineralogy of some two river terrace sequences in Spain. *Geoderma*, 23:191-208, 1980.