

REVISTA BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO

Volume 25 - Outubro a Dezembro de 2001 - Número 4

SEPARATA

VIÇOSA - MINAS GERAIS

SEÇÃO V - GÊNESE, MORFOLOGIA E CLASSIFICAÇÃO DO SOLO

OS FRAGIPÃS E DURIPÃS DAS DEPRESSÕES DOS TABULEIROS COSTEIROS DO NORDESTE BRASILEIRO: UMA PROPOSTA DE EVOLUÇÃO⁽¹⁾

H. F. FILIZOLA⁽²⁾, M. LAMOTTE⁽³⁾, E. FRITSCH⁽³⁾, R. BOULET⁽³⁾,
J. C. ARAUJO FILHO⁽⁴⁾, F. B. R. SILVA⁽⁴⁾ & J. C. LEPRUN⁽⁵⁾

RESUMO

A presença de fragipãs e duripãs é freqüente nos solos desenvolvidos sobre o Grupo Barreiras, nos baixos platôs costeiros do Nordeste. Os estudos desenvolvidos nas regiões áridas atribuem a cimentação dos duripãs à sílica amorfa. Entretanto, os duripãs e fragipãs do NE brasileiro ocorrem tanto no semi-árido como em zonas com alta pluviosidade (1.500 a 2.000 mm ano⁻¹). Este trabalho teve por objetivo apresentar uma proposta de evolução desses solos, a partir da distribuição espacial das organizações pedológicas estudadas em quatro depressões de diferentes tamanhos. As seqüências de solo foram estudadas por meio de tradagens e trincheiras cujas dimensões variaram de 2 a 70 m. Os solos foram descritos morfologicamente nas trincheiras abertas. Análises mineralógicas, químicas, granulométricas e micromorfológicas foram feitas em amostras selecionadas dos diversos horizontes. A formação destes horizontes endurecidos está ligada à evolução das depressões, aos processos de hidromorfia e à translocação de matéria mineral e orgânica. O início da hidromorfia seria responsável pela formação dos fragipãs e das bandas ferruginosas. Com o aumento das condições hidromórficas, ligado ao aumento da dimensão das depressões, teriam início a formação dos duripãs e a podzolização, com a formação do horizonte álbico.

Termos de indexação: horizontes endurecidos, infiltração de água, podzolização, Espodosolos, Grupo Barreiras.

⁽¹⁾ Projeto financiado pela FAPESP. Recebido para publicação em agosto de 1999 e aprovado em junho de 2001.

⁽²⁾ Pesquisador da EMBRAPA Meio Ambiente, Caixa Postal 69, CEP 13820-000 Jaguariúna (SP). E-mail: filizola@cnpma.embrapa.br

⁽³⁾ Pesquisador do IRD, USP, Caixa Postal 11348, CEP 05422-970 São Paulo (SP). E-mail: mlamotte@usp.br

⁽⁴⁾ Pesquisador da EMBRAPA Solos. CEP 51020-240 Recife (PE). E-mail: coelho@embrapa.cnpsuep.com.br

⁽⁵⁾ Pesquisador do IRD, B.P. 5045 34032 Montpellier cedex 1 (Fr). E-mail: Jean-claude.deprun@mpl.ird.fr

SUMMARY: FRAGIPANS AND DURIPANS OF THE LOW COASTAL PLATEAU DEPRESSION IN NORTHEASTERN BRAZIL: AN EVOLUTION PROPOSAL

Fragipans and Duripans are frequently found in soils developed from sediments of the Barreiras Formation, in the low coastal plateaus of northeastern Brazil. Previous studies in arid regions have attributed Duripan cohesion to the amorphous silica. However, the Duripans and Fragipans in northeastern Brazil are located in semi-arid and high annual precipitation level zones (1.500 to 2.000 mm year⁻¹). This study, based on a detailed characterization of soils from four depressions with different sizes, aimed to propose an evolution scheme of these horizons. Toposequences were studied by boring and excavating the trench (2-70 m in size) from the center to the border of four depressions. The morphology and the organization of the horizons were described in detail and samples were characterized for granulometry, mineralogy, geochemistry and micromorphology. The results indicated that the formation of these hardened horizons was related to the evolution of the depressions, hydromorphic conditions and particle translocation. At the first stage, the hydromorphic conditions caused the formation of the Fragipans and the iron bands. Their evolution and the increased depression size caused Duripan formation and podzolization, with the formation of the albic horizon.

Index terms: hardened horizons, water infiltration, podzolization, Spodosols, Barreiras Group.

INTRODUÇÃO

Os platôs litorâneos do nordeste brasileiro, onde predominam Latossolos e Argissolos, são geralmente extensos e pouco dissecados (Brasil, 1981). Estes platôs comportam numerosas depressões onde são freqüentemente encontrados, em profundidade maior que 80 cm, horizontes endurecidos, identificados como fragipãs e duripãs (Jacomine, 1974; Brasil, 1981). Espodossolos também são encontrados e estão associados às depressões maiores. Os horizontes endurecidos constituem importante fator limitante para a agricultura, porque reduzem a infiltração da água e impedem a penetração das raízes (Lopes da Silva, 1989; Oliveira Neto, 1992; Melo, 1993). Assim, o manejo e as práticas de conservação destes solos dependem do bom conhecimento de seu comportamento hídrico.

Os fragipãs e duripãs da região costeira do nordeste brasileiro são similares aos horizontes endurecidos das regiões áridas. Distinguem-se, contudo, por estarem presentes em áreas de alta pluviosidade (1.500 a 2.000 mm ano⁻¹), por estarem associados aos Espodossolos (Melo & Santos, 1996) e por um teor de argila nitidamente maior (Silva, 1995). O endurecimento dos fragipãs e duripãs do Nordeste é geralmente atribuído à sílica, por analogia com os estudos realizados nas regiões áridas (Harlan et al., 1977; Chartres & Fitzgerald, 1990; Balbir-Singh & Gilkes, 1993).

No caso dos solos endurecidos associados a Espodossolos, identificados em regiões úmidas, o endurecimento é atribuído a complexos de alumínio

e matéria orgânica, com ou sem ferro associado (McKeague & Wang, 1980). Jacomine (1974) atribui este papel à sílica e ao alumínio amorfo. Recentemente, Silva et al. (1997) atribuíram ao alumínio o principal papel na formação dos duripãs dos tabuleiros litorâneos do nordeste, dada a sua contribuição para o endurecimento desses horizontes, na forma de hidroaluminossilicatos.

O objetivo deste trabalho foi relacionar os solos que apresentam horizontes endurecidos com a dimensão das depressões. A partir dos resultados, pretende-se propor um esquema de evolução dos solos, considerando o desenvolvimento das depressões.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi iniciado na Estação Experimental de Itapirema da Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária (IPA), sobre uma seqüência Argissolo Amarelo, na vertente, e Espodossolo duripânico, na área deprimida. Em discussão com pesquisadores locais, foi apresentado um mapa de solos, na escala 1:10.000, elaborado pela Prosped (1992), na região de Boca da Mata (AL), que mostrava claramente a ligação entre o tamanho das depressões e a presença de fragipãs e duripãs nelas. A partir deste mapa e de uma visita à Usina Triunfo, foram selecionadas três depressões de tamanhos diferentes para serem estudadas em detalhe, já que, segundo o mapa, as depressões pouco extensas apresentavam só fragipã, as de tamanho médio, fragipã associado ao duripã pouco desenvolvido, e as maiores, fragipã

e duripã bem desenvolvidos e Espodosolos. Os critérios de seleção, além do tamanho, foram: proximidade dos carregadores e estradas e o mínimo de interferência nos trabalhos cotidianos da usina.

Localização

A Estação Experimental de Itapirema da Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária (IPA) está localizada a $7^{\circ} 37' 30''$ S e $34^{\circ} 57' 30''$ W, no município de Goiana (PE), enquanto a área de Boca da Mata (AL) localiza-se entre os paralelos $9^{\circ} 40' 47''$ e $9^{\circ} 42' 30''$ S e os meridianos $36^{\circ} 08' 12''$ e $36^{\circ} 5' 3''$ W (Figura 1).

Geologia e geomorfologia

Os baixos platôs costeiros do nordeste estão relacionados com o Grupo Barreiras, cujo material sedimentar é descrito por Kisler (1954) e Mabesoone & Alheiros (1988) como constituído por uma seqüência de coloração variegada, onde predominam arenitos síltico-argilosos, com estratificação oblíqua e leitos horizontais; estão presentes também intercalações de níveis de argilas arenosiltosas e leitos conglomeráticos. Os sedimentos são comumente mal selecionados e com nítida predominância das frações areia e argila. O Grupo Barreiras sobrepõe-se discordantemente tanto sobre as rochas cristalinas pré-cambrianas, como sobre rochas cretáceas. Mineralogicamente, estes sedimentos são constituídos essencialmente de caulinita, quartzo e moscovita associados a alguns minerais pesados como zircônio, anatásio e esfênio. Os feldspatos, quando presentes, são geralmente completamente alterados em caulinita (pseudomorfos). As moscovitas apresentam uma alteração crescente da base para o topo da formação (Mafrá Valença, 1993).

Os baixos platôs litorâneos, também denominados tabuleiros costeiros, situados ao longo do litoral brasileiro, desde o Espírito Santo até o Maranhão, são profundamente entalhados por vales de orientação Leste-Oeste. Estes tabuleiros comportam numerosas depressões circulares, de alguns a centenas de metros de diâmetro.

Clima e vegetação

O clima da região de Boca da Mata é tropical úmido. A estação meteorológica de Boca da Mata apresenta os seguintes dados climáticos para a Usina Triunfo: a média das precipitações anuais é de 1.640 mm e da evaporação estimada é de 1.100 mm, havendo um período de excedente de água de maio a outubro. A temperatura média mensal varia de 23 a 27°C e a umidade relativa do ar varia de 85 a 93%. O clima da região de Goiana é mais úmido, com 1.991 mm de pluviosidade média anual e evaporação estimada de 1.174 mm. A temperatura média anual é de 25°C e a umidade relativa média é de 78% (médias dos dados relativos ao período de 1931 a 1960 fornecidos pela Estação Meteorológica de Goiana).

A vegetação primitiva, nos dois locais, era uma floresta densa (Mata Atlântica), hoje quase totalmente desmatada para o cultivo intensivo da cana.

Trabalhos de campo

Nas áreas selecionadas, foram estudadas toposseqüências de solos associadas a quatro depressões (D1 a D4). O trabalho foi iniciado em Goiana, onde uma depressão (D3, no texto) foi estudada por meio de tradagens e trincheiras de $2 \times 1 \times 2$ m. O trabalho teve continuidade em Boca da Mata, apoiando-se, como já dito, em uma carta de solos na escala 1:10.000 (Prosped, 1992), que mostrou a existência de diferentes seqüências de solos de acordo com o tamanho das depressões.

Assim, foram selecionadas mais três depressões (D1, D2 e D4), que foram estudadas por meio de trincheiras, cujas dimensões variaram de 20 a 70 m de comprimento por aproximadamente 2 m de profundidade. Em alguns pontos das depressões D2 e D4, as trincheiras foram aprofundadas para se chegar ao limite inferior de alguns horizontes, especialmente o duripã. As paredes das trincheiras foram limpas com faca e fotografadas com Polaroid. Os principais horizontes do solo foram individualizados a partir de suas características morfológicas (cor, estrutura, textura, coesão e prosidade), descritos e desenhados sobre papel vegetal colado sobre as fotos Polaroid. Os fragipãs foram diferenciados dos duripãs por meio dos testes do rompimento súbito e de imersão em água (Oliveira et al., 1992). Finalmente os diferentes horizontes foram amostrados, tanto vertical como lateralmente, para análises físicas, químicas e mineralógicas.

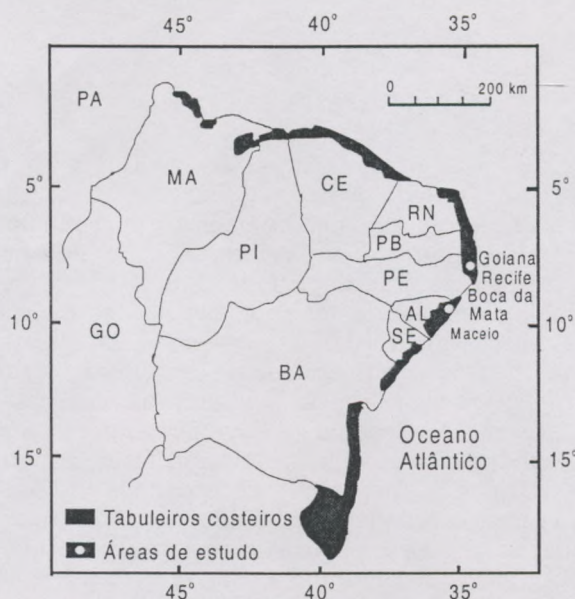


Figura 1. Mapa de localização das áreas de estudo.

Trabalhos de laboratório

Fotointerpretação: Como a carta de solos elaborada pela Prosped (1992) mostrou a existência de numerosas depressões na área da Usina Triunfo, foi feita a fotointerpretação a partir de fotos aéreas na escala 1:50.000 (foto SagII 2086 88.31 de outubro 1983).

Análises laboratoriais: As análises físicas consistiram na caracterização textural, segundo as técnicas preconizadas pela EMBRAPA (1997), mas, dada a dificuldade de dispersão da argila do duripã, algumas amostras referentes a este material foram submetidas primeiramente ao ultra-som. As análises químicas, via ICP, incluíram os óxidos de Si, Al e Fe. Destas, oito amostras foram tratadas com a técnica do oxalato de amônio, após extração com DCB, proposta por MacKeague & Day (1966), e posterior quantificação do Si, Al e Fe por espectrofotometria de absorção atômica. A Capacidade de Troca de Cátions e o Ferro foram avaliados segundo o método proposto pela EMBRAPA (1997), enquanto o Ki foi calculado a partir de dados do ataque sulfúrico. O teor de carbono orgânico de amostras de Boca da Mata foi quantificado com o Carbograph LOCO CR412. Para as amostras de Goiana, utilizou-se o método de Walkey-Black modificado (EMBRAPA, 1997). O pH em água e o pH em KCl foram determinados de acordo com EMBRAPA (1997).

A mineralogia dos materiais foi caracterizada pela difração de raios-X, com um difratômetro Philips e goniômetro vertical PW3020 (40 kV, 30 mA, radiação de Cu-K α). Foram também utilizadas microscopia ótica, microscopia eletrônica de transmissão e de varredura, usando difração eletrônica e microsonda. Os dois meios de observação (MEV e MET) não dizem respeito às mesmas observações. Com o microscópio de varredura, observaram-se fraturas, geralmente correspondentes a vazios ou a faces estruturais, enquanto as lâminas ultrafinas correspondiam ao fundo matricial. Além disso, foram feitas datações por ^{14}C e avaliações do $\delta^{13}\text{C}$ do horizonte B_n do solo de Goiana.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Organização das coberturas pedológicas das depressões

Apesar de o trabalho ter sido iniciado em Goiana (PE), para dar maior clareza à exposição, adotou-se uma ordem que respeita a seqüência de evolução deduzida a partir do estudo das quatro depressões.

Depressão D1 (Boca da Mata): O platô, onde está inserta a depressão, é um Argissolo Amarelo latossólico. Esta depressão, com 30 m de diâmetro e 30 cm de profundidade, não apresenta exutório superficial. Uma trincheira, de 19 m de comprimento

e 2 m de profundidade, mostrou a organização da cobertura pedológica (Figura 2a). O quadro 1 mostra uma síntese das características morfológicas dos solos do platô e da depressão D1.

Uma linha descontínua de plaquetas ferruginosas de 1 cm de espessura, que existe desde o Argissolo Amarelo (Quadro 1 e Figura 2a), transforma-se, em direção ao centro da depressão D1, em uma banda ferruginosa contínua, de 2 a 5 cm de espessura, menos dura e mais difusa que as plaquetas.

Acima desta banda ferruginosa, no prolongamento do horizonte 3 (Figura 2a), começam a aparecer volumes mais endurecidos, de cor bruno muito clara (10YR 7/5). Lateralmente, estes volumes tornam-se maiores (horizonte 6, Figura 2a) e mais claros. Simultaneamente, os volumes fragipânicos do horizonte 4, localizados abaixo da banda ferruginosa, aumentam de tamanho, acabando por se tornarem quase contínuos (horizontes 7 e 8, Figura 2a). Este conjunto é mais endurecido no topo do que na base, onde são encontrados somente alguns volumes centimétricos duros.

O segundo nível do fragipã (horizontes 7 e 8, Figura 2a) é menos endurecido que aquele localizado acima da banda ferruginosa (horizonte 6, Figura 2a). A estrutura é maciça com fratura horizontal preferencialmente plana. Uma rede de material bruno-amarelo (10YR 5,5/4) percorre estes horizontes.

Depressão D2 (Boca da Mata): Esta depressão, com 100 m de extensão e 1,5 m de profundidade, também não apresenta exutório. Para seu estudo, foi aberta uma trincheira de 25 m de comprimento por 2 m de profundidade (Figura 2b). Em seu centro, a trincheira foi aprofundada até 4 m.

Na borda da depressão, o solo é análogo àquele da D1, Argissolo Amarelo latossólico, 10YR 6/8, com os mesmos volumes com características fragipânicas e fratura preferencialmente plana e horizontal, dispersa na matriz microagregada do horizonte 5 (Figura 2b). Existem linhas de plaquetas ferruginosas em diferentes profundidades (50, 90 e 130 cm); a linha superior passa a uma banda ferruginosa difusa que permanecerá até o centro da depressão, com numerosas ramificações. Aproximadamente, a 6 m do início da trincheira, na altura do perfil F8 (Figura 2b), o solo passa gradativamente a um Argissolo Acinzentado (10YR 6/2). A textura é franco argilo-arenosa, no topo, e argilo-arenosa a partir dos 30 cm.

Acima da banda ferruginosa, desenvolvem-se, lateralmente, volumes de cor amarelo-clara (2Y 7/6), duros, de forma irregular, semelhantes aos fragipãs da depressão D1, dispersos numa matriz microagregada. A 5 m do início da trincheira (perfil F5, Figura 2b), estes volumes tornam-se mais claros, mais duros, quase contínuos, tornando-se um duripã. A 10 m do início da trincheira (perfil F9), o duripã ultrapassa a banda ferruginosa, atingindo mais de 4 m de espessura no centro da depressão.

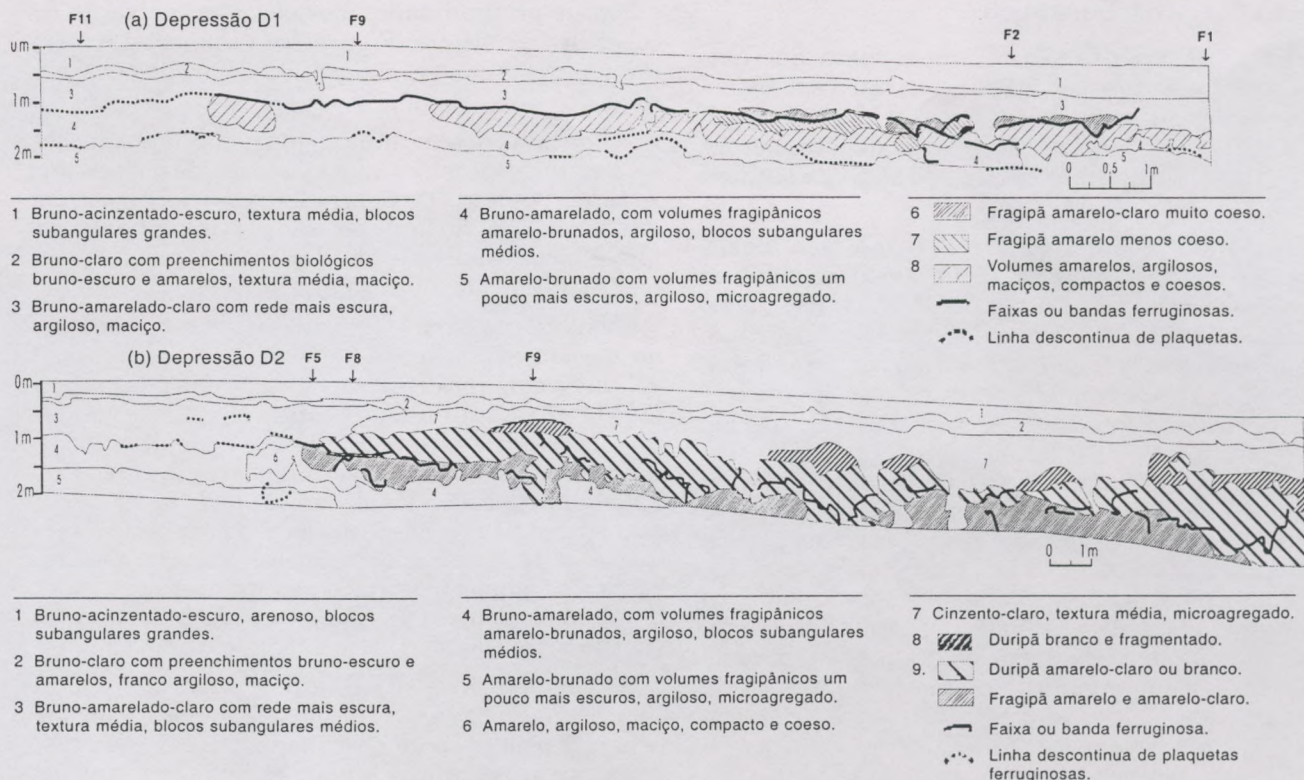


Figura 2. Distribuição espacial dos horizontes dos solos nas depressões D1 e D2.

Quadro 1. Síntese das características morfológicas dos solos da depressão D1

Horizonte	Profundidade	Cor	Estrutura	Textura	Coesão	Porosidade	Observações
	cm	Munsell					
Argissolo Amarelo distrófico latossólico - Perfil da borda da depressão							
1 Ap	0-30	10YR4/2	bl. cm.	md	md/fr	f.	
2 AB	30-50	10YR6/3	maç.	md	fr	f.	frt. pol.
3 Bt	50-100	10YR6/8	maç.	arg.	md	f.	com rede 2.5YR3/4
L. plaq.	85-100	2.5YR3/4					desc. ond. matriz: Bt (3)
4 Bt	100-135	10YR5/7	bl. dm.	arg.	md	f.	com nm. vol. fragip. 10YR6/7
L. plaq.	135-138	2.5YR3/4					com desdobramentos
5 Bw	138-200	10YR6/8	micgr.	arg.	md	mf	com nm. vol. cm. fragip. 10YR6/6
Argissolo Amarelo distrófico fragipânico - Perfil da parte central da depressão							
1 Ap	0-30	10YR4/2	bl. cm.	md	md/fr	f.	
3 Bt	50-80	10YR6/5	maç.	arg.	md	f.	vol. dm. fragip. q. cont.
6 Btx	80-110	2.5Y8/4	bl. dm.	arg.	f.	fr.	fragipã
bd.ferr.	110-112	10R3/6-4/8	maç.				
7 Btx	112-130	2.5Y8/6	bl. dm.		md		fragipã menos coeso
8 Btx	130-170	2.5Y7/6	bl. m.	arg.	fr.		fragipã pouco evoluído
4 Bt	170-190	10YR5/7	bl. dm.	arg.	md	f.	com vol. dm. fragip.
5 Bw	190+	10YR6/8	micgr.	arg.	md	mf	

Os números da primeira coluna referem-se aos horizontes da Figura 2a. l. plaq.: linha de plaquetas ferruginosas; bd. ferr.: banda ferruginosa. Estrutura: bl.cm.: blocos centimétricos; maç.: maciça; bl. dm.: blocos decimétricos; micgr.: microagregado. Textura: md: média; arg.: argilosa. Coesão: fr: fraca; md: média; f.: forte. Porosidade: mf: muito forte; f.: forte; fr.: fraca. Observações: frt. pol.: fratura poliédrica; c/: com; desc.: descontinua; ond.: ondulada; nm.: numerosos; vol. cm. fragip.: volumes centimétricos de fragipã; vol. dm. fragip.: volumes decimétricos de fragipã; vol. fragip. q. cont.: volumes de fragipã quase contínuos.

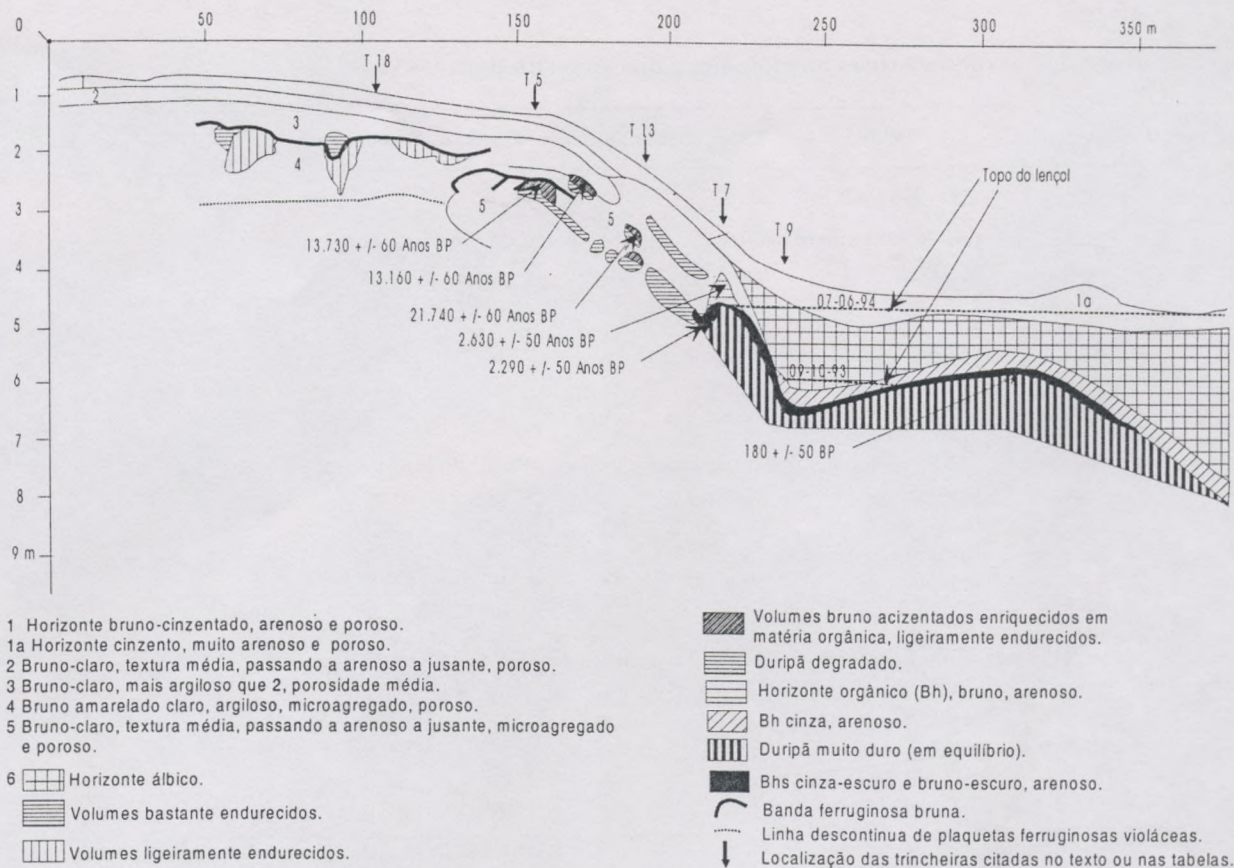


Figura 3. Distribuição espacial dos horizontes dos solos da depressão D3.

Abaixo da banda ferruginosa, os volumes de fragipã (10YR 6/7) aumentam, tornando-se contínuos. Ao mesmo tempo, sua cor torna-se mais clara que aquela da matriz microagregada.

Tanto no fragipã quanto no duripã existem volumes decimétricos de material argiloso, bruno, microagregado, poroso, com orientação vertical e sub-horizantal, que corresponderiam a antigos alojamentos das raízes da vegetação primitiva, já que são observados vestígios destas raízes. Estes volumes conferem ao duripã e ao fragipã uma porosidade grosseira importante, mas, na estação úmida, acima do duripã contínuo e das bandas ferruginosas, o solo fica saturado.

No solo acima do duripã, existem numerosos blocos centimétricos semelhantes ao duripã, que se tornam cada vez mais frágeis para o topo e que são, provavelmente, relíquias deste.

Depressão D3 (Goiana): A depressão D3, com exutório, tem aproximadamente 1 km de diâmetro e 5 m de desnível da borda ao centro (Figura 3). O solo da borda da depressão é um Argissolo Amarelo latossólico, como em D1 e D2, e as linhas de plaquetas também estão presentes. O quadro 2 apresenta a síntese das características morfológicas dos solos desta depressão.

A partir da trincheira T5 (Figura 3), começam a aparecer volumes de cor bruno-acinzentada, ligeiramente endurecidos, enriquecidos por matéria orgânica, sobrepostos ou não a volumes claros mais endurecidos. Estes últimos tornam-se maiores e quase contínuos em direção ao centro da depressão, chegando a vários metros de comprimento e 50 cm de espessura. Tendo em vista a continuidade destes volumes endurecidos com o duripã que existe no fundo da depressão, estes foram interpretados como duripã degradado (Figura 3). Abaixo e acima deste nível, existe um horizonte de cor bruno muito clara, poroso, sem coesão, com estrutura microagregada e volumes centimétricos de duripã branco degradado dispersos na matriz (horizonte 5, Figura 3).

Próximo ao fundo da depressão, os horizontes superiores tornam-se cada vez mais arenosos e mais claros e, na altura da trincheira T7, aparece em bisel o horizonte álbico (horizonte 6, Figura 3) do Espodossolo que ocupa toda a parte central da depressão. Na base do horizonte álbico, há um horizonte Bh, cinza, arenoso, seguido do horizonte Bhs, cinza-escuro e bruno-escuro, arenoso. Fechando a seqüência vertical, o duripã contínuo, extremamente duro, impermeável e de cor branca. Este último está impregnado, em seu topo, por matéria orgânica.

Quadro 2. Síntese das características morfológicas dos solos da depressão D3

Horizonte	Profundidade cm	Cor Munsell	Estrutura	Textura	Coesão	Porosidade	Observações
Argissolo Amarelo distrófico latossólico - Perfil da borda da depressão							
1 A	0-18	10YR5/2	gr. / maç.	ar.	md	f	
2 AB	18-32	10YR6/4	bl. dm.	ar.	md	md	com vols. 10YR7/8
3 Bt	32-100	10YR6/6	bl. dm.	md	md	md	
bd.ferr.	100-102	10R3/6-4/8	maç.	arg.	f	fr	sinuosa
4 Bw	102-200	10YR6/6	micgr.	arg.	n	f	com vol. dm. frag.
l. plaq.	200-203	2.5YR3/4	maç.	arg.	mf	fr	contínua
Argissolo Amarelo distrófico duripânico espódico - Perfil do início da depressão							
1 A	0-18	10YR5/2	bl. dm.	ar.	md	f	
2 AB	18-32	10YR6/3	bl. dm.	ar.	md	f	
5 Bt	32-150	10YR7/4	micgr.	md	n	f	com nm. vol. cm. dur.
Bh	150-160	10YR4/2	maç.	ar.	fr	f	
Bsm	160-250	10YR8/2	maç.		mf	fr	duripã
Espodossolo Ferrocárbico hiperespesso típico - Perfil do centro da depressão							
1 A	0-15	10YR4/2	maç.	ar.	md	f	
7 E	15-270	10YR7/2	maç.	ar.	fr	f	
Bh	270-300	10YR4/2	maç.	ar.	fr	f	
Bhs	300-320	10YR4/2 e 7,5YR4/4	maç.	ar.	mf	fr	
Bsm	320+	10YR8/1	mac.		mf	n	duripã c/ tp. impreg. m.o

Os números da primeira coluna referem-se aos horizontes da Figura 3. bd.ferr.: banda ferruginosa; l. plaq.: linha de plaquetas ferruginosas. Estrutura: gr.: granular; maç.: maciça; bl. dm.: blocos decimétricos; micgr.: microagregada. Textura: ar.: arenosa; md: média; arg.: argilosa. Coesão: mf: muito forte; f: forte; md: média; fr: fraca; n: nula. Porosidade: f: forte; md: média; fr: fraca; n: nula. Observações: c/: com; nm.: numerosos; vol. dm. frag.: volumes decimétricos de fragipã; vol. cm. dur.: volumes centimétricos de duripã; c/ tp. impreg. m.o.: com topo impregnado por matéria orgânica.

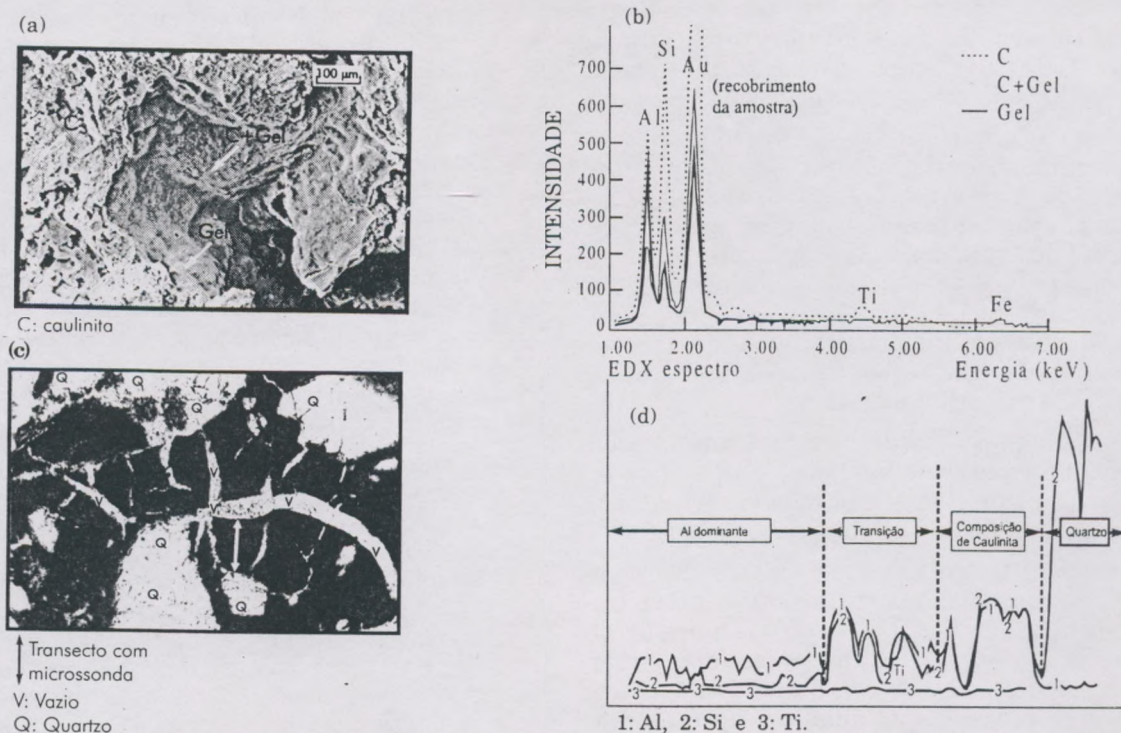


Figura 4. Imagem do fragipã amarelo-claro em Microscópio Eletrônico de Varredura (a) com seu respectivo espectro de microsonda (b) e fotomicrografia de uma banda ferruginosa da depressão D3 (c) com o transecto com microsonda de um gel fendilhado na borda de um vazio (d).

Na estação de chuva, o duripã contínuo constitui o assoalho de um lençol suspenso e a zona de flutuação localiza-se no Espodossolo. Este lençol está ausente a montante, onde o duripã está reduzido a volumes descontínuos. Uma tradagem, realizada no máximo da estação de chuva, de 4 m de profundidade e a um metro a montante do duripã contínuo, não apresentou indício de água livre, mas mostrou, no prolongamento do duripã contínuo, a existência de volumes brancos, centimétricos e friáveis, similares ao duripã, mas muito menos duros.

Depressão D4 (Boca da Mata): Esta depressão tem também um exutório, é muito plana, estende-se por vários quilômetros e tem quase 2 m de profundidade. Dentro dela, há outra depressão de 30 m de diâmetro, cujo estudo foi feito a partir de uma trincheira de 70 m de comprimento. O quadro 3 apresenta as principais características morfológicas dos solos.

Nos horizontes 1 a 3 (Quadro 3), existem relíquias de duripã que diminuem em número, tamanho e dureza em direção à superfície, desaparecendo ao redor de 40 cm de profundidade. O horizonte 3 passa, na sua base, a um nível de 60 a 100 cm de espessura constituído por placas (4 x 10 cm) de duripã de dureza variável (muito duro a quebrável com a mão), mais ou menos horizontais, com os interstícios preenchidos por um material de textura média, microagregado (horizonte 4, Quadro 3). Existem também blocos de duripã muito duros de até 80 cm. Certos blocos são sobrepujados por relíquias do horizonte Bhs. Para jusante, o solo torna-se progressivamente mais arenoso, mais claro, até passar a um Espodossolo com horizonte Bh na

pequena depressão. O nível de blocos de duripã é mantido, exceto no centro da depressão, onde está atravessado pelo Espodossolo (horizonte 7 e 8 quadro 3). Esta cobertura é bem drenada e não existe lençol suspenso, mesmo na época das chuvas.

Resultados analíticos

Textura: Nas depressões D1 e D2, a textura é média (180 a 260 g kg⁻¹ de argila) nos horizontes de superfície (Ap); argilosa no horizonte Bt e no fragipã (Btx), situados acima da banda ferruginosa e nos horizontes situados abaixo da última banda (340 a 590 g kg⁻¹ de argila) (Quadros 4 e 5). Lateralmente, a variação de textura é muito fraca. Não se observaram variações de textura entre o Argissolo Amarelo (Quadro 5, Perfil F2) da borda e o Argissolo Acinzentado (Quadro 5, Perfil F18) do centro da depressão D2. Na depressão D3, a variação textural mostrou-se semelhante às anteriores para o Argissolo, mas lateralmente esta variação aumentou bastante, gradando para um Espodossolo (Quadro 6). Os resultados analíticos mostraram uma nítida transição textural, a partir da meia vertente, na passagem do Argissolo ao Espodossolo. Em uma extensão de 5 m, o teor de argila passou de 220 para 60 g kg⁻¹ e, posteriormente, para 2 g kg⁻¹, no Espodossolo.

Microscopia ótica, microscopia de varredura e microssonda

Depressão D2: No fragipã, existem géis pouco espessos nas paredes dos poros, de composição alumino-silicosa (Figuras 4a e 4b). No microscópio ótico, estes géis são bem luminosos em luz normal,

Quadro 3. Síntese das características morfológicas dos solos da depressão D4

Horizonte	Profundidade	Cor	Estrutura	Textura	Coesão	Porosidade	Observações
	cm	Munsell					
Argissolo Amarelo distrófico duripânico - Perfil do início da trincheira							
1 Ap	0-30	10YR4/2	maç.	ar.	n/fr.	int. f	ar. e mais coeso na base
2 AB	30-54	10YR5/4	bl. dm.	ar.	md/f	tb e int. md	com alg. vol. cm. dur.
3 Bt	54-120	10YR6/5	micgr.	md	fr.	tb e intmc	com nm vol. cm. dur.
4 Bsm	120-200	10YR5/3	micgr. / bl. dm.	md	fr.	f	40-80% vol. dm. dur. + rq Bh
5 Bsm	200-250	10YR6/5	bl. cm.	arg.	f/mf	tb f	duripã
6 Bw	250+	7.5YR6/8	bl. cm.	arg.	fr	f	com microagregação
Espodossolo Cárbico órtico duripânico - Perfil do centro da depressão							
7 Ap	0-20	10YR2/1	bl. cm.	ar.	n.	f	
8 E	20-140	10YR7/1	maç.	ar.	n.	f	
9 Bh	140-160	7.5YR3/4	mac.	ar.	md	int.f	com vol. dm. de duripã
10 Bsm	160-360	2.5Y7/6	bl. m.	md	f	tb, fr	dur. em cam. sep. mat. tx. md
11 Bt	360+	2.5Y8/4	micgr.	arg.	fr	f	

Estrutura: bl. dm.: blocos decimétricos; bl. cm.: blocos centimétricos; micgr.: microagregada; maç.: maciça. Textura: ar.: arenosa; md: média; arg.: argilosa. Coesão: m. f. muito forte; f. forte; md: média; fr.: fraca; n.: nula. Porosidade: int.: intersticial; tb: tubular; intmc: inter-microagregados; f: forte; md: média; Observações: c/: com; alg.: alguns; nm: numerosos; vol. cm. dur.: volumes centimétricos de duripã; vol. dm. dur.: volumes decimétricos de duripã; rq Bh: relíquias de Bh; dur. em cam. sep. mat. tx. md.: duripã em camadas separado por material textura média.

Quadro 4. Características físicas e químicas dos solos da depressão D1

Trinch.	Perfil/ horizonte	Profundidade	AG	AF	S	Ar	pH		C org.	SiO ₂ *	Al ₂ O ₃ *	Fe ₂ O ₃ *	Al ³⁺	Ki
							H ₂ O	KCl ^f						
		cm	g kg ⁻¹				g kg ⁻¹				cmol _d dm ⁻³			
D1	F11	Argissolo Amarelo distrófico latossólico												
	Ap1	0-10	540	200	60	200	5,3	4,1	9,6	78	63	10	0,4	2,10
	AB2	20-30	490	200	90	220	5,0	4,0	10,3	86	75	14	0,5	1,95
	Bt3	35-45	460	200	60	280	4,7	3,9	7,2	98	81	15	0,8	2,06
		50-60	400	150	50	400	4,7	4,0	4,9	153	146	27	1,0	1,78
	plaq. ferr.	75-85	370	140	70	420	4,5	4,1	3,9	149	148	32	0,9	1,71
	hvfr4	85-90	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	154	78	n.a	-
	Bw5	110-120	290	110	70	530	4,4	4,1	3,6	207	189	31	1,0	1,86
		150-160	230	100	80	590	4,4	4,0	2,9	218	206	34	1,0	1,80
	F9	Argissolo Amarelo distrófico latossólico												
	Ap1	0-10	590	170	60	180	5,2	4,3	9,8	79	62	09	0,3	2,17
		20-30	560	180	60	200	4,5	3,8	9,9	82	74	11	0,9	1,88
	AB2	40-50	520	180	60	240	4,4	3,9	7,5	98	93	11	1,1	1,79
	Bt3	60-70	430	130	60	380	4,4	3,9	4,8	152	142	22	1,0	1,82
		80-90	380	130	70	420	4,6	4,0	4,4	167	156	24	0,9	1,82
		100-110	300	120	50	530	4,4	4,1	4,1	194	181	29	1,1	1,82
	hvfr4	130-140	240	100	90	570	4,5	4,0	3,9	226	210	34	1,0	1,83
	Bw5	170-180	220	90	120	570	4,9	4,3	3,2	246	210	34	0,2	1,96
	F2	Argissolo Amarelo distrófico fragipânico												
	Ap1	0-10	590	170	60	180	6,1	5,1	8,4	78	70	12	0,0	1,89
		20-27	590	170	40	200	6,0	5,0	8,3	81	73	7	0,0	1,89
		30-40	600	150	50	200	6,0	4,9	9,7	84	71	9	0,0	2,01
	AB2	40-50	500	150	70	280	5,9	4,7	6,5	118	104	12	0,0	1,93
	Bt3	60-70	410	130	60	400	5,9	4,4	5,6	157	145	19	0,3	1,84
		70-80	460	110	50	380	5,7	4,4	5,2	156	154	18	0,3	1,72
		90-100	380	130	100	390	5,7	4,4	4,8	171	172	18	0,6	1,69
	fragipã6	95-100	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	163	86	n.a	-
	bd.ferr	100-110	320	120	110	450	4,8	4,2	3,6	198	199	27	1,0	1,69
	frd8	125-135	270	120	80	530	5,0	4,1	3,5	208	186	28	1,0	1,90
		145-155	240	110	120	530	4,7	4,1	3,8	222	209	28	1,0	1,80
	Bw5	175-185	220	90	100	590	4,5	4,1	3,0	239	211	38	1,0	1,92
	F1	Argissolo Amarelo distrófico fragipânico												
	Ap1	0-10	540	190	70	200	6,2	5,4	8,4	58	75	11	0,0	1,31
	AB2	30-35	540	170	50	240	5,9	5,0	6,8	64	76	19	0,0	1,43
		35-45	550	190	60	200	5,8	5,0	8,3	53	92	12	0,0	0,98
	Bt3	45-55	440	160	60	340	5,9	4,9	5,7	87	116	24	0,0	1,27
		60-70	410	120	40	430	5,7	4,8	5,7	115	163	26	0,0	1,20
		80-90	370	110	70	450	5,7	4,8	5,2	118	154	30	0,1	1,30

Fx: perfis analisados (Figura 2a). Números entre parênteses: horizontes da figura 2a. AG: areia grossa; AF: areia fina; S: silte; Ar: argila; n.a: não analisado. * Ataque por H₂SO₄ (1:1); f: 1N; plaq. ferr: plaqueta ferruginosa; hvfr: horizonte com volumes com características fragipânicas; bd.ferr: banda ferruginosa; frd: fragipã descontínuo.

isotrópicos e fendilhados (Figuras 4c e 4d). A caulinita apresenta-se freqüentemente na forma de pequenas plaquetas < 1 µ. No duripã, os géis são mais espessos e mais fendilhados. A composição é variável, indo da caulinita àquela dos géis aluminosos, passando por géis alumino-silicosos, podendo apresentar teores bastante elevados em ferro nas bordas dos poros (Figuras 5a e 5b).

Depressão D3: O fundo matricial do duripã apresenta um plasma pouco orientado, localmente existem orientações argilassépicas, esquelssépica e vossépica. São comuns argilãs ao redor dos vazios.

As análises com microsonda mostram que o plasma tem geralmente a composição da caulinita (Figuras 5c e 5d.). Nas argilãs, o teor de alumínio ultrapassa muito o teor em sílica (Quadro 7), o que corresponderia a géis alumino-ferruginosos e aluminosos (Silva, 1995).

Microscopia eletrônica de transmissão sobre lâminas ultrafinas: A caulinita está organizada em uma rede contínua, bastante regular, com uma malha de 0,5 a 1 µ, tanto no duripã como no fragipã (Figuras 6a e 6b). Este último tem os vazios, de 1 a 2 µ, preenchidos por géis de sílica. A caulinita

Quadro 5. Características físicas e químicas dos solos da depressão D2

Trinch.	Perfil	Profundidade	AG	AF	S	Ar	pH		C org.	SiO ₂ *	Al ₂ O ₃ *	Fe ₂ O ₃ *	Al ³⁺	Ki
							H ₂ O	KClf						
		cm	g kg ⁻¹				g kg ⁻¹				cmol _e dm ⁻³			
Argissolo Amarelo distrófico latossólico														
D2	F2													
	Ap1	0-10	510	190	60	240	5,7	4,7	10,0	91	92	15	0,0	1,68
	AB2	20-30	500	170	50	280	5,5	4,4	7,6	113	112	12	0,2	1,71
	Bt3	45-55	360	130	70	440	4,9	4,3	4,3	164	169	18	0,3	1,65
		70-80	320	120	70	490	4,8	4,3	3,7	193	185	20	0,4	1,77
	hvfr4	110-120	240	100	90	570	4,6	4,1	2,9	214	200	24	0,7	1,82
	Bw5	180-190	230	110	90	570	4,5	4,0	2,4	241	215	25	0,8	1,90
	F5													
	Bt3	45-55	340	120	50	490	5,2	4,4	5,4	192	182	26	0,3	1,79
Argissolo Acinzentado distrófico duripânico														
	F7													
	Ap 1	0-10	550	120	70	260	5,3	4,3	9,1	93	82	12	0,4	1,93
	AB 2	20-30	510	150	60	280	4,9	4,2	7,6	118	112	10	0,8	1,79
	Bt 7	45-55	350	120	40	490	5,5	4,4	5,7	182	175	20	0,2	1,77
	dur. br.8	80-90	370	140	220	270 [#]	4,7	4,4	8,0	226	214	10	0,6	1,80
	dur. amar.9	110-120	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	238	224	18	n.a	2,16
	bd. ferr.	135-138	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	399	210	198	n.a	-
	F14													
	Bt 7	45-55	420	130	50	400	4,7	4,1	5,1	158	151	19	0,9	1,78
	F18													
	Ap1	0-10	610	140	30	220	5,5	4,6	10,8	81	73	8	0,0	1,89
	AB2	20-30	490	180	50	280	5,4	4,7	7,2	117	108	12	0,0	1,84
	Bt7	45-55	360	150	50	440	5,1	4,3	5,6	161	157	13	0,4	1,74
	hvdu8 ^a	70-80	310	120	100	470	5,4	4,5	5,5	194	184	18	0,3	1,79

Fx: perfis analisados (Figura 2b). Números entre parênteses: horizontes da figura 2b. AG: areia grossa; AF: areia fina; S: silte; Ar: argila. n.a: não analisado; *Ataque por H₂SO₄ (1:1); f: 1N; # amostra tratada com ultra-som; hvfr: horizonte com volumes com características fragipânicas; dur. br.: duripã branco; dur. amar.: duripã amarelo; bferr: banda ferruginosa; hvdu: horizonte com volumes de duripã.

Quadro 6. Características físicas e químicas dos solos da depressão D3

Trinch.	Perfil	Profundidade	AG	AF	S	Ar	pH		C org.	SiO ₂ *	Al ₂ O ₃ *	Fe ₂ O ₃ *	Al ³⁺	Ki
							H ₂ O	KClf						
		cm	g kg ⁻¹				g kg ⁻¹				cmol _e dm ⁻³			
Argissolo Amarelo distrófico														
D3	T18													
	A 1	0-10	670	220	40	70	5,3	4,9	19,1	28	23	2	0,0	2,07
	AB 2	20-30	580	230	30	160	5,3	4,7	5,0	58	59	6	0,2	1,67
	Bt 3	50-60	570	190	10	230	4,9	4,3	3,6	94	100	10	0,5	1,60
		70-80	440	200	40	320	4,7	4,2	3,3	97	119	13	0,8	1,39
	bd. ferr	100-110	350	140	10	410	4,9	4,2	2,9	161	122	29	1,0	2,24
	Bt 4	150-160	420	170	70	340	4,7	4,2	1,2	131	151	18	0,8	1,47
	plaq ferr	200-210	350	170	60	420	4,6	4,2	2,2	145	171	27	0,8	1,44
	Bt 4	240-250	370	160	110	360	4,6	4,2	1,2	156	186	14	0,8	1,43
	T5													
	A 1	0-10	600	250	30	120	5,6	4,5	13	36	41	4	0,2	1,49
		10-20	610	210	20	160	5,2	4,3	6,7	50	63	7	0,6	1,35
	AB 2	26-36	540	230	50	180	5,1	4,3	2,7	51	71	6	0,6	1,22
	Bt 3	52-62	480	220	40	260	5,1	4,3	3,1	76	108	9	0,6	1,20
	Bt 5	70-80	490	150	90	270	4,9	4,3	1,9	81	111	11	1,0	1,24
		80-90	550	180	50	220	5,0	4,5	1,9	69	127	7	1,2	0,92
		110-120	430	250	60	260	5,1	4,5	5,2	76	102	6	0,6	1,27
		125-135	480	260	60	200	5,3	4,5	7,8	54	87	6	0,6	1,05
	Bhs	135-140	480	180	130	210	5,0	4,9	14,0	97	200	32	0,3	0,82

Continua...

Quadro 6. Continuação

Trinch.	Perfil	Profundidade cm	AG	AF	S	Ar	pH		C org.	SiO ₂ *	Al ₂ O ₃ *	Fe ₂ O ₃ *	Al ³⁺	Ki
							H ₂ O	KClf						
			g kg ⁻¹				g kg ⁻¹				cmol.dm ⁻³			
Argissolo Amarelo distrófico duripânico espódico														
T13														
A 1)		0-10	620	250	50	80	5,5	4,7	7,3	29	20	2	0,2	2,46
AB2		20-30	610	240	40	110	5,3	4,6	4,0	34	33	4	0,2	1,75
Bt 5		40-50	630	230	40	110	5,3	4,6	4,4	39	43	4	0,3	1,54
		70-80	530	250	60	160	5,3	4,7	5,2	47	78	5	0,2	1,02
		100-110	510	280	60	150	5,3	4,9	8,2	44	67	4	0,2	1,12
Bh		150-160	400	270	20	130	5,2	4,9	17,9	87	130	3	0,4	1,14
duripã		170-180	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	16,9	133	198	7	0,4	1,14
Silva# (1995)			460	260	60	220	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a
Argissolo Amarelo distrófico duripânico espódico														
T15														
A 1		0-10	600	280	50	70	5,8	4,6	6,4	31	22	4	0,3	2,40 ^B
		20-30	650	280	10	60	5,7	4,7	4,2	19	12	1	0,3	2,69 ^B
Bw 5)		40-50	630	300	10	60	5,9	4,9	3,9	18	11	1	0,2	2,78 ^B
		70-80	600	320	20	60	5,3	4,8	5,3	23	17	1	0,4	2,30 ^B
		90-100	640	280	20	60	5,5	4,7	7,0	20	24	2	0,5	1,42 ^B
Bh		110	550	300	110	40	5,5	4,6	39,5	24	43	1	1,2	1,95 ^B
duripã		130-140	730	230	200	20	5,7	4,9	3,0	10	8	1	0,0	2,13 ^B
degrad.		150-160	610	280	50	60	5,5	4,8	7,4	15	16	1	0,4	1,59 ^B
Argissolo Amarelo distrófico duripânico espódico														
T7														
A 1		0-10	640	270	10	80	5,6	4,5	10,4	15	16	1	0,4	1,53 ^B
		20-30	660	270	10	60	5,3	4,6	8,2	11	8	2	0,4	2,34 ^B
Bw 5		40-50	660	270	10	60	5,3	4,5	2,1	9	8	1	0,4	1,91 ^B
		50-60	620	310	10	60	5,4	4,6	2,0	10	5	1	0,2	3,40 ^B
Bh		85-90	600	290	30	80	5,3	4,3	12,9	11	16	5	1,8	1,17 ^B
		110-120	580	330	10	80	5,0	4,5	7,7	11	15	1	0,6	1,25 ^B
		140-150	670	180	90	60	5,1	4,5	7,5	7	8	1	0,8	1,49 ^B
Bhs		-160	600	340	10	60	5,0	4,6	30,7	113	218	3	1,5	0,88 ^B
Bh		-170	590	300	50	60	a.e.	a.e.	48,1	17	69	1	1,2	0,41 ^B
Espodossolo Ferrocárbico hiperespesso típico														
T9														
A 1		0-10	640	290	10	60	5,9	4,8	6,5	9	7	0,0	0,1	
		30-40	680	270	10	40	5,7	4,6	2,8	5	1	0,0	0,1	
E 6		60-70	710	230	10	50	5,8	4,8	1,1	5	-	0,0	0,0	
		100-110	630	310	10	50	5,9	4,6	0,8	6	-	0,0	0,0	
Bh		120-125	660	250	10	80	5,2	4,2	5,0	10	13	0,0	1,0	
Espodossolo Ferrocárbico hiperespesso típico														
T6														
A 1		0-5	660	260	20	60	5,7	4,5	6,1	12	16	4	0,0	1,28
		10-20	620	310	10	60	5,9	4,7	3,8	19	15	6	0,0	2,15
		30-40	720	220	20	40	5,3	4,2	3,6	13	10	1	4	2,21
E 6		50-60	780	170	20	30	5,5	4,3	2,3	7	3	1	0,0	4,00
		100-110	610	340	30	20	6,1	5,2	0,6	5	3	1	0,0	2,83
Bh		170-180	550	280	90	80	4,5	3,8	32,3	14	29	3	62	0,82
Espodossolo Ferrocárbico hiperespesso típico														
T4														
A 1		0-10	630	210	80	80	5,9	4,8	21,8	20	23	3	0,0	
E 6		20-30	780	170	10	40	5,5	4,5	4,2	7	2	1	0,0	
		90-100	710	250	20	20	5,8	5,0	1,0	5	-	1	0,0	
		190-200	620	320	40	20	6,2	5,4	0,6	5	-	1	0,0	
		290-300	660	300	30	10	6,3	5,3	0,6	5	-	1	0,0	
Bh		365-370	640	300	30	30	5,1	4,5	2,9	7	7	1	4	

Tx: perfis analisados (Figura 3). Números entre parênteses: horizontes da figura 3. AG: areia grossa; AF: areia fina; S: silte; Ar: argila; n.a: não analisado; a.e.: amostra esgotada; * Ataque por H₂SO₄ (1:1); ^J 1N; # média de 12 amostras tratadas com ultra-som; ^B valores duvidosos devido à textura. bferr: banda ferruginosa; plaq. ferr: plaqueta ferruginosa.

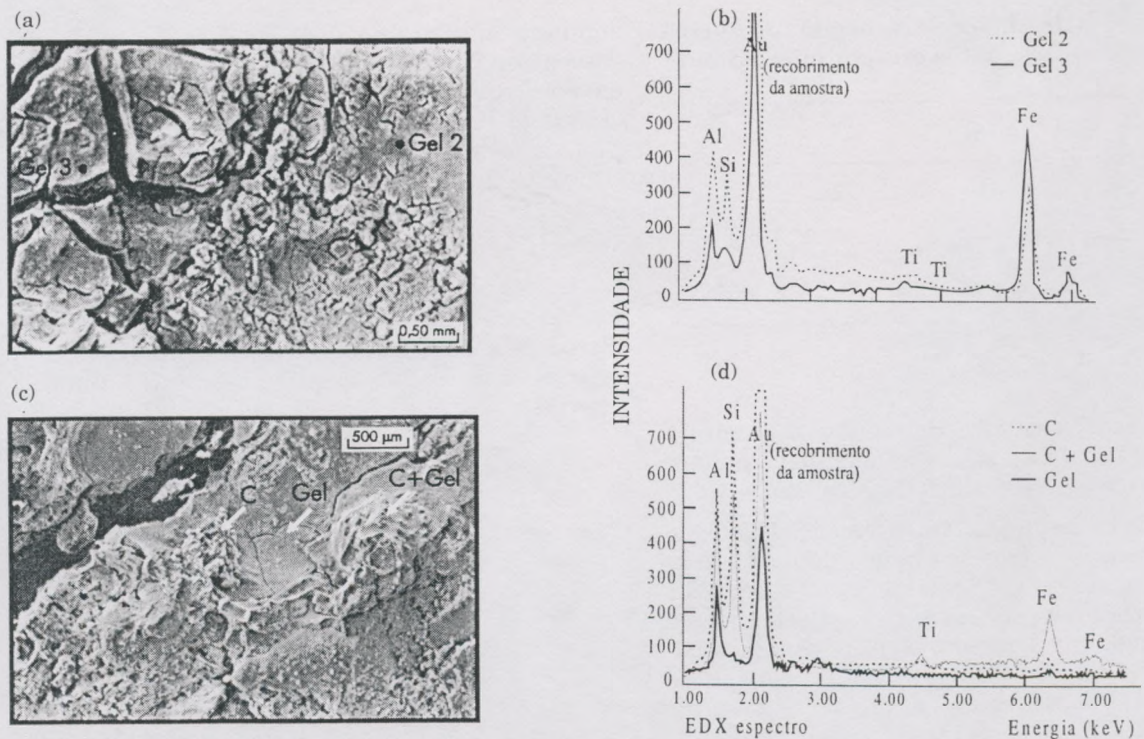


Figura 5. (a) Imagem de ferricitã vermelha ao redor de um poro do duripã amarelo da depressão D2 obtida por Microscópio Eletrônico de Varredura; gel 2: aluminosilico ferruginoso, gel 3: ferro-aluminosilicoso. (b) Espectro da análise semiquantitativa por microsonda correspondente à (a). (c) Imagem do duripã branco da depressão D3 obtida por Microscópio Eletrônico de Varredura. (d) Espectro da análise semiquantitativa por microsonda correspondente à (c).

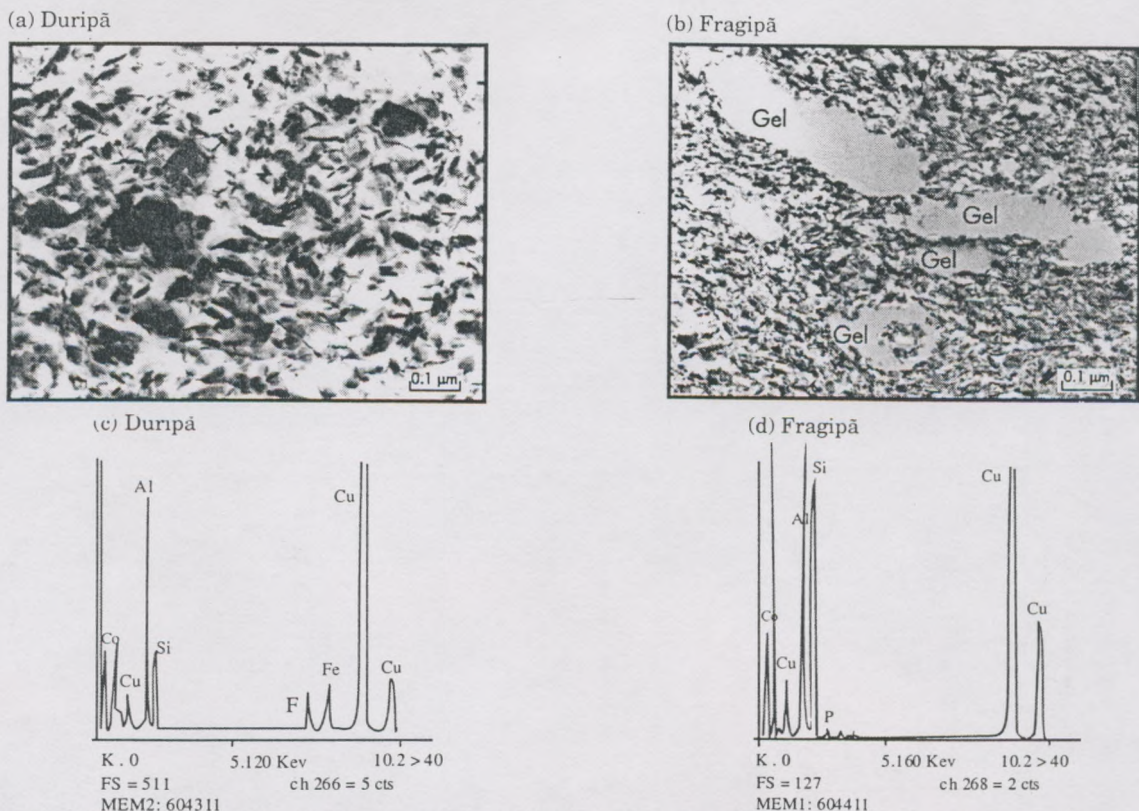


Figura 6. (a) Duripã e (b) fragipã observados em lâmina ultrafina (Microscopia Eletrônica de Transmissão). (c) Duripã e (d) Fragipã: Análise por microsonda acoplada ao Microscópio Eletrônico de Transmissão.

Quadro 7. Teores de Al, Si e Fe de argilãs do duripã da depressão D3, analisados por microsonda

Al	Si	Fe
g kg ⁻¹		
105,8	5,3	276,6
142,0	3,4	231,4
282,1	90,9	4,65

do fragipã é mais rica em sílica que em alumínio (Figura 6c), enquanto a caulinita do duripã é mais rica em alumínio que em sílica (Figura 6d).

Mineralogia: Segundo Mafra Valença (1993), a caulinita do Grupo Barreiras é bem ordenada e bem cristalizada, apresentando a melhor cristalinidade de todas as alterações da região, mas a difratometria por raios-X das amostras totais em pó do material microagregado (Bw), do fragipã e do duripã, das depressões D1 e D2, mostra serem tais solos constituídos essencialmente por quartzo, caulinita desordenada e mal cristalizada; secundariamente, por óxido de ferro, principalmente goethita (Figura 7).

O teor em Fe₂O₃, na D1 é de 78 g kg⁻¹, nas plaquetas, e de 86 g kg⁻¹, na banda ferruginosa,

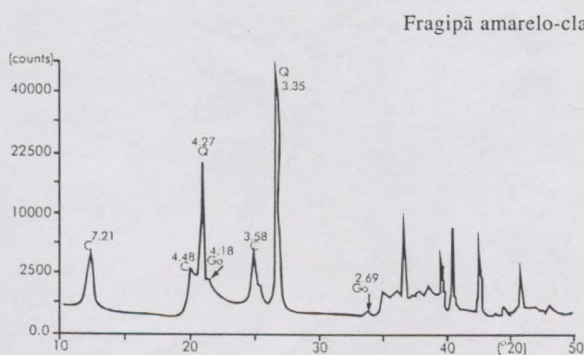
enquanto no fragipã é de 18 g kg⁻¹ e no fragipã descontínuo de 27 g kg⁻¹ (Quadro 4). Já na D2, o teor em Fe₂O₃ (Quadro 5) das bandas aumenta bastante (198 g kg⁻¹). O teor deste óxido no fragipã é de 24 g kg⁻¹ e no duripã branco de 10 g kg⁻¹ (Quadro 5). Os óxidos de ferro amorfo ao raio-X, extraídos com o oxalato ácido de amônio, são apresentados no quadro 8.

Os géis observados nas lâminas delgadas, tanto sob microscópio ótico como no microscópio de varredura e identificados na microsonda, não foram detectados com o raio-X, provavelmente porque são amorfo.

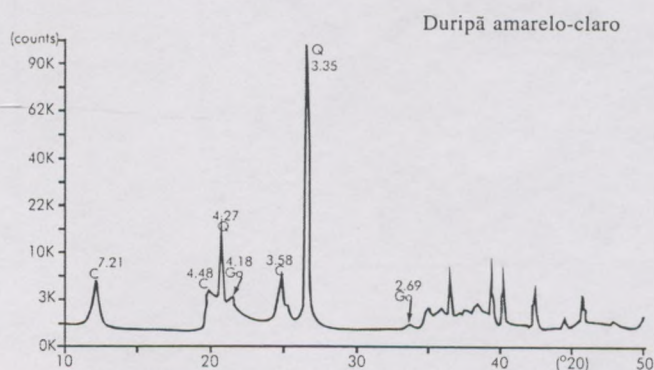
Quadro 8. Teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ extraídos por oxalato dos solos da depressão D2

Horizonte	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
dag kg ⁻¹			
Ap	0,2	1,4	1,0
AB	0,2	2,0	0,8
Bt	0,2	2,2	2,8
Bw (média de 2 amostras)	0,2	1,8	1,2
Fragipã	0,4	1,8	0,6
Duripã branco	1,4	5,8	0,2
Duripã amarelo	0,8	3,4	0,6

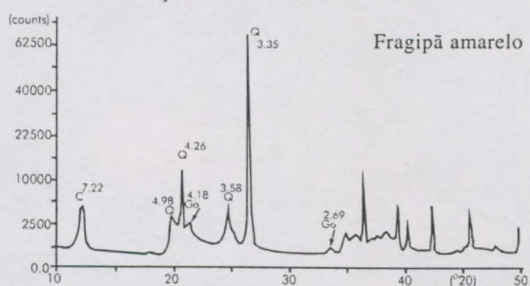
Identificação da amostra: D1F4-90



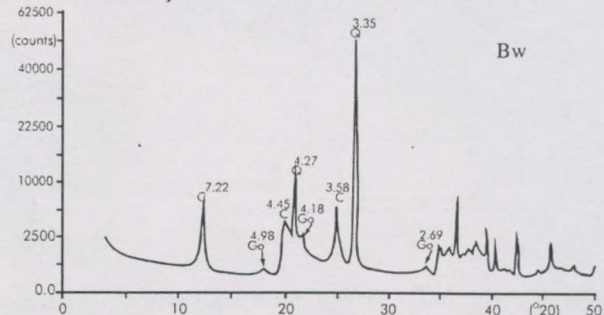
Identificação da amostra: D1F4-110



Identificação da amostra: D1F4-125



Identificação da amostra: D1F2-220



C: caulinita, Go: goethita, Q: quartzo

Figura 7. Difratogramas de raio-X referentes aos horizontes da D1 e D2.

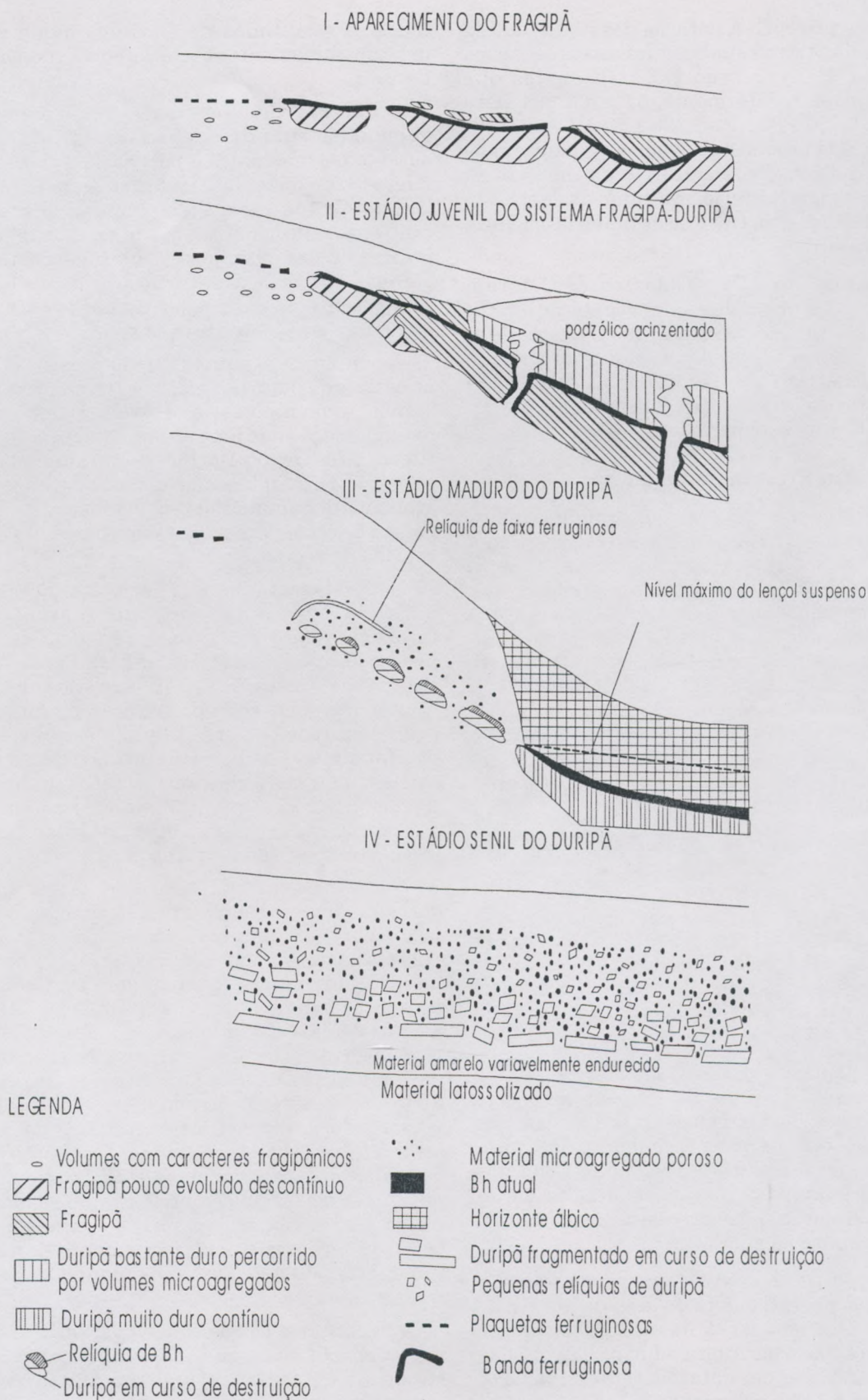


Figura 8. Esquema geral de evolução dos fragipãs e duripãs estudados.

Datações por ^{14}C : A datação dos restos de Bh, que impregnam a parte superior dos restos de duripã da vertente da depressão D3, dão idades que diminuem quase regularmente, de montante para jusante, de 13.730 ± 60 AP a 2.290 ± 50 AP. A datação 21.740 ± 60 está fora desta seqüência e não se sabe como interpretá-la. Pode tratar-se de um erro. A idade do Bhs acima do duripã contínuo da depressão D3 é de 180AP, ou seja, trata-se de matéria orgânica atual (Figura 3).

Resultados do $\delta^{13}\text{C}$: Todos os $\delta^{13}\text{C}$ foram inferiores a -25, o que indica uma vegetação em C_3 , provavelmente florestal (Button, 1991; Pessenda et al., 1996). Todavia, o hiato cronológico importante entre as trincheiras T30 e T7 (13.730 AP e 2.630 AP) não permitiu excluir a hipótese de variações de vegetação durante este período.

Processos atuantes na pedogênese

O fato de as depressões estarem alinhadas indica que elas são provavelmente de determinismo tectônico, pois a interpretação das fotografias aéreas mostrou, além do alinhamento das depressões, sua localização freqüente no cruzamento destes eixos que podem corresponder a pontos de fuga vertical da água em consequência de falhas, como já mostrado no estado de São Paulo por Filizola & Boulet (1996). Apesar de as falhas terem sido assinaladas no embasamento cristalino subjacente à Grupo Barreiras, uma drenagem vertical acelerada em profundidade transmite-se para cima por perda remontante de matéria (Boulet, 1978).

Considerando que o Grupo Barreiras, em Boca da Mata, está parcialmente sobreposto às formações cretáceas calcárias, haveria então um fator complementar para o processo de formação e evolução das depressões, já que estas rochas apresentam maior grau de dissolução e mobilização nas zonas de falhas (Karmann, 1994). Estes locais são preferenciais para a ação da erosão geoquímica por constituírem vias de fluxo de água.

Com o início das depressões, passa a haver uma circulação lateral da água em direção ao centro dessas depressões. Essa circulação propicia condições oxidantes para as áreas não deprimidas topograficamente, bem como o aumento das condições redutoras para as áreas deprimidas, com a instalação de lençóis suspensos e aceleração dos processos de dissolução de ferro e hidrólise da caulinita.

Assim, os solos do platô evoluíram para Latossolos e Argissolos, por estarem fora da área de influência do lençol suspenso, enquanto, nas áreas deprimidas, a evolução foi no sentido fragipã-duripã e Argissolo-Espodossolo. A partir das datações radiocarbônicas, pode-se inferir que, há pelo menos 13.730 anos AP, o processo de podzolização, com formação dos horizontes endurecidos, está atuante na área, sem alterações identificáveis do ciclo fotossintético, pois

todos os resultados de $\delta^{13}\text{C}$ dos quais se dispõe indicam nitidamente vegetação em C_3 (provavelmente floresta).

A hidromorfia, que aumenta com a ampliação e aprofundamento da depressão, tem papel preponderante nesta evolução, pois acelera a dissolução e migração do ferro. Isto levaria à transformação das linhas de plaquetas em bandas ferruginosas contínuas, que constituem o nível de diminuição da infiltração da água, pois, conforme constatado em campo, durante a estação úmida, o horizonte sobrejacente às bandas ferruginosas é bem úmido, enquanto os subjacentes são secos.

As linhas de plaquetas estão presentes desde os argissolos do platô até mais de 7 m de profundidade. Tem-se como hipótese que a sua origem é devida à ferruginização das juntas de sedimentação da parte superior do Grupo Barreiras, durante sua fase de alteração, formando um nível contínuo, impermeável, atualmente fragmentado em plaquetas. Estes níveis podem ser observados na maior parte dos cortes de estrada da região.

Os níveis sedimentares com estratificação plano-paralela, situados abaixo desses níveis impermeáveis, ficaram então protegidos dos processos pedogenéticos induzidos pela água, guardando, assim, suas características litológicas. Com a fragmentação das juntas ferruginosas, a pedogênese começa a transformar este material. Foi constatado que no horizonte 5 da D1 e no 4 da D3 existem volumes com características fragipânicas e fratura horizontal plana. Estes horizontes teriam herdado caracteres litológicos do Grupo Barreiras, como a compacidade e a fratura horizontal plana.

Na depressão D1, observações morfológicas revelam uma seqüência de diferenciação entre o fragipã bruno-amarelado e o fragipã amarelo-claro, pois se constatou nesta depressão que os horizontes endurecidos claros localizam-se imediatamente acima da banda ferruginosa superior. Abaixo, o fragipã é mais colorido (bruno-amarelado) e mais rico em ferro. As bandas ferruginosas, sendo um local de diminuição da drenagem, favorecem a dissolução do ferro e sua migração em profundidade, provocando, assim, a desferruginização do horizonte sobrejacente. A banda ferruginosa constituiria assim a frente de transformação do fragipã bruno-amarelado em fragipã amarelo-claro. Assim, a banda migra para baixo, acompanhando a transformação. O ferro concentra-se provisoriamente nesta banda sob a forma de géis alumino-ferruginosos e depois como goethita.

Na depressão D2, a seqüência de diferenciação é mais completa. Como na D1, as plaquetas ferruginosas superiores passam a uma banda ferruginosa contínua e ramificada. Acima desta aparece um fragipã bruno-amarelado-claro e, abaixo, um horizonte bruno-amarelado, com características fragipânicas. O fragipã superior passa lateralmente

a um duripã amarelo-claro e depois branco, que atinge mais de quatro metros de espessura no centro da depressão. O horizonte com volumes fragipânicos, localizado abaixo da banda ferruginosa, passa a um fragipã contínuo e da mesma cor. Assim, constata-se uma descoloração na seqüência superior da montante para jusante (fragipã bruno-amarelado-claro \Rightarrow duripã amarelo-claro \Rightarrow duripã branco). Tal transformação é acompanhada de uma perda de ferro (24 g kg⁻¹ de Fe₂O₃, no fragipã, e 10 g kg⁻¹, no duripã).

Na seqüência vertical, a banda corresponde, como na D1, à frente de desferruginização. Apesar da perda de ferro, as análises com microsonda mostram que o ferro encontra-se no fragipã, principalmente no gel pouco espesso das paredes dos poros e quando este se transforma em duripã, sua retirada corresponde a um aumento relativo da sílica e sobretudo do alumínio, o que torna o duripã menos vulnerável à água.

Além disso, as observações efetuadas por microscopia eletrônica mostraram que a caulinita do fragipã comporta vazios preenchidos por gel de sílica, enquanto os vazios do duripã não são preenchidos. Assim, quando o fragipã é mergulhado na água, o gel se expande, provocando a fragmentação do material. Estes dois processos seriam complementares.

No solo acima do duripã, existem numerosos blocos centimétricos idênticos ao duripã e que são provavelmente relíquias deste. Isto significa que o duripã forma-se na sua base e é transformado no topo, no solo sobrejacente. Esta transformação parece, em grande parte, herdada da atividade da floresta anterior, pois os volumes microagregados e de cor cinza dentro do duripã apresentam um padrão de sistema radicular de árvores e, como já dito, ainda existem restos destas raízes com vários decímetros de comprimento e mais de dez centímetros de diâmetro. É provável que haja continuidade desta transformação sob cultura, mas não há dados sobre a atividade biológica atual.

Na D3, o duripã apresenta o máximo desenvolvimento (extremamente duro, contínuo e impermeável). No centro da depressão, um lençol suspenso se superpõe ao mesmo durante a estação das chuvas. A necessidade deste lençol suspenso ao equilíbrio dinâmico do duripã é demonstrado pela degradação deste último imediatamente a montante do nível máximo do lençol. Isto corresponde ao abaixamento do lençol ligado à abertura parcial da depressão.

Os mecanismos que intervêm sucessivamente nesta evolução são a hidromorfia e a podzolização (migração do ferro, hidrólise da caulinita, que é provavelmente responsável pela variação da textura), cada vez mais acentuadas, chegando à formação do Espodossolo, ao mesmo tempo que o duripã adquire seu desenvolvimento máximo. Por outro lado, a parte inferior do horizonte Bh preto,

que impregna o topo do duripã contínuo e impermeável, assemelha-se aos horizontes tipo *ortstein*, descritos em contextos climáticos diferentes (McKeague & Wang, 1980).

Na depressão D4, o duripã fragmenta-se e transforma-se em um material de textura franco-argilo-arenosa e microagregado. Como testemunha, pedaços de duripã, cada vez menores e mais frágeis, em direção ao topo, são encontrados até 40 cm de profundidade. Alguns ainda conservam características próprias do duripã, inclusive restos de banda ferruginosa e de Bh. O solo resultante assemelha-se ao Argissolo do platô, pela forte variação vertical da textura, mas difere por uma microagregação acentuada do horizonte B.

CONCLUSÕES

1. A formação dos fragipãs e duripãs nas depressões seria induzida pela migração do ferro, que se concentra provisoriamente nas bandas ferruginosas derivadas das linhas de plaquetas, sob a forma de géis alumino-ferruginosos, e depois como oxiidróxidos de ferro. As bandas, pela diminuição da drenagem, provocariam a desferruginização e a hidrólise da caulinita, fonte dos géis aluminosos, alumino-silicosos ou, ainda alumino-ferruginosos, responsáveis pelas características dos materiais endurecidos.

2. A ocorrência de uma seqüência evolutiva (Figura 8) dos fragipãs aos duripãs, começando com a formação do fragipã em pequenas depressões com hidromorfia moderada (D1), progredindo até sua evolução máxima (D3) com hidromorfia bastante acentuada (presença de um lençol suspenso) e, por fim, sua destruição, quando a depressão torna-se completamente aberta (D4), provocando o desaparecimento da hidromorfia (Figura 8). Esta evolução está ligada à evolução das depressões.

3. Os solos dos platôs, Latossolos e Argissolos, que estão fora do domínio hidromórfico das depressões, tiveram a sua evolução sob condições oxidantes, enquanto aqueles sob condições de saturação temporária evoluiriam no sentido da podzolização com a formação de fragipãs e duripãs. Com a abertura da depressão e, portanto, supressão das condições redutoras, o sistema fragipã-duripã sai das condições de equilíbrio e transforma-se em um Argissolo Latossólico.

4. A podzolização exerce provavelmente um papel importante na evolução do duripã. Os restos de Bh presentes no duripã em vias de destruição, na depressão D4, testemunham que o espodossolo esteve presente neste local, mas falta um estágio intermediário, que corresponderia ao desaparecimento do horizonte alábico. O fato de ter sido o duripã contínuo, impermeável e extremamente duro

(estádio maduro, Figura 8), encontrado abaixo de um espodossolo, permite supor que os processos de formação do duripã e aquele da podzolização estão ligados. Todavia, a associação estrita do duripã maduro com a flutuação do lençol suspenso acima deste parece corresponder ao fator principal da evolução completa do duripã.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP, que financiou o projeto 94/2471-8; ao Escritório Regional de P&D-Nordeste (ERP-NE) da Embrapa-Solos, e à Usina Triunfo, que deram o apoio logístico necessário à execução deste projeto.

LITERATURA CITADA

- BALBIR-SINNGH & GILKES, R.J. The recognition of amorphous silica in indurated soil profiles. *Clay Miner.* 28:461-474, 1993.
- BOULET, R. Toposéquences de sols tropicaux en Haute-Volta. Équilibre et déséquilibre pédobioclimatique. Paris, Mem. ORSTOM, 85, 1978. 272p.
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Projeto RADAMBRASIL. Folha SD 24 Salvador; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1981, 452p. (Levantamento dos Recursos Naturais, 24)
- BUTTON, T.W. Stable carbon isotopes ratios of natural materials. 2: atmospheric, terrestrial, marine and fresh water environmental. In: COLEMAN, D.C. & FRY, B., eds. Carbon Isotopes technics. London, Academic Press. 1991. p.173-185.
- CHARTRES, C.J. & FITZGERALD, J.D. Properties of siliceous cements in some Australian soils and saprolites. *Develop. Soil Sci.*, 19, p.199-205, 1990.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solo, 1997. 212p.
- FILIZOLA, H.F. & BOULET, R. Evolution and opening of closed depressions developed in a quartz-kaolinitic sedimentary substratum at Taubaté basin (São Paulo, Brazil), and analogy to the slope evolution. *Geomorphology*, 16:77-86, 1996.
- HARLAN, P.W.; FRANZMEIER, D.P. & ROTH, C.B. Soil formation on loess in southwester Indiana. II. Distribution of clay and free oxides and fragipan formation. *Soil Sci. Am. J.*, 41: 99-103, 1977.
- JACOMINE, K.T.P. Fragipãs em solos de tabuleiros. Características, gênese e implicações no uso agrícola. Recife, Universidade Rural de Pernambuco, 1974. 83p. (Tese de Livre Docência)
- LOPES DA SILVA, M.S. Efeito do cultivo contínuo da cana de açúcar em propriedades de solos dos tabuleiros do Estado de Alagoas. Recife, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1989. 106p. (Tese de Mestrado)
- KARMANN, I. Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do Alto Vale do Rio Ribeira de Iguape, Sudeste do estado de São Paulo. São Paulo, Universidade de São Paulo. 1994. 228p. (Tese de Doutorado)
- KISLER, P. Historical resume of the Amazon basin. Belém, 1954. (Petrobras, 104-A)
- MABESOOONE, J.M. & ALHEIROS, M.M. Origem da bacia sedimentar costeira de Pernambuco-Paraíba. *R. Bras. Geoc.*, 18:476-482, 1988.
- MAFRA (1995) ?falta citação?
- MAFRA VALENÇA, L.M. Étude des altérations météoriques du littoral oriental du Nord-Est du Brésil. Strasbourg, Université Louis Pasteur, 1993. 135p. (Tese de Doutorado)
- MCKEAGUE, J.A. & DAY, J.H. Dithionite and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soil. *Can. J. Soil Sci.*, 46:13-22, 1966.
- MCKEAGUE, J.A. & WANG, C. Micromorphology and energy dispersive analysis of ortstein horizons of podzolic soils from New Brunswick and Nova Scotia, Canada. *Can. J. Soil Sci.*, 60:9-21, 1980.
- MELO, F.J.R. Micromorfologia e gênese de solos intermediários dos tabuleiros costeiros de Pernambuco. Recife, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1993. 97p. (Tese de Mestrado)
- MELO, F.J.R. & SANTOS, M.C. Micromorfologia e mineralogia de dois solos de Tabuleiro Costeiro de Pernambuco. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:99-108, 1996.
- OLIVEIRA, J.B.; JACOMINE, P.K.T. & CAMARGO, M.N. Classes gerais de solos do Brasil: guia auxiliar para seu reconhecimento. Jaboticabal, Fundação Estadual Paulista, 1992. 201p.
- OLIVEIRA NETO, M.B. Pedogênese de uma topossequência no agreste de Pernambuco. Recife, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1992. 142p. (Tese de Mestrado)
- PESSENDA, L.C.R.; ARAVENA, R.; MELFI, A.J.; TELLES, E.C.C.; BOULET, R.; VALÊNCIA, E.P.E. & TOMAZELLI, M. The use of carbon isotopes ¹³C, ¹⁴C in soil to evaluate vegetation change during the Holocene on central Brazil. *Radio Carbon*, 38:191-201, 1996.
- PROSPED LTDA Levantamento detalhado dos solos da Usina Triunfo na escala de 1:10.000. Boca da Mata, 1992. (Relatório Geral)
- SILVA, F.B.R. Relatório do Programa de Pesquisa a nível de pós-Doutorado, 2. Strasbourg, 1995. 67p.
- SILVA, F.B.R.; LEPRUN, J.C. & BOULET, R. Duripãs em solos dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste do Brasil: mineralogia, micromorfologia e gênese. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., Rio de Janeiro, 1997. Anais, Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. (CD-ROM).