

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

HORIZONTES CIMENTADOS EM ARGISSOLOS E ESPODOSSOLOS DOS
TABULEIROS COSTEIROS E EM NEOSSOLOS REGOLÍTICOS E
PLANOSSOLOS DA DEPRESSÃO SERTANEJA NO NORDESTE DO BRASIL

JOSÉ COELHO DE ARAÚJO FILHO

Orientador: Prof. Dr. Adilson Carvalho

TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica

São Paulo
2003

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

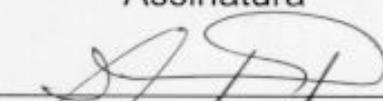
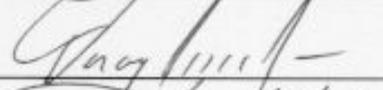
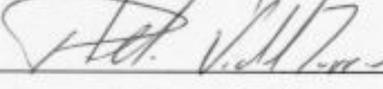
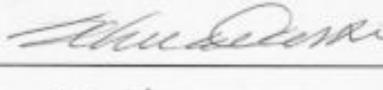
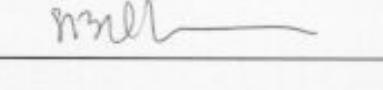
HORIZONTES CIMENTADOS EM ARGISSOLOS E
ESPODOSSOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS E EM
NEOSSOLOS REGOLÍTICOS E PLANOSSOLOS DA DEPRESSÃO
SERTANEJA NO NORDESTE DO BRASIL

JOSÉ COELHO DE ARAÚJO FILHO

Orientador: Prof. Dr. Adilson Carvalho

TESE DE DOUTORAMENTO

COMISSÃO JULGADORA

	Nome	Assinatura
Presidente	Prof. Dr. Adilson Carvalho	
Examinadores:	Prof. Dr. Doracy Ramos Pessoa	
	Prof. Dr. Pablo Vidal Torrado	
	Prof ^ª . Dr ^ª . Selma Simões de Castro	
	Prof ^ª . Dr ^ª . Sonia Maria Barros de Oliveira	

Ficha catalográfica preparada pelo Serviço de Biblioteca e Documentação do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo

Araújo Filho, José Coelho de
Horizontes cimentados em Argissolos e
Espodossolos dos tabuleiros costeiros e em
Neossolos Regolíticos e Planossolos da depressão
sertaneja no Nordeste do Brasil / José Coelho de
Araújo Filho - São Paulo, 2003.

xiii, 223 fls. : il.

=

Tese (Doutorado) : IGC/USP -

Orient. : Carvalho, Adilson

1. Cimentações pedogenéticas 2. Duripã 3.
Fragipã 4. Horizonte dúrico 5. Ortstein 6.
Horizonte plácico I. Título

A minha esposa, Maria das Graças de Melo Ribeiro Coelho,

pela compreensão e apoio,

dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

A elaboração desta Tese contou com a colaboração de várias instituições e pessoas sem as quais seria impossível a realização deste trabalho. Desta forma, gostaríamos de expressar os nossos agradecimentos:

- Em primeiro lugar a Deus, por ter nos dado saúde, força e coragem para vencer este e muitos outros desafios;

- À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), pela oportunidade que nos concedeu para realização do Curso e elaboração desta Tese;

- Ao Instituto de Geociências (IGc) da USP, por ter nos acolhido e dado plenas condições para realização da pesquisa necessária à elaboração desta Tese;

- À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa (Processo 2000/13557-3);

- Às Usinas Coruripe e Seresta, pelo fornecimento de mapas de solos e todo o apoio necessário à abertura de trincheiras e à coleta de solos na região dos tabuleiros costeiros, Estado de Alagoas. O apoio dessas Empresas foi imprescindível para o sucesso da pesquisa;

- Ao Prof. Dr. Adilson Carvalho, nosso Orientador, pelos ensinamentos transmitidos, a orientação, o apoio total e, especialmente, por ter nos confiado a missão de executar o projeto e por ter colocado à nossa disposição todas as condições necessárias para que pudéssemos realizar a pesquisa;

- Ao Dr. Fernando Barreto Rodrigues e Silva, por ter nos apoiado para realização do Curso e, especialmente, por ter viabilizado a realização deste trabalho integrando a Embrapa e o Instituto de Geociências da USP;

- A Sandra Andrade e equipe (Ricardo S. Cardenete e Marines L. da Silva) do laboratório de química e ICP-AES/MS, pelo apoio pleno, constante, eficiente, a ajuda prestativa e os ensinamentos transmitidos durante todas as etapas de teste de métodos e das extrações seletivas de fases amorfas em amostras de solos, bem como pela revisão dos capítulos referentes às extrações seletivas;

- A Paulo Mori, pelo apoio nas análises por fluorescência de raios-X (FRX) e pelos ensinamentos transmitidos em qualquer momento que solicitamos.

- A Flávio, pelo apoio, sugestões e ensinamentos transmitidos relativos às análises por difração de raios-X;

- Aos Docentes do Instituto de Geociências (IGc) da USP, que contribuíram com ensinamentos transmitidos para o nosso aperfeiçoamento técnico e profissional, especialmente aos Professores Sonia M. B. Oliveira, Valdecir A. Janasi, Ian McReath, Gergely A. J. Szabó, Raphael Hypolito, Excelso Ruberti, Silvio Vlach, Daniel Atencio e Fábio R. D. de Andrade;

- Ao Prof. A. J. Melfi (ESALQ/USP), pela excelente oportunidade que nos foi concedida para cursar a disciplina *Geoquímica dos Solos*;

- A professora Célia e ao Sérgio (NUPEGEL/ESALQ), pelo apoio nas análises por microscopia eletrônica (MEV);

- Aos funcionários do IGc/USP, que contribuíram em várias etapas do nosso projeto, especialmente Verônica (laboratório de análises mineralógicas), Cleide e Sueli (laboratório de Geoquímica), José Paulo (laboratório de tratamento de amostras), Cláudio Hopp e equipe (seção de laminação), Marcos Mansueto (laboratório de microsonda eletrônica), Paulo Roberto (preparo de amostras para uso na microsonda), Artur T. Onoe (CPGEO), Samuel (preparo de amostras de solo) e Angélica (laboratório de microscopia óptica);

- A Ana Paula e Magali, na seção de Pós-Graduação; ao Tadeu, na seção de Apoio Acadêmico; e ao Ericson, na seção de informática;

- Ao Prof. Raimundo Nonato e ao colega Elmo Clarck Gomes, pela ajuda nos trabalhos de campo;

- A Anacleto, pela ajuda nas análises granulométricas preliminares realizadas no laboratório de física do solo da UFRPE;

- Aos colegas da EMBRAPA SOLOS (Rio de Janeiro), pelo apoio na realização das análises dos perfis de solo, especialmente ao colega Sebastião Calderano, pelas análises mineralógicas de grãos;

- Aos colegas da EMBRAPA SOLOS UEP Recife, especialmente Alexandre e David, pela confecção de mapas de solo;

- Aos colegas da Pós-Graduação que, de diferentes maneiras, contribuíram com as nossas atividades de pesquisa;

- A Maria Aparecida Bezerra Ayello (biblioteca), pela colaboração na organização da bibliografia e pelo atendimento prestativo, também extensivo a Maristela, Brenda e Érica Celeste.

- A Sérgio Roberto e a colega Márcia, pela formatação das tabelas de dados analíticos de perfis de solo;

- E a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

CONTEÚDO

AGRADECIMENTOS	iii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE QUADROS	x
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii

Parte 1 *CONHECIMENTO PRÉVIO*

CAPÍTULO 1 - Introdução geral	1
CAPÍTULO 2 - Cimentações	3
O REGOLITO COMO FONTE DE AGENTES CIMENTANTES, 3	
TIPOS DE MATERIAIS CIMENTADOS, 5	
CIMENTAÇÕES PEDOGENÉTICAS, 6	
CONCEITUAÇÃO E DEFINIÇÃO DE DURIPÃ E FRAGIPÃ, 8	
HORIZONTES CIMENTADOS CONSIDERADOS COMO FRAGIPÃS E DURIPÃS NO NORDESTE DO BRASIL, 10	
HORIZONTES CIMENTADOS DESENVOLVIDOS EM AMBIENTES ÚMIDOS, 11	
HORIZONTES CIMENTADOS DOMINANTEMENTE POR SÍLICA NO CONTEXTO MUNDIAL, 13	
FORMAÇÃO DE HORIZONTES CIMENTADOS DOMINANTEMENTE POR SÍLICA, 14	

Parte 2 *ÁREAS DE ESTUDO, SOLOS SELECIONADOS E MÉTODOS DE TRABALHO*

CAPÍTULO 3 - Características gerais das áreas	17
PAISAGENS E RELAÇÕES SOLO-PAISAGEM, 17	
CLIMA, 19	
GEOLOGIA, 21	
GEOMORFOLOGIA E RELEVO, 23	
VEGETAÇÃO, 24	
SOLOS QUE DESENVOLVEM HORIZONTES CIMENTADOS CONSIDERADOS COMO FRAGIPÃS E DURIPÃS, 26	
CAPÍTULO 4 - Materiais e métodos	32
SOLOS ESTUDADOS, 32	
DESCRIÇÃO E AMOSTRAGEM DE SOLOS, 34	
PREPARO E PRÉ-TRATAMENTO DE AMOSTRAS DE SOLO, 35	
ANÁLISES FÍSICAS DE SOLO, 36	
ANÁLISES QUÍMICAS DE SOLO, 38	

ANÁLISES MINERALÓGICAS,	41
ANÁLISES DE FASES AMORFAS E/OU DE BAIXO GRAU DE CRISTALINIDADE,	42
ANÁLISES MICROMORFOLÓGICAS,	45
ANÁLISES POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA,	45
EQUAÇÕES UTILIZADAS NO BALANÇO GEOQUÍMICO DE MASSA,	46

Parte 3

HORIZONTES CIMENTADOS EM ARGISSOLOS E ESPODOSSOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS

CAPÍTULO 5 - Características morfológicas e físicas	49
HORIZONTES CIMENTADOS EM ARGISSOLOS AMARELOS,	52
HORIZONTES CIMENTADOS EM ARGISSOLOS ACINZENTADOS,	55
HORIZONTES CIMENTADOS EM ESPODOSSOLOS,	59
CLASSES DE CIMENTAÇÃO,	64
VARIAÇÕES DE CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS E FÍSICAS EM SEQÜÊNCIAS DE SOLOS COM HORIZONTES CIMENTADOS EM SUAVES DEPRESSÕES,	71
SÍNTESE E CONCLUSÕES,	82
CAPÍTULO 6 - Mineralogia	84
AMOSTRA TOTAL,	84
FRAÇÃO-ARGILA,	86
GRÃOS,	91
SÍNTESE E CONCLUSÕES,	91
CAPÍTULO 7 - Balanço geoquímico de Si, Al e Fe: uma primeira aproximação	93
COMPOSIÇÃO QUÍMICA TOTAL,	94
O BALANÇO GEOQUÍMICO,	94
SÍNTESE E CONCLUSÕES,	101
CAPÍTULO 8 - Agentes cimentantes e a formação dos horizontes cimentados	102
EXTRAÇÃO DE SILÍCIO, ALUMÍNIO E FERRO PELO OXALATO DE AMÔNIO,	103
EXTRAÇÃO DE SILÍCIO, ALUMÍNIO E FERRO PELO TIRON,	106
DIFERENÇAS ENTRE OS TEORES DE Si EXTRAÍDOS PELO TIRON E OXALATO DE AMÔNIO,	109
EXTRAÇÃO DE ALUMÍNIO E FERRO PELO PIROFOSFATO DE SÓDIO,	109
VALORES DA RELAÇÃO Al/Si INDICATIVOS DE ALUMINOSSILICATOS AMORFOS,	112
NATUREZA DOS AGENTES CIMENTANTES,	116
O PAPEL DE COMPONENTES DA MATRIZ NAS CIMENTAÇÕES,	119
ANÁLISE MICROMORFOLÓGICA,	120
ANÁLISE POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA,	121
ATRIBUTOS DIAGNÓSTICOS E TIPOS DE HORIZONTES CIMENTADOS,	124
PROCESSOS PEDOGENÉTICOS ENVOLVIDOS NA FORMAÇÃO DE AGENTES CIMENTANTES E HORIZONTES CIMENTADOS,	129
SÍNTESE E CONCLUSÕES,	132

Parte 4***HORIZONTES CIMENTADOS EM NEOSSOLOS REGOLÍTICOS E PLANOSSOLOS DA DEPRESSÃO SERTANEJA***

CAPÍTULO 9 - Características morfológicas e físicas	135
HORIZONTES TIPO DURIPÃ EM NEOSSOLOS REGOLÍTICOS,	136
HORIZONTES TIPO FRAGIPÃ EM PLANOSSOLOS,	141
CLASSES DE CIMENTAÇÃO,	145
SÍNTESE E CONCLUSÕES,	147
CAPÍTULO 10 - Mineralogia	149
FRAÇÃO-ARGILA,	149
GRÃOS,	152
MATERIAL DE ORIGEM (CAMADA R),	152
SÍNTESE E CONCLUSÕES,	153
CAPÍTULO 11 - Balanço geoquímico: uma primeira aproximação	154
COMPOSIÇÃO QUÍMICA TOTAL,	155
O BALANÇO GEOQUÍMICO,	155
CARACTERIZAÇÃO PEDOGEOQUÍMICA DOS SOLOS,	158
SÍNTESE E CONCLUSÕES,	159
CAPÍTULO 12 - Agentes cimentantes e horizontes cimentados	160
EXTRAÇÃO DE SILÍCIO, ALUMÍNIO E FERRO PELO TIRON,	160
EXTRAÇÃO DE SILÍCIO, ALUMÍNIO E FERRO PELO OXALATO DE AMÔNIO,	161
DIFERENÇAS ENTRE OS TEORES DE Si EXTRAÍDOS PELO TIRON E OXALATO DE AMÔNIO,	163
ANÁLISE MICROMORFOLÓGICA,	163
ANÁLISE POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA,	165
NATUREZA DOS AGENTES CIMENTANTES,	170
HORIZONTES CIMENTADOS,	170
SÍNTESE E CONCLUSÕES,	171
CONSIDERAÇÕES FINAIS	173
BIBLIOGRAFIA	176
ANEXO - Dados morfológicos e analíticos dos perfis de solo estudados	187

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema ilustrativo da formação de rochas sedimentares e de solos, incluindo etapas em que podem ocorrer processos de cimentação	4
Figura 3.1 – Localização das áreas estudadas. 1: área dos tabuleiros costeiros no estado de Alagoas; 2: área da depressão sertaneja no Estado de Alagoas; e 3: área da depressão sertaneja no Estado de Pernambuco	18
Figura 3.2 - Precipitação média mensal na zona úmida costeira, Estado de Alagoas (A e B) e na zona da depressão sertaneja, entre os Estados de Alagoas e Pernambuco (C e D)	20
Figura 4.1 – Localização dos perfis de solos estudados nos Estados de Alagoas e Pernambuco	33
Figura 5.1 - Solos com horizontes cimentados. A: Espodossolo (P15) apresentando horizonte com cimentação forte (Bm); e B: Argissolo Acinzentado (P13) apresentando horizonte com cimentação fraca (Btx)	50
Figura 5.2 - A: Argissolo Amarelo (P7) apresentando horizonte com cimentação fraca (Btx) pouco desenvolvido. Entre os horizontes Bt e Btx1 ocorre uma fina camada ferruginosa que corresponde a um horizonte plácico; B: detalhe de um horizonte Btx (perfil P11) bem desenvolvido e com presença de estruturas laminares	50
Figura 5.3 - Espodossolos apresentando horizontes com cimentação forte (Bm) e fraca (Bx) interligados de forma contínua (local do perfil complementar P16)	51
Figura 5.4 - Amostras de horizonte com cimentação fraca (P11-Btx4) e forte (P12-Bm1) imersas em solução ácida (HCl 1N) e básica (NaOH 1M) no período de 10 dias	66
Figura 5.5 - Classes de tamanho de materiais esboroados em soluções ácidas e básicas. A: horizonte com cimentação fraca em condições normais; B: horizonte com cimentação fraca, próxima do grau forte	68
Figura 5.6 - Classes de tamanho de materiais esboroados em soluções ácidas e básicas. A: Horizonte com cimentação forte, tipo I; e B: horizonte com cimentação forte, tipo II	69
Figura 5.7 - Classes de tamanho de materiais esboroados em soluções ácidas e básicas. Horizonte com cimentação forte, tipo III	69
Figura 5.8 - Observações sobre classes de cimentação e suas relações com teores da fração argila	70
Figura 5.9 - Variação do conteúdo da fração-argila em um perfil de Argissolo Acinzentado (P13) apresentando horizontes com cimentação forte (Bm) e fraca (Btx)	71
Figura 5.10 - Modelo de uma suave depressão nos tabuleiros costeiros com cerca de 8 m de desnível (local do perfil P4)	73
Figura 5.11 - Seqüência evolutiva de horizontes com cimentação fraca (Btx) (fundo) até cimentação forte (Bm)(frente) na passagem Argissolos Amarelos/Espodossolos, localizada na borda de uma suave depressão	73
Figura 5.12 - Mapa de solos apresentando duas suaves depressões. No alto, a depressão mostra uma transformação pedológica mais completa (local do perfil P6). Embaixo, a depressão mostra uma transformação pedológica relativa menos completa	74
Figura 5.13 - Mapa de solos na área de uma suave depressão mostrando o posicionamento das trincheiras abertas para o estudo das transformações laterais de duas seqüências pedológicas	76
Figura 5.14 - Vista espacial da organização morfológica de horizontes, com destaque para a degradação e/ou perda de argila na passagem Argissolos Amarelos/Espodossolos	77
Figura 5.15 - Nódulos fragipânicos observados na trincheira A, onde foi mapeado o horizonte Btx2. A: aspecto morfológico dos nódulos (seta). B: teor de argila dentro e fora dos nódulos	79
Figura 5.16 - Vista espacial da organização morfológica de horizontes, com destaque para a degradação e/ou perda de argila na passagem Argissolos Acinzentados/Espodossolos, entre P13 e P12	80
Figura 5.17 - Vista esquemática espacial da organização morfológica de horizontes, com destaque para a degradação e/ou perda de argila no perfil de Espodossolo (perfil complementar P16)	81
Figura 6.1 – Difrátogramas de raios-X da amostra total (pó) relativos a horizontes selecionados do perfil P11 (Argissolo Amarelo). (C: caulinita; Qz: quartzo; An: anatásio; M: mica)	85
Figura 6.2 – Difrátogramas de raios-X da amostra total (pó) relativos a horizontes selecionados do perfil P12 (Espodossolo). (C: caulinita; Qz: quartzo; An: anatásio; M: mica)	85
Figura 6.3 – Difrátogramas de raios-X da fração-argila (sem matéria orgânica) relativos a horizontes selecionados do perfil P11 (Argissolo Amarelo). (C: caulinita)	87

Figura 6.4 – Difractogramas de raios-X da fração-argila (sem matéria orgânica) relativos a horizontes selecionados do perfil P12 (Espodossolo). (C: caulinita; An: anatásio)	87
Figura 6.5 – Difractogramas de raios-X da fração-argila caulinitica (sem matéria orgânica) em condição natural e após tratamento com hidrazina monohidratada	88
Figura 6.6 – Variações da relação molar k_i e do conteúdo de fases amorfas extraíveis seletivamente pelo oxalato de amônio em horizontes selecionados com diversos níveis de endurecimento	90
Figura 8.1 – Extração de silício, alumínio e ferro pelo oxalato de amônio em três perfis de solo	104
Figura 8.2 – Extração de alumínio, silício e ferro pelo oxalato de amônio em um perfil de Espodossolo (perfil complementar P16) apresentando horizontes com cimentação forte (Bm) e fraca (Bx)	105
Figura 8.3 – Extração de silício, alumínio e ferro pelo oxalato de amônio em horizontes selecionados, cimentados e não-cimentados	107
Figura 8.4 – Extração de silício, alumínio e ferro pelo Tiron (Si_T , Al_T e Fe_T) em horizontes selecionados, cimentados e não-cimentados	108
Figura 8.5 – Variações de $\Delta Si = Si_T - Si_0$ em três perfis de solo e em horizontes cimentados selecionados	110
Figura 8.6 – Extração de alumínio e ferro da fração orgânica pelo pirofosfato de sódio e o conteúdo de carbono total em horizontes cimentados selecionados	111
Figura 8.7 – Proporção do conteúdo de alumínio, em fases não-cristalinas, na fração mineral e orgânica de horizontes cimentados selecionados	113
Figura 8.8 – Variação da relação cátion/ânion, $[(Al_p + Fe_p)/C]$, em horizontes cimentados selecionados. A relação média estimada foi de $0,35 \pm 0,08$	113
Figura 8.9 – Correlação dos teores de alumínio e ferro extraídos pelo pirofosfato de sódio (Al_p e Fe_p) com teores de carbono total (C) em horizontes cimentados selecionados (vinte e quatro amostras)	114
Figura 8.10 – Classes da relação molar Al/Si com base em extrações seletivas da fração mineral não-cristalina de horizontes cimentados selecionados (vinte e quatro amostras)	114
Figura 8.11 – Correlação entre os teores de Al e Si extraídos seletivamente da fração mineral não-cristalina em horizontes cimentados selecionados (vinte e quatro amostras)	115
Figura 8.12 – Correlação entre os teores de Al e Si extraídos seletiva e conjuntamente da fração mineral não-cristalina e da fração orgânica em horizontes cimentados selecionados (vinte e quatro amostras). A: extrações pelo oxalato de amônio; B: extrações pelo Tiron	115
Figura 8.13 – Aspecto massivo de horizontes cimentados. A: horizonte com cimentação fraca (P11-Btx2), destacando-se ferrãs e argilãs; B: horizonte com cimentação forte (P17-Bm2), com destaque aos argilãs	122
Figura 8.14 – Aspecto estrutural diferenciado entre horizontes não-cimentados. A: horizonte coeso (P11-PA-Bt) de um Argissolo Amarelo dos tabuleiros costeiros com aspecto massivo; B: horizonte não-coeso (P17-Bw) de um Latossolo Amarelo da Chapada do Araripe com aspecto microagregado	122
Figura 8.15 – Mapeamento de Al e Si por MEV em áreas selecionadas pela microscopia ótica, abrangendo argilãs e parte da matriz fina circunvizinha. A: horizonte com cimentação forte (P16-Bm2); B: horizonte não-cimentado coeso (P11-PA-Bt)	123
Figura 8.16 – Esquema geral da formação de agentes cimentantes, horizontes cimentados e horizontes coesos no ambiente das suaves depressões nos tabuleiros costeiros	133
Figura 9.1 – Mapa de solos mostrando áreas com domínios de Neossolos Regolíticos e os locais onde foram coletados dois perfis de solo desta classe (P1 e P2) com presença de horizontes com cimentação forte, tipo duripã	137
Figura 9.2 – Neossolos Regolíticos apresentando horizontes com cimentação forte (Cmn), tipo duripã	138
Figura 9.3 – Mapa de solos mostrando áreas com domínios de Neossolos Regolíticos associados com Planossolos e o local onde foi coletado o perfil de Planossolo (perfil P3) com presença de horizontes com cimentação fraca, tipo fragipã	142
Figura 9.4 – Planossolo (perfil P3) apresentando horizontes com cimentação fraca (Btxn1 e Btxn2), tipo fragipã, sobrejacentes à camada R (granito)	143
Figura 9.5 – Amostra de horizonte com cimentação fraca (P3-Btxn1) e com cimentação forte (P1-Cmn) imersas em solução ácida (HCl 1N) e básica (NaOH 4M) no período de 10 dias	146

Figura 9.6 – Classes de tamanho de materiais esboroados em soluções ácidas e básicas. A: horizonte com cimentação fraca; B: Horizonte com cimentação forte	148
Figura 10.1 – Difractogramas de raios-X da amostra total (pó) relativos a horizontes selecionados do perfil P2 (Neossolo Regolítico). (Qz: quartzo; Fd: feldspato; M: mica; Am 2:1: argilominerais tipo 2:1)	150
Figura 10.2 – Difractogramas de raios-X da fração-argila, submetida a vários tratamentos, relativos aos horizontes Crn e Cmn do perfil P2 (Neossolo Regolítico). (E: esmectita; I: ilita; C: caulinita; Mg: saturação por magnésio; K: saturação por potássio; Eg: solvatação por etileno glicol)	151
Figura 10.3 – Difractogramas de raios-X da fração-argila, submetida a vários tratamentos, relativos aos horizontes Btxn2 e En do perfil P3 (Planossolo). (I: ilita; C: caulinita; Mg: saturação por magnésio; K: saturação por potássio)	151
Figura 12.1 – Extração de silício, alumínio e ferro pelo Tiron (Si_T , Al_T e Fe_T) em dois perfis de solo com horizontes cimentados	162
Figura 12.2 – Extração de silício, alumínio e ferro pelo Tiron (Si_T , Al_T e Fe_T) em três classes de horizontes selecionados, isto é, com cimentação forte, fraca e não-cimentados	162
Figura 12.3 – Extração de silício, alumínio e ferro pelo oxalato de amônio (Si_o , Al_o e Fe_o) em três classes de horizontes selecionados, isto é, com cimentação forte, fraca e não-cimentados	164
Figura 12.4 – Variações de $\Delta Si = Si_T - Si_o$ em três classes de horizontes selecionados	164
Figura 12.5 – Aspecto massivo de horizontes cimentados selecionados. A: horizonte com cimentação fraca (P3-Btxn2), tipo fragipã, destacando-se áreas com ferri-argilãs; B: horizontes com cimentação forte (P1-Cmn), tipo duripã, destacando-se áreas com argilãs; C: horizonte com cimentação forte (P2-Cmn), tipo duripã, destacando-se áreas de poros com argilãs nas bordas	166
Figura 12.6 – Mapeamento de Si e Al por MEV em áreas selecionadas pela microscopia ótica numa amostra do horizonte com cimentação forte (Cmn) do perfil P1 (Neossolo Regolítico)	167
Figura 12.7 – Imagem (MEV) de fraturas frescas do horizonte com cimentação forte (Cmn) do perfil P1 (Neossolo Regolítico). A: área da matriz fina impregnada com agentes cimentantes silicosos acompanhados por baixo conteúdo de alumínio. Nesta área destacam-se plaquetas silicosas (seta) parcialmente embebidas pela matriz fina; B: área da matriz fina cimentada por compostos silicosos com destaque a uma feição muito silicosa	168

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Geologia e solos correlacionados nas áreas estudadas	22
Quadro 4.1 - Solos selecionados com horizontes cimentados e condições ambientais	34
Quadro 5.1 - Síntese de características morfológicas de Argissolos Amarelos apresentando horizontes com cimentação fraca (Btx)	53
Quadro 5.2 - Síntese de características físicas de Argissolos Amarelos apresentando horizontes com cimentação fraca (Btx)	55
Quadro 5.3 - Síntese de características morfológicas de Argissolos Acinzentados apresentando horizontes com cimentação forte (Bm) e/ou fraca (Btx)	56
Quadro 5.4 - Síntese de características físicas de Argissolos Acinzentados apresentando horizontes com cimentação forte (Bm) e/ou fraca (Btx)	58
Quadro 5.5 - Síntese de características físicas de horizontes selecionadas de Argissolos Acinzentados apresentando cimentação forte (Bm) e/ou fraca (Btx)	59
Quadro 5.6 A - Síntese de características morfológicas de Espodossolos apresentando horizontes com cimentação forte (Bm) ou fraca (Bx)	60
Quadro 5.6 B - Síntese de características morfológicas de Espodossolos Hidromórficos apresentando horizontes com cimentação forte (Bm)	61
Quadro 5.7 A - Síntese de características físicas de Espodossolos apresentando horizontes com cimentação forte (Bm, Bsm e Bhsm) ou fraca (Bx)	63
Quadro 5.7 B - Síntese de características físicas de Espodossolos Hidromórficos apresentando horizontes com cimentação forte (Bm e Bsm/Bm)	64

Quadro 5.8 - Estimativas do volume de material esboroado nos testes de imersão em água, ácido e base em amostras selecionadas de horizontes cimentados	65
Quadro 6.1 - Análise química total da fração argila caulínica, com eliminação da matéria orgânica, antes e após tratamento com oxalato de amônio	89
Quadro 7.1 - Composição química total de solos com horizontes cimentados desenvolvidos em uma suave depressão nos tabuleiros costeiros	95
Quadro 7.2 - Composição química total de um perfil de Espodossolo (perfil complementar P16) com horizontes cimentados desenvolvido em uma suave depressão nos tabuleiros costeiros	96
Quadro 7.3 - Composição química total do material de origem de solos com horizontes cimentados desenvolvidos em suaves depressões nos tabuleiros costeiros a partir de sedimentos do Grupo Barreiras	96
Quadro 7.4 - Balanço geoquímico de massa de solos com horizontes cimentados desenvolvidos em uma suave depressão nos tabuleiros costeiros	97
Quadro 7.5 - Balanço geoquímico de massa de um perfil de Espodossolo (perfil complementar P16) com horizontes cimentados desenvolvido em uma suave depressão nos tabuleiros costeiros	98
Quadro 8.1 - Microanálises quantitativas da fração-argila obtidas por microsonda eletrônica em amostras selecionadas de horizonte cimentado e não-cimentado coeso	125
Quadro 8.2 - Síntese de atributos diagnósticos de horizontes cimentados desenvolvidos em Argissolos Amarelos e Argissolos Acinzentados dos tabuleiros costeiros	127
Quadro 8.3 - Síntese de atributos diagnósticos de horizontes cimentados desenvolvidos em Espodossolos (não-hidromórficos) dos tabuleiros costeiros	128
Quadro 8.4 - Síntese de atributos diagnósticos de horizontes cimentados desenvolvidos em Espodossolos hidromórficos dos tabuleiros costeiros	129
Quadro 9.1 - Síntese de características morfológicas de Neossolos Regolíticos apresentando horizontes com cimentação forte (Cmn), tipo duripã	139
Quadro 9.2 - Síntese de características físicas de Neossolos Regolíticos apresentando horizontes com cimentação forte (Cmn), tipo duripã	140
Quadro 9.3 - Síntese de características morfológicas de um solo da classe dos Planossolos apresentando horizontes com cimentação fraca (Btxn1 e Btxn2), tipo fragipã	141
Quadro 9.4 - Síntese de características físicas de um solo da classe dos Planossolos apresentando horizontes com cimentação fraca (Btxn1 e Btxn2), tipo fragipã	145
Quadro 9.5 - Estimativas do volume de material esboroado nos testes de imersão em água, ácido e base em amostras selecionadas de horizontes cimentados	146
Quadro 11.1 - Composição química total de solos com horizontes cimentados e do material de origem (granitos) na depressão sertaneja	156
Quadro 11.2 - Balanço de massa em solos com horizontes cimentados desenvolvidos a partir de granitos na depressão sertaneja	157
Quadro 12.1 - Microanálises químicas quantitativas, pontuais, obtidas por microsonda eletrônica em amostras selecionadas da fração-argila de horizontes cimentados	169

RESUMO

Horizontes cimentados foram estudados em Argissolos Amarelos, Argissolos Acinzentados e Espodossolos dos tabuleiros costeiros e em Neossolos Regolíticos e Planossolos da depressão sertaneja, no Nordeste do Brasil. A ênfase dos estudos foi direcionada para os horizontes cimentados desenvolvidos em suaves depressões dos tabuleiros costeiros. O objetivo principal foi caracterizar a natureza de agentes cimentantes e de horizontes cimentados considerados como duripãs e fragipãs, e inferir processos pedogenéticos envolvidos na formação dos mesmos. Os horizontes cimentados foram caracterizados com base em aspectos morfológicos, físicos, químicos, mineralógicos e micromorfológicos. A caracterização e a dedução dos agentes cimentantes foram estabelecidas com base, principalmente, em extrações seletivas de fases amorfas pelos métodos do oxalato de amônio, Tiron e pirofosfato de sódio. O refinamento dos estudos foi desenvolvido com o apoio da microscopia eletrônica.

Na região dos tabuleiros costeiros, os resultados indicaram que os agentes cimentantes principais são compostos aluminosos, identificados como aluminossilicatos amorfos hidratados e, secundariamente, complexos organometálicos. Foi constatado, também, altas proporções de ferro em compostos amorfos, em associação com complexos organometálicos, cimentando finas camadas ferruginosas (horizonte plácico). O balanço geoquímico de massa em geral foi indicativo do acúmulo de alumínio nos horizontes cimentados, constituídos essencialmente por caulinita e quartzo. Conforme características e atributos diagnósticos, os horizontes com cimentação fraca foram enquadrados como fragipã. Os que apresentaram cimentação forte, em função da natureza dos agentes cimentantes principais, foram enquadrados como horizonte dúrico, ortstein e horizonte plácico. Portanto, parece ser inadequado o uso tradicional do termo duripã para denominar horizontes com agentes cimentantes principais aluminosos, como os desenvolvidos nesta região. No ambiente das suaves depressões, os principais mecanismos envolvidos na formação desses horizontes foram a podzolização moderada, o transporte mecânico de argila e condições hidromórficas, ainda que temporárias.

Na zona da depressão sertaneja, ao contrário, foi constatado que os agentes cimentantes principais são compostos silicosos, mas sempre acompanhados por alumínio. Os horizontes com cimentação forte desenvolvidos em Neossolos Regolíticos mostraram um conjunto de características que permitiram enquadrá-los como duripãs. O horizonte com cimentação fraca desenvolvido no perfil de Planossolo, com mais de 10 cm de espessura, foi classificado como fragipã. O balanço geoquímico de massa não indicou nenhum acúmulo de silício nos horizontes cimentados. A composição mineralógica essencial destes horizontes apresentou caulinita, quartzo, feldspato e pequenas proporções de argilominerais 2:1.

As investigações indicaram que as proporções entre o conteúdo de frações finas e os teores de agentes cimentantes foram fatores determinantes na diferenciação entre horizontes com cimentação forte e fraca. Entretanto, tais proporções só puderam ser observadas com mais detalhes nos horizontes cimentados desenvolvidos nos solos dos tabuleiros costeiros.

ABSTRACT

The present study was carried out in cemented horizons in Ultisols and Spodosols from the coastal tablelands, and in Inceptisols and Alfisols from the *sertaneja* depression of Northeast Brazil. The emphasis was concentrated on the cemented horizons developed in smooth depressions in the coastal tablelands. The main objective was to identify the cementing agents and to characterize horizons considered to be duripan and fragipan, and to infer the pedogenic processes involved in their formation. The morphological, micromorphological, physical, chemical, and mineralogical features of the cemented horizons were described. The identification of the cementing agents was achieved with selective extractions of the amorphous phases using ammonium oxalate, Tiron and sodium pyrophosphate. Detailed studies were carried out with an electron microscope.

In the coastal tablelands region, the results indicated that the principal cementing agents are aluminum compounds, found to be amorphous hydrated aluminosilicates, and secondarily, organo-metallic complexes. The significant contents of amorphous iron compounds associated with organo-metallic complexes were found to cement thin ferruginous layers (placic horizon).

The overall geochemical mass balance indicated the accumulation of aluminum in the cemented horizons composed mainly of quartz and kaolinite. Weakly cemented horizons were classified as fragipans. The more strongly cemented horizons were separated into duric, ortstein and placic horizons, according to their principal cementing agents. The traditional use of the term duripan seems to be inappropriate in the case of horizons in which the principal cementing agents are aluminous, such as those occurring in this region. In the smooth depression domain, the main mechanisms of the formation of these horizons are moderate podzolization, clay translocation, and the development of hydromorphic conditions, although temporary.

In contrast, the main cementing agents in the *sertaneja* depression region are silicon compounds, always accompanied by aluminum. Strongly cemented horizons developed in Inceptisols have the characteristics of duripan. The weakly cemented horizon thicker than 10 cm within an Alfisol profile was classified as fragipan. The geochemical mass balance showed no silica accumulation in the cemented horizons. The mineralogical composition of these horizons includes kaolinite, quartz, feldspar and small amounts of 2:1 clay minerals.

The investigations indicated that the relative proportions of fine fractions and cementing agents were the main factors in determining the degree of cementation. However, it was only possible to study these proportions in more detail in the cemented horizons of the soils formed on the coastal tablelands.

Parte 1

CONHECIMENTO PRÉVIO

CAPÍTULO 1 - Introdução geral

Horizontes cimentados considerados como fragipãs e duripãs têm ocorrência significativa em solos do Nordeste do Brasil. Destacam-se, sobretudo, na região úmida dos tabuleiros costeiros, considerada de fundamental importância para economia nordestina. Em menor proporção, ocorrem em áreas da depressão sertaneja (zona semi-árida) (SILVA et al., 1993; BRASIL, 1972; EMBRAPA, 1975; EMBRAPA, 1999; OLIVEIRA et al., 1992). Estudos pedológicos recentes realizados nos Estados de Sergipe, Alagoas e Pernambuco, especialmente os mapeamentos detalhados de solos (não-publicados), executados em áreas das agroindústrias do setor canavieiro, têm mostrado que os referidos horizontes ocupam áreas importantes nestes Estados. São horizontes que impõem restrições de drenagem, profundidade efetiva, crescimento de raízes, movimento e armazenamento de água, entre outras.

Apesar da importância e das restrições impostas na produção agrícola, são poucas e, por vezes contraditórias, as informações existentes sobre a natureza e a gênese desses horizontes em solos do Nordeste do Brasil (JACOMINE, 1974; BOULET et al., 1996; SILVA et al., 1997; BOULET et al., 1998; FILIZOLA et al., 2001; MOREAU, 2001; ROMERO, 2003).

Diante da escassez de informações, em particular dos horizontes cimentados que ocorrem no ambiente dos tabuleiros costeiros, há várias décadas que se pratica basicamente o mesmo uso e manejo igualitário das terras. Em consequência, pelo menos em parte, este uso tem contribuído para a degradação ambiental, o que se nota pela queda de produtividade e até mesmo pelo colapso de algumas agroindústrias.

Com base nos conhecimentos adquiridos na literatura e em trabalhos de campo sobre os horizontes considerados como fragipãs e duripãs desenvolvidos em solos do Nordeste do Brasil, pôde-se esboçar as seguintes questões:

a) Os contrastes de condições climáticas (zona úmida e seca) e de material de origem (geologia), que condicionam a formação de diferentes solos, são fatores que impõem diferenças na composição dos horizontes cimentados e agentes cimentantes?

b) O silício, o alumínio e o ferro, principalmente em fases amorfas, são os elementos químicos envolvidos na composição de agentes que causam cimentações e/ou endurecimento? Estes elementos variam em proporção em função do clima (quantidade e distribuição de chuvas), do material de origem e da drenagem local?

c) Em cada ambiente climático e geológico, o grau de cimentação e/ou endurecimento varia dentro e entre solos, sem modificações na natureza dos agentes cimentantes?

Visando responder estas e outras questões, a pesquisa teve como objetivo central gerar informações básicas sobre a natureza de agentes cimentantes e horizontes cimentados considerados como fragipãs e duripãs desenvolvidos em solos do Nordeste do Brasil, com ênfase na região dos tabuleiros costeiros. Os objetivos específicos foram: (1) estudar a natureza de agentes cimentantes e horizontes cimentados em Argissolos e Espodossolos desenvolvidos no ambiente dos tabuleiros costeiros e em Neossolos Regolíticos e Planossolos desenvolvidos na depressão sertaneja; (2) inferir processos pedogenéticos relacionados à formação dos horizontes cimentados.

Os resultados almejados serão de grande relevância para pesquisas aplicadas na área de uso, manejo, conservação, interpretação do potencial agrícola das terras, levantamentos de solo, preservação ambiental e, especialmente, para dar suporte ao desenvolvimento do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999). Especificamente, o conhecimento básico sobre a natureza dos agentes cimentantes e horizontes cimentados servirá para:

- a) Definir horizontes diagnósticos de solos brasileiros que até o momento são fundamentados, principalmente, no conhecimento da literatura estrangeira;
- b) Nortear critérios aplicados para levantamentos de solo;
- c) Adequar critérios visando a estruturação e/ou reestruturação de classes de solos no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, principalmente nas ordens dos Espodossolos, Argissolos, Neossolos e Planossolos;
- d) Estabelecer novas classes no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos;
- e) Dar suporte às pesquisas aplicadas, visando diferenciação de uso, manejo e conservação das terras;
- f) Interpretar e avaliar o potencial de uso agrícola e não-agrícola das terras;

Diante desse elenco de possibilidades, os resultados a serem obtidos contribuirão não só para o avanço do conhecimento científico em ciência do solo, mas também para o cumprimento das missões das Instituições envolvidas na pesquisa. Tanto a Embrapa Solos como a Universidade de São Paulo, por meio do Instituto de Geociências, buscam gerar conhecimentos no campo da pedogênese tropical.

CAPÍTULO 2 - Cimentações

Processos de cimentação têm ocorrência no ciclo de formação das rochas, particularmente das sedimentares, assim como no próprio local de formação do manto de intemperismo sobrejacente às rochas preexistentes, bem como em coberturas pedológicas, via processos pedogenéticos (Figura 2.1).

Uma breve discussão sobre a formação do manto de intemperismo, bem como suas transformações, é de grande importância para o entendimento da origem dos agentes cimentantes e da formação dos materiais cimentados que ocorrem na natureza, sejam rochas, sedimentos ou solos.

A ação do intemperismo sobre as rochas ou sedimentos deve-se à necessidade de equilíbrio em resposta às condições próximas ou em contato direto com a atmosfera, hidrosfera e biosfera. Pela ação do intemperismo, progressivamente forma-se sobre a rocha-mãe o manto de intemperismo, também chamado de regolito. Este, compreende materiais não-consolidados, bem como pode conter materiais secundários cimentados, deposições coluviais ou aluviais, evaporitos ou ainda deposições eólicas.

O REGOLITO COMO FONTE DE AGENTES CIMENTANTES

Em termos gerais, um regolito bem desenvolvido como nas regiões tropicais, segundo ROBERTSON & BUTT (1977), compreende duas grandes zonas: o saprolito e o pedolito. O saprolito é a zona de base, em contato com a rocha-mãe. Por isso mesmo pode compreender pedaços de rocha pouco alterada e um percentual de mais de 20% de minerais primários intemperizáveis alterados. O pedolito, a parte mais superficial do regolito, é a zona de maior grau de alteração, na qual o material de origem encontra-se completamente transformado por um conjunto de processos pedológicos, onde os solos são formados (ROBERTSON & BUTT, 1977).

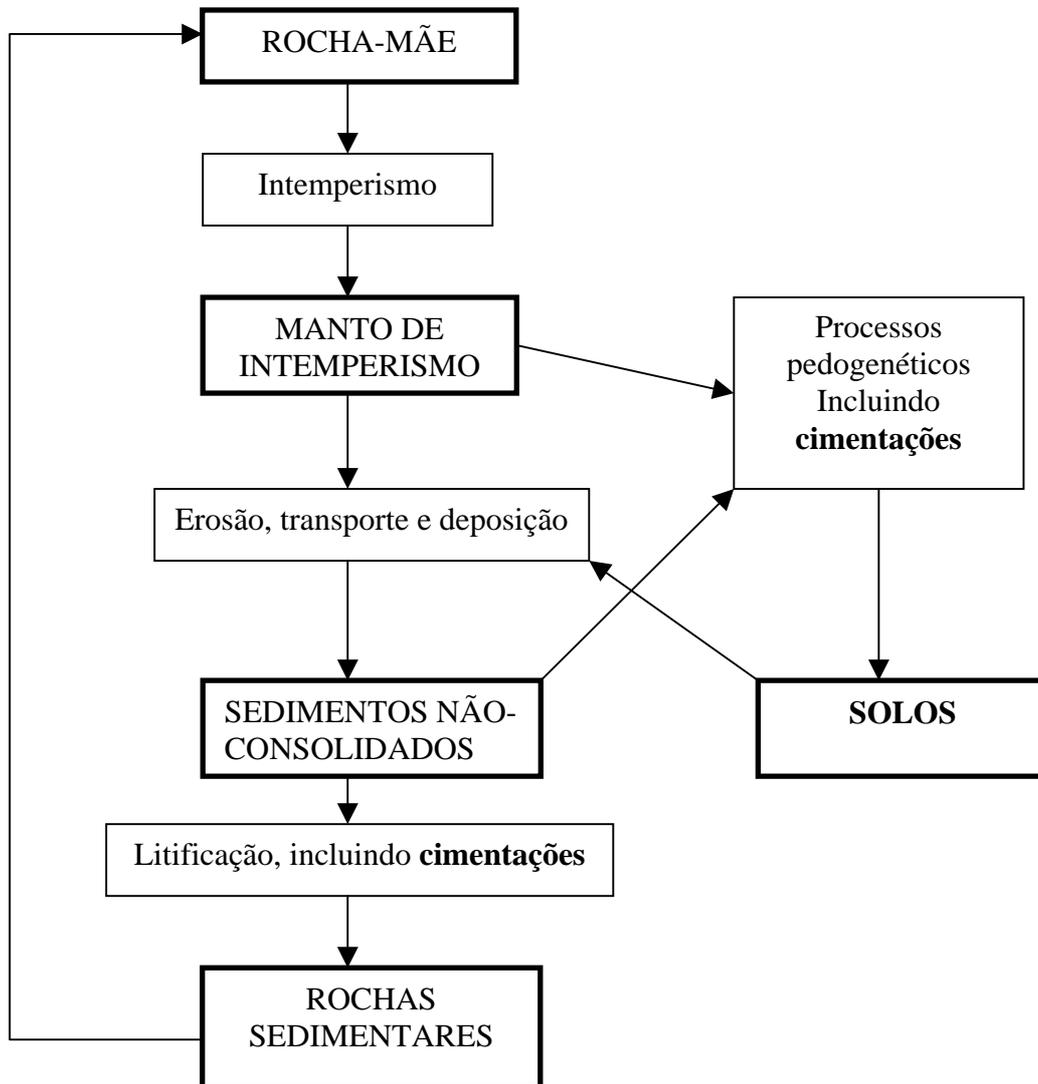


Figura 2.1 - Esquema ilustrativo da formação de rochas sedimentares e de solos, incluindo etapas em que podem ocorrer processos de cimentação (Os retângulos com letras maiúsculas representam materiais e aqueles com letras minúsculas, os processos).

O regolito está sujeito a uma série de transformações em função das condições ou mudanças de clima, de processos erosivos, bem como da própria atuação contínua dos processos de intemperismo. Os processos erosivos (provocados pela ação da água, vento ou gelo) atuam removendo, principalmente a parte superficial do manto de intemperismo, expondo novos materiais à ação do intemperismo, inclusive podendo expor a própria rocha não-alterada.

Os produtos de erosão removidos do manto de intemperismo, podem ser transportados e depositados em locais diversos, como em bacias sedimentares, ao longo dos cursos das águas, nos oceanos, etc. Os materiais depositados nos continentes por meio de processos pedogenéticos formarão solos, com ou sem a presença de horizontes cimentados. Entretanto, ao serem submetidos aos processos de consolidação e litificação, poderão formar rochas sedimentares.

Produtos de intemperismo, especialmente resultantes do intemperismo químico, como a sílica na forma dissolvida (H_4SiO_4), óxidos e hidróxidos de ferro, carbonatos, podem ser removidos lateral ou verticalmente por meio do fluxo das águas, seja em superfície ou em subsuperfície. Tais produtos durante o transporte em solução, conforme o grau de solubilidade e as condições ambientais, podem precipitar, dando origem a diversos tipos de materiais cimentados. Solos contendo fragipãs, duripãs, concreções ferruginosas, silcretos, assim como determinados arenitos e calcários, são exemplos de materiais cimentados (OLLIER, 1984; PETRI & FÚLFARO, 1983; BIRKELAND, 1999).

A parte mais superficial do regolito, onde os solos são formados, é uma zona que fica exposta à ação muito intensa do intemperismo, especialmente em condição de clima quente e úmido com boa drenagem. Nestas condições climáticas, os processos de perda por lixiviação são intensos, sendo tanto maior quanto mais altas forem as precipitações. Por meio da lixiviação é que ocorrem perdas de materiais secundários carregados em solução pelas águas, havendo, portanto, a concentração diferencial de produtos secundários menos solúveis, como alumínio e ferro.

Os produtos secundários dissolvidos e carregados em solução, à medida que atingem ambientes em condições de menor solubilidade, podem precipitar-se, sendo o processo controlado geoquimicamente. O ferro é um dos produtos carregados a curta distância. Porém, em ambientes redutores e em condições ácidas, pode ser transportado para longas distâncias. Os carbonatos podem ser carregados para distâncias relativamente maiores, mas, à medida que a aridez aumenta, normalmente precipitam-se. Os sulfatos são considerados os mais solúveis e, portanto, podem atingir grandes distâncias durante o transporte em solução. A precipitação destes e de outros agentes cimentantes, dá origem às diversas formas de materiais cimentados encontrados na natureza, seja em rochas, sedimentos ou solos.

TIPOS DE MATERIAIS CIMENTADOS

Entre os diversos produtos de alteração que funcionam como agentes cimentantes destacam-se: sílica, óxidos e hidróxidos de ferro, hidróxidos de alumínio, carbonatos de cálcio e magnésio, gipsita e manganês (ROBERTSON & BUTT, 1977; OLLIER, 1984; DREES et al., 1989).

Os produtos secundários cimentados normalmente ocorrem na forma de nódulos, crostas ou em camadas endurecidas, seja em solos ou em sedimentos. Quando a cimentação ocorre em forma de camadas ou horizontes, genericamente recebem a denominação de “duricrust” (OLLIER, 1984; SMITH & WHALLEY, 1982). Os principais tipos de “duricrust” são os ferricretes, aluminocretes, silcretes e calcretes (OLLIER, 1984).

Ferricretes. Estes são também denominados de lateritas, cangas lateríticas (PETRI & FÚLFARO, 1983) ou ainda de couraças ferruginosas (ROBERTSON & BUTT, 1997). Compreendem materiais nodulares, massivo ou vesicular, predominantemente constituídos de óxidos e hidróxidos de ferro, com menor quantidade de caulinita e outros minerais.

Aluminocretes. Constituem produtos residuais de intemperismo concentrados principalmente em alumínio (CARVALHO et al., 1997) na forma de diásporo, boehmita, gibbsita e alumogel (KIRSCH, 1972). Por isso, comumente são denominados como bauxitas (PETRI & FÚLFARO, 1983; OLLIER, 1984). A formação ocorre quando praticamente todos os outros materiais tiverem sido removidos, o que requer condições extremas de lixiviação para concentrar minerais residuais de alumínio.

Silcretes. São materiais cimentados fortemente por sílica secundária. A sílica pode estar tanto na forma cristalina como amorfa. Esse tipo de cimentação pode ocorrer em diversas posições do regolito, incluindo solos, sedimentos ou rochas. São muito comuns na Austrália e na África do Sul (ROBERTSON & BUTT, 1997; THIRY, 1993; CHARTRES, 1985).

Calcretes. Consistem de camadas de carbonato de cálcio secundário (BUOL et. al., 1997) cimentando materiais pedogenéticos ou sedimentos (ROBERTSON & BUTT, 1997). São formas de cimentação comuns em ambientes semi-áridos e áridos, onde as precipitações anuais são inferiores a 500 mm (OLLIER, 1984).

Além das cimentações mencionadas, existem outras que caracterizam formas específicas, como, por exemplo, manganocretes (cimentação por manganês) (OLLIER, 1984) e gipcretes (cimentação por gipsita) (SMITH & WHALLEY, 1982; CHEN, 1997).

CIMENTAÇÕES PEDOGENÉTICAS

Segundo FLACH et al. (1969), os principais tipos de cimentações pedogenéticas são categorizados em três grupos: (1) as cimentações relativas à sílica; (2) as cimentações desenvolvidas por carbonatos; (3) as cimentações decorrentes dos óxidos e hidróxidos de ferro.

Horizontes cimentados predominantemente por sílica. Os horizontes cimentados por sílica recebem diversas denominações. Os que apresentam cimentação forte são conhecidos por termos como silcretes, hardpans, duripans (“duripãs” em português) e tepetates (ROBERTSON & BUTT, 1997; THIRY, 1993; CHARTRES, 1985; CHARTRES & NORTON, 1994; BLANK

et al., 1998, etc.). Por outro lado, os horizontes com cimentações fracas ou aparentes, são denominados genericamente, como fragipans (“fragipãs” em português) (NORTON, 1994; BUOL et al., 1997; FANNING & FANNING, 1989; FAO, 1994; UNITED STATES, 1999; EMBRAPA, 1999).

Deve-se ressaltar que, no caso dos fragipãs e hardpans, alguns estudos indicaram que, além da sílica, compostos como aluminossilicatos amorfos podem desempenhar papel importante na sua formação (SMECK & CIOLKOSZ, 1989; THOMPSON et al., 1994; BUTT, 1983; THORNER et al., 1987).

Os silcretes pedogenéticos, conforme estudos efetuados por THIRY (1993) na bacia de Paris, desenvolveram-se no contexto dos processos de formação dos solos, de modo que apresentam estruturas típicas das organizações pedológicas. São essencialmente formados por quartzo microcristalino, conforme também observaram MILNES et al. (1991) na Austrália. Entretanto, estudos de MILNES & THIRY (1992) mostraram resultados de um silcrete pedogenético complexo, com agentes cimentantes compreendendo, além do quartzo microcristalino, opala e calcedônia.

Conforme CHARTRES (1985) e THIRY (1993), os agentes cimentantes nos hardpans ocorrem na forma de sílica amorfa, sendo a acumulação considerada absoluta. Porém estudos de FLACH et al. (1973) na região oeste dos Estados Unidos, mostraram que além de compostos amorfos, ocorrem materiais birrefringentes em estágio inicial de cristalinidade.

Comparações feitas por THIRY (1993) e EGBAL & SOUTHARD (1993) indicaram que os hardpans da Austrália e os duripãs das regiões áridas dos Estados Unidos são formas de cimentação com características similares. MILNES et al. (1991), no estudo de solos e saprolitos da Austrália, usaram as duas terminologias (duripãs e hardpans), referindo-se ao mesmo tipo de cimentação. No México, NIMLOS (1989) descreve formas de cimentação similares denominadas como tepetates. Outros materiais com cimentação forte constam na literatura com a denominação de horizontes dúricos (CHADWICK et al., 1987a,b; CHARTRES & NORTON, 1994; McKEAGUE & KODAMA, 1981).

Horizontes cimentados por carbonatos. As cimentações por carbonatos são consideradas menos efetivas do que as de sílica e se restringem, basicamente, aos ambientes áridos e semi-áridos e em poucos solos de regiões úmidas (FLACH et al., 1969). Horizontes com este tipo de cimentação são denominados de petrocálcicos (BUOL et al., 1997; EMBRAPA, 1999).

Horizontes cimentados por óxidos e hidróxidos de ferro. As cimentações desenvolvidas por ferro, ao contrário dos carbonatos, estão relacionadas aos solos de ambientes úmidos ou que foram úmidos no passado. Sua formação, em geral, está relacionada a processos

de umedecimento e secagem. Podem formar materiais cimentados de forma branda, conhecidos por plintita ou laterita, como também materiais consolidados, em forma de concreções soltas (horizonte concrecionário ou petroplíntico) ou ainda camadas consolidadas contínuas ou composta de blocos grandes consolidados (horizonte litoplíntico) (FLACH et al., 1969; EMBRAPA, 1999). Também podem formar camadas finas, com presença de matéria orgânica. Neste caso, recebem a denominação de horizonte plácico (UNITED STATES, 1999; EMBRAPA, 1999). Podem ainda participar de horizontes cimentados por compostos contendo alumínio, silício e complexos organometálicos, constituindo horizontes tipo ortstein, comuns em solos da classe dos Podzóis (LEE et al., 1988a e 1988b; KODAMA & WANG, 1989).

CONCEITUAÇÃO E DEFINIÇÃO DE DURIPÃ E FRAGIPÃ

Duripã. Este é um horizonte mineral subsuperficial, cimentado por sílica iluvial, podendo conter ou não outros cimentos acessórios. O grau de cimentação deve ser o suficientemente forte para que menos da metade do volume de fragmentos secos tornem-se esboroados quando imersos em água ou em solução ácida, mesmo por um longo período de tempo. O grau de cimentação e a aparência dos duripãs são variáveis. Entretanto, após prolongado umedecimento, os materiais duripânicos permanecem, no mínimo, firmes, podendo tornar-se quebradiços. Em regiões úmidas, os duripãs gradam para materiais tipo fragipãs, assim com para materiais não cimentados. Em regiões semi-áridas ou mais secas, podem ocorrer conjuntamente com horizontes enriquecidos com carbonato de cálcio (UNITED STATES, 1999; EMBRAPA, 1999).

Para ser considerado duripã (UNITED STATES, 1999), o horizonte cimentado deve atender aos seguintes requisitos:

- a) A cimentação ou endurecimento do material deve ocupar mais da metade do volume do horizonte;
- b) O material cimentado deve apresentar evidências de acumulação de opala ou de outras formas de sílica;
- c) Menos da metade do volume de fragmentos de material seco ao ar esboroa-se em HCl 1N, mesmo em prolongado tempo de imersão na solução ácida; porém mais da metade esboroa-se em solução concentrada de KOH ou NaOH ou em processos alternados de imersão em solução ácida e alcalina;
- d) Em função da continuidade lateral do material cimentado, raízes só conseguem penetrar em fraturas verticais espaçadas em 10 cm ou mais.

Conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999), para ser considerado como horizonte diagnóstico, o duripã deve apresentar uma espessura mínima estabelecida em 10 cm.

Fragipã. Corresponde a um horizonte subsuperficial, pedogenético, com 15 cm ou mais de espessura e que causa restrições à penetração de raízes e de água. Comumente apresenta baixos teores de matéria orgânica e alta densidade em relação ao horizonte subjacente. Quando seco, o fragipã apresenta consistência no mínimo dura para que ocorra ruptura do material. No estado úmido, sob pressão, o material mostra tendência de ruptura súbita, em vez de deformar-se lentamente em mais de 60% do volume do horizonte. Fragmentos de materiais fragipânicos secos ao ar, com 5 a 10 cm de diâmetro, esboroam-se em mais da metade do volume quando imersos em água, sendo esta uma característica diferencial em relação aos duripãs e outros materiais cimentados (UNITED STATES, 1999).

A maioria dos fragipãs mostra características de óxido-redução e evidências de translocação de argila. Estas feições pedogenéticas servem de base, portanto, para distinguir os fragipãs de outros materiais com alta densidade. Entretanto, a gênese dos fragipãs ainda permanece um processo obscuro (UNITED STATES, 1999).

Todo fragipã desenvolve, fortemente, o que se chama de propriedades fráguas. Porém, nem todo material que apresenta propriedades fráguas enquadra-se como fragipã. Materiais com propriedades fráguas devem apresentar:

- a) Evidências de processos pedogenéticos no interior ou nas faces dos agregados;
- b) Resistência de ruptura, sendo no mínimo firme, e tendência de ruptura súbita, em vez de deformação lenta, quando o material for submetido à pressão, estando a umidade do solo em torno da capacidade de campo;
- c) Esboroamento quando fragmentos secos ao ar, com 5 a 10 cm de diâmetro, são imersos em água;
- d) Restrições à penetração de raízes quando a umidade do solo estiver em torno da capacidade de campo.

Para ser considerado fragipã, além de propriedades fráguas, o horizonte ou camada deve apresentar as seguintes características:

- a) Espessura mínima de 15 cm;
- b) Evidências de pedogênese no interior do horizonte ou, pelo menos, nas faces das unidades estruturais;
- c) Estrutura prismática, colunar, blocos ou material de natureza massiva. No caso de materiais estruturados, a separação entre unidades estruturais, permitindo a penetração

de raízes, deve apresentar um espaçamento médio de 10 cm ou mais no sentido horizontal;

- d) Mais da metade dos materiais constitutivos do horizonte esboroam-se quando fragmentos secos ao ar, com 5 a 10 cm de diâmetro, são imersos em água;
- e) A consistência úmida (resistência de ruptura), em mais de 60% do volume do horizonte, deve ser no mínimo firme. Com teor de umidade em torno da capacidade de campo, a tendência de ruptura dos materiais sob pressão ocorre de forma súbita em vez de deformação lenta. Neste mesmo volume, virtualmente não são observadas raízes.

No Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999), fragipã é um horizonte mineral subsuperficial, conforme definido anteriormente, mas requerendo uma espessura mínima estabelecida em 10 cm e um volume mínimo de materiais fragipânicos de 50%.

HORIZONTES CIMENTADOS CONSIDERADOS COMO FRAGIPÃS E DURIPÃS NO NORDESTE DO BRASIL

No Nordeste do Brasil, tem sido verificado a presença de horizontes considerados como fragipãs ou duripãs tanto em solos da zona úmida costeira como em solos do ambiente semi-árido (BRASIL, 1972; JACOMINE, 1974; EMBRAPA, 1975; BOULET et al., 1998; ROMERO, 2003).

Na zona úmida costeira, os solos com horizontes considerados como fragipãs e/ou duripãs distribuem-se, sobretudo, na região dos tabuleiros costeiros. Nesta região, os horizontes cimentados ocorrem em solos das classes dos Argissolos Amarelos, Argissolos Acinzentados e Espodossolos, onde comumente formam seqüências contínuas (SILVA et al., 1997; BOULET et al., 1996; BOULET et al., 1998).

Na região semi-árida, a presença de horizontes cimentados é comum em solos da classe dos Neossolos Regolíticos e em alguns Planossolos (BRASIL, 1972; EMBRAPA, 1975; OLIVEIRA et al, 1992). Entretanto, pouco se sabe a respeito desses horizontes. Os dados disponíveis mais específicos sobre horizontes tipo fragipã ou duripã são de estudos relativos aos solos da região dos tabuleiros costeiros (JACOMINE, 1974; SILVA et al., 1997; BOULET et al., 1996; MELO & SANTOS, 1996; BOULET et al., 1998; FILIZOLA et al., 2001; MOREAU, 2001; ROMERO, 2003).

HORIZONTES CIMENTADOS DESENVOLVIDOS EM AMBIENTES ÚMIDOS

Horizonte plácico. Este corresponde a uma fina camada de cor vermelha-escura ou preta, cimentada ou endurecida por ferro (ferrihidrita e goethita pobremente cristalizada) ou por ferro, manganês e matéria orgânica, com ou sem a presença de outros agentes cimentantes. Comumente ocorre dentro de 50 cm de profundidade e apresenta espessura geralmente entre 2 e 10 mm. Porém pode ter apenas 1 mm de espessura. Quando ocorre associado com materiais espódicos (definido adiante), a espessura máxima é inferior a 2,5 cm. Se não estiver associado com esses materiais, a espessura máxima não tem limites. Grande parte desses horizontes são formados em ambientes com clima úmido e frio, em condições de baixa evapotranspiração. Desenvolvem-se em materiais com texturas muito diversificadas, desde arenosas até argilosas (UNITED STATES, 1999; EMBRAPA, 1999).

Para que um horizonte seja considerado horizonte plácico, as características requeridas são as seguintes:

- a) O horizonte é cimentado ou endurecido por ferro ou ferro, manganês e matéria orgânica, com ou sem outros agentes cimentantes;
- b) A espessura mínima é de 1 mm e, quando associado com materiais espódicos (definidos adiante), a espessura máxima é inferior a 2,5 cm;
- c) Em função da continuidade lateral do horizonte, as raízes só conseguem penetrar nos locais de fraturas verticais, espaçadas em 10 cm ou mais.

No Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999), a espessura mínima requerida para o horizonte plácico é de 0,5 cm, sendo as demais características conforme UNITED STATES (1999).

Horizonte tipo ortstein. É um horizonte constituído de materiais espódicos, com espessura mínima de 2,5 cm e com cimentação ocupando mais da metade do volume do horizonte. Este horizonte pode assumir formas diversas, tais como camadas horizontais, nódulos, colunas irregulares, entre outras. No contexto em que ocorrem materiais espódicos, a diferenciação entre horizonte plácico e ortstein é feita com base apenas na espessura. O horizonte plácico tem espessura máxima inferior a 2,5 cm, enquanto o ortstein tem no mínimo 2,5 cm (UNITED STATES, 1999).

As características requeridas (UNITED STATES, 1999) para horizonte tipo ortstein são as seguintes:

- a) O horizonte é constituído de materiais espódicos;
- b) A cimentação ocupa 50% ou mais do volume do horizonte;
- c) A espessura mínima é de 2,5 cm.

Materiais espódicos. São constituintes minerais de solos dominados por materiais amorfos, ativos, resultantes de processos de iluviação. Os materiais amorfos são compostos por matéria orgânica e alumínio, com ou sem ferro. O termo ativo refere-se aos materiais com alta carga pH dependente, alta superfície específica e alto poder de retenção de umidade.

Os materiais espódicos comumente ocorrem subjacentes a um horizonte álbico e desenvolvem-se em ambientes de clima frio ou temperado, mas com ocorrência em climas quentes e úmidos (UNITED STATES, 1999).

Para ser considerado material espódico, as características requeridas são as seguintes:

- a) Valor do pH em água (1:1) igual ou menor a 5,9, e o teor de carbono orgânico maior ou igual a 0,6%;
- b) Uma ou ambas condições seguintes:
 - 1) Presença de horizonte álbico sobrejacente e tendo cores úmidas como a seguir:
 - Matiz 5YR ou mais vermelha;
 - Matiz 7,5YR com valor menor ou igual a 5 e croma 4 ou menor;
 - Matiz 10YR ou neutro, sendo a cor com valor e croma 2 ou menor;
 - Cor 10YR 3/1.
 - 2) Presença ou não de horizonte álbico sobrejacente e uma das cores especificadas na condição 1 ou no matiz 7,5YR, com valor 5 ou menor e croma 5 ou 6 e uma ou mais das seguintes características morfológicas ou químicas:
 - Cimentação por matéria orgânica e alumínio, com ou sem ferro (em 50% ou mais do material), sendo a consistência (de ruptura) no mínimo firme na parte cimentada;
 - Presença de “coatings” nos grãos de areia em quantidade maior ou igual a 10%;
 - Valor das porcentagens de alumínio e ferro extraídos pelo extrato de oxalato de amônio, conforme a expressão $(Al_o + 0,5Fe_o)$, com valor de 0,5 ou maior, e no máximo metade deste valor no horizonte sobrejacente;
 - Valor da Densidade Óptica do Extrato do Oxalato (ODOE) de 0,25 ou maior, e no máximo a metade deste valor no horizonte sobrejacente.

Horizonte espódico. No Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999), assim como no norte-americano (UNITED STATES, 1999), um dos critérios para enquadrar horizonte espódico é a cimentação. Admite-se como horizonte espódico, entre outras exigências de cada sistema, horizontes que apresentam cimentação por matéria orgânica e alumínio, com ou sem ferro, em 50% ou mais do horizonte, desde que a consistência úmida seja no mínimo firme nas partes cimentadas. No sistema brasileiro (EMBRAPA, 1999) admite-se ainda, aqueles horizontes com qualquer cor, desde que sejam continuamente cimentados por uma

combinação de matéria orgânica e alumínio, com ou sem ferro, porém requerendo uma consistência úmida muito firme ou extremamente firme.

Horizonte dúrico. É um tipo de horizonte subsuperficial, fortemente cimentado, que não atende aos requisitos de fragipã, duripã ou ortstein. Usualmente apresenta mudança textural abrupta em relação ao horizonte subjacente e difusa em relação ao horizonte subjacente. Diferencia-se dos fragipãs porque apresenta cimentação forte. Não atende aos requisitos de duripãs porque o agente cimentante principal não é sílica. Diferencia-se de ortstein porque não atende requisitos de cor e/ou teor de carbono (McKEAGUE & SPROUT, 1975).

Conforme MILNES et al. (1979), horizonte dúrico e ortstein, quando ocorrem associados, podem até apresentar características morfológicas similares, porém diferenciam-se com relação aos teores de Al e Fe extraíveis. Estudos micromorfológicos e por microscopia eletrônica (McKEAGUE & PROTZ, 1980) indicaram que, além de Si, Al e Fe, a matéria orgânica humificada, mesmo em pequena quantidade, também atua como agente cimentante em horizonte dúrico.

HORIZONTES CIMENTADOS DOMINANTEMENTE POR SÍLICA NO CONTEXTO MUNDIAL

Horizontes ou camadas cimentadas por sílica, como hardpans, duripãs e silcretes, são muito comuns na Austrália e na África do Sul, bem como nos Estados Unidos (NORTON, 1994; THIRY, 1993; MILNES & THIRY, 1992; BUTT, 1983; STEPHENS, 1971). Entretanto, ocorrem também em diversas outras partes do mundo, abrangendo vários domínios climáticos, como na África do Norte, golfo arábico, zona oeste da Europa e América do Sul (MILNES & THIRY, 1992).

Com relação às cimentações pedogenéticas denominadas de fragipãs, observa-se que são predominantes em regiões de médias latitudes, sob condições variadas de clima, desde zonas úmidas até zonas áridas (WITTY & KNOX, 1989). Os Estados Unidos compreendem uma das maiores áreas no mundo com solos tendo cimentações fracas dessa natureza (WITTY & KNOX, 1989; LINDBO & VENEMAN, 1989; HUDNALL & WILLIAMS, 1989). Em menores proporções, os fragipãs também se fazem presentes em diversas partes do mundo, como na Romênia, Nova Zelândia, Tchecoslováquia, Canadá, Hungria, Polônia, França, Inglaterra, Bélgica, Espanha, Itália, Suécia, Holanda, Ilhas Britânicas, Brasil, Argentina, México e Austrália (WITTY & KNOX, 1989; McINTOSH & KEMP, 1991; MILNES et al., 1991; JACOMINE, 1974; BETTENAY & CHURCHWARD, 1974; AJMONE-MARSAN et al., 1994; MELO & SANTOS, 1996; SILVA et al., 1997; BOULET et al., 1998).

FORMAÇÃO DE HORIZONTES CIMENTADOS DOMINANTEMENTE POR SÍLICA

Duripãs, hardpans ou silcretos. Estudos da região semi-árida do oeste da Austrália (LITCHFIELD & MARBUTT, 1962), apoiados em observações micromorfológicas, mostraram que horizontes do tipo hardpans foram formados pela deposição de argila e sílica, sendo que a argila foi depositada primeiro e a sílica depois, em direção ao centro dos poros. Este estudo sugeriu ainda que o processo de formação dos hardpans está relacionado a períodos de inundação e de estiagem, favorecendo a dissolução e a precipitação da sílica. Trabalhos posteriores (CHARTRES, 1985), também na Austrália, apontaram a sílica amorfa como o agente cimentante principal.

Conforme FLACH et al. (1969), horizontes cimentados, tipo duripãs, foram desenvolvidos em superfícies muito antigas relacionadas com materiais de alto grau de intemperismo, no oeste dos Estados Unidos, bem como em superfícies mais recentes relacionadas às regiões desérticas nos estados do Arizona e Nevada. Estas condições ambientais indicaram que os cimentos de sílica foram derivados tanto a partir do intemperismo lento de feldspatos e minerais ferromagnesianos como a partir do intemperismo mais rápido de vidro vulcânico e de outros materiais amorfos. Este estudo evidenciou ainda que compostos amorfos de sílica, mesmo em pequenas quantidades, atuam como agentes cimentantes. Posteriormente, reportando-se à mesma região, FLACH et al. (1973) destacaram que a sílica, na forma de opala e calcedônia, constituiu o material cimentante responsável pelo endurecimento de duripãs.

Para SMITH & WHALLEY (1982), referindo-se a um complexo de *duricrust* nigeriano, a formação de um silcrete ocorreu por sucessivos eventos deposicionais de materiais contendo sílica amorfa. Estes autores também verificaram pequenos poros contendo megaquartzo e uma transição da sílica - aparentemente amorfa, calcedônia e formas microcristalinas - para os cristais de megaquartzo.

Segundo CHADWICK et al. (1987a, b), solos da região oeste dos Estados Unidos (Estado de Nevada) desenvolveram horizontes cimentados em função da iluviação de sílica e de carbonatos de cálcio. A sílica opalina foi observada nas frações finas da matriz, assim como na porosidade mais fina, ou formando pontes entre grãos da fração-areia. O carbonato de cálcio, por sua vez, verificou-se preenchendo poros de maior diâmetro. Na matriz com predomínio de frações grosseiras, tanto a sílica como o carbonato de cálcio foram observados preenchendo poros mais largos. Em ambos os casos a sílica se fez presente formando “coatings” em grãos de quartzo.

Conforme BLANK & FOSBERG (1991a), em estudos realizados também no oeste dos Estados Unidos, duripãs desenvolvidos no platô do sudoeste de Idaho, a partir de sedimentos eólicos e fragmentos basálticos, foram cimentados por carbonato de cálcio e por sílica na forma

de opala-A. Interpretou-se que a sílica liberada a partir da alteração de minerais primários e aluminossilicatos, migrou para a zona do duripã, via solução do solo, sendo proveniente, portanto, dos horizontes subjacentes. Entretanto, BLANK & FOSBERG (1991b), reportando-se aos duripãs da mesma região, afirmaram que a sílica secundária foi formada *in situ*.

Na Austrália, MILNES et al. (1991) observaram que silcretes e hardpans apresentam estruturas iluviais que refletem deposições de materiais clásticos e sílica secundária a partir da água de percolação. Nos silcretes aparecem vários estágios de formação da sílica, mas com predominância de quartzo microcristalino. Muitos estágios de dissolução, iluviação e deposição foram reconhecidos, em seguida à cristalização inicial do quartzo microcristalino. Nos hardpans, os resultados indicaram que durante a iluviação e deposição de minerais de argila houve a precipitação de opala-A. Conforme este estudo, a diferença principal entre silcretes e hardpans está relacionada ao material iluviado. Partículas de quartzo de tamanho da fração silte e macroquartzo secundário foram típicos dos silcretes, enquanto que materiais argilosos embebidos em materiais clásticos e opala-A tipificaram os hardpans. Os autores citados consideraram ainda que a formação de estruturas de iluviação, como as presentes nos silcretes e hardpans pedogenéticos, requerer períodos sazonais de umedecimento e secagem ou longos períodos de flutuações climáticas. Entretanto, reconheceram que faltam resultados de pesquisa para o entendimento destes eventos.

Segundo THIRY (1993), com base em estudos da bacia de Paris, as silicificações pedogenéticas desenvolveram-se em função de condições de clima ou períodos secos e úmidos alternados. Nos períodos úmidos, a sílica foi colocada em solução, e nos períodos secos as soluções concentraram-se por evaporação, assegurando a precipitação da sílica. Entretanto, esse autor considerou que a origem da sílica para formação de silicificações do tipo hardpan ainda não foi claramente estabelecida.

Conforme THIRY (1993), as silicificações pedogenéticas seguem os processos normais de formação dos solos e enquadram-se em dois tipos: (a) as quartzosas, que são formadas por quartzo microcristalino, e (b) aquelas formadas por opala impregnando materiais argilosos e óxidos de ferro preexistentes, comuns em horizontes do tipo hardpans. São, portanto, observações concordantes com as de MILNES et al. (1991).

Estudos micromorfológicos recentes, realizados em solos com horizontes cimentados da Austrália, mostraram aspectos convergentes e divergentes em relação aos agentes envolvidos na cimentação. HOLLINGSWORTH & FITZPATRICK (1994) apontaram a presença de compostos amorfos de sílica preenchendo poros, assim como camadas de silicatos orientadas formando pontes em grãos da fração silte, bem como a presença de óxidos de ferro, oticamente amorfos, embebendo grãos de quartzo da fração areia e silte. SULLIVAN (1994), por sua vez,

observou perda de calcita e preenchimento dos espaços porosos por compostos amorfos de sílica na formação de hardpans australianos. Por outro lado, resultados de CHARTRES & NORTON (1994) mostraram que duripãs da Austrália podem conter, além de sílica, grandes proporções de alumínio. Entretanto, as fontes destes agentes cimentantes são incertas. Sugeriram também que períodos sazonais secos e úmidos favoreceram a concentração de sílica e alumínio proveniente da solução do solo e que, em determinados casos, a lixiviação de horizontes subjacentes aos duripãs foi uma possível fonte dos elementos cimentantes.

Fragipãs. No que diz respeito aos fragipãs, existem várias teorias enfatizando condições de relevo, material de origem, clima, vegetação, bem como processos físicos, tentando explicar a gênese destes horizontes (FRANZMEIER et al., 1989). Entretanto, são teorias pouco esclarecedoras que, de modo geral, atribuem à sílica o papel principal da cimentação. Por outro lado, KARATHANASIS (1989) formula a hipótese de que compostos amorfos de aluminossilicatos são os agentes responsáveis pela cimentação de fragipãs, assim como também foram indicativas pesquisas recentes realizadas na região dos tabuleiros costeiros do Nordeste do Brasil (SILVA et al., 1997; BOULET et al., 1998; FILIZOLA et al., 2001). Nesta região, JACOMINE (1974) considerou que fenômenos físicos foram os principais fatores responsáveis pela gênese de fragipãs, mas levou em conta também que SiO_2 e Al_2O_3 “livres”, restrições de drenagem, perda de bases e elevação da acidez desempenharam papel importante na formação desses horizontes.

Conforme JAMES et al. (1995), as diversas hipóteses de formação dos fragipãs enquadram-se, de forma sintética, nas seguintes categorias: (1) empacotamento de grãos esqueléticos; (2) união ou estabelecimento de pontes entre partículas adensadas por argilas silicatadas; ou (3) cimentação das partículas de solo por óxidos de Al, Si, Fe, Mn, isoladamente ou de forma combinada.

Parte 2
ÁREAS DE ESTUDO, SOLOS SELECIONADOS E
MÉTODOS DE TRABALHO

CAPÍTULO 3 - Características gerais das áreas

A caracterização ambiental das áreas onde foram coletados os dados para os estudos de horizontes cimentados constitui o principal objetivo deste capítulo. As áreas selecionadas foram três, uma nos tabuleiros costeiros e duas na depressão sertaneja, entre os Estados de Alagoas e Pernambuco (Figura 3.1).

A caracterização ambiental destaca os seguintes pontos: (a) as paisagens (tabuleiros costeiros e depressão sertaneja) e relações solo-paisagem; (b) o clima; (c) a geologia; (d) a geomorfologia e o relevo; (e) a vegetação; (f) os solos que desenvolvem horizontes cimentados considerados como fragipãs e duripãs.

PAISAGENS E RELAÇÕES SOLO-PAISAGEM

Tabuleiros costeiros. A grande unidade de paisagem dos tabuleiros costeiros, onde predominam as florestas subperenifólias, limita-se a leste com a baixada litorânea e a oeste com rochas do embasamento cristalino. As cotas dos tabuleiros costeiros comumente situam-se na faixa de 60 a 200 m acima do nível do mar. Diversos vales cortam essa grande unidade de paisagem, em intervalos variados, fazendo a drenagem geral da região. Os vales normalmente atravessam os platôs no sentido perpendicular à orla marítima. Em algumas áreas, formam dissecamentos bastante profundos e atingem o embasamento de rochas cristalinas.

No topo dos tabuleiros, ocorrem diversos tipos de arranjo de solos. Existem grandes áreas com domínios de Argissolos Amarelos, com ou sem a presença de horizontes cimentados, tipo fragipã. Noutras, localizadas em bordas de vales ou onde os tabuleiros são mais estreitos (com maior dissecamento), dominam os Latossolos Amarelos ou solos intermediários entre Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos.

Uma feição importante no topo dos tabuleiros são as suaves depressões, isto é, pequenas áreas abaciadas onde geralmente dominam seqüências de solos com horizontes cimentados.

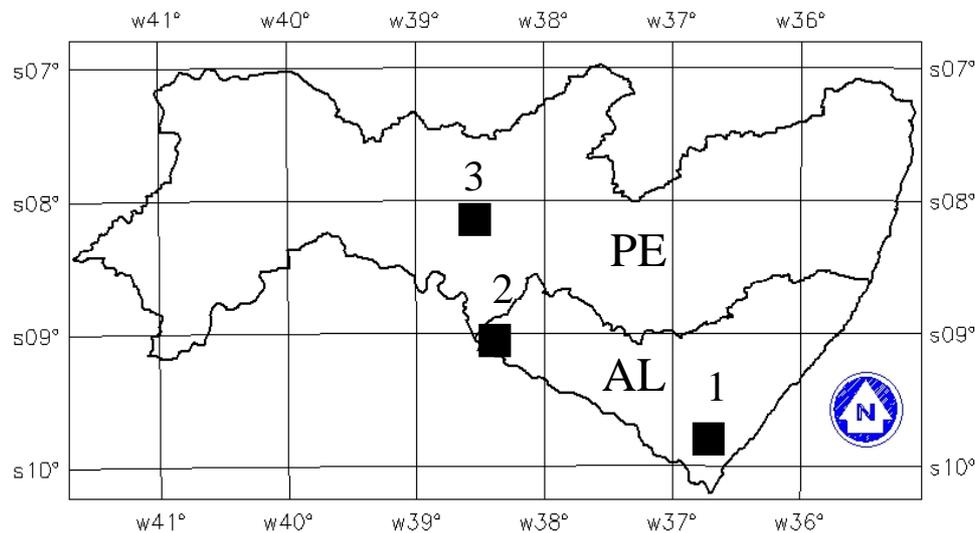


Figura 3.1 - Localização das áreas estudadas. 1: área dos tabuleiros costeiros no estado de Alagoas; 2: área da depressão sertaneja no Estado de Alagoas; e 3: área da depressão sertaneja no Estado de Pernambuco.

Nessas seqüências podem ser observados Argissolos Amarelos/Espodossolos, Argissolos Acinzentados/Espodossolos ou Argissolos Amarelos/Argissolos Acinzentados/Espodossolos. Ainda no topo dos tabuleiros, no contexto da região estudada, raramente ocorrem Plintossolos ou Neossolos Quartzarênicos.

Nas bordas das linhas de drenagem, no terço superior das encostas, onde comumente ocorrem Latossolos Amarelos e/ou Argissolos Amarelos intermediários para latossolos, é comum a presença de áreas com concreções ferruginosas. Porém, em posição de terço médio a inferior, em geral, ocorrem solos tipo Argissolos Amarelos, Argissolos Vermelho-Amarelos e, com menor freqüência, Latossolos Amarelos e Plintossolos. Com muito baixa expressão, também podem ocorrer Argissolos Amarelos com horizontes cimentados.

Depressão sertaneja. Nesta região, onde predominam as formações de caatinga mais secas, verificam-se extensas áreas de pediplanos com relevos planos a suavemente ondulados

contendo algumas partes com relevo pouco movimentado. Neste contexto, esparsadamente ocorrem áreas elevadas constituindo serras, serrotes e inselbergs.

Nas superfícies de pediplanos, são observadas extensas áreas com seqüências de solos contendo Planossolos, Neossolos Litólicos e Luvisolos. Estes solos ocorrem em diversas proporções, sendo as mudanças de uma classe para outra, normalmente, em curtas distâncias, às vezes em poucos metros. Outros padrões de área vigente nesse contexto de paisagem são as superfícies arenosas intimamente relacionadas com ambientes de rochas graníticas e similares. Nessas superfícies destacam-se solos da classe dos Neossolos Regolíticos comumente associados com solos das classes dos Planossolos e/ou Neossolos Litólicos. Nos Neossolos Regolíticos, assim como em Planossolos, é comum aparecerem horizontes cimentados em diversos graus.

Nas serras, serrotes e outros tipos de elevações residuais, comumente ocorrem Neossolos Litólicos, Argissolos Vermelho-Amarelos, Cambissolos e áreas significativas com afloramentos rochosos.

CLIMA

O clima é um dos fatores mais ativos no processo de intemperização das rochas e na formação dos solos. Neste estudo, a caracterização focaliza o regime de chuvas e de temperatura, assim como leva em conta informações de balanço hídrico. A caracterização teve como base dados vigentes em SUDENE (1990a, b), BRASIL (1983) e NIMER (1989).

Chuvas

Zona úmida costeira. As principais características desta zona, onde predominam as formações florestais, são: (1) precipitações médias anuais na faixa de 1.000 a 2.000 mm; (2) distribuição pluviométrica com um período chuvoso de março a agosto. O período de escassez de chuvas, inclusive com déficit hídrico, ocorre entre setembro e fevereiro (Figura 3.2 A e B). O trimestre mais chuvoso corresponde aos meses de maio, junho e julho; e o mais seco, aos meses de outubro, novembro e dezembro.

Zona da depressão sertaneja. É uma das zonas mais secas da região do semi-árido, pois abrange predominantemente o ambiente do sertão. Nesta zona, predominam as formações vegetais denominadas de caatinga hiperxerófila, por vezes englobando áreas com domínios da caatinga hipoxerófila. As chuvas, além de escassas, com uma média anual na faixa de 400 a 700 mm, ocorrem com grande irregularidade. O período das chuvas situa-se entre dezembro e maio, sendo o trimestre mais chuvoso nos meses de fevereiro, março e abril. Fica, portanto, a maior parte do ano em condições secas, com déficit hídrico muito acentuado (Figura 3.2 C e D).

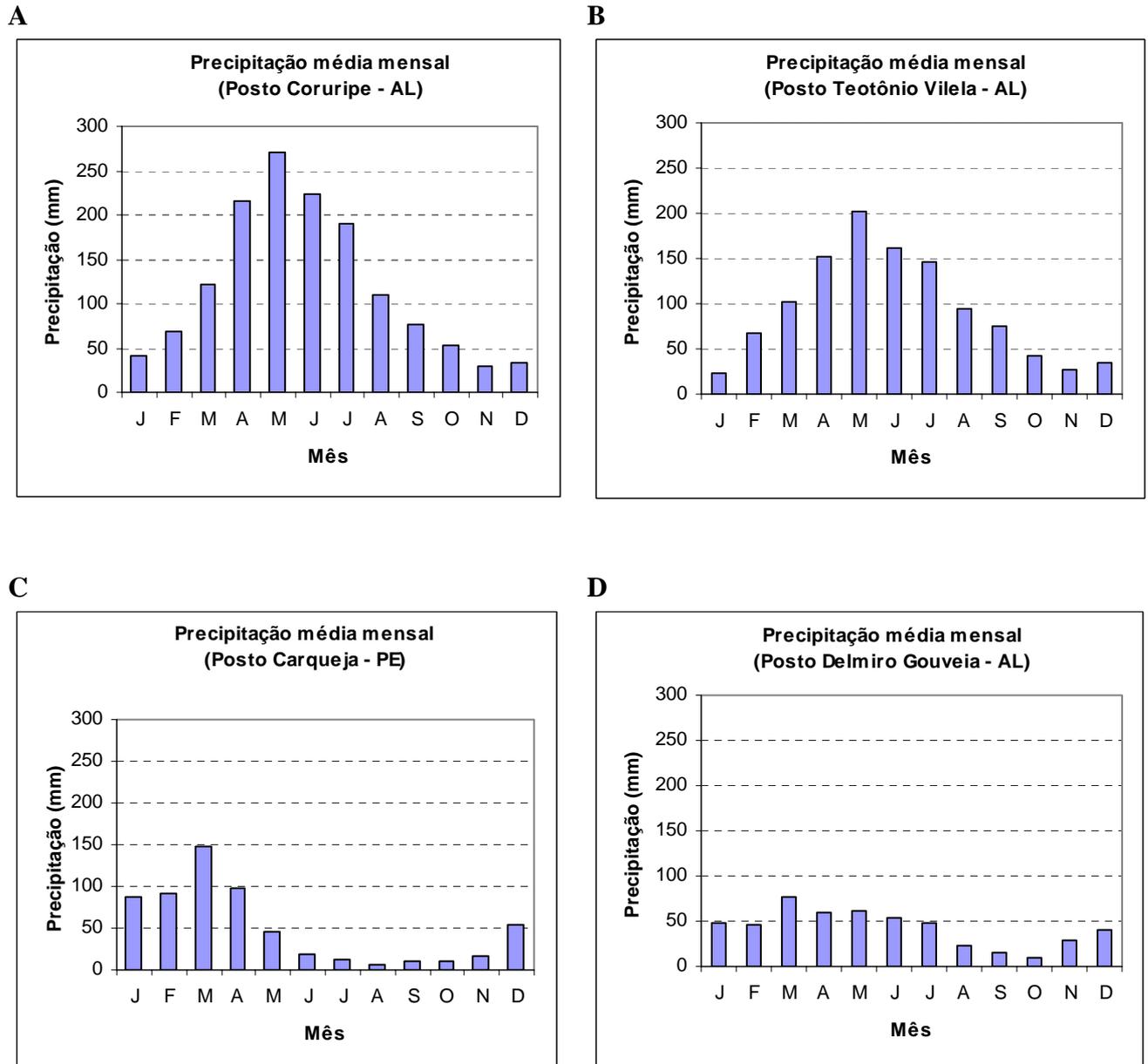


Figura 3.2 - Precipitação média mensal na zona úmida costeira, Estado de Alagoas (A e B) e na zona da depressão sertaneja, entre os Estados de Alagoas e Pernambuco (C e D). Período de observação: 47 anos no posto Coruripe (A); 23 anos no posto Teotônio Vilela (B); 22 anos no posto Carqueja (C); e 45 anos no posto Delmiro Gouveia (D).

Temperatura

Apesar das diferenças ambientais acentuadas entre a zona úmida costeira e a depressão sertaneja, as temperaturas médias anuais são relativamente similares. Na zona úmida costeira, a média situa-se em torno de 25 °C com uma pequena oscilação térmica, ao redor de 6 a 8 °C. Na

depressão sertaneja, a média gira em torno de 26 °C, tendo uma oscilação térmica na faixa de 6 a 12 °C.

Balanço hídrico

Zona úmida costeira. O balanço hídrico, isto é, a contabilidade da água disponível no solo, revela que mesmo na zona úmida costeira, onde as precipitações médias anuais são elevadas (1.000 a 2.000 mm), ocorrem épocas com déficit hídrico. Isto se deve ao regime de distribuição das chuvas e da condição de evapotranspiração potencial muito elevada, da ordem de 1.200 a 1.400 mm por ano. A deficiência hídrica varia na faixa de 100 a 350 mm e ocorre no período de novembro a fevereiro. Por outro lado, o excedente hídrico médio anual varia na faixa de 200 a 800 mm no período de março a agosto.

Zona da depressão sertaneja. Nesta zona, que é uma das mais secas do ambiente semi-árido (precipitação média anual na faixa de 400 a 700 mm), a evapotranspiração potencial atinge valores da ordem de 1.100 a 1.300 mm e, portanto, tem-se condições de déficit hídrico praticamente durante todo ano. Evidentemente que na época de ocorrência das pancadas de chuva mais intensas por certo ocorrem poucos dias com excedentes hídricos, o que em geral não é refletido pelas médias mensais.

GEOLOGIA

Em função das informações bibliográficas consultadas (DANTAS, 1980; BRASIL, 1972; BRASIL, 1983), bem como das observações de campo, foi elaborada uma esquematização da geologia das áreas estudadas (Quadro 3.1).

Terciário

Está representado pelo Grupo Barreiras, o qual se estende pela faixa sedimentar costeira paralelamente ao litoral. Limita-se do lado leste com os sedimentos quaternários da planície costeira e, do lado oeste, com rochas do Pré-Cambriano. Constitui os sedimentos que formam os tabuleiros costeiros, morfologicamente muito uniformes, porém com grande variação quanto à granulometria.

No Estado de Alagoas, os tabuleiros costeiros atingem uma largura máxima em torno de 80 km. Compreendem estratificações praticamente horizontais com sedimentos de natureza variada, desde areias até argilas e, por vezes, incluindo cascalhos, leito de seixos rolados e arenitos. Em camadas mais inferiores, são encontradas argilas de coloração arroxeadada e/ou cinzenta. Em camadas mais superiores, às vezes ocorrem concreções ferruginosas, especialmente nas bordas de vales.

Quadro 3.1 - Geologia e solos correlacionados nas áreas estudadas

PERÍODO	UNIDADE LITOESTRATIGRÁFICA	LITOLOGIA	SOLOS
Terciário	Grupo Barreiras	Argilas variegadas, arenitos e cascalhos	Latossolos, Argissolos, Espodossolos, Neossolos Quartzarênicos e Plintossolos.
Pré-Cambriano indiviso	Complexo Gnáissico-Migmatítico	Granitos, gnaisses, granodioritos e gabros.	Luvissolos, Planossolos, Cambissolos, Neossolos Litólicos, Neossolos Regolíticos e Argissolos
	Complexo Migmatítico-Granitóide	Rochas Granitizadas e migmatitos	Luvissolos, Planossolos, Cambissolos, Neossolos Litólicos, Neossolos Regolíticos e Argissolos

Os principais solos desenvolvidos a partir dos sedimentos do Grupo Barreiras são os Argissolos Amarelos, Latossolos Amarelos, Argissolos Acinzentados, Espodossolos e em menor proporção Neossolos Quartzarênicos, Argissolos Vermelho-Amarelos e Plintossolos. Entre estes, os solos que podem apresentar horizontes cimentados são os Argissolos Amarelos, Argissolos Acinzentados e Espodossolos.

Pré-Cambriano indiviso

As áreas estudadas estão inseridas no contexto das geologias representadas pelos Complexos Gnáissico-Migmatítico e Migmatítico-Granitóide.

Complexo Gnáissico-Migmatítico. Esta unidade do Pré-Cambriano é considerada a de maior representação no Estado de Pernambuco. Compreende principalmente granitos, granodioritos, gnaisses e gabros. Estende-se numa faixa contínua, desde as proximidades norte e sudoeste de Arcoverde até o extremo oeste do Estado. Faz limite com o Complexo Migmatítico-Granitóide através da falha transcorrente que constitui o Lineamento Pernambuco. A partir das rochas relacionadas a este complexo, os principais solos desenvolvidos são Luvissolos, Planossolos, Neossolos Litólicos, Cambissolos, Neossolos Regolíticos e Argissolos Vermelho-Amarelos.

Complexo Migmatítico-Granitóide. Sua ocorrência está relacionada ao Maciço Pernambuco-Alagoas e ao Maciço de Itaíba. Estende-se na porção sul oriental do Estado de Pernambuco, passando pela região da bacia de Jatobá, onde se encontra recoberto pelos sedimentos paleomesozóicos da referida Bacia. Litologicamente, está representado por rochas granitizadas com predominância de migmatitos, mas ocorrendo também leptinitos, calcários

cristalinos, diques irregulares de granito róseo, granodiorito, tonalito e veios de pegmatito e aplito. Os principais solos desenvolvidos a partir das rochas deste Complexo, são como no caso anterior, Luvisolos, Planossolos, Neossolos Litólicos, Cambissolos, Neossolos Regolíticos e Argissolos Vermelho-Amarelos.

Especificamente, onde se fazem presentes as associações de Neossolos Regolíticos e Planossolos com horizontes cimentados, predominantemente ocorrem rochas graníticas.

GEOMORFOLOGIA E RELEVO

A geomorfologia e o relevo (BRASIL, 1983; BRASIL, 1972; EMBRAPA, 1975) das áreas estudadas podem ser compartimentados nas seguintes estruturas: (a) os baixos platôs costeiros e (2) as superfícies de pediplanos com as elevações residuais.

Os baixos platôs costeiros. Compreendem áreas ocupadas pelos sedimentos do Grupo Barreiras, referidos ao Período Terciário, assentados predominantemente sobre o embasamento cristalino. Em alguns trechos os baixos platôs costeiros (tabuleiros) são dissecados por vales profundos onde é possível identificar o embasamento de rochas cristalinas. Na região de estudo, localizada no litoral-sul do Estado de Alagoas, os tabuleiros são muito extensos e atingem uma largura máxima na faixa de 80 km. Em geral, limitam-se a leste pela baixada litorânea, na maioria das vezes em forma de falésias (escarpas), e a oeste com o relevo pouco movimentado ou movimentado correspondentes aos níveis cristalinos.

O relevo é predominantemente plano, mas varia de plano a suave ondulado, com declives de 0 a 6% e altitudes com cotas na faixa de 60 a 200 metros acima do nível do mar. Nos locais onde os tabuleiros são cortados por linhas de drenagem, o relevo pode variar de suave ondulado a forte ondulado e, às vezes, com trechos em forma de escarpas, particularmente no terço superior das encostas dos vales.

Superfícies de pediplanos com elevações residuais. Esta ampla superfície de pediplanos, relacionada à região da depressão sertaneja, apresenta-se ligeiramente inclinada na direção da calha do rio São Francisco, com relevo predominantemente plano a suave ondulado, declives da ordem de 1 a 8% e altitudes na faixa de 300 a 500 m. Inclui, também, áreas menos extensas com ondulações mais acentuadas, com declives na faixa de 8 a 30%.

No contexto dessas superfícies de pediplanação, esparsadamente ocorrem serras, serrotes e inselbergs com altitudes variando na faixa de 300 a 900 m.

VEGETAÇÃO

As principais fases de vegetação do ambiente dos tabuleiros costeiros e da depressão sertaneja, nas áreas onde foram amostrados os solos, constam no esquema apresentado em seguida. A caracterização teve como base os dados vigentes em BRASIL (1972), EMBRAPA (1975) e em observações diretas campo.

ESQUEMA DA VEGETAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

Florestas	Floresta subperenifólia Floresta subcaducifólia
Cerrado	Cerrado subperenifólio
Caatingas	Caatinga hiperxerófila Caatinga hipoxerófila

Floresta Subperenifólia. É, sem dúvida, uma das principais formações vegetais desenvolvidas na zona úmida costeira, particularmente no contexto dos tabuleiros costeiros. Engloba espécies vegetais de grande porte, com 20 a 30 metros de altura, sendo a densidade vegetal elevada quando comparada, por exemplo, com a floresta perenifólia de restinga.

Em função da pressão dos desmatamentos para dar lugar principalmente à cana-de-açúcar, e considerando também a extração de madeiras, a floresta da região atualmente encontra-se praticamente toda devastada.

As espécies mais comuns que compõem o extrato arbóreo são as seguintes: Parkia pendula Benth. (visgueiro), Bowdichia virgilioides H. B. K. (sucupira), Plathymenia foliolosa Benth. (amarelo), Cecropia sp. (imbaúba), Byrsonima sericea DC. (murici-da-mata), Manilkara salzmanni (A.DC. Lam) (maçaranduba) e Hymenaea spp. (jatobá).

No contexto da zona úmida costeira, esta formação vegetal está relacionada sobretudo com as áreas onde ocorrem Latossolos Amarelos, Argissolos Amarelos, Argissolos Acinzentados e, por vezes, em áreas com Espodossolos.

Floresta Subcaducifólia. Esta formação florestal distribui-se nas partes relativamente mais secas do ambiente dos tabuleiros costeiros, isto é, nas partes mais afastadas da linha do litoral. É uma vegetação com porte ligeiramente menos exuberante em relação à floresta

subperenifolia (em torno de 20 metros), menos densa, por vezes, apresentando algumas espécies espinhosas. Algumas das espécies perdem parte das folhas na estação seca. Entretanto, na estação chuvosa sua fitofisionomia florística pode confundir-se com a da floresta subperenifolia.

As espécies mais frequentes são: Tabebuia chrysotricha (Mart. Ex-DC.) Standley (pau-d'arco-amarelo), Sclerolobium densiflorum Benth. (ingá-de-porco), Plathymenia foliolosa Benth. (amarelo), Manilkara salzmanni (A.DC. Lam.) (maçaranduba), Pithecolobium polycephalum Benth. (camondongo), Bowdichia virgilioides H.B.K. (sucupira), Cordia trichotoma (Vell.) Arrab. Ex Steud. (frei Jorge), Syagrus coronata (Mart.) Becc. (ouricuri), Thyrsodium schomburgkianum Benth. (Caboatã-de-leite) e Ingá subnuda Salzm. ex Benth. (ingazeiro).

Esta formação está relacionada com áreas onde ocorrem Latossolos Amarelos, Latossolos Vermelho-Amarelos, Argissolos Amarelos e Argissolos Vermelho-Amarelos.

Cerrado subperenifólio. São formações vegetais menos densas que as florestas e que possuem uma fitofisionomia florística bem característica, constituída por espécies de porte arbóreo-arbustivo ou arbustivo com substrato rasteiro de gramíneas e ciperáceas.

Apresentam porte de 3 a 4 metros, caracterizando-se por caules tortuosos, esgalhamento baixo, casca espessa e fendilhada, copas irregulares, folhas grandes e grossas, às vezes coriáceas, sendo normalmente desprovidos de espinhos e acúleos.

Como principais espécies, destacam-se: Curatella americana L. (lixeira ou cajueiro brabo), Byrsonima cidoniaefolia Juss. (murici-do-tabuleiro), Anacardium occidentale L. (cajueiro), Hancornia speciosa Gomes (mangabeira) e Miconia ferruginata DC. (apaga-fogo).

Esta formação vegetal restringe-se a áreas localizadas no litoral sul do Estado de Alagoas, onde ocorrem solos como Argissolos Amarelos, Argissolos Acinzentados, Espodosolos e, em baixas proporções, Plintossolos e Neossolos Quartzarênicos.

Caatinga hiperxerófila. É a vegetação característica da região semi-árida na zona fisiográfica do Sertão. Apresenta grau de xerofitismo mais acentuado em relação à caatinga hipoxerófila (a fase de caatinga mais úmida) e está relacionada com áreas de maior irregularidade de chuvas.

Embora em alguns setores esta vegetação seja encontrada com porte arbóreo, é uma formação tipicamente mais seca, rica em Aspidosperma pyriforme Mart. (pereiro) e Pilocereus gounellei Webber (xique-xique). Estas espécies e outras como Cnidocolus phyllacanthus (Muell. Arg.) Pax. & K. Hoffm. (favela) e Calliandra depauperata Benth. (carqueja), são as que mais tipificam a caatinga hiperxerófila.

Os solos típicos do ambiente de domínio desta formação vegetal são Neossolos Litólicos, Planossolos, Luvisolos e Neossolos Regolíticos.

Caatinga hipoxerófila. É uma formação vegetal que apresenta xerofitismo menos acentuado em relação à caatinga hiperxerófila. Situa-se em áreas menos secas, indo até os limites com as formações florestais propriamente ditas. Na zona do Sertão, relaciona-se com áreas de serras mais elevadas.

A grande maioria das espécies da caatinga hipoxerófila também são comuns à caatinga hiperxerófila. No entanto, algumas palmeiras como ouricuri (*Syagrus* spp.), conforme observações de campo, são indicadoras de ambientes mais úmidos do que aqueles onde domina a caatinga hiperxerófila e, portanto, servem como critério para diferenciar as fases de caatinga. Os solos típicos do ambiente de domínio desta formação vegetal são, como no caso anterior, Neossolos Litólicos, Planossolos, Luvisolos e Neossolos Regolíticos.

SOLOS QUE DESENVOLVEM HORIZONTES CIMENTADOS CONSIDERADOS COMO FRAGIPÃS E DURIPÃS

Os principais solos que apresentam horizontes cimentados considerados como fragipãs e duripãs nas áreas de estudo são:

A) Na zona úmida costeira (tabuleiros):

- Argissolos Amarelos;
- Argissolos Acinzentados;
- Espodossolos;

B) Na depressão sertaneja:

- Neossolos Regolíticos;
- Planossolos.

A caracterização que se segue teve como base a experiência de campo e dados disponíveis em BRASIL (1972), BRASIL (1983), EMBRAPA (1975), EMBRAPA (1999) e OLIVEIRA et al. (1992).

Argissolos Amarelos

Os solos desta classe apresentam acentuada diferença no conteúdo de argila entre o horizonte superficial A e o de subsuperfície Bt. A cor do horizonte diagnóstico subsuperficial, que é o horizonte de acumulação de argila, tipicamente é amarelada. Neste horizonte, os teores de ferro geralmente são baixos, quase sempre inferiores a 70g/kg de solo, com amplo predomínio do óxido de ferro goethita. As cores mais frequentes ocorrem no matiz 10YR com valor e croma maiores que 4. Menos frequentemente ocorrem no matiz 7,5YR com valor e croma iguais ou

maiores que 5, e raramente nos matizes 2,5Y e 5Y com cores amareladas. Em vários casos, o horizonte Bt apresenta-se com mosqueamentos, podendo ou não conter plintita.

São solos normalmente muito profundos, com seqüência de horizontes do tipo A, AB ou BA, Bt; A, AB ou BA, Bt, Btx; A, E, Bt; A, Bt, Bw; etc. A textura entre os horizontes A e Bt varia desde arenosa/média até arenosa/muito argilosa. O grau de desenvolvimento das estruturas do horizonte Bt tipicamente é fraco, em blocos subangulares, com tamanho pequeno a médio. Deve-se lembrar que muitos desses solos, no estado seco, são coesos, especialmente na parte mais superficial do horizonte Bt. Entretanto, ao serem umedecidos, tornam-se relativamente friáveis ou no máximo firmes, exceto nas partes com horizontes cimentados.

Em geral são forte a moderadamente ácidos, com variação do pH em água de 4,3 a 5,3 e muito dessaturados de bases (menos de 1cmol_c/kg de solo no horizonte B e não ultrapassando os 2 cmol_c/kg de solo no horizonte superficial A). São, portanto, solos muito intemperizados. Ocorrem em áreas de domínio das florestas subperenifólia, subcaducifólia, bem como em ambientes de cerrado, atualmente constituindo áreas ocupadas pela cultura da cana-de-açúcar.

Argissolos Acinzentados

São solos que apresentam acentuada diferença no conteúdo de argila entre o horizonte superficial A e o de subsuperfície Bt. Em geral compreendem horizontes cimentados. Estes, quando presentes, são responsáveis pelas maiores restrições de drenagem em relação aos Argissolos Amarelos. Por isso, processos de óxido-redução continuam bastante ativos nos Argissolos Acinzentados, sobretudo devido às restrições de drenagem.

O horizonte B textural (Bt) tipicamente apresenta-se com uma coloração acinzentada. Nele, os teores de ferro de modo geral são baixos, quase sempre inferiores a 50 g/kg. As cores acinzentadas, tanto no horizonte A como no horizonte B textural (Bt), ocorrem principalmente no matiz 10YR, com valor 3 ou superior e croma menor ou igual a 3. Menos frequentemente ocorrem no matiz 2,5Y, com valores entre 3 e 6 e cromas menores que 4, excetuando-se a cor preta. São solos com drenagem moderada a imperfeita e, em vários casos, apresentam mosqueamentos no horizonte Bt, podendo ou não conter plintita. As estruturas apresentam desenvolvimento fraco, em blocos subangulares, com tamanho pequeno a médio, mas em geral o aspecto que se observa é o maciço. No estado seco, muitos desses solos são coesos, mas ao serem umedecidos, tornam-se friáveis, exceto nas partes com horizontes cimentados onde a consistência varia de firme a extremamente firme.

Em geral, são solos profundos, com seqüência de horizontes A, E, Bt, Btf, Btx, Btxm e/ou Bm; ou A, Bt, BC, entre outras. O horizonte superficial A é do tipo moderado, com textura geralmente arenosa a média. Em subsuperfície, a textura do horizonte Bt comumente varia na

faixa média a argilosa. São solos fortemente ácidos, extremamente dessaturados de bases, com valores de cálcio e magnésio trocáveis, em geral, menores que 0,5 cmolc/kg de solo. Em consequência, são solos considerados muito intemperizados e estão relacionados com ambientes da floresta subperenifólia ou transição para o cerrado.

Espodosolos

São solos minerais, tipicamente arenosos, não hidromórficos ou hidromórficos com horizonte B espódico, dentro de 400 cm da superfície do solo. O horizonte B espódico em geral é precedido de horizonte E alábico e raramente em seqüência a um horizonte A.

Geralmente são solos profundos a muito profundos, com seqüência de horizonte do tipo A, E, Bh, Bhs ou Bs; A, E, Bhsm, Bsm ou Bm; A, E, Bsx; Bx, etc. A presença de horizontes com cimentação forte, do tipo Bsm, Bhsm ou Bm, é típica dos Espodosolos do ambiente dos tabuleiros costeiros.

O horizonte superficial A é comumente moderado com espessura variável na faixa de 10 a 30 cm. Apresenta cores com padrão cinzento muito escuro ou mesmo preto, no matiz 10YR, com valor de 2 a 6 e croma de 1 a 2. A textura mais freqüente é areia ou areia-franca, podendo às vezes ocorrer com textura franco-arenosa. A estrutura normalmente ocorre na forma de grãos simples ou fracamente desenvolvida em pequenos blocos subangulares e granulares. A consistência, no solo seco, pode ser macia ou solta, passando a muito friável, quando no material úmido, e sendo não plástica e não pegajosa no solo molhado. A transição normalmente é clara ou gradual, com topografia plana, na passagem para o horizonte subjacente.

O horizonte E (eluvial) apresenta espessura bastante variável, mas normalmente na faixa de 50 a 200 cm. A cor é bem mais clara em relação ao horizonte A. No estado úmido, pode ser do tipo bruno-acinzentado, cinzento-brunado-claro, cinzento e cinzento-claro, até praticamente branco, no matiz 10YR, com valor de 5 a 8 e croma de 1 a 5. A textura é tipicamente arenosa e a estrutura normalmente ocorre em grãos simples. A consistência do solo seco é macia ou solta, passando a muito friável ou solta no estado úmido e não plástica e não pegajosa no estado molhado. A transição entre os horizontes E e B espódico usualmente é abrupta e plana.

O horizonte subsuperficial B espódico, tipo Bh ou Bhs, possui espessura variando normalmente entre 4 e 50 cm. A cor, para o solo úmido, pode ser do tipo bruno-avermelhado-escuro, bruno-escuro e amarelo-brunado. A textura mais freqüente é do tipo areia ou areia-franca, mas ocorrendo casos na faixa média. As estruturas são muito variadas, podendo ser fraca pequena a média, blocos subangulares ou maciça muito coesa ou ainda grãos simples. A consistência, com o solo seco, pode ser dura, macia ou solta. No estado úmido varia de friável a

firme, e no material molhado normalmente é não plástica e não pegajosa. A transição para os horizontes subjacentes (Bhm, Bhsm ou Bm) normalmente é abrupta e ondulada.

Os horizontes Bhm, Bhsm, ou Bm ocorrem com maior frequência em profundidades de 80 a 200 cm, tendo espessuras muito variadas. A cor, para o solo úmido, é muito diversificada. Pode ser do tipo bruno-vermelho-escuro ou claro, bruno-avermelhado, vermelho-amarelado, amarelo-avermelhado, bruno e bruno-amarelado, amarelo-brunado, com matiz entre 2,5YR e 10YR. O horizonte Bm, quando presente, normalmente mostra cores claras ou acinzentadas. A textura varia na faixa de arenosa a média e a estrutura é comumente maciça coesa a extremamente coesa, podendo ser também do tipo fraca pequena a grande laminar. No estado seco, a consistência é extremamente dura; no estado úmido, varia de extremamente firme a muito firme; e no material molhado, normalmente é não plástica e não pegajosa.

São solos com drenagem rápida na superfície, mas podendo ser impedida em profundidade, especialmente quando o horizonte espódico é do tipo cimentado e contínuo. Neste caso, o lençol freático pode se tornar elevado no período chuvoso, impondo condições hidromórficas aos solos. Com relação à granulometria, merece ser observado que a dominância é da fração-areia, quase sempre ultrapassando 90%, principalmente nos horizontes A e E.

Quimicamente, são solos muito dessaturados de bases e apresentam reação de pH mais frequente na faixa de 4 a 5,5. A capacidade de troca de cátions fica quase restrita à disponibilidade das frações orgânicas e óxidos e hidróxidos associados.

Neossolos Regolíticos

A classe dos Neossolos Regolíticos caracteriza-se pela presença de solos com textura arenosa a média, com teores de argila normalmente entre 5 a 15% e de silte na faixa de 10 a 20%, bem como por apresentar uma pequena variação do conteúdo de argila ao longo do perfil. Em geral, a classe textural areia-franca é a mais dominante. Quando abrangem a faixa de textura média, normalmente compreendem a classe areia-franca nos horizontes mais superficiais. Em raros casos, podem atingir a textura franco-argiloarenosa. Na composição das frações granulométricas, pode haver presença de cascalhos em quantidades diversas, de modo que a textura pode ser com cascalho ou cascalhenta.

Apresentam seqüência de horizontes comumente do tipo A, C, Cr, R; A, Cx, R; etc. Em casos mais raros, ocorrem seqüências do tipo A, C, Cm, R. Os horizontes Cx e Cm, quando presentes, normalmente são maciços e duros a extremamente duros, conforme o nível de cimentação. Especialmente nos Neossolos Regolíticos com horizonte Cm, as mudanças de consistência são abruptas entre as partes cimentadas e as não-cimentadas e se não forem

examinados cuidadosamente, podem ser confundidos com as mudanças de consistência e textura que ocorrem em solos da classe dos Planossolos.

Em sua grande parte estão presentes em paisagens com relevo plano a suave ondulado. Quase sempre são fortemente drenados, exceto os que apresentam horizontes cimentados. As cores, na sua grande maioria, são claras ou acinzentadas, especialmente quando observadas com o solo no estado seco. Dominantemente ocorrem no matiz 10YR. Grãos simples e estruturas em blocos subangulares, muito pequenos e pequenos, são os aspectos estruturais representativos desses solos. Os horizontes que apresentam cimentações bem desenvolvidas normalmente são maciços.

Os Neossolos Regolíticos são solos normalmente pouco profundos a profundos, com espessura mínima de 50 cm. Geologicamente estão relacionados com rochas graníticas e similares. Em alguns casos podem ser confundidos com Neossolos Quartzarênicos, mas deles se diferenciam por apresentar nas frações grosseiras (areia e/ou cascalho), teores acima de 4% de minerais primários facilmente intemperizáveis, como plagioclásios e biotita.

Nos ambientes onde a cobertura vegetal dominante é a caatinga hiperxerófila, há uma ligeira predominância de solos eutróficos sobre os distróficos, tendo reação de pH moderada a fortemente ácida, com valores na faixa de 4 e 6,5.

Por serem solos desenvolvidos no contexto do ambiente semi-árido, alguns ocorrem com saturação por sódio acima de 8%, caracterizando solos solódicos ou até mesmos sódicos.

Planossolos

São solos minerais imperfeitamente ou mal drenados, tendo como característica distintiva a presença de um horizonte B plânico (modalidade especial de horizonte Bt), precedido de uma mudança textural abrupta e subjacente a um horizonte (A) ou (A+E). O horizonte B plânico tem como características marcantes: (1) cores acinzentadas em reflexo as condições de deficiência de drenagem e (2) os tipos de estruturas duras a extremamente duras que podem ser prismáticas, colunares, em blocos, maciças ou combinações dessas formas. Além dessas feições, o horizonte B plânico também caracteriza-se por apresentar estruturas que podem compreender materiais com diversos níveis de cimentação.

As seqüências de horizontes mais comuns são do tipo A, Bt, C; A, E, Bt, C; A, Btn, Cn; A, E, Btnz, Cnz; A, Btxn, Cn; etc.

Na superfície (horizonte A ou A + E), as cores são claras, comumente no matiz 10YR, com valor maior que 4 e croma de 2 a 4. A textura varia de franco-arenosa a areia-franca e as estruturas apresentam grau de desenvolvimento fraco, em blocos subangulares, pequenas a médias ou maciças. A consistência, no estado seco, varia desde ligeiramente dura a muito dura,

passando a friável ou muito friável no estado úmido. No estado molhado, varia de não plástica a ligeiramente plástica e de não pegajosa a ligeiramente pegajosa.

O horizonte B plânico, com profundidade média variando de 15 a 50 cm, apresenta comumente cores acinzentadas ou bruno-acinzentadas ou cores variegadas contendo partes acinzentadas. A textura varia, com maior frequência, na faixa de franco-argiloarenosa até argila. As estruturas podem apresentar grau de desenvolvimento fraco a moderado, tamanho médio a grande, tipo prismática, composta ou não de blocos angulares e subangulares. A consistência normalmente é extremamente dura, firme, plástica e pegajosa ou muito plástica e muito pegajosa, respectivamente nos estados seco, úmido e molhado.

O horizonte C apresenta textura similar ou menos argilosa que a do horizonte B plânico e normalmente contém muitos materiais primários facilmente decomponíveis. As cores, em geral, guardam semelhanças com as do B plânico.

São solos tipicamente com deficiência de drenagem em função da baixa permeabilidade do horizonte subsuperficial B plânico.

Quanto às propriedades químicas, apresentam reação de pH desde moderadamente ácida até moderadamente alcalina. Nos horizontes superficiais (A ou A+E), são comuns valores de pH de 5,5 a 6,5; e em subsuperfície, no B plânico e C, de 6,0 a 8,4. A soma de bases varia de 3,0 a 6,0 cmol_c/kg de solo, nos horizontes superficiais, e de 12 a 25 cmol_c/kg de solo, no B plânico e C.

A saturação por sódio é muito variada, em geral na faixa de 3 a 25% nos horizontes B plânico e/ou C. A condutividade elétrica também é muito variada, sendo mais comum valores menores que 2,0 dS/m a 25 °C nos horizontes superficiais e na faixa de 1,0 a 5,0 dS/m a 25 °C nos horizontes B plânico e/ou C.

Os valores para capacidade de troca de cátions em geral são maiores que 17 cmol_c/kg de solo nos horizontes B plânico e C. A saturação de bases apresenta valores médios a altos em todo o perfil, variando de 50 a 100%.

CAPÍTULO 4 - Materiais e métodos

SOLOS ESTUDADOS

Os horizontes cimentados considerados como fragipãs e duripãs foram estudados em Argissolos Amarelos, Argissolos Acinzentados e Espodossolos dos tabuleiros costeiros e em Neossolos Regolíticos e Planossolos da depressão sertaneja, nos Estados de Alagoas e Pernambuco. No total foram selecionados dezesseis perfis com horizontes cimentados (P1 a P16) e um (P17) livre de problemas de cimentação e/ou coesão, para fins comparativos (Figura 4.1). Treze perfis foram localizados na zona dos tabuleiros costeiros (oito de Espodossolos, três de Argissolos Acinzentados e dois de Argissolos Amarelos) e três na zona da depressão sertaneja (dois perfis de Neossolos Regolíticos e um da classe dos Planossolos). O perfil comparativo, de Latossolo Amarelo (perfil complementar P17), foi selecionado na Chapada do Araripe. A relação dos solos com horizontes cimentados e ambientes de estudo constam no quadro 4.1.

O conhecimento da região e a disponibilidade de mapas pedológicos em diversas escalas foram fatores decisivos para a escolha dos locais de estudo. Em virtude da disponibilidade de mapas pedológicos detalhados na região dos tabuleiros costeiros e do apoio logístico fornecido por Empresas locais (Usina Coruripe e Usina Seresta), optou-se pelo estudo mais detalhado de horizontes cimentados em solos dessa região. Os mapas permitiram selecionar diversas áreas em suaves depressões, onde predominam solos com horizontes cimentados. Nas depressões selecionadas, foram descritos e coletados perfis individualizados, assim como orientados em seqüências de solos, contemplando transformações laterais e verticais de horizontes cimentados. Em termos de transformações laterais, estudaram-se duas seqüências de solos. A primeira foi uma passagem do tipo Argissolos Amarelos/Espodossolos (local de P11), e a segunda, uma passagem do tipo Argissolos Acinzentados/Espodossolos (local de P12 e P13). Também foi selecionado um corte profundo de estrada (5 a 10 m de profundidade) através de uma suave depressão, especialmente visando o estudo de variações verticais de horizontes cimentados em Espodossolos (local do perfil complementar P16).

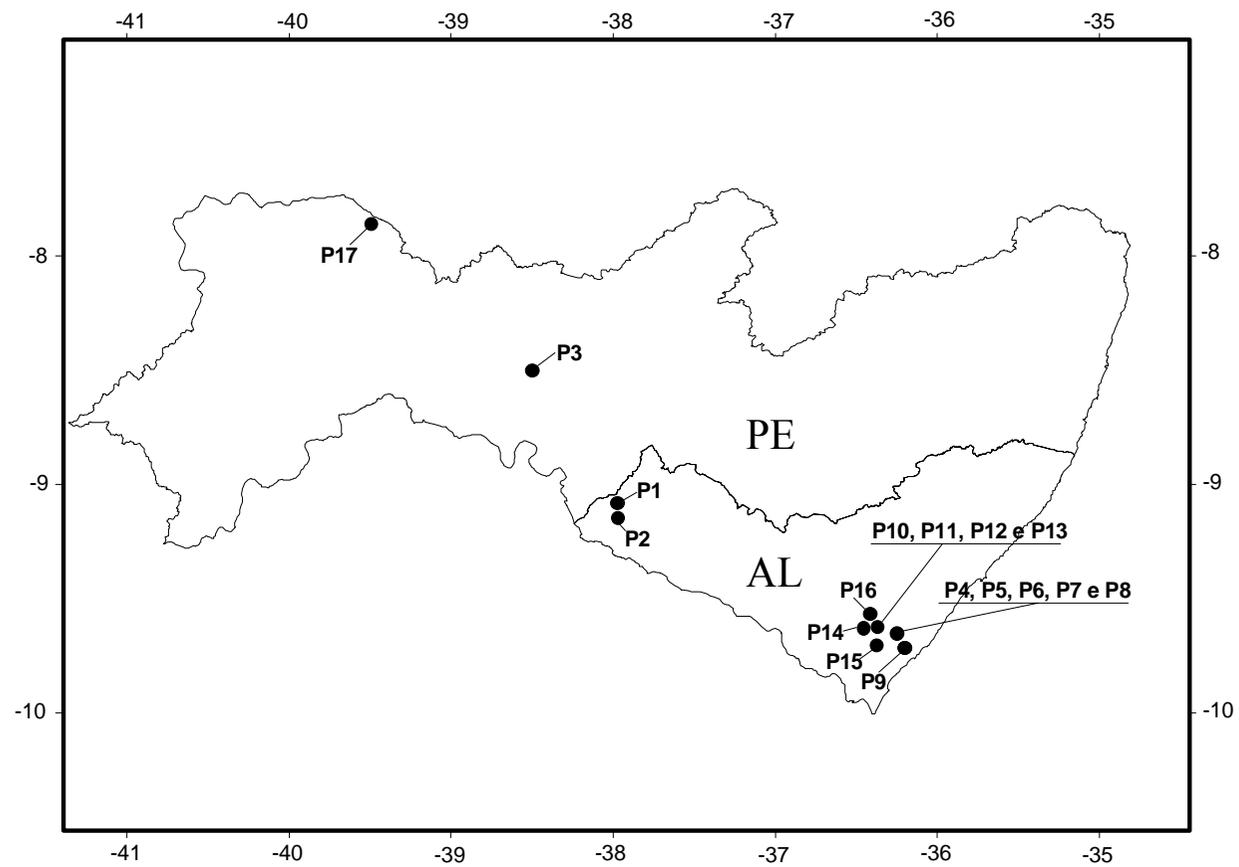


Figura 4.1 - Localização dos perfis de solos estudados nos Estados de Alagoas e Pernambuco.

Quadro 4.1 - Solos selecionados com horizontes cimentados e condições ambientais

SOLOS E PERFIS COLETADOS	DRENAGEM	GEOLOGIA	CLIMA
ESPODOSSOLOS Perfis: P5, P9, P10, P12 e P16 (complementar)	Moderada a imperfeita	Sedimentos do Grupo Barreiras	Tropical úmido (zona do Litoral)
ESPODOSSOLOS Perfis: P6, P14 e P15	Imperfeita a mal		
ARGISSOLOS AMARELOS Perfis: P7 e P11	Moderada		
ARGISSOLOS ACINZENTADOS Perfis: P4, P8 e P13	Moderada a imperfeita		
NEOSSOLOS REGOLÍTICOS Perfis: P1 e P2	imperfeita	Rochas graníticas do Pré-Cambriano	Semi-árido (Zona do Sertão)
PLANOSSOLOS Perfil: P3	imperfeita		

DESCRIÇÃO E AMOSTRAGEM DE SOLOS

As descrições morfológicas e coletas de perfis de solos no campo, incluindo amostras deformadas e não-deformadas, foram realizados conforme LEMOS & SANTOS (1996), EMBRAPA (1988 e 1999), MURPHY (1986) e BULLOCK et al. (1985). A caracterização morfológica constou fundamentalmente do diagnóstico de horizontes, particularmente dos cimentados. Cada horizonte foi descrito em termos de espessura, cor, textura, estrutura, consistência, transição entre horizontes, porosidade, presença de raízes e outras observações consideradas relevantes. Em complementação, foram anotadas diversas informações ambientais, destacando-se a situação topográfica, a geologia e o material de origem, pedregosidade e rochiosidade, altitude, drenagem local e regional, vegetação predominante e uso agrícola.

Fechando as descrições de campo, cada solo foi classificado taxonomicamente, tendo como base o conjunto de características morfológicas.

PREPARO E PRÉ-TRATAMENTO DE AMOSTRAS DE SOLO

Inicialmente todas as amostras coletadas no campo passaram pelo processo de secagem ao ar, para depois serem destinadas aos diversos processos de preparo conforme as necessidades analíticas. As amostras deformadas foram destorroadas e passadas em peneira de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA) segundo procedimentos adotados no manual de métodos de análise de solos (EMBRAPA, 1997). A partir da TFSA, preparou-se o pó, de amostras selecionadas, com uma granulometria em torno de 200 mesh, visando-se as determinações pelas técnicas de fluorescência de raios-X (FRX) (MORI et al., 1999) e por espectrometria de emissão atômica por plasma induzido acoplado (ICP-AES) (JANASI et al., 1995). Para as determinações mineralógicas por difração de raios-X (DRX), o pó foi preparado manualmente com o uso de almofariz de ágata. Para as análises da composição química total e de fases amorfas e/ou de baixo grau de cristalinidade, o pó foi obtido com o uso de moinho de carbeto de tungstênio. O preparo foi realizado conforme procedimentos adotados no laboratório de tratamento de amostras (LTA) do IGc/USP.

Pré-tratamento de amostras deformadas. Constou, basicamente, da eliminação da matéria orgânica (EMBRAPA, 1997) e de fases amorfas e/ou de baixo grau de cristalinidade (ROSS & WANG, 1993; KODAMA & ROSS, 1991). A eliminação da matéria orgânica foi um procedimento adotado nas amostras de TFSA destinadas às análises granulométricas pelo método da pipeta e em amostras selecionadas para extração e análises de fases amorfas e/ou de baixo grau de cristalinidade, assim como para estudos mineralógicos por DRX. A extração de fases amorfas e/ou de baixo grau de cristalinidade também serviu como pré-tratamento de amostras para estudos por DRX.

Impregnação de amostras e a confecção de lâminas de seção delgada. As amostras não-deformadas e orientadas, depois de secas ao ar, foram colocadas em cubas de papel alumínio (adequadas aos tamanhos das amostras) e em seguida foram colocadas em estufa, na faixa de temperatura de 40 a 60 °C, durante um período de 1 a 2 dias. Após a secagem, as amostras foram colocadas em dessecador até atingirem a temperatura ambiente e depois foram submetidas à impregnação. O processo foi realizado com uma mistura de resina (epoxglass 1504) e endurecedor (epoxglass 1601) na proporção de 5:1.

A confecção das lâminas de seção delgada seguiu as seguintes etapas: (a) corte dos blocos impregnados com serra diamantada controlada automaticamente; (b) redução do tamanho dos blocos ao tamanho das lâminas de vidro (46 mm x 27 mm) por meio de corte controlado

manualmente; (d) colagem dos blocos às lâminas com superfícies polidas; (e) desbaste e polimento dos blocos colados às lâminas até a espessura de 30 μm ; (f) limpeza das lâminas e, quando necessário, procedeu-se ao recobrimento com o uso de lamínulas e bálsamo do Canadá.

No presente estudo, a maioria das lâminas foi confeccionada sem o uso de lamínulas, tendo em vista as análises a serem realizadas por microscopia eletrônica. Todas as etapas de trabalho seguiram procedimentos adotados nos laboratórios de impregnação de amostras e de confecção de lâminas de seção delgada do IGc/USP.

ANÁLISES FÍSICAS DE SOLO

A caracterização física dos solos foi realizada basicamente em função das frações granulométricas, das relações entre frações granulométricas e considerando as relações massa/volume. As frações e relações foram obtidas conforme procedimentos contidos no manual de métodos de análise de solo (EMBRAPA, 1997) e, quando necessário, por outros métodos devidamente especificados.

Visando identificar e diferenciar horizontes cimentados tipo fragipãs (com cimentação fraca) e duripãs (com cimentação forte) de outros horizontes, foram realizados testes de imersão em água e em solução ácida e alcalina, conforme exigências nas definições destes horizontes (EMBRAPA, 1999; UNITED STATES, 1999).

Frações da amostra total, granulometria, densidade e relações derivadas

As frações e relações visando a caracterização física dos solos foram as seguintes: frações da amostra total, frações granulométricas, argila dispersa em água, grau de floculação, relação silte/argila, densidade global e densidade das partículas.

Frações da amostra total. A separação destas frações foi realizada em função do destorroamento e fracionamento da amostra em um conjunto de peneiras com malha de 20 mm (retenção de calhaus) e de 2 mm (retenção de cascalhos). O material que passa na malha de 2 mm corresponde a TFSA.

Granulometria. Em função da importância das frações granulométricas, especialmente da fração-argila que é utilizada no cálculo do gradiente textural, foram utilizadas duas metodologias em três laboratórios, para obtenção destas frações. O método da pipeta foi a opção adotada para obtenção das frações granulométricas no laboratório de geoquímica do IGc/USP, utilizando-se 10 g de TFSA após eliminação a matéria orgânica. A dispersão dos componentes granulométricos foi efetuada utilizando-se o pirofosfato de sódio e um tempo de agitação de 4 horas. O método do densímetro, fazendo a dispersão química com o uso do hidróxido de sódio, foi a opção metodológica adotada nas determinações das frações granulométricas realizadas nos

laboratórios da Embrapa Solos (utilizando 20 g da amostra) e no laboratório de física do solo da UFRPE (utilizando 50 g da amostra).

Argila dispersa em água. Foi determinada conforme procedimentos adotados nas análises granulométricas, porém sem o uso de dispersantes químicos.

Grau de floculação. Este parâmetro foi calculado conforme a seguinte expressão:

Grau de floculação = $100 (\text{argila total} - \text{argila dispersa em água}) / \text{argila total}$.

Relação silte/argila. Calculada diretamente pela razão entre os teores de silte e de argila total.

Densidade global. Foi determinada pelo método do torrão parafinado (4 a 6 cm de diâmetro), no caso das amostras de horizontes cimentados ou com consistência extremamente dura. Nas demais amostras, adotou-se o método do anel volumétrico (anel de Kopecky) com 50 cm³.

Densidade das partículas. Foi estabelecida em função do volume de álcool necessário para completar a capacidade de um balão volumétrico de 50 mL, utilizando-se 20 g de amostra seca a 105 °C.

Testes de imersão em água, ácido e base

Testes de imersão em água. Durante os trabalhos de descrição e coleta de solos no campo, os materiais diagnosticados como horizontes cimentados tipo fragipãs e/ou de duripãs (EMBRAPA, 1999; UNITED STATES, 1999) foram imersos em água durante um período de 4 a 8 horas. Os testes foram realizados utilizando-se fragmentos de materiais cimentados com diâmetro predominantemente na faixa de 5 a 10 cm. A imersão foi realizada em água contida em copos plásticos, sem agitação. Os materiais que se mantiveram estáveis ou cujo esboroamento não excedeu 50% do volume (avaliação visual), foram considerados com cimentação forte, tipo duripã. Os materiais com propriedades fráguas, cujo esboroamento excedeu 50%, foram considerados como fragipãs. Os testes foram realizados com materiais coletados em várias partes do mesmo horizonte.

Testes de imersão em solução ácida e básica. Em condições de laboratório, amostras selecionadas de materiais cimentados foram submetidas aos testes de imersão em solução ácida e em solução alcalina. Os testes foram realizados com o uso de HCl 1N, 3N e 6N e solução de NaOH 1M e 4M. A duração dos testes foi de 10 dias.

Os procedimentos dos testes foram os seguintes:

a) Pesou-se 50 a 100 g de fragmentos de materiais cimentados com 2 a 5 cm de diâmetro, secos ao ar, e em seguida foram colocados em copos plásticos com capacidade de cerca de 200 mL, tendo a identificação da amostra e da solução a ser usada. Na seqüência, adicionou-se

solução de ácido ou base, cobrindo totalmente amostra. A quantidade de solução foi completada sempre que necessário para manter as amostras totalmente imersas. Diariamente foram feitas avaliações visuais estimando as percentagens de esboroamento dos materiais. Nas soluções que se tornam escuras, devido à extração de ácidos orgânicos, as avaliações foram realizadas inclinando-se o vasilhame e examinando-se o material com uso de espátula.

b) Após 10 dias, desprezaram-se as soluções, lavaram-se as amostras com água corrente e procedeu-se à secagem do material ao ar. As amostras foram lavadas para evitar a agregação do material que foi observado em alguns casos. Após a secagem, o material foi passado em um jogo de peneiras com abertura de 6, 4 e 2 mm, com uso de um agitador mecânico durante 15 minutos. Em seguida pesaram-se as frações retidas em cada peneira e a fração menor que 2 mm.

c) A estimativa do volume esboroado, por fração, foi calculada pela expressão:

Fração esboroada (g/Kg) = 1000 (peso da fração / soma do peso de todas as frações).

ANÁLISES QUÍMICAS DE SOLO

Análises químicas de rotina

As análises químicas de rotina visando à classificação pedológica dos solos foram desenvolvidas conforme procedimentos analíticos contidos no manual de métodos de análise de solo (EMBRAPA, 1997). As diversas análises realizadas e expressões derivadas estão relacionadas, de forma sintética, em seguida.

pH em água e em KCl. Determinação feita potenciométricamente na suspensão solo-solução, na proporção 1:2,5.

Carbono orgânico. Determinado em função da oxidação da matéria orgânica pelo dicromato de potássio (0,4N), em meio sulfúrico, titulando-se o excesso de dicromato de potássio com sulfato ferroso amoniacal (0,1N). Em horizontes selecionados, o carbono total foi determinado por absorção de infravermelho (IR), no equipamento LECO CHN - 1000 do laboratório de química do IGc/USP.

Nitrogênio total. Determinado pela digestão da amostra em solução ácida, sulfúrica, na presença de sulfatos de sódio e de cobre. A dosagem do N foi feita por volumetria, após retenção do NH₃ em ácido bórico.

Relação C/N. Calculada em função dos teores de C e N.

Fósforo assimilável. Considerado como a fração extraída pela solução ácida composta de HCl 0,05N mais H₂SO₄ 0,025N. A determinação foi feita por método fotocolorimétrico na presença de ácido ascórbico.

Cálcio mais magnésio trocáveis e alumínio extraível. A extração foi realizada pela solução de KCl 1N na proporção solo-solução 1:20. O alumínio foi determinado volumetricamente por titulação com solução de NaOH 0,025N, utilizando o indicador azul de bromotimol. Na mesma alíquota onde foi determinado o alumínio, determinaram-se os cátions cálcio mais magnésio por titulação com EDTA 0,0125M na presença dos indicadores eriochrome black e murexida. O cálcio foi determinado em outra alíquota do extrato, titulando-se com EDTA 0,025M.

Magnésio trocável. Foi obtido por diferença entre o valor da determinação cálcio mais magnésio menos o valor de cálcio determinado em separado.

Potássio e sódio trocáveis. A extração foi realizada com solução de HCl 0,05N na proporção solo-solução 1:10. As determinações foram realizadas por espectrofotometria de chama.

Soma de bases (valor S). A soma foi calculada pela seguinte expressão:

$$S = (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+)$$

Acidez extraível ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$). Extração realizada com solução de acetato de cálcio 1N tamponada a pH 7, sendo a proporção solo-solução de 1:15. As determinações foram realizadas volumetricamente com solução de NaOH 0,0606N na presença do indicador fenolftaleína.

Hidrogênio extraível. Calculado em função da acidez e do alumínio extraíveis, conforme a expressão:

$$\text{H}^+ = [(\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}) - (\text{Al}^{3+})]$$

Valor T (capacidade de troca de cátions). Calculado em função da soma de bases (valor S) e da acidez extraível, conforme a expressão:

$$T = S + (\text{H}^+ + \text{Al}^{3+})$$

Valor V (percentagem de saturação por bases). Calculado em função da soma de bases (valor S) e da capacidade de troca de cátions (valor T), conforme a expressão:

$$V = 100 S/T$$

Saturação por alumínio. Calculada conforme a expressão:

$$\text{Saturação por alumínio} = 100 (\text{Al}^{3+})/(S + \text{Al}^{3+})$$

Saturação por sódio. Calculada segundo a expressão:

$$\text{Saturação por sódio} = 100 (\text{Na}^+)/T$$

Condutividade elétrica. Determinada no extrato de saturação do solo (obtido por filtração sob vácuo), utilizando-se condutivímetro.

Sais solúveis - Os cátions sódio e potássio do extrato de saturação foram determinados por espectrofotometria de chama.

Equivalente de CaCO₃. Obtido em função do ataque da amostra com solução de HCl 0,5N. O excesso do ácido foi determinado por titulação com NaOH 0,25N na presença do indicador fenolftaleína. Os equivalentes de CaCO₃ corresponderam aos do ácido, menos o excesso.

Óxidos do ataque sulfúrico e relações derivadas

A determinação de índices da composição global de minerais secundários foi realizada em função da solubilização de amostras de solo com H₂SO₄ diluído na proporção 1:1. O ataque sulfúrico foi realizado na razão de 1 g de amostra para 20 mL de ácido diluído em fervura, durante meia hora. Após o resfriamento do material, procedeu-se a diluição e filtragem. No resíduo, determinou-se sílica, e no filtrado, ferro, alumínio e titânio, conforme a seguir.

SiO₂. A sílica foi determinada por espectrofotometria, após solubilização do resíduo do ataque sulfúrico com NaOH 30% em condição de fervura.

Fe₂O₃. Determinou-se em alíquota do extrato do ataque sulfúrico por compleximetria com EDTA 0,01M, com uso de ácido sulfossalicílico como indicador.

Al₂O₃. Após determinação do ferro, na mesma alíquota foi feita a determinação do alumínio por compleximetria com CDTA 0,031M. O excesso de CDTA foi titulado com solução de sulfato de zinco 0,0156M na presença de ditizona, comparando-se o resultado com uma prova em branco.

TiO₂. Determinou-se em alíquota do extrato sulfúrico por espectrofotometria em função da peroxidação do sulfato de titânio com H₂O₂ concentrado, após eliminação da matéria orgânica.

Relação Ki. Foi calculada em função dos valores percentuais de SiO₂ e Al₂O₃, divididos pelos respectivos pesos moleculares. A expressão do cálculo foi a seguinte:

$$K_i = 1,70 (\%SiO_2)/(\%Al_2O_3)$$

Relação Kr. Foi obtida em função dos percentuais de SiO₂ e (Al₂O₃ + Fe₂O₃), divididos pelos respectivos pesos moleculares. A expressão do cálculo foi a seguinte:

$$K_r = (\%SiO_2/0,60)/[(\%Al_2O_3/1,02) + (\%Fe_2O_3/1,60)]$$

Relação Al₂O₃/Fe₂O₃. Foi calculada em função dos percentuais dos óxidos de Al₂O₃ e Fe₂O₃, dividido pelos respectivos pesos moleculares. A expressão do cálculo foi a seguinte:

$$\text{Relação } Al_2O_3/Fe_2O_3 = 1,7 (\%Al_2O_3)/(\%Fe_2O_3)$$

Análise química total

A análise química total de amostras selecionadas foi desenvolvida através da técnica de fluorescência de raios-X (FRX), conforme procedimentos adotados no IGc/USP (MORI et al., 1999). Os elementos maiores foram analisados em discos de vidro fundido na proporção solo-

fundente 1:9. Os elementos menores foram determinados em pastilhas de pó prensado (micronizado, com granulometria inferior a 5 μm), utilizando-se cera como agente aglutinante. A proporção solo-aglutinante (cera) foi de 5:1.

A perda ao fogo (PF), utilizada no fechamento da soma dos óxidos e para o controle de qualidade dos dados, foi determinada pela diferença de peso da amostra (0,5 g) entre as temperaturas de 105 ± 5 e 1000 °C.

O Fe(II) de amostras de rocha em processo de alteração foi calculado pelo método de Wilson modificado (ANDRADE et al., 2002).

A análise química total de argilas realizadas antes e após tratamento com oxalato de amônio (ROSS & WANG, 1993) foi desenvolvida pela técnica do ICP-AES, conforme procedimentos adotados no IGc/USP (JANASI et al., 1995). Antes das análises, as argilas foram lavadas quatro vezes com água destilada e decantadas em centrífuga numa rotação de 4000 rpm. Após tratamento com oxalato de amônio (ROSS & WANG, 1993) e centrifugação do material, a solução sobrenadante foi utilizada para análise de Si, Al e Fe, pela técnica do ICP-AES. Em seguida as amostras foram levadas por mais duas vezes, com coleta do sobrenadante para análises.

ANÁLISES MINERALÓGICAS

As análises mineralógicas da amostra total e de frações em separado foram desenvolvidas em conformidade com os procedimentos analíticos contidos no manual de métodos de análise de solo (EMBRAPA, 1997).

Amostra total. As determinações mineralógicas qualitativas por difração de raios-X (DRX) foram realizadas em amostras na forma de pó, sem pré-tratamento, assim como em amostras selecionadas após eliminação da matéria orgânica e de fases amorfas e/ou de baixo grau de cristalinidade.

Fração-argila. Nesta fração, as análises qualitativas por DRX foram desenvolvidas após eliminação da matéria orgânica. Em amostras selecionadas (com minerais 2:1), foram realizadas determinações após tratamento com Mg, Mg e etileno glicol, assim como após tratamento com K nas temperaturas de 25, 300 e 550 °C. Também foram realizadas análises por DRX, em amostras selecionadas, após extração de fases amorfas e/ou de baixo grau de cristalinidade e em caulinitas tratadas com hidrazina monohidratada.

Grãos (areias e cascalho). As análises mineralógicas qualitativas e semiquantitativas destas frações foram desenvolvidas por processos óticos mediante o uso de lupa binocular e microscópio petrográfico e com o apoio de microtestes químicos. Estas análises foram desenvolvidas nos laboratórios da Embrapa Solos no Rio de Janeiro - RJ.

Interpretações dos difratogramas de raios-X. As interpretações foram desenvolvidas basicamente em duas etapas. Na primeira, os minerais e argilominerais foram identificados de forma semi-automatizada com uso de software disponível no IGc/USP. Na segunda etapa, as interpretações foram realizadas conforme critérios de identificação contidos em KIMPE (1993), DIXON & WEED (1989) e MOORE & REYNOLDS (1989).

ANÁLISES DE FASES AMORFAS E/OU DE BAIXO GRAU DE CRISTALINIDADE

A extração seletiva de fases amorfas e/ou de baixo grau de cristalinidade teve como base três métodos, isto é, o do oxalato de amônio, o do Tiron e o do pirofosfato de sódio (ROSS & WANG, 1993; KODAMA & ROSS, 1991).

O oxalato de amônio (com extração no escuro) (ROSS & WANG, 1993) extrai sílica, alumínio e ferro (Si_o , Al_o e Fe_o) em meio ácido (pH 3), proveniente de fases não cristalinas e/ou de baixo grau de cristalinidade em solos. Seletivamente dissolve alumínio e sílica (Al_o e Si_o) de fases como alofana e imogolita, assim como ferro (Fe_o) de hidróxidos de ferro de baixa cristalinidade, como ferrihidrita, bem como extrai alumínio (Al_o) de fases orgânicas.

O método do Tiron, que funciona em meio alcalino (pH 10,2), dissolve sílica, alumínio e ferro (Si_T , Al_T , Fe_T) de forma equivalente ao método do oxalato de amônio e, em adição, dissolve efetivamente sílica de fases opalinas. Portanto, é o método que serve de base para estimativas dessas fases (KODAMA & ROSS, 1991).

O método do pirofosfato de sódio funciona em meio alcalino (pH 10) e seletivamente extrai alumínio e ferro de fases orgânicas (Al_p e Fe_p), mas também pode dissolver quantidades muito pequenas de fases minerais não-cristalinas (ROSS & WANG, 1993).

As aplicações diretas dos métodos selecionados (oxalato de amônio, Tiron e pirofosfato de sódio) são as possibilidades de estimativas de fases amorfas e/ou de baixo grau de cristalinidade, dissolvidas por estes métodos, correlacionadas com agentes cimentantes em solos. Os resultados das extrações pelo método do oxalato de amônio (Al_o e Fe_o) também servem de base para verificação da presença de materiais espódicos em solos de ambientes úmidos (UNITED STATES, 1999).

Teste de métodos

Antes das extrações propriamente ditas, foram realizados testes experimentais com os três métodos selecionados. Com relação aos métodos do oxalato de amônio e Tiron, foram testados quatro tempos de extração em diferentes materiais, assim como foram executadas quatro extrações sucessivas na mesma amostra. Com base nesses testes, assim como observando estudos de SEGALLEN (1968), constatou-se que o método do oxalato de amônio funciona sem

atacar ou alterando minimamente fases cristalinas, com apenas uma extração durante o tempo de quatro horas. Com relação ao método do Tiron, foi verificado que uma extração, no tempo de uma hora, é adequada para extrair fases amorfas sem atacar, ou alterando o mínimo, os materiais cristalinos.

Com relação ao método do pirofosfato de sódio, o principal problema é o fato que o pirofosfato de sódio atua como um extrator de ferro e alumínio de complexos orgânicos, mas também promove a dispersão de partículas minerais finas (silicatos e óxidos de ferro) indesejáveis no extrato a ser analisado.

Para sedimentar as partículas finas em suspensão, o método (ROSS & WANG, 1993) oferece as seguintes alternativas:

1 - Centrifugação a 20.000 x g, (rotação superior a 20.000 rpm) por 10 minutos.

Problema: Os laboratórios do IGc/USP (como a maioria dos laboratórios convencionais) não dispõem de centrífuga para atingir rotação dessa magnitude.

2 - Centrifugar a 510 x g por 10 minutos, com uso de superfloc N-100 a 0,1%, disponível na Cyanamid of Canada Ltd (ROSS & WANG, 1993). **Problema:** só se conseguiu um produto similar no mercado, o superfloc N-300, através de um representante internacional no Brasil (Cytec do Brasil).

3 - Utilizar ultrafiltração através de papel de filtro com porosidade de 0,025- μ m, sendo considerado (ROSS & WANG, 1993) um procedimento recomendado para solos tropicais. **Problema:** Procedimento extremamente lento devido ao tamanho da porosidade do papel de filtro.

Diante dessas opções e problemas, e em função da falta de informações na literatura, decidiu-se testar as seguintes alternativas:

a) Com o uso do superfloc N-300 (centrifugando a 510 x g por 10 minutos);

b) Sem o uso do superfloc N-300, mas com uma centrifugação a 13.000 rpm (centrífuga disponível no IGc/USP) por 10 minutos;

c) E, por último, buscou-se um procedimento alternativo, objetivo e simplificado, possível de ser executado pela maioria dos laboratórios. Nesse procedimento foi utilizado uma centrifugação a 3000 rpm durante um período de 30 minutos.

Os resultados indicaram que a centrifugação a 13.000 rpm por 10 minutos ou 3.000 rpm por 30 minutos são equivalentes e funcionam melhor do que na opção com o uso de superfloc N-300 (centrifugando a 510 x g por 10 minutos). Com o uso do superfloc N-300 0,1% cerca de 30% das amostras testadas permaneceram com turbidez após a centrifugação, particularmente os materiais mais ricos em ferro. Por conseguinte, adotou-se a centrifugação a 3.000 rpm por 30 minutos nas análises de rotina, em função da simplicidade e facilidade operacional do método.

Análise de Si, Al e Fe dos extratos

Os elementos Si, Al e Fe extraídos pelas metodologias do oxalato de amônio e Tiron, assim com Fe e Al extraídos pelo pirofosfato de sódio, foram analisados pela técnica do ICP-AES (espectrometria de emissão atômica por plasma induzido acoplado) conforme procedimentos adotados no IGc/USP (JANASI et al., 1995).

Estimativas de fases amorfas e/ou de baixo grau de cristalinidade

Sílica opalina. Em conformidade com o funcionamento dos métodos Tiron e oxalato de amônio (KODAMA & ROSS, 1991; ROSS & WANG, 1993; MOODY & GRAHAM, 1997), a sílica opalina foi estimada pela diferença de resultados entre os dois métodos (ΔSi), isto é:

$$(\Delta Si) = (Si_T - Si_o)$$

Alofana. Estimativa do conteúdo de alofana tem sido realizada com base na relação Al/Si e no conteúdo de Si provenientes de extrações pelo método do oxalato de amônio (Al_o e Si_o), descontando-se os teores de Al presentes em fases orgânicas determinados pelo método do pirofosfato de sódio (Al_p). A expressão utilizada para o cálculo estimativo de alofana (JONGMANS et al., 2000; RANST et al., 2002) é a seguinte:

$$\%Alofana = 100 (\%Si_o) / [23,4 - 5,1 (Al_o - Al_p) / (Si_o)]$$

Ferrihidrita. Segundo estudos desenvolvidos por RANST et al. (2002), a ferrihidrita pode ser estimada com base no conteúdo de ferro extraído pelo método do oxalato de amônio (Fe_o). A expressão utilizada para estimativas desta forma mal cristalizada de ferro é a seguinte:

$$\%Ferrihidrita = 1,7 (\%Fe_o)$$

Materiais espódicos. A densidade ótica do extrato de oxalato de amônio (DOEO), sem eliminação da matéria orgânica das amostras, assim como o alumínio e o ferro (Al_o e Fe_o), servem de base para o estabelecimento de critérios utilizados para diagnosticar a presença de materiais espódicos em solos de regiões úmidas. A DOEO corresponde a absorvância do extrato de oxalato de amônio obtida no comprimento de onda de 430 nm (SKJEMSTAD et al., 1992). Como as leituras foram feitas em transmitância (T), a densidade ótica foi obtida pela expressão: $DOEO = \log (1/T)$, sendo $T = (\%T/100)$. Quando $[\%Al_o + 0,5 (\%Fe_o)]$ é maior ou igual a 0,5 ou DOEO maior ou igual a 0,25, tem-se condições indicativas de materiais espódicos (UNITED STATES, 1999).

ANÁLISES MICROMORFOLÓGICAS

As descrições micromorfológicas das lâminas de seção delgada de solo foram desenvolvidas com auxílio de microscópio petrográfico em conformidade com as terminologias de BULLOCK et al. (1985), BREWER (1972 e 1976) e BREWER & PAWLUK (1975). Traduções para o português foram realizadas conforme SANTOS et al. (1991). Fotomicrografias foram obtidas por meio de câmera acoplada ao microscópio petrográfico. As fotomicrografias obtidas com nicóis cruzados (polarizador e analisador inseridos) foram indicadas com a sigla XPL, ao passo que as obtidas com a luz polarizada em um só plano (polarizador inserido) foram indicadas com a sigla PPL.

As interpretações micromorfológicas fundamentaram-se, principalmente, nos trabalhos de BREWER (1972 e 1976), BREWER & PAWLUK (1975), BULLOCK et al. (1985), DOUGLAS & THOMPSON (1985) e RINGROSE-VOASE & HUMPHREYS (1994).

ANÁLISES POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA

Feições pedológicas indicativas de compostos amorfos relacionadas com agentes cimentantes, inferidas pela microscopia ótica mas sem recursos para determinar sua composição elementar, foram estudadas com mais detalhes por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com detector de raios-X, permitindo microanálises por espectrometria de dispersão de energia (EDS). Os estudos em MEV foram direcionados para o mapeamento elementar (Si, Al e Fe) e geração de imagens, realçando aspectos morfológicos ou composicionais. O mapeamento elementar deriva dos sinais de raios-X emitidos pelos elementos da amostra. As diversas radiações emitidas pelos elementos são separadas pelo espectrômetro de raios-X, e cada fóton detectado produz um ponto na imagem gerada. Como cada ponto da imagem de um determinado elemento corresponde a um fóton de raios-X, as variações de densidades de pontos expressam, aproximadamente, a concentração elementar (REED, 1993).

As imagens foram geradas a partir de lâminas de seção delgada e de fraturas frescas, sendo as superfícies revestidas com filme carbono. O realce da morfologia (aspectos topográficos) foi obtido com detector de elétrons secundários, e o da natureza composicional, com detector de elétrons retroespalhados.

Um maior refinamento das microanálises foi desenvolvido com o uso de microsonda eletrônica (ME) com microanálises por espectrometria de dispersão de comprimento de onda (WDS). As microanálises foram realizadas em superfícies polidas de lâminas e de pequenos blocos de amostras. Em ambos os casos, as superfícies foram revestidas com filme de carbono.

EQUAÇÕES UTILIZADAS NO BALANÇO GEOQUÍMICO DE MASSA

O balanço de massa é um processo que envolve a comparação entre o perfil de alteração e o material de origem. Em solos, as comparações envolvem densidade, composição química, bem como mudanças volumétricas. A composição química leva em conta a concentração de elementos móveis, incluindo os que se reprecipitam, e a de elementos considerados imóveis, usualmente Zr ou Ti (EGLI & FITZE, 2000; CHADWICK et al., 1990). Neste estudo optou-se pelo uso do Ti devido às seguintes razões: (a) os resultados analíticos do Ti são obtidos nas mesmas amostras dos elementos maiores de interesse nesta pesquisa; (b) os resultados do balanço geoquímico de massa em função do Ti ou do Zr mostraram similaridades ou as mesmas tendências não justificando preparo de amostras exclusivas para análise do Zr.

Equações que efetivam o balanço de massa, considerando variações volumétricas do ambiente pedogenético, são apresentadas em seguida. Destaca-se que a equação relativa ao fluxo de massa incorpora uma correção recente introduzida por EGLI & FITZE (2000).

Equações. Nos procedimentos de cálculo do balanço de massa basicamente utilizaram-se três tipos de equações. O primeiro foi utilizado para expressar mudanças volumétricas no perfil de alteração; o segundo, para estabelecer a função transporte de massa de elementos químicos (perdas e ganhos absolutos); e o terceiro, para calcular o fluxo de massa no perfil de alteração ou em horizontes ou camadas específicas.

Expressão das mudanças volumétricas. Utilizando-se um elemento considerado imóvel, as mudanças de volume que ocorrem durante as transformações no perfil de alteração podem ser calculadas pela seguinte equação (EGLI & FITZE, 2000):

$$\varepsilon_{i,w} = \left(\frac{\rho_p C_{i,p}}{\rho_w C_{i,w}} \right) - 1 \quad (4.1)$$

onde $\varepsilon_{i,w}$ (adimensional) representa a variação volumétrica do perfil de alteração (w), calculada em função de um elemento imóvel (i); ρ_p e ρ_w são os índices que representam a densidade global (g cm^{-3}), respectivamente, no material de origem (p) e no perfil de alteração (w); e $C_{i,p}$ e $C_{i,w}$ representam, respectivamente, a concentração (% de óxido) do elemento imóvel (i) no material de origem (p) e no perfil de alteração (w).

Os resultados de $\varepsilon_{i,w}$ são utilizados nos cálculos da função transporte e no fluxo de massa, descritos adiante. O valor de $\varepsilon_{i,w}$ pode ser maior, igual ou menor que zero. Quando $\varepsilon_{i,w} > 0$, significa expansão, ou se $\varepsilon_{i,w} < 0$, significa colapso no perfil de alteração. Valor de $\varepsilon_{i,w} = 0$

significa processos de alteração isovolumétricos (CHIQUET et al. 2000). Os resultados de $\varepsilon_{i,w}$ multiplicados por 100 expressam mudanças volumétricas em percentagem (BRIMHALL & DIETRICH, 1987; BRIMHALL et al., 1991).

Perdas e ganhos absolutos. A remoção ou adição de elementos móveis, incluindo aqueles que se reprecipitam no perfil de alteração, pode ser calculada de duas maneiras. A primeira, é uma função da densidade global, concentração dos elementos móveis e das variações volumétricas do perfil de alteração. A segunda, leva em conta a presença de um elemento imóvel e a concentração dos elementos móveis (EGLI & FITZE, 2000). As equações são as seguintes:

$$\tau_{j,w} = \left(\frac{\rho_w C_{j,w}}{\rho_p C_{j,p}} (\varepsilon_{i,w} + 1) \right) - 1 \quad (4.2)$$

ou

$$\tau_{j,w} = \left(\frac{C_{j,w} C_{i,p}}{C_{j,p} C_{i,w}} \right) - 1 \quad (4.3)$$

onde $\tau_{j,w}$ (adimensional) é a função transporte de massa do elemento móvel (j) no perfil de alteração (w) em sistema aberto; $C_{j,w}$ e $C_{j,p}$ representam a concentração (% óxido) do elemento móvel (j) no perfil de alteração (w) e no material de origem (p), respectivamente; $C_{i,p}$, $C_{i,w}$, $\varepsilon_{i,w}$, ρ_w e ρ_p , conforme especificado na equação (4.1).

Valores de $\tau_{j,w} > 0$ e < 0 significam, respectivamente, ganho e perda de massa no perfil de alteração em relação ao material de origem (CHIQUET et al., 2000; CHADWICK et al., 1990). Resultados de $\tau_{j,w}$ multiplicados por 100 expressam perdas e ganhos em percentagem (CHADWICK et al., 1990; BRIMHALL et al., 1991).

Fluxo de massa. O fluxo de massa de um determinado elemento químico, com relação a um horizonte ou camada do perfil de alteração, considerando uma seção de área unitária, pode ser calculado por meio da equação corrigida de EGLI & FITZE (2000):

$$m_{j,fluxo}(H) = \rho_p \Delta z_w \left(\frac{1}{\varepsilon_{i,w} + 1} \right) C_{j,p} \tau_{j,w} \quad (4.4)$$

onde $m_{j,fluxo}(H)$ é o fluxo de massa do horizonte ou camada (H) do perfil de alteração (w); Δz_w é a espessura do horizonte ou camada (H); $C_{j,p}$, $\varepsilon_{i,w}$, ρ_p e $\tau_{j,w}$, conforme definido nas equações (4.1), (4.2) e (4.3). A correção introduzida na equação (4.4) por EGLI & FITZE (2000) é o termo

$[1/(\varepsilon_{i,w} + 1)]$. Este termo permite o cálculo do fluxo de massa, levando em conta as variações volumétricas no perfil de alteração.

Para obter os resultados do fluxo de massa $m_{j,fluxo}(H)$ em g cm^{-2} , sendo Δz_w em cm, ρ_p em g cm^{-3} e $C_{j,p}$ em percentagem de óxido do elemento móvel (j) no material de origem (p), a equação (4.4) assume a seguinte forma:

$$m_{j,fluxo}(H) = \rho_p \Delta z_w \left(\frac{1}{\varepsilon_{i,w} + 1} \right) \frac{C_{j,p}}{100} f_{j,p} \tau_{j,w} \quad (4.5)$$

onde $f_{j,p}$ é um fator introduzido para transformar a percentagem do óxido em massa do elemento móvel (j) no material de origem (p). O fator $f_{j,p}$ é obtido dividindo-se a massa do elemento (j) contida no óxido pela massa total da fórmula do óxido correspondente. Por exemplo, no caso da sílica, a massa do Si = 28,09 e a do SiO_2 = 60,09, dando um fator $f_{\text{Si,p}} = 0,47$. Para alumínio e ferro, o fator $f_{j,p}$ tem valores, respectivamente, de 0,53 e 0,70.

Valores de $m_{j,fluxo}(H) > 0$ e < 0 dependem da função transporte de massa e significam, respectivamente, ganho e perda de massa do elemento móvel (j) considerado. O cálculo do balanço de massa global de um elemento químico móvel (j) é feito somando-se os resultados dos horizontes ou camadas (H) em toda extensão do perfil de alteração (EGLI & FITZE, 2000), isto é:

$$m_{j,fluxo}(Perfil) = [m_{j,fluxo}(H1) + m_{j,fluxo}(H2) + m_{j,fluxo}(H3) + \dots + m_{j,fluxo}(Hn)] \quad (4.6)$$

onde, H1, H2, H3 ... Hn representam os horizontes ou camadas integrantes do perfil de alteração.

Parte 3

HORIZONTES CIMENTADOS EM ARGISSOLOS E ESPODOSSOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS

CAPÍTULO 5 - Características morfológicas e físicas

Na região dos tabuleiros costeiros, é comum a presença de solos com horizontes subsuperficiais cimentados, particularmente nas áreas onde ocorrem suaves depressões. Os horizontes com cimentação forte, tipo Bm, vem sendo consideradas como duripãs, e os que apresentam cimentação fraca, do tipo Btx ou Bx, são denominados de fragipãs.

Nas suaves depressões, percorrendo-se da margem para o centro, são freqüentes seqüências de solos do tipo Argissolos Amarelos => Argissolos Acinzentados => Espodossolos; ou Argissolos Amarelos => Espodossolos; ou ainda Argissolos Amarelos => Argissolos Acinzentados. Entre esses solos, os horizontes com cimentação forte destacam-se nos Espodossolos (Figura 5.1 A) e em parte dos Argissolos Acinzentados. Já os horizontes com cimentação fraca são mais comuns em Argissolos Amarelos (Figura 5.2). Desenvolvem-se também em parte dos Argissolos Acinzentados (Figura 5.1 B) e, menos freqüentemente, em Espodossolos. Nas seqüências de solos mencionadas, foi observado que os horizontes com cimentação forte e fraca comumente se interligam lateral e verticalmente, formando seqüências contínuas (Figura 5.3).

Neste capítulo, os objetivos principais foram: (1) destacar características morfológicas e físicas e aspectos diagnósticas de horizontes cimentados em Argissolos Amarelos, Argissolos Acinzentados e Espodossolos e (2) avaliar modificações de características morfológicas e físicas em seqüências de solos ou no mesmo solo, relacionadas às variações de graus de cimentação, desde as cimentações fracas até as fortes.

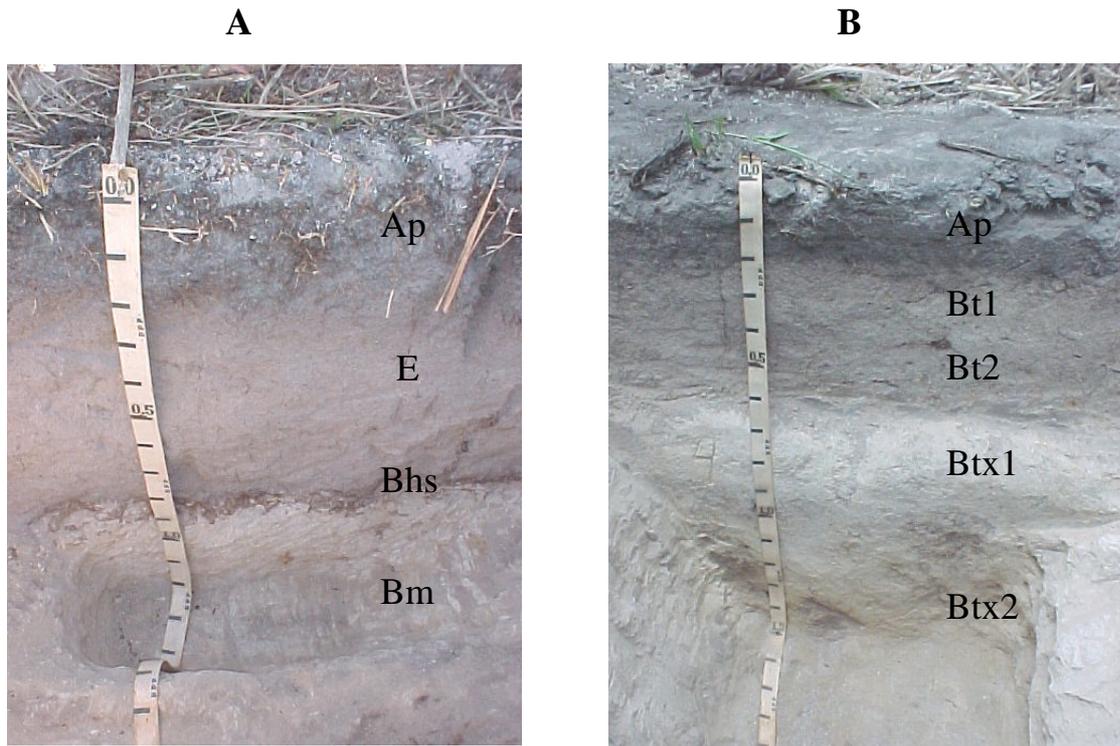


Figura 5.1 - Solos com horizontes cimentados. A: Espodosolo (P15) apresentando horizonte com cimentação forte (Bm); e B: Argissolo Acinzentado (P13) apresentando horizonte com cimentação fraca bem desenvolvido (Btx).

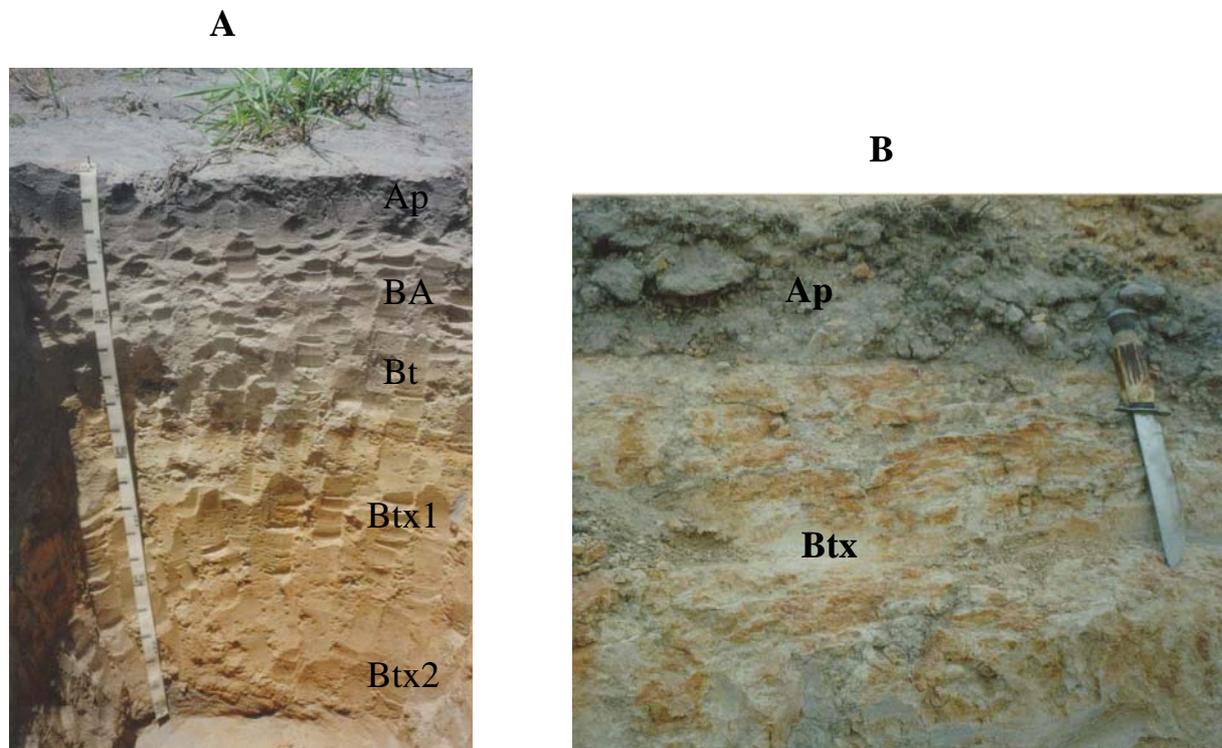


Figura 5.2 - A: Argissolo Amarelo (P7) apresentando horizonte com cimentação fraca (Btx) pouco desenvolvido. Entre os horizontes Bt e Btx1 ocorre uma fina camada ferruginosa que corresponde a um horizonte plácico; B: detalhe de um horizonte Btx (perfil P11) bem desenvolvido e com presença de estruturas laminares.



Figura 5.3 - Espodossolos apresentando horizontes com cimentação forte (Bm) e fraca (Bx) interligados de forma contínua (local do perfil complementar P16).

HORIZONTES CIMENTADOS EM ARGISSOLOS AMARELOS

Características morfológicas

Nos Argissolos Amarelos (Quadro 5.1), os horizontes com cimentação fraca (Btx) podem assumir formas contínuas ou descontínuas, sendo mais freqüentes as últimas. Quando formam horizontes contínuos e transitam para horizontes com cimentação forte, tornam-se de fácil identificação (Figura 5.2 B). Por outro lado, nas transições para solos não-cimentados, morfológicamente são mais difíceis de serem identificados (Figura 5.2 A). Nesses casos, são necessários exames pormenorizados da consistência úmida, visando identificar materiais com propriedades fráguas, diagnósticas de fragipãs. Na prática, materiais com cimentação fraca foram identificados principalmente por dois tipos de avaliações. A primeira teve como base as comparações de consistência com o solo no estado úmido, e a segunda, os testes de imersão em água. Embora estas avaliações envolvam subjetividade, constituíram a base de referência para a distinção de materiais com cimentação fraca de outros materiais.

Os materiais constituintes das cimentações fracas foram observados na formas de nódulos, blocos ou em estruturas irregulares, distribuindo-se em proporções diversas no volume de solo não-cimentado.

Em termos de profundidade e espessura, em geral os horizontes com cimentação fraca (Btx) iniciam-se na faixa de profundidade de 60 a 120 cm. Entretanto, em situações particulares, foram observados quase à superfície (Figura 5.2 B), entre 15 e 60 cm, ou abaixo de 200 cm de profundidade. Quanto à espessura, é difícil sua estimativa, pois muito pouco se sabe sobre os limites inferiores atingidos por esses horizontes. O que se conhece com maior clareza é o limite superior ou a espessura de alguns horizontes com menos de 200 cm. Algumas observações em cortes de estrada mostraram que esses horizontes por vezes atingem profundidades além de 300 cm.

No que diz respeito à cor, em função das restrições de permeabilidade na zona do perfil onde ocorrem os horizontes tipo fragipã, tanto mosqueados como padrões de cores variegadas, indicativos de fenômenos de óxido-redução, são feições normais nesses horizontes. Entretanto, deve-se ressaltar que alguns solos apresentam mosqueados ou padrões de cores variegados mas não estão associados, necessariamente, com a presença de horizontes cimentados. Portanto, mosqueados são indicativos mas não exclusivos desses horizontes.

Os mosqueados associados aos horizontes com cimentação fraca (Btx) apresentaram cores diversas, desde acinzentadas até avermelhadas. Os mais comuns mostraram padrões bruno-forte (7,5YR 5/8), vermelho-amarelo (5YR 5/8), vermelho (2,5YR 4/8), vermelho-escuro (2,5YR 3/6), bruno amarelado-claro (2,5YR 6/4) e bruno-claro-acinzentado (10 YR 6/3).

Quadro 5.1 - Síntese de características morfológicas de Argissolos Amarelos apresentando horizontes com cimentação fraca (Btx)

Horizonte	Profundidade (cm)	Cor (solo úmido)		Textura	Estrutura ⁽¹⁾	Consistência ⁽²⁾		
		Fundo	Mosqueado			Seca	Úmida	Molhada
Perfil P7								
Ap	0 - 17	10YR 3/2	-	areia-franca	fr. pq. e md. bsa. e gs.	macia	m. friável	não pl. e não peg.
BA	- 35	10YR 6/4	-	franco-arenosa	fr. pq. e md. bsa.	lig. dura	friável	lig. pl. e lig. peg.
Bt	- 70	10YR 6/4	-	franco-argiloarenosa	fr. pq. e md. bsa. e maciça	m. dura	friável	pl. e peg.
Btx	- 85	10YR 6/4	10YR 5/6	argila	fr. pq. e md. bsa. e ba.	m. dura	friável e firme	pl. e peg.
Plácico	- 87	2,5YR 3/4	-	argila	fr. pq. e md. laminar	-	-	-
Btx1	- 135	10YR 6/4	2,5YR 3/6	argila	fr. pq. e md. bsa. e ba.	-	friável e firme	pl. e lig. peg.
Btx2	- 200+	7,5YR 5/6	2,5YR 3/6	argila	fr. pq. e md. bsa. e ba.	-	friável e firme	pl. e peg.
Perfil P11								
Ap	0 - 15	10YR 4/3	-	franco-arenosa	fr. pq. e md. bsa. e gs.	lig. dura	friável	lig. pl. e lig. peg.
Btx1	- 38	variegado	10YR 5/6, 10YR 6/3 e 5YR3/3	argila	fr. e mo. md. e gd. laminar	m. dura e ext. dura	m. firme e ext. firme	lig. pl. e lig. peg.
Btx2	- 70	10YR 5/6	10YR 7/3 e 5YR 5/6	argila	fr. pq. e md. bsa. e ba. e maciça	m. dura e ext. dura	m. firme e ext. firme	lig. pl. e lig. peg.
Btx3	- 110	2,5YR 7/4	10YR 7/3 e 2,5YR 4/6	argila	fr. pq. e md. bsa. e ba. e maciça	m. dura	firme	pl. e peg.
Btx4	- 170+	2,5YR 7/4	10YR 7/3 e 2,5YR 4/6	argila	fr. pq. e md. bsa. e ba. e maciça	m. dura	firme e friável	pl. e peg.

⁽¹⁾ fr.: fraca; mo.: moderada; pq.: pequena; md.: média; gd.: grande; bsa.: blocos subangulares; ba.: blocos angulares; gs.: grãos simples. ⁽²⁾ lig.: ligeiramente; m.: muito; ext.: extremamente; pl.: plástica; peg.: pegajosa.

No contexto geral da região, a textura dos horizontes com cimentação fraca (Btx) foi observada com maior frequência na faixa de média a argilosa. Nos perfis P7 e P11 (Quadro 5.1), entretanto, as texturas situam-se na faixa argilosa.

Com relação ao aspecto estrutural, em geral foram observados horizontes predominantemente maciços coesos a muito coesos. Estruturas fracas, pequenas a médias, em blocos angulares e subangulares, assim como nódulos ou estruturas irregulares, também foram

verificados associados com partes maciças ou de forma individualizada. Outras formas, como laminares (Figura 5.2 B), também foram observadas integrando parte dos horizontes Btx, como no perfil P11.

Em relação à consistência dos horizontes Btx, no estado seco variou de dura a extremamente dura, da mesma forma que nos volumes não-cimentados de horizontes coesos. No estado úmido, os materiais com cimentação fraca foram tipicamente firmes a muito firmes, mas apresentando propriedades fráguas que são características diferenciais dos materiais não-cimentados, coesos ou não-coesos. No estado molhado, a consistência depende muito da textura do material. Nos mais argilosos, mostrou-se plástica e variando de ligeiramente pegajosa a pegajosa. Nos materiais, ainda na faixa argilosa, porém, com textura mais próxima da faixa média, a consistência em geral foi ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa, da mesma forma que nos volumes não-cimentados associados.

No que concerne à transição entre horizontes, o contraste na passagem entre os horizontes Btx e os horizontes sobrejacentes foi observado em geral de forma abrupta ou clara, com topografia plana a ondulada.

Características Físicas

A granulometria nos horizontes Btx, que envolve partes com cimentação fraca e partes não-cimentadas, situou-se na faixa argilosa (Quadro 5.2). Entretanto, ressalta-se que os resultados refletiram a composição média dessas partes, uma vez que nas análises de rotina esses materiais são misturados e analisados conjuntamente.

Comparando-se os horizontes com cimentação fraca (Btx) e os não-cimentados, observou-se que os teores de argila dispersa em água, que se correlacionam negativamente com o grau de floculação, foram muito variados. Por conseguinte, nos casos estudados, não foram indicativos de diferenças entre esses horizontes.

Os valores da densidade do solo nos horizontes com cimentação fraca (Btx) mostraram-se mais elevados, similares ou mesmo inferiores aos dos horizontes não cimentados adjacentes (coesos e não-coesos). Portanto, a densidade isoladamente não pôde ser considerada como um parâmetro diagnóstico, mas apenas indicativo da presença de materiais com cimentação fraca, tipo fragipã.

Quadro 5.2 - Síntese de características físicas de Argissolos Amarelos apresentando horizontes com cimentação fraca (Btx)

Horizonte	Profundidade cm	Granulometria ⁽¹⁾				Argila dispersa em H ₂ O	Grau de flocculação	Densidade do solo ⁽²⁾ kg dm ⁻³
		Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila			
Perfil P7								
Ap	0 - 17	622	255	43	80	20	75	-
BA	- 35	524	275	61	140	80	43	-
Bt	- 70	421	205	52	322	221	31	1,62
Btx	- 85	152	164	238	446	182	59	1,62
Plácico	- 87	279	143	45	533	225	58	-
Btx1	- 135	219	108	125	548	284	48	1,60
Btx2	- 200+	262	144	26	568	40	93	1,64
Perfil P11								
Ap	0 - 15	359	341	98	202	182	10	1,59
Btx1	- 38	229	186	135	450	287	36	1,74
Btx2	- 70	211	186	153	450	41	91	1,71
Btx3	- 110	228	151	132	489	41	92	1,65
Btx4	- 170+	146	132	132	590	41	93	1,51

⁽¹⁾ Método do densímetro. ⁽²⁾ Média de três repetições pelo método do torrão parafinado (horizontes cimentados) ou anel volumétrico (horizontes não-cimentados).

HORIZONTES CIMENTADOS EM ARGISSOLOS ACINZENTADOS

Características morfológicas

As cimentações nesta classe de solos foram muito mais variadas do que aquelas presentes nos Argissolos Amarelos. Por vezes, no mesmo perfil, verificaram-se variações extremas, desde cimentações fracas até fortes. Como exemplo dessas variações, citam-se os casos dos perfis P8 e P13 (Quadro 5.3).

Os horizontes com cimentação fraca (Btx) apresentaram-se de forma contínua ou descontínua, da mesma forma que na classe dos Argissolos Amarelos. Por serem acinzentados, mostraram-se pouco contrastantes em relação à cor de fundo, também acinzentada. Já os horizontes com cimentação forte (Bm), normalmente com cores mais claras do que as do fundo não-cimentado, foram mais evidentes do que aqueles com cimentação fraca.

A faixa de profundidade mais freqüente destes horizontes foi de 60 a 120 cm. Entretanto, em situações particulares, constatou-se horizontes cimentados dentro de 60 cm ou abaixo de 200 cm.

A espessura é um parâmetro pouco conhecido, uma vez que, na maioria dos casos, estes horizontes ultrapassam 200 cm de profundidade e são difíceis ou impossíveis de serem examinados apenas com auxílio de trado.

Quadro 5.3 - Síntese de características morfológicas de Argissolos Acinzentados apresentando horizontes com cimentação forte (Bm) e/ou fraca (Btx)

Horizonte	Profundidade (cm)	Cor (solo úmido)		Textura	Estrutura ⁽¹⁾	Consistência ⁽²⁾		
		Fundo	Mosqueado			Seca	Úmida	Molhada
Perfil P4								
Ap	0 - 18	10YR 2/1	-	areia-franca	fr. pq. e md. bsa. e gs. e maciça	dura	friável	não pl. e não peg.
Bt1	- 33	10YR 4/2	10YR 4/6	franco-argiloarenosa	fr. pq. e md. bsa. e maciça	m. dura	friável	lig. pl. e lig. peg.
Bt2	- 63	10YR 5/2	10YR 4/6	franco-argiloarenosa	fr. pq. e md. bsa. e maciça	m. dura	friável	pl. e peg.
Btx1	- 120	10YR 7/2	10YR 6/8	argiloarenosa	maciça e fr. pq. e md. ba.	ext. dura	firme e m. firme	lig. pl. e lig. peg.
Btx2	- 150+	10YR 7/2	10YR 6/8	argila	maciça e fr. pq. e md. ba.	ext. dura	firme e m. firme	lig. pl. e lig. peg.
Perfil P8								
Ap	0 - 17	10YR 3/3	-	areia	gs. e fr. pq. e md. bsa.	macia	m. friável	não pl. e não peg.
AE	- 35	10YR 4/3	-	franco-arenosa	fr. pq. e md. bsa. e gs.	lig. dura	m. friável	não pl. e não peg.
Bt	- 70	10YR 6/3	-	franco-argiloarenosa	fr. pq. e md. bsa.	lig. dura e dura	friável	pl. e peg.
Btx/Bs	- 85	10YR 6/3	7,5YR 4/6	franco-argiloarenosa	fr. pq. e md. bsa. e maciça	dura e lig. dura	friável e firme	pl. e lig. peg.
Bm	- 160+	10YR 7/3	10YR 5/6	franco-argiloarenosa	maciça	ext. dura	ext. firme	lig. pl. e não peg.
Perfil P13								
Ap	0 - 18	10YR 3/2	-	areia	fr. pq. e md. bsa. e gs.	lig. dura	m. friável	não pl. e não peg.
Bt1	- 38	10YR 6/3	-	franco-arenosa	fr. pq. e md. bsa.	lig. dura e dura	friável	lig. pl. e lig. peg.
Bt2	- 90	10YR 6/2	-	franco-argiloarenosa	fr. pq. e md. bsa.	dura	friável	pl. e peg.
Bm	- 135	10YR 7/2	2,5YR 6/8	franca	maciça e fr. pq. e md. ba. e bsa.	ext. dura	ext. firme	lig. pl. e lig. peg.
Plácico	- 137	5YR 3/4	10YR 7/2	franca	fr. gd. laminar	ext. dura	ext. firme	lig. pl. e lig. peg.
Btx	- 170+	10YR 7/2	7,5YR 5/6	argila	fr. pq. e md. ba.	ext. dura	firme e friável	pl. e peg.

⁽¹⁾ fr.: fraca; mo.: moderada; pq.: pequena; md.: média; gd.: grande; bsa.: blocos subangulares; ba.: blocos angulares; gs.: grãos simples. ⁽²⁾ lig.: ligeiramente; m.: muito; ext.: extremamente; pl.: plástica; peg.: pegajosa.

Em termos de cor, as diferenciações observadas (Quadro 5.3) foram os tons mais claros ou mesmo esbranquiçados em relação ao fundo acinzentado normal nos solos desta classe. Porém, em certos casos, os contrastes foram muito difusos, dificultando a identificação. Outro ponto de destaque foi a presença de mosqueados. Estes constituem feições pedológicas que normalmente estão associadas às zonas do perfil onde ocorrem os horizontes Btx ou Bm, face às maiores restrições de permeabilidade. Entretanto, ressalta-se que mosqueados não foram exclusivos destes horizontes. Os mais comuns mostraram cores amarelo-brunado (10YR 6/8), bruno-amarelado 10YR 5/6), amarelo-oliváceo (2,5YR 6/8) e bruno-forte (7,5YR 5/6).

A textura dos horizontes Btx variou na faixa de média a argilosa (Quadro 5.3). Já nos horizontes tipo Bm, a tendência observada foi de materiais com textura mais arenosa em relação aos horizontes não-cimentados ou com cimentação fraca, adjacentes. Nos perfis examinados (Quadro 5.3), verificou-se na faixa média.

Em termos estruturais, para os horizontes do tipo Btx, são válidas as mesmas considerações feitas para os Argissolos Amarelos. Com relação aos horizontes Bm, em geral apresentaram-se maciços e extremamente coesos. Porém, não muito raramente mostraram casos combinando formas maciças com volumes em forma de blocos (Quadro 5.3) e/ou laminares.

A Consistência no material úmido, apresentou-se com uma propriedade-chave para o diagnóstico dos horizontes com cimentação fraca (Btx). Estes, caracteristicamente apresentaram as denominadas propriedades fráguas, diferenciando-se dos materiais não-cimentados que são compressíveis e/ou deformam-se lentamente quando submetidos à pressão. No caso dos horizontes com cimentação forte (Bm), a consistência em geral mostrou-se extremamente firme ou muito firme. Entretanto, testes de imersão em água, ácido ou base foram necessários para diferenciar as cimentações fortes das fracas.

No estado seco, a consistência mostrou-se similar em Btx ou Bm, sendo normalmente extremamente dura. No estado molhado, variou conforme a textura. Materiais com textura média a argilosa, normalmente apresentaram consistência de ligeiramente plástica a plástica e de ligeiramente pegajosa a pegajosa. Aqueles com textura na faixa média, comumente mostraram consistência ligeiramente plástica e de não pegajosa a ligeiramente pegajosa.

A Transição na passagem dos horizontes Btx e/ou Bm para os horizontes subjacentes em geral mostrou contraste abrupto ou claro. Quanto à topografia, na maioria dos casos observados, variou de plana a ondulada.

Características físicas

A composição granulométrica (Quadro 5.4) foi indicativa de que no sentido do aumento das cimentações em geral ocorre uma diminuição nos teores de argila. Este aspecto, conforme

exames de campo, tanto ocorre vertical como lateralmente. Um exemplo da variação no sentido vertical foi observado no perfil P13 (Quadro 5.4). Já no perfil P8, também com horizontes Btx/Bs e Bm (Quadro 5.4), os resultados foram divergentes do esperado. Visando elucidar as divergências, foram coletadas novas amostras e repetidas análises granulométricas pelo método da pipeta de horizontes selecionados dos perfis P8 e P13. Os novos resultados (Quadros 5.5), entretanto, confirmaram a tendência geral. Resultados similares também foram obtidos por FILIZOLA et al. (2001) no estudo de solos da região.

Com relação aos teores de argila dispersos em água, que se correlacionam negativamente com o grau de floculação, notou-se uma grande variabilidade. Portanto, não indicam qualquer tendência para diferenciar materiais cimentados de não-cimentados.

A densidade do solo nos horizontes cimentados apresentou valores relativamente dispersos, da mesma forma que nos horizontes não-cimentados (Quadro 5.4). Portanto, isoladamente, não permite diferenciar materiais cimentados dos não-cimentados.

Quadro 5.4 - Síntese de características físicas de Argissolos Acinzentados apresentando horizontes com cimentação forte (Bm) e/ou fraca (Btx)

Horizonte	Profundidade cm	Granulometria ⁽¹⁾				Argila dispersa em H ₂ O	Grau de floculação	Densidade do solo ⁽²⁾ kg dm ⁻³
		Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila			
Perfil P4								
Ap	0 - 18	594	254	31	121	80	34	1,78
Bt1	- 33	469	256	33	242	162	33	1,68
Bt2	- 63	422	227	47	304	162	47	1,52
Btx1	- 120	341	118	189	352	41	88	1,51
Btx2	- 150+	206	162	118	514	41	92	1,50
Perfil P8								
Ap	0 - 17	696	201	23	80	20	75	1,63
AE	- 35	598	219	42	141	121	14	1,61
Bt	- 70	478	205	54	263	223	15	1,51
Btx/Bs	- 85	408	203	82	307	246	20	1,29
Bm	- 160+	345	148	173	334	63	81	1,50
Perfil P13								
Ap	0 - 18	557	326	77	40	20	50	1,70
Bt1	- 38	477	292	90	141	141	0	1,72
Bt2	- 90	399	272	87	242	40	83	1,55
Bm	- 135	328	179	391	102	20	80	1,79
Plácico	- 137	192	151	471	186	41	78	1,68
Btx	- 170+	254	191	108	447	41	91	1,63

⁽¹⁾ Método do densímetro. ⁽²⁾ Média de três repetições pelo método do torrão parafinado (horizontes cimentados) ou anel volumétrico (horizontes não-cimentados).

Quadro 5.5 - Síntese de características físicas de horizontes selecionados de Argissolos Acinzentados apresentando cimentação forte (Bm) e/ou fraca (Btx)

Hori- zonte	Profun- didade	Granulometria ⁽¹⁾				
		Areia grossa	Areia fina	Silte grosso	Silte fino	Argila
	cm	----- g kg ⁻¹ -----				
Perfil P8						
Bm	85 - 160+	490	210	60	70	170
Perfil P13						
Ap	0 - 18	640	280	20	0	60
Bt1	- 38	440	350	40	0	170
Bt2	- 90	430	250	50	10	260
Bm	- 135	560	260	50	40	90
Plácico	- 137	390	270	80	70	190
Btx	-170+	330	350	100	60	160

⁽¹⁾ Método da pipeta.

HORIZONTES CIMENTADOS EM ESPODOSSOLOS

Características morfológicas

Na classe dos Espodossolos (Quadro 5.6) foi observado que são mais comuns horizontes com cimentação forte (Bm) (Figura 5.1 A) do que aqueles com cimentação fraca (Bx).

No ambiente das suaves depressões dos tabuleiros costeiros, a faixa de profundidade mais freqüente destes horizontes foi entre 60 e 120 cm, conforme observações realizadas em relação aos Argissolos Amarelos e Argissolos Acinzentados. No entanto, em situações particulares, estes horizontes foram observados dentro de 60 cm ou abaixo de 200 cm.

Em função dos estudos pedológicos de rotina limitarem-se até 200 cm de profundidade, a espessura máxima destes horizontes ainda é pouco conhecida. Um caso examinado, em um corte de estrada, mostrou horizontes com cimentação forte (Bm) interligados de forma contínua com horizontes apresentando cimentação fraca (Bx) e com limite inferior abaixo de 3 m. Neste caso, a espessura média do sistema de horizontes cimentados ficou numa faixa de 2 m (Figura 5.3).

Quadro 5.6 A - Síntese de características morfológicas de Espodossolos apresentando horizontes com cimentação forte (Bm) ou fraca (Bx)

Horizonte	Profundidade (cm)	Cor (solo úmido)		Textura	Estrutura ⁽¹⁾	Consistência ⁽²⁾		
		Fundo	Mosqueado			Seca	Úmida	Molhada
Perfil P5								
Ap	0 - 18	10YR 3/1	-	areia	gs. e fr. pq. e md. granular	macia e solta	m. friável	não pl. e não peg.
E	- 110	10YR 7/2	-	areia	gs. e fr. pq. e md. bsa.	macia e solta	m. friável	não pl. e não peg.
Bhs	- 115	5YR 3/3	-	areia-franca	fr. pq. e md. bsa. e maciça	lig. dura e dura	friável e firme	não pl. e não peg.
Bm	- 145	variegado	10YR 7/2, 10YR 6/3 e 2,5Y 5/6	areia-franca	maciça	ext. dura	ext. firme	não pl. e não peg.
Bhsm	- 180+	5YR 3/3	10YR 7/3	areia-franca	maciça e fr. gd. bsa.	dura e ext. dura	firme e m. firme	lig. pl. e lig. peg.
Perfil P9								
Ap	0 - 25	10YR 3/2	-	franco-arenosa	gs. e fr. pq. e md. granular	macia	m. friável	não pl. e não peg.
E	- 95	10YR 5/3	-	areia	gs. e maciça	macia	m. friável	não pl. e não peg.
Bhs/E	- 160	10YR 3/3	-	areia-franca	fr. pq. e md. bsa. e gs.	macia e dura	m. friável	não pl. e não peg.
Bsm/E	- 190	7,5YR 5/4	-	areia-franca	mo. md. laminar e maciça	dura e ext. dura	m. firme	não pl. e não peg.
Bm/E	- 260+	10YR 7/2	10YR 5/6	franco-arenosa	maciça	ext. dura	ext. firme	não pl. e não peg.
Perfil P10								
Ap	0 - 18	10YR 3/3	-	areia-franca	fr. pq. e md. bsa. e granular	lig. dura	m. friável	lig. pl. e lig. peg.
AE	- 38	10YR 5/4	-	franco-arenosa	fr. pq. e md. bsa.	lig. dura	m. friável	lig. pl. e lig. peg.
BE	- 55	2,5Y 7/6	-	franco-arenosa	fr. pq. e md. bsa.	-	m. friável	lig. pl. e lig. peg.
Bs	- 73	10YR 4/4	10YR 6/4	franco-arenosa	mo. gd. laminar	-	firme e m. firme	lig. pl. e lig. peg.
Plácico	- 74,5	2,5YR 3/4	10YR 5/6	franco-arenosa	fr. md. laminar	-	m. firme	-
Bx1	- 90	10YR 5/6	5YR 3/4	franco-arenosa	maciça e fr. md. bsa.	-	m. firme	lig. pl. e lig. peg.
Bx2	- 150+	variegado	10YR 5/6 10YR 6/3	franco-arenosa	fr. md. bsa. e ba.	-	m. firme	lig. pl. e lig. peg.
Perfil P12								
Ap	0 - 20	10YR 3/1	-	areia	fr. pq. e md. bsa. e gs.	lig. dura e solta	m. friável	lig. pl. e não peg.
E1	- 40	10YR 5/3	-	areia	fr. pq. e md. bsa. e gs.	lig. dura e solta	m. friável	lig. pl. e não peg.
E2	- 85	10YR 4/2	-	areia-franca	fr. pq. e md. bsa. e gs.	lig. dura e solta	m. friável	lig. pl. e não peg.
Bm1	- 120	2,5Y 7/2	-	franco-siltosa	maciça	ext. dura	ext. firme	lig. pl. e não peg.
Bm2	- 150+	2,5Y 7/2	10YR 5/6	franco-siltosa	maciça	ext. dura	ext. firme	lig. pl. e não peg.

⁽¹⁾ fr.: fraca; mo.: moderada; pq.: pequena; md.: média; gd.: grande; bsa.: blocos subangulares; ba.: blocos angulares; gs.: grãos simples. ⁽²⁾ lig.: ligeiramente; m.: muito; ext.: extremamente; pl.: plástica; peg.: pegajosa.

Quadro 5.6 B - Síntese de características morfológicas de Espodosolos Hidromórficos apresentando horizontes com cimentação forte (Bm)

Horizonte	Profundidade (cm)	Cor (solo úmido)		Textura	Estrutura ⁽¹⁾	Consistência ⁽²⁾		
		Fundo	Mosqueado			Seca	Úmida	Molhada
Perfil P6								
Ap	0 - 18	10YR 2/1	-	areia	gs. e maciça	macia e solta	m. friável	não pl. e não peg.
E	- 127	10YR 7/2	-	areia	maciça e gs.	macia	m. friável	não pl. e não peg.
Bs	- 130	7,5YR 3/4	-	areia-franca	maciça e fr. pq. e md. bsa.	lig. dura e dura	friável e firme	não pl. e não peg.
Bm/Bsm	- 170+	10YR 6/3	10YR 5/6 e 7,5YR 4/4	franco-arenosa	maciça	ext. dura	ext. firme	não pl. e não peg.
Perfil P14								
Ap	0 - 18	10YR 3/2	-	areia	gs. e fr. pq. e md. granular	macia e solta	m. friável	não pl. e não peg.
E1	- 110	10YR 6/2	-	areia	maciça e fr. pq. e md. bsa.	macia e solta	m. friável	não pl. e não peg.
E2	- 128	10YR 4/2	-	areia	maciça e fr. pq. e md. bsa.	-	m. friável	não pl. e não peg.
Bhs	- 133	10YR 2/2	-	areia-franca	maciça	-	friável	lig. pl. e não peg.
Bm	- 170+	10YR 6/2	7,5YR 4/4	areia-franca	maciça	-	ext. firme	lig. pl. e não peg.
Perfil P15								
Ap	0 - 18	10YR 3/2	-	areia	gs. e fr. pq. e md. granular	macia e solta	m. friável	lig. pl. e não peg.
E1	- 80	10YR 5/3	-	areia	fr. pq. e md. bsa. e gs.	lig. dura e maciça	m. friável	não pl. e não peg.
Bhs	- 83	7,5YR 3/3	-	areia-franca	fr. pq. e md. bsa. e maciça	lig. dura	friável	não pl. e não peg.
Bm	- 120+	2,5Y 6/4	10YR 5/6	areia-franca	maciça	ext. dura	ext. firme	lig. pl. e não peg.

⁽¹⁾ fr.: fraca; mo.: moderada; pq.: pequena; md.: média; gd.: grande; bsa.: blocos subangulares; ba.: blocos angulares; gs.: grãos simples. ⁽²⁾ lig.: ligeiramente; m.: muito; ext.: extremamente; pl.: plástica; peg.: pegajosa.

A cor dos horizontes cimentados (Quadro 5.6) em geral foi observada com padrões claros ou acinzentados, pouco contrastantes em relação aos horizontes não-cimentados. Entretanto, quando no topo dos horizontes cimentados ocorrem horizontes do tipo Bh ou Bhs, os contrastes tornam-se mais destacados.

Em função das fortes restrições de permeabilidade, comumente ocorrem mosqueados associados aos horizontes cimentados. Os mais comuns apresentaram cores do tipo bruno-oliváceo-claro (2,5YR 5/6), bruno-amarelado (10YR 5/6) e bruno (7,5YR 4/4).

Nesta classe de solos, os horizontes cimentados tipicamente apresentaram textura na faixa de arenosa a média (Quadro 5.6). Embora ocorram mudanças radicais de propriedades entre os horizontes cimentados e os não-cimentados, a passagem entre eles mostrou-se praticamente uniforme ou com mudanças relativamente pequenas em termos de textura.

Com relação à natureza das estruturas, os horizontes tipo Bm e Bsm apresentaram-se normalmente com aspecto maciço coeso ou, por vezes, compreendendo uma associação de partes maciças com estruturas em blocos de tamanhos diversos. As proporções entre essas partes variaram de local para local, assim como no mesmo perfil. Entretanto, o predomínio foi sempre de partes maciças.

A consistência foi sempre muito contrastante entre os horizontes cimentados e os não-cimentados. No estado seco, variou normalmente de extremamente dura a dura e de solta a ligeiramente dura, respectivamente, nos horizontes cimentados e não-cimentados. Quando avaliada no material úmido, os horizontes cimentados apresentaram-se extremamente firmes a muito firmes, enquanto que os não-cimentados em geral foram muito friáveis. No estado molhado, devido ao fato de as texturas serem relativamente semelhantes entre as partes cimentadas e não-cimentadas, as consistências também foram similares (Quadro 5.6).

O contraste de separação entre os horizontes Bm ou Bsm e os horizontes sobrejacentes em geral foi abrupto, com topografia ondulada a plana (Quadro 5.6).

Características físicas

A composição granulométrica dos horizontes com cimentação forte ou fraca variou na faixa de arenosa a média, com teores de argila relativamente baixos (Quadro 5.7). Os teores máximos de argila situaram-se sempre abaixo de 200 g/kg e na passagem dos horizontes cimentados para os não-cimentados, as mudanças mostraram-se relativamente suaves.

A argila dispersa em água, correlacionada de forma inversa com o grau de floculação, mostrou valores muito variados tanto nos horizontes cimentados como naqueles não-cimentados.

Na maioria dos casos, a densidade dos horizontes cimentados (Bm, Bsm, Bx) mostrou valores mais elevados do que nos materiais não-cimentados (Quadro 5.7). Porém, em certos casos, os horizontes não-cimentados apresentaram densidades similares às dos cimentados. Portanto, isoladamente, a densidade do solo não pode ser utilizada com um critério diagnóstico dos horizontes cimentados, mas apenas como um indicativo dos mesmos.

Quadro 5.7 A - Síntese de características físicas de Espodosolos apresentando horizontes com cimentação forte ou fraca

Horizonte	Profundidade	Granulometria ⁽¹⁾				Argila dispersa em H ₂ O	Grau de flocculação	Densidade do solo ⁽²⁾
		Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila			
	cm	----- g kg ⁻¹ -----						kg dm ⁻³
Perfil P5								
Ap	0 - 18	775	165	20	40	20	50	-
E	- 110	601	266	93	40	0	100	-
Bhs	- 115	673	203	43	81	20	75	-
Bm	- 145	562	222	132	84	42	50	1,52
Bhsm	- 180+	590	267	60	83	21	75	-
Perfil P9								
Ap	0 - 25	720	147	73	60	40	33	-
E	- 95	781	156	43	20	20	0	-
Bhs/E	- 160	640	170	87	103	61	41	-
Bsm/E	- 190	543	237	179	41	20	51	1,35
Bm/E	- 260+	647	131	120	102	41	60	1,73
Perfil P10								
Ap	0 - 18	377	410	153	60	60	0	1,76
AE	- 38	332	419	148	101	60	41	1,79
BE	- 55	340	405	154	101	40	60	1,77
Bs	- 73	323	380	209	88	44	50	1,23
Plácico	- 74,5	367	349	240	44	44	0	-
Bx1	- 90	416	175	325	42	42	0	1,86
Bx2	- 120	458	162	274	43	43	0	1,57
Perfil P12								
Ap	0 - 20	620	287	73	20	20	0	1,60
E1	- 40	604	299	57	40	20	50	1,78
E2	- 85	536	318	86	60	60	0	1,63
Bm1	- 120	301	139	519	41	21	49	1,74
Bm2	- 150+	225	118	637	20	20	0	1,73

⁽¹⁾ Método do densímetro. ⁽²⁾ Média de três repetições pelo método do torrão parafinado (horizontes cimentados) ou anel volumétrico (horizontes não-cimentados).

Quadro 5.7 B - Síntese de características físicas de Espodossolos Hidromórficos apresentando horizontes com cimentação forte

Horizonte	Profundidade cm	Granulometria ⁽¹⁾				Argila dispersa em H ₂ O	Grau de flocculação	Densidade do solo ⁽²⁾ kg dm ⁻³
		Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila			
Perfil P6								
Ap	0 - 18	713	225	22	40	20	50	1,57
E	- 127	602	288	70	40	20	50	1,61
Bs	- 130	582	253	63	102	20	80	-
Bm/Bsm	- 170+	548	232	117	103	21	80	1,79
Perfil P14								
Ap	0 - 18	709	211	60	20	20	0	1,44
E1	- 110	680	272	28	20	20	0	1,64
E2	- 128	581	340	59	20	20	0	1,76
Bhs	- 133	549	266	104	81	61	25	-
Bm	- 170+	509	281	129	81	61	25	1,78
Perfil P15								
Ap	0 - 18	708	188	84	20	20	0	1,34
E1	- 80	669	268	43	20	20	0	1,63
Bhs	- 83	532	231	195	42	21	50	-
Bm	- 120+	569	235	112	84	42	50	1,69

⁽¹⁾ Método do densímetro. ⁽²⁾ Média de três repetições pelo método do torrão parafinado (horizontes cimentados) ou anel volumétrico (horizontes não-cimentados).

CLASSES DE CIMENTAÇÃO

Para o enquadramento nas definições de horizonte com cimentação forte, tipo duripã, ou fraca, tipo fragipã, os materiais cimentados devem, em princípio, ser submetidos aos testes de imersão em água, ácido ou base, de modo que se possa verificar se as reações dos materiais nos testes de imersão conferem com as características requeridas nas suas respectivas definições. Visando este propósito, amostras selecionadas foram submetidas aos testes laboratoriais de imersão em ácido e base, complementando os resultados dos testes de imersão em água realizados no campo.

Com base nos resultados dos testes, os materiais foram individualizados em duas classes gerais de cimentação, isto é, (a) a cimentação fraca e (b) a cimentação forte (Quadro 5.8).

Quadro 5.8 - Estimativas do volume de material esboroado nos testes de imersão em água, ácido e base em amostras selecionadas de horizontes cimentados

Amostra	Textura	Testes de imersão com materiais de 2 a 5 cm de diâmetro						Classe de cimentação
		Água ⁽¹⁾	Ácido (HCl) ⁽²⁾			Base (NaOH) ⁽²⁾		
			1N	3N	6N	1M	4M	
----- Volume esboroado em g kg ⁻¹ -----								
P4 - Btx1	argilo-arenosa	± 500	± 500	-	-	> 500	-	fraca ^(*)
P4 - Btx2	argila	> 500	> 500	-	-	> 500	-	fraca
P11-Btx2	argila	> 500	> 500	-	-	> 500	-	fraca
P11-Btx3	argila	> 500	> 500	-	-	> 700	-	fraca
P11-Btx4	argila	1000	1000	-	-	1000	-	fraca
P12-Bm1	franco-siltosa	< 50	< 50	> 900	1000	>900	-	forte
P12-Bm2	franco-siltosa	< 50	< 50	1000	1000	< 300	> 500	forte
P13-Bm	franca	< 100	< 500	1000	1000	> 500	1000	forte
P14-Bm	areia-franca	< 50	< 500	1000	1000	1000	-	forte
P15-Bm	areia-franca	< 50	< 50	< 500	< 500	> 800	> 800	forte
P17-Bm1	areia-franca	< 50	< 50	-	-	< 200	1000	forte

⁽¹⁾Testes realizados no campo com duração de 4 a 8 horas. ⁽²⁾Testes realizados no laboratório com duração de 10 dias. ^(*)Material com cimentação fraca por apresentar propriedades fráguas em mais da metade do volume.

Os materiais enquadrados na classe de cimentação fraca esboroam-se totalmente ou em mais da metade do volume em água, HCl 1N, assim como em NaOH 1M, conforme critérios estabelecidos em UNITED STATES (1999) e EMBRAPA (1999) (Figura 5.4). Entretanto, considerou-se também nesta classe materiais que apresentaram um percentual de esboroamento em torno da metade do volume, mas com propriedades fráguas predominando na maior parte do material, como foi o caso da amostra do horizonte P4-Btx1 (Quadro 5.8). Este horizonte, em condições de campo, já indicava possuir características próximas daquelas de horizontes com cimentação forte. Como regra de decisão, utilizou-se do conceito de propriedades fráguas para situá-lo na classe de cimentação fraca, uma vez que pelo volume de material esboroado não foi possível definir a classe de cimentação.

As amostras de horizontes com cimentação forte, por outro lado, mostraram-se estáveis ou esboroaram-se em menos da metade do volume em água ou HCl 1N, mas esboroaram-se totalmente ou em mais da metade do volume em solução concentrada de NaOH 1M e/ou 4M (Figura 5.4).

Inferiu-se que a solução alcalina foi efetiva no esboroamento dos horizontes com cimentação forte em função da sua capacidade de dissolver agentes cimentantes (amorfos) da fase mineral e possíveis agentes cimentantes relacionados com complexos orgânicos. Conforme STEVENSON (1994), acredita-se que o ataque alcalino quebra as ligações entre as frações orgânicas e minerais, desestabilizando as cimentações. A extração de ácidos orgânicos (cor escura) e a desestabilização das cimentações podem ser vistos na figura 5.4.

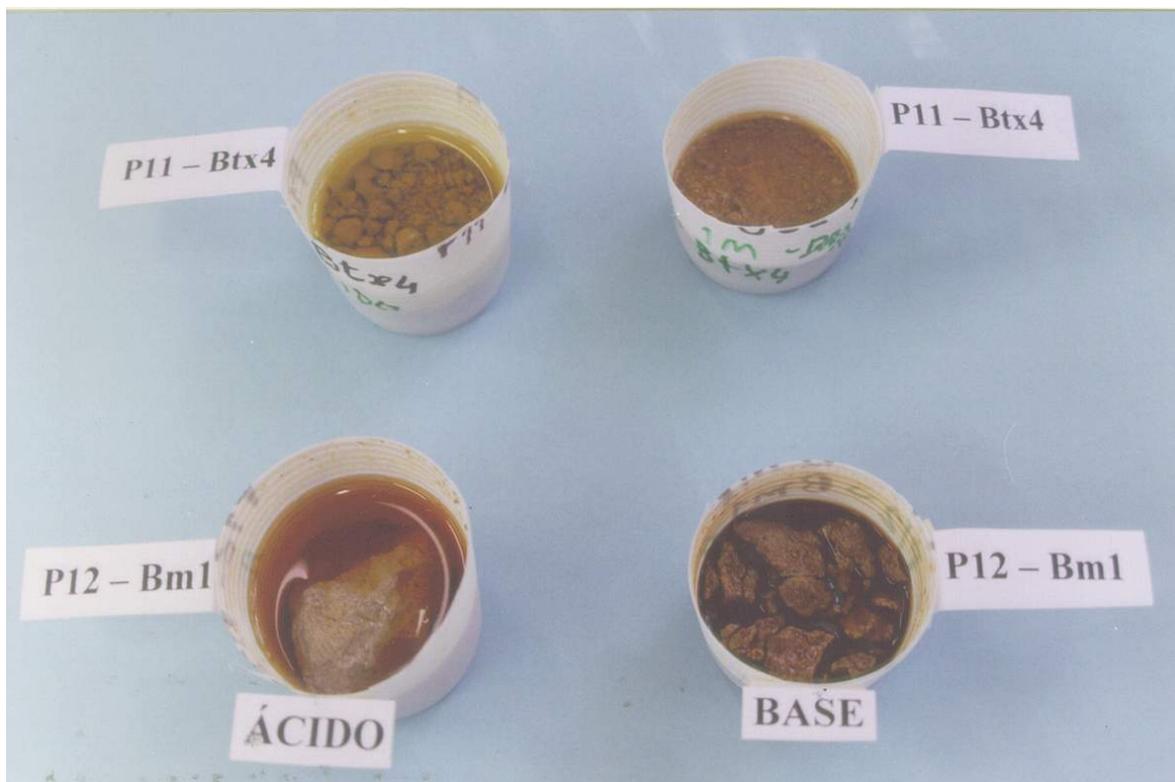


Figura 5.4 - Amostras de horizonte com cimentação fraca (P11-Btx4) e forte (P12-Bm1) imersas em solução ácida (HCl 1N) e básica (NaOH 1M) no período de 10 dias.

Tipos de cimentação forte

Os resultados indicaram que diante das soluções ácidas e básicas existem variações em, pelo menos, três tipos de reação das cimentações fortes (Quadro 5.8). Estas variações foram categorizadas como do tipo I, II e III, conforme características discriminadas em seguida.

A cimentação forte tipo I ocorreu nos materiais cujo esboroamento foi nulo ou praticamente nulo (menos de 100 g/kg) nos testes de imersão em solução ácida (HCl 1N), mas foi efetivo em mais da metade do volume em solução básica (NaOH 1M). Como exemplo, tem-se a amostra P12-Bm1 (Quadro 5.8).

A cimentação forte tipo II caracterizou-se pelo esboroamento nulo ou praticamente nulo (menos de 100 g/kg), quando os materiais cimentados foram imersos em solução de HCl 1N e/ou NaOH 1M. Somente ocorreu esboroamento efetivo, em mais da metade do volume, na imersão em solução básica muito concentrada (NaOH 4M). Como exemplo, tem-se a amostra P12-Bm2 (Quadro 5.8).

Já a cimentação forte tipo III caracterizou-se pelo comportamento intermediário entre as cimentações tipo I e II. Neste caso os materiais esboroaram-se de forma significativa, mas em menos da metade do volume, em solução de HCl 1N. Por outro lado, o esboroamento foi efetivo, na maior parte do volume, em solução de NaOH 1M e/ou 4M. Como exemplo, tem-se a amostra P14-Bm (Quadro 5.8).

É importante destacar que numa mesma seqüência vertical de horizontes cimentados ou dentro de um mesmo horizonte os materiais mostraram variação quanto ao grau de cimentação forte. Outro ponto verificado foi o esboroamento de materiais com cimentação forte, não apenas em soluções básicas, mas também em soluções ácidas muito concentradas (HCl 3N ou 6N) (Quadro 5.8).

Caracterização do material esboroadado

Nos testes de imersão em ácido ou base (Quadro 5.8), os resultados indicaram apenas uma estimativa do volume de material esboroadado. Para se conhecer com mais detalhes o efeito das soluções ácidas e/ou básicas nos materiais cimentados, foram desenvolvidas avaliações quantitativas nos materiais esboroadados, considerando as seguintes classes de tamanho: 0 - 2 mm; 2 - 4 mm; 4 - 6 mm; e > 6 mm. As avaliações foram centralizadas nas amostras imersas nas soluções de HCl 1N e NaOH 1M ou 4M, que são referenciais utilizados para diferenciar as cimentações fracas das fortes.

Os horizontes da classe de cimentação fraca, tipo fragipã, esboroaram-se em fragmentos com tamanho predominantemente inferiores a 6 mm (Figura 5.5A), seja em soluções ácidas ou básicas. Entretanto, quando estes materiais apresentaram maior grau de desenvolvimento,

tendendo para as cimentações fortes, o esboroamento ocorreu em fragmentos com tamanho predominantemente maiores que 6 mm (Figura 5.5B).

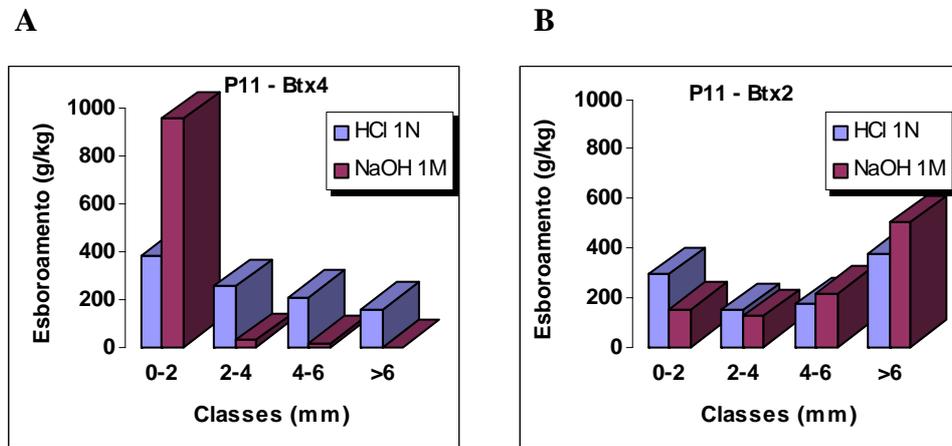


Figura 5.5 - Classes de tamanho de materiais esboroados em soluções ácidas e básicas. A: horizonte com cimentação fraca em condições normais; B: horizonte com cimentação fraca, próxima do grau forte.

Por sua vez, amostras de horizontes da classe de cimentação forte (Bm) quando imersas em soluções básicas, esboroaram-se em fragmentos com tamanhos diversos, provavelmente em reflexo aos diferentes graus de cimentação destes materiais.

Em solução básica de NaOH 1M, os horizontes com cimentação forte, tipo I, esboroaram-se em fragmentos com tamanho predominantemente inferiores a 2 mm na maior parte do volume. Ao contrário, em soluções ácidas (HCl 1N), permanecem estáveis em mais de 900 g/kg (Figura 5.6 A). Horizontes com cimentação forte, tipo II, permaneceram praticamente estáveis em solução básica de NaOH 1M, mas desestabilizam-se na imersão em solução alcalina muito concentrada de NaOH 4M. Neste caso, a maior parte do volume esboroadado reduziu-se a fragmentos com tamanho inferior a 2 mm (Figura 5.6 B).

Horizontes com cimentação forte, tipo III, após imersão em solução básica de NaOH 1M, esboroaram-se em fragmentos menores que 6 mm em menos da metade do volume. Por outro lado, esboroaram-se em mais da metade do volume em fragmentos menores que 2 mm, quando foram imersos em solução básica muito concentrada (NaOH 4M) (Figura 5.7). Em solução ácida de HCl 1N, os materiais com tamanho maior que 6 mm permanecem estáveis durante 10 dias.

Em geral, todo material esboroado pela ação das soluções ácidas ou básicas resultou em fragmentos inferiores a 6 mm. Entretanto, observaram-se casos, como no da amostra P13-Bm, em que os fragmentos esboroados (ou fraturados) apresentaram tamanhos maiores que 6 mm.

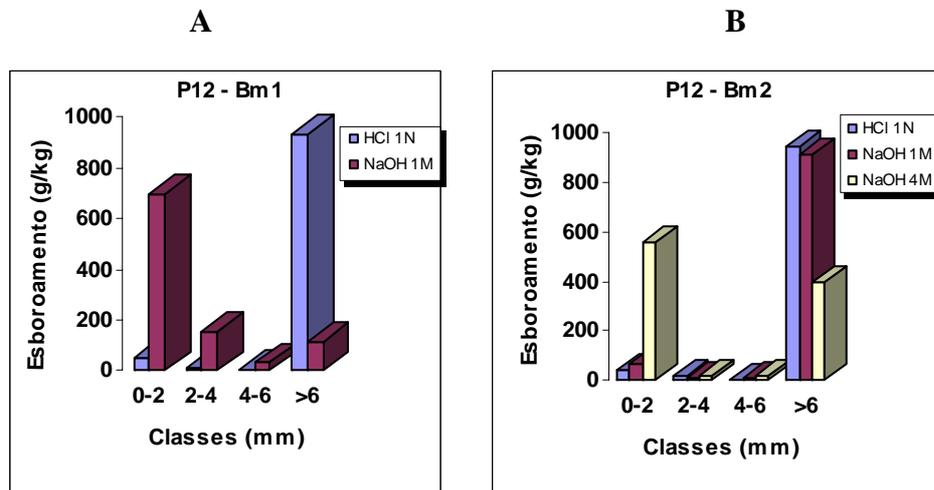


Figura 5.6 - Classes de tamanho de materiais esboroados em soluções ácidas e básicas. A: horizonte com cimentação forte, tipo I; e B: horizonte com cimentação forte, tipo II.

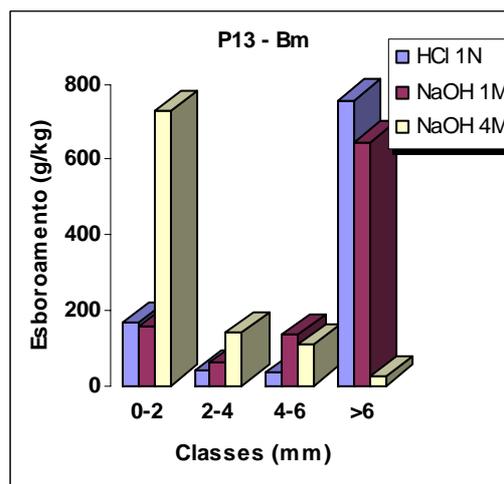


Figura 5.7 - Classes de tamanho de materiais esboroados em soluções ácidas e básicas. Horizonte com cimentação forte, tipo III.

Horizontes cimentados e suas relações com classes texturais

No ambiente das suaves depressões dos tabuleiros costeiros verificou-se que os horizontes da classe de cimentação fraca, tipo fragipã, foram desenvolvidos em materiais com texturas diversas, desde a faixa arenosa até a argilosa ou até mesmo em materiais muito argilosos, conforme observações de JACOMINE (1974). Por outro lado, os horizontes da classe de cimentação forte, tipo Bm, foram verificados em materiais com variações texturais muito menores, na faixa de arenosa a média, com teores de argila inferiores a 200 g/kg (Figura 5.8).

Cimentação	Forte	Forte		
	Fraca	Fraca	Fraca	Fraca
	0	100	200	>300
	Teor de argila (g/Kg)			

Figura 5.8 - Observações sobre classes de cimentação e suas relações com teores da fração argila.

Ao longo de uma seqüência vertical de horizontes, quando ocorrem variações substanciais nos teores de argila e nos graus de cimentação, observou-se que as cimentações fortes localizam-se na zona do perfil onde os teores de argila situam-se abaixo do limite de 200 g/kg (Figura 5.8). Ressalta-se que entre os solos estudados, em nenhum caso verificou-se acúmulo de argila nas zonas de formação dos horizontes com cimentação forte (Bm) em quantidade suficiente para caracterização de horizonte B textural. Um exemplo típico desta situação observa-se na figura 5.9.

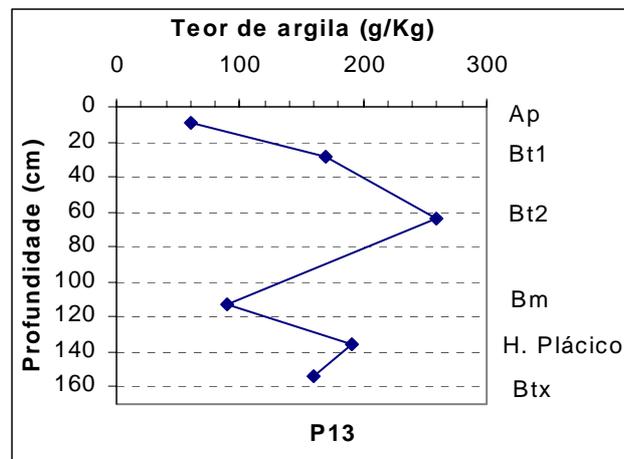


Figura 5.9 - Variação do conteúdo da fração-argila em um perfil de Argissolo Acinzentado (P13) apresentando horizontes com cimentação forte (Bm) e fraca (Btx).

VARIAÇÕES DE CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS E FÍSICAS EM SEQUÊNCIAS DE SOLOS COM HORIZONTES CIMENTADOS EM SUAVES DEPRESSÕES

As suaves depressões desenvolvidas no ambiente dos tabuleiros costeiros variam em termos de tamanho, forma, profundidade, além de aspectos relativos à drenagem e às transformações pedológicas. Com relação ao tamanho, observaram-se áreas abaciadas desde poucos metros até extensões superiores a um quilômetro. Em termos de forma, são mais comuns as arredondadas. Entretanto, algumas apresentam-se alongadas ou irregulares. Quanto à profundidade, ocorrem áreas abaciadas, com desníveis variando desde poucos centímetros até valores da ordem de dezenas metros (Figura 5.10).

Com relação à drenagem, nas condições atuais, foi verificado que somente em poucas depressões acumula-se água no período chuvoso. Também constatou-se casos isolados nos quais, mesmo na época mais seca do ano, persiste um certo acúmulo de água subsuperficial em função das restrições de permeabilidade de horizontes cimentados contínuos. Ressalta-se que a grande maioria das depressões constituem sistemas de drenagem fechados lateralmente. Entretanto, algumas delas são abertas por meio de canais de drenagem que interligam as áreas abaciadas com os vales mais profundos que dissecam e drenam a região.

Com relação às transformações de solos no ambiente das suaves depressões, em geral foram aspectos muito evidentes. Os maiores destaques quase sempre foram notados pelas mudanças texturais e pelo surgimento de horizontes cimentados. Em direção ao centro das depressões, foi verificado que a textura normalmente torna-se progressivamente mais arenosa e, em geral, aumenta-se a intensidade das cimentações. Neste contexto, passagens de horizontes com cimentação fraca (tipo Btx) para horizontes com cimentação forte (tipo Bm) foram observadas de forma contínua (Figura 5.11).

No que concerne à evolução pedológica, pôde-se distinguir dois casos. O primeiro refere-se às transformações consideradas relativamente mais completas que culminaram com a formação de Espodossolos. O segundo refere-se às transformações consideradas parciais ou incompletas, pois estacionaram com a formação de Argissolos Acinzentados ou, por vezes, em solos intermediários entre Argissolos Acinzentados e Espodossolos (Figura 5.12).

Ao longo das transformações mais completas, apresentando desde horizontes com cimentação fraca até forte, as passagens mais comuns foram do tipo: Argissolos Amarelos/Espodossolos, Argissolos Acinzentados/Espodossolos; Argissolos Amarelos/Argissolos Acinzentados/Espodossolos.

Nas transformações consideradas parciais ou incompletas, onde também ocorrem horizontes com cimentação fraca até forte, as passagens observadas foram comumente do tipo Argissolos Amarelos/Argissolos Acinzentados.

Na figura 5.12 observam-se duas suaves depressões com seqüências de solos refletindo transformações pedológicas diferenciadas. Na transformação mais completa, o mapa de solos mostra uma passagem do tipo Argissolos Amarelos/Argissolos Acinzentados/Espodossolos. Na parcial, a evolução pedológica corresponde à passagem Argissolos Amarelos/Argissolos Acinzentados.

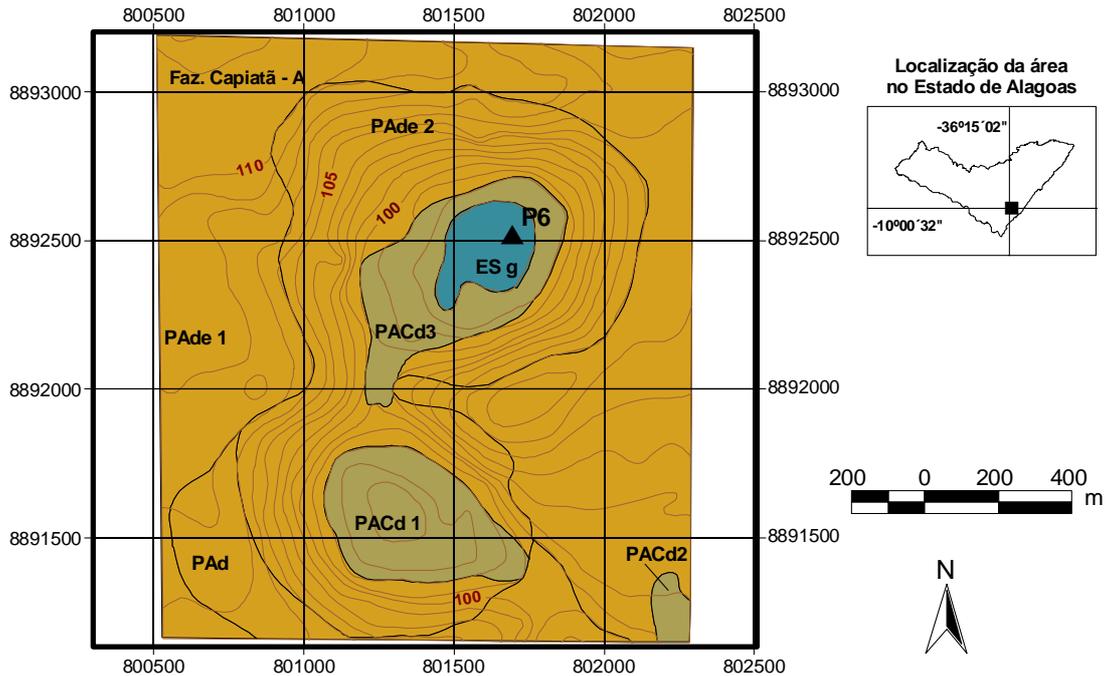
Como nas transformações pedológicas mais completas culmina-se com a formação de Espodossolos, pôde-se deduzir que entre os processos pedogenéticos responsáveis pelas transformações destaca-se a podzolização. Estudos de FILIZOLA et al. (2001) e BOULET et al. (1998) realizados na mesma região atribuíram a podzolização e a hidromorfia como sendo os processos gerais responsáveis pelas transformações da cobertura pedológica no ambiente das suaves depressões. Na região amazônica, em material de origem similar, LUCAS et al. (1984) consideraram a podzolização como parte dos mecanismos responsáveis pelas transformações de Latossolos em Espodossolos. Por sua vez BRAVARD & RIGHI (1989) consideraram que neste último tipo de transformação, além da podzolização, foram atuantes também processos hidrolíticos e de eluviação,



Figura 5.10 - Modelo de uma suave depressão nos tabuleiros costeiros com cerca de 8 m de desnível (local do perfil P4).



Figura 5.11 - Seqüência evolutiva de horizontes com cimentação fraca (Btx) (fundo) até cimentação forte (Bm)(frente) na passagem Argissolos Amarelos/Espodossolos localizada na borda de uma suave depressão (Trincheira A, local do perfil P11).



LEGENDA DE SOLOS

- PAd - ARGISSOLOS AMARELOS Distróficos fragipânicos textura média/muito argilosa fase relevo plano.
- PAde 1 - ARGISSOLOS AMARELOS Distróficos e Eutróficos fragipânicos textura arenosa/argilosa fase relevo plano.
- PAde 2 - ARGISSOLOS AMARELOS Distróficos e Eutróficos fragipânicos textura arenosa/argilosa fase relevo suave ondulado.
- PACd 1 - ARGISSOLOS ACINZENTADOS Distróficos fragipânicos textura arenosa média/argilosa fase relevo plano e suave ondulado.
- PACd 2 - ARGISSOLOS ACINZENTADOS Distróficos dúricos textura arenosa/argilosa fase relevo plano.
- PACd 3 - ARGISSOLOS ACINZENTADOS Distróficos dúricos textura arenosa/média fase relevo plano.
- ESg - ESPODOSSOLOS FERROCÁRBICOS Hidromórficos arênicos fase relevo plano.

Obs.: ambiente com vegetação tipo floresta subperenifólia.

Figura 5.12 - Mapa de solos apresentando duas suaves depressões. No alto, a depressão mostra uma transformação pedológica mais completa com seqüência de solos do tipo Argissolos Amarelos/Argissolos Acinzentados/Espodossolos (local do perfil P6). Embaixo, a depressão mostra uma transformação pedológica relativa menos completa com uma seqüência de solos do tipo Argissolos Amarelos/Argissolos Acinzentados.

Seqüências pedológicas estudadas

Visando ao entendimento de processos relacionados à formação e evolução de horizontes cimentados, estudaram-se duas seqüências pedológicas com ênfase nas transformações morfológicas e físicas dos solos.

Numa depressão considerada rasa (menos de 3 m de desnível) e com um sistema drenagem aberto lateralmente, selecionaram-se as seqüências Argissolos Amarelos/Espodossolos e Argissolos Acinzentados/Espodossolos. Nestas seqüências, priorizou-se o estudo das transformações laterais. A localização das trincheiras (A, B e C) visando ao estudo destas seqüências consta no mapa pedológico da figura 5.13.

Para o estudo específico de transformações verticais, selecionou-se um corte de estrada profundo, na faixa de 5 a 10 m, em um segmento de área com Espodossolos (Figura 5.3) situado em uma suave depressão com sistema de drenagem natural fechado lateralmente.

A seqüência pedológica Argissolos Amarelos/Espodossolos

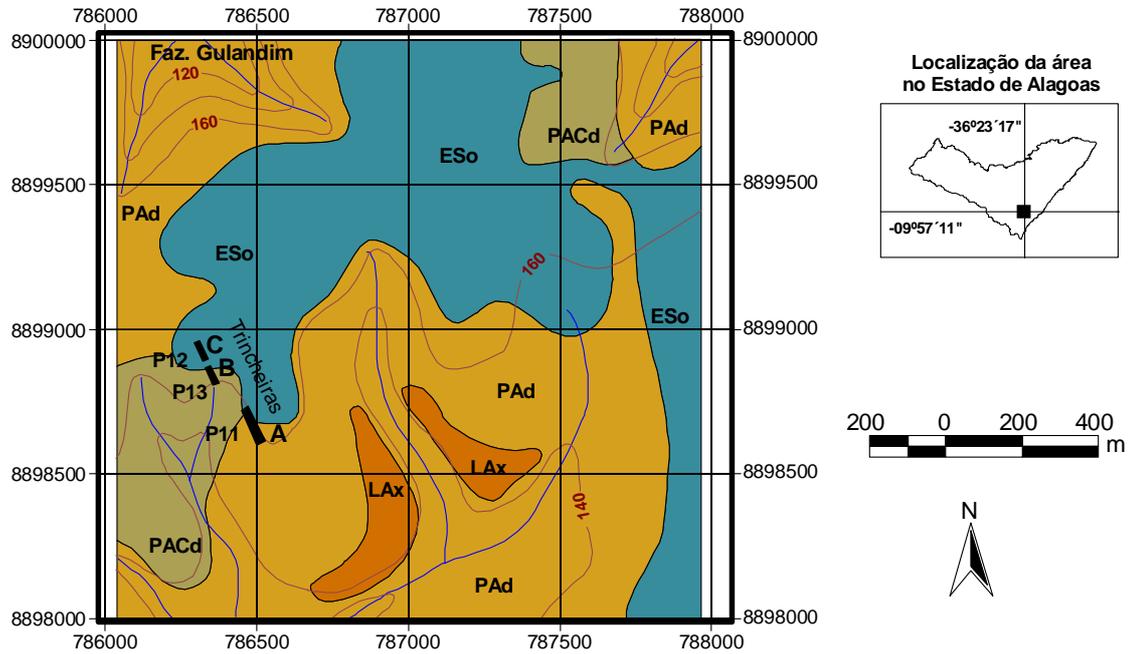
As transformações morfológicas e físicas laterais desta seqüência, com destaque para as variações texturais, estão representadas na figura 5.14. No sentido da seqüência Argissolos Amarelos => Espodossolos, as mudanças mais notáveis foram as seguintes:

- (1) Perdas e/ou degradação de argila;
- (2) Aumento progressivo da intensidade das cimentações.

Este tipo de transformação lateral mostrou que as variações texturais ocorrem de forma inter-relacionada com os processos de cimentação, de modo que, no sentido em que decrescem os teores de argila dos horizontes subsuperficiais, concomitantemente intensifica-se o grau de cimentação dos mesmos. Em adição, este caso ainda mostrou que os horizontes cimentados se interligam de forma contínua, lateral e verticalmente.

Conforme sugerem os solos dos extremos desta passagem, as transformações laterais passam por um conjunto de processos, desde o transporte mecânico de argila (lessivagem) mais pronunciado no lado dos Argissolos Amarelos, até a degradação e/ou perda desta fração devido à podzolização, no lado dos Espodossolos.

Na direção do fluxo lateral das soluções, que se dá no sentido Argissolos Amarelos (parte mais alta) => Espodossolos (parte mais baixa), verificou-se que os teores de argila decrescem para valores inferiores a 200 g/kg e, a partir destas condições, as cimentações tornam-se fortes. Entretanto, deve-se destacar que a presença de um horizonte plácico (Figura 5.14) pode restringir o fluxo das soluções e modificar o curso normal dos processos de cimentação.



LEGENDA DE SOLOS

- LAX - LATOSSOLOS AMARELOS Coesos petroplínticos textura argilosa fase relevo suave ondulado.
- PAd - ARGISSOLOS AMARELOS Distróficos fragipânicos textura arenosa/média a argilosa fase relevo plano e suave ondulado.
- PACd - ARGISSOLOS ACINZENTADOS Distróficos fragipânicos textura arenosa/média a argilosa fase relevo plano e suave ondulado.
- ESo - ESPODOSSOLOS FERROCÁRBICOS Órticos dúricos textura arenosa fase relevo plano a suave ondulado.

Obs.: ambiente com vegetação tipo floresta subperenifólia.

Figura 5.13 - Mapa de solos na área de uma suave depressão mostrando o posicionamento das trincheiras abertas para o estudo das transformações laterais de duas seqüências pedológicas. Trincheira A: passagem Argissolos Amarelos/Espodossolos; trincheira B: passagem Argissolos Acinzentados/Espodossolos; e trincheira C: Espodossolos.

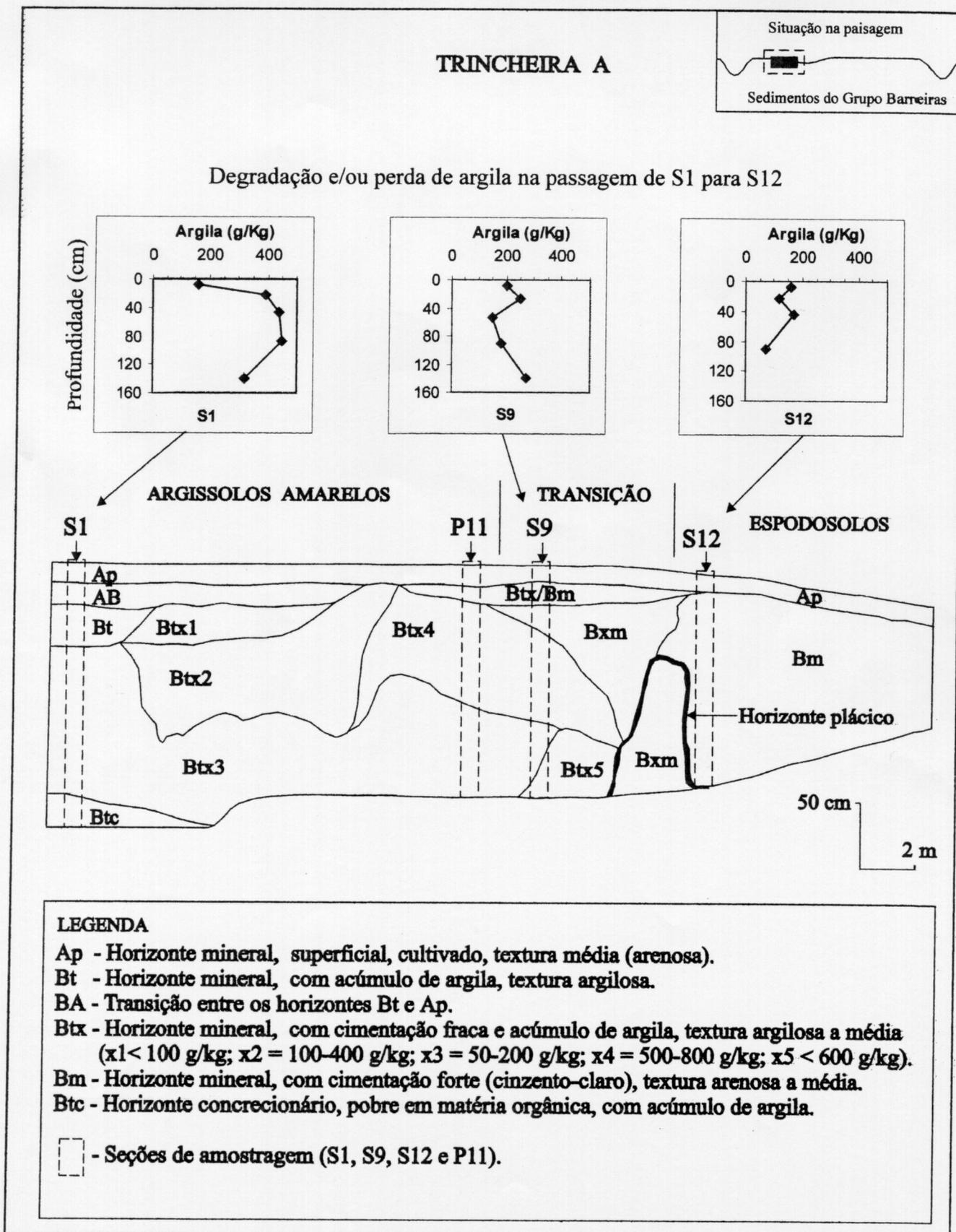


Figura 6.14 - Vista espacial da organização morfológica de horizontes com destaque à degradação e/ou perda de argila na passagem Argissolos Amarelos/Espodossolos.

Na parte da passagem onde foi mapeado o horizonte Btx2, com 100 a 400 g/kg de volumes com cimentação fraca, analisou-se em separado a composição granulométrica de volumes cimentados (nódulos fragipânicos) e dos volumes não-cimentados envolventes dos nódulos. Os resultados indicaram que o conteúdo de argila dentro dos nódulos é relativamente inferior ao material envolvente dos mesmos (Figura 5.15). Esta observação, ainda que muito localizada, sugeriu que processos de formações dos volumes fragipânicos devem envolver perdas e/ou degradação de argila. Entretanto, ressalva-se que os dados obtidos sobre este aspecto foram muito pontuais e não podem ser generalizados.

Além dos horizontes cimentados de forma contínua, também se verificou a presença de um horizonte concrecionário (Btc) nesta passagem. Este horizonte sugeriu que em épocas passadas provavelmente ocorreram períodos com nível do lençol freático elevado na área. A altura de formação deste horizonte pode ter sido uma provável zona de oscilação do nível das águas no local. Atualmente, a condição climática e a presença de uma linha de drenagem interligando a depressão com o sistema de drenagem regional não permitem o acúmulo de água no período chuvoso, muito menos a elevação do nível das águas até a posição onde encontra-se formado o horizonte concrecionário. Por conseguinte, estas observações, ainda que especulativas, sugerem que mudanças significativas do regime de drenagem e umidade devem ter ocorrido ao longo do tempo geológico na região e, em particular, no ambiente desta depressão.

A seqüência pedológica Argissolos Acinzentados/Espodossolos

A organização morfológica e as variações texturais desta passagem (Figura 5.16) mostraram três aspectos relevantes. O primeiro foi o processo progressivo de perda e/ou degradação de argila, muito destacado no sentido Argissolos Acinzentados => Espodossolos. O segundo foi a presença de um horizonte subsuperficial fortemente cimentado, tipo Bm, ao longo de toda passagem, porém restringindo-se a uma zona com teores de argila inferiores a 200 g/kg. O terceiro, porém, não menos importante, foi a variação vertical do grau de cimentação com uma interrupção abrupta, mudando de cimentação forte para a fraca, devido à presença de um horizonte plácico (Figura 5.16, trincheira B). Esta mudança indicou que o horizonte plácico deve ter restringido o fluxo das soluções e modificado o curso normal dos processos de cimentação, conforme também observou-se na seqüência pedológica da passagem Argissolos Amarelos/Espodossolos (Figura 5.14).

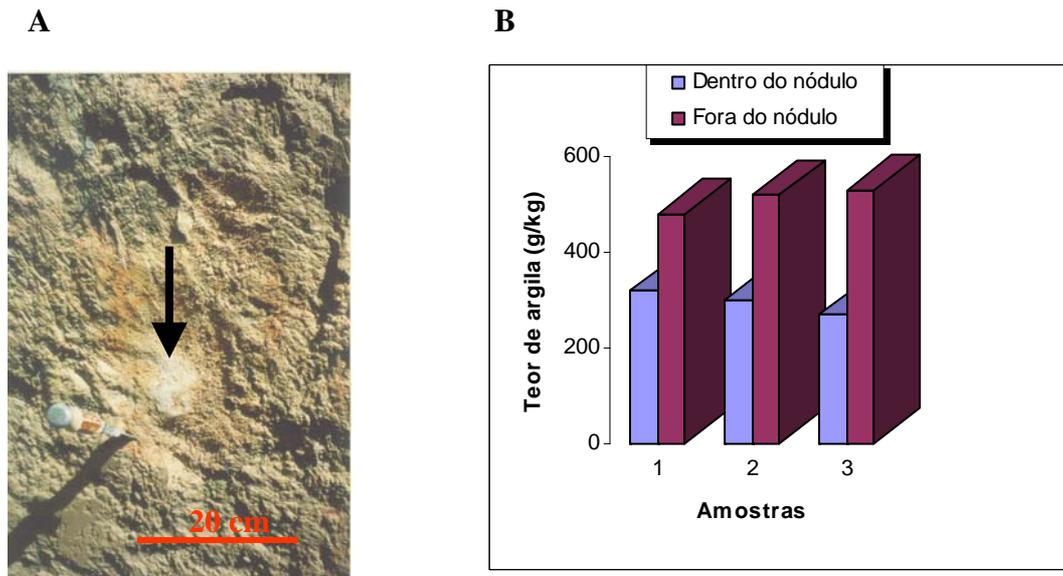


Figura 5.15 - Nódulos fragipânicos observados na trincheira A, onde foi mapeado o horizonte Btx2 com 100 a 400 g/kg de volumes com cimentação fraca (Figura 5.14). A: aspecto morfológico dos nódulos (seta). B: teor de argila dentro e fora dos nódulos (amostragem de 2 em 2 m).

A diferença fundamental desta passagem em relação à dos Argissolos Amarelos/Espodossolos foi a transformação direta dos horizontes tipo B textural (Bt) para horizontes com cimentação forte, tipo Bm. Neste caso, o conjunto de transformações levou à formação de horizontes do tipo E alvíco, Bsm e Bm (Figura 5.16), indicando claramente a ação dos processos de podzolização nos sistemas pedológicos desenvolvidos nas depressões.

Corte vertical profundo numa depressão com Espodossolos

Nesta depressão, o sistema de drenagem natural é fechado lateralmente. Na seção vertical estudada (Figura 5.17), o principal objetivo foi destacar as mudanças dos materiais cimentados até os não-cimentados e suas relações com os teores de argila. Na parte mais superficial da seção, de 1,1 a 3,1 m de profundidade, onde os horizontes apresentam cimentação forte (Bm), os teores de argila foram verificados abaixo de 200 g/kg. Por outro lado, na parte mais inferior da seção, entre 3,1 e 3,6 m, onde a cimentação é fraca (Bx), os teores de argila aumentaram gradativamente de 19 a 250 g/kg. Entre 3,6 e 4,3 m, zona do horizonte transicional BC, os teores de argila permaneceram em torno de 250 g/kg. Abaixo de 4,3 m, onde ocorre o horizonte concrecionário Cc, os teores de argila atingiram cerca de 310 g/kg. Portanto, os resultados mostraram que o aumento dos teores de argila, passando do limite de 200 g/kg, deve ter influenciado em mudanças nas cimentações, pois estas passaram de fortes para fracas.

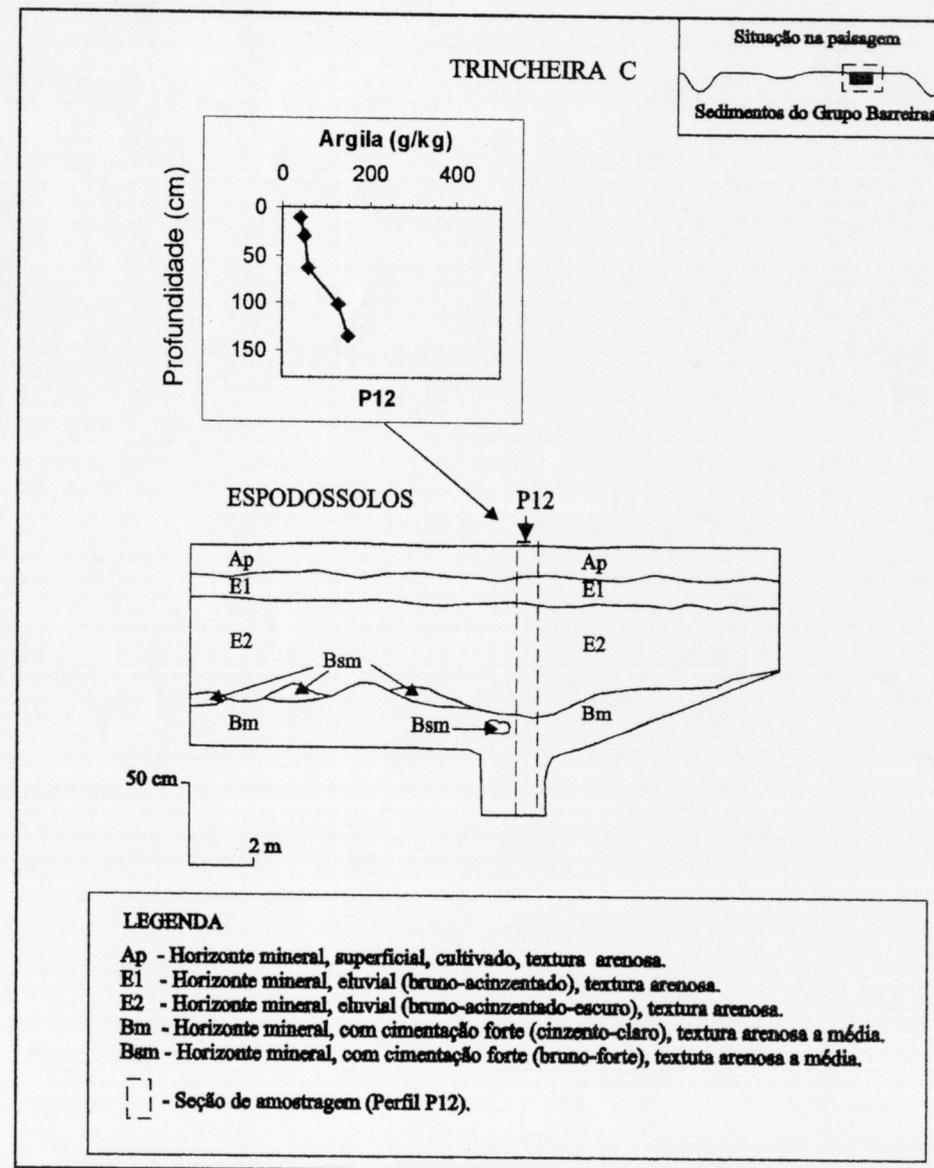
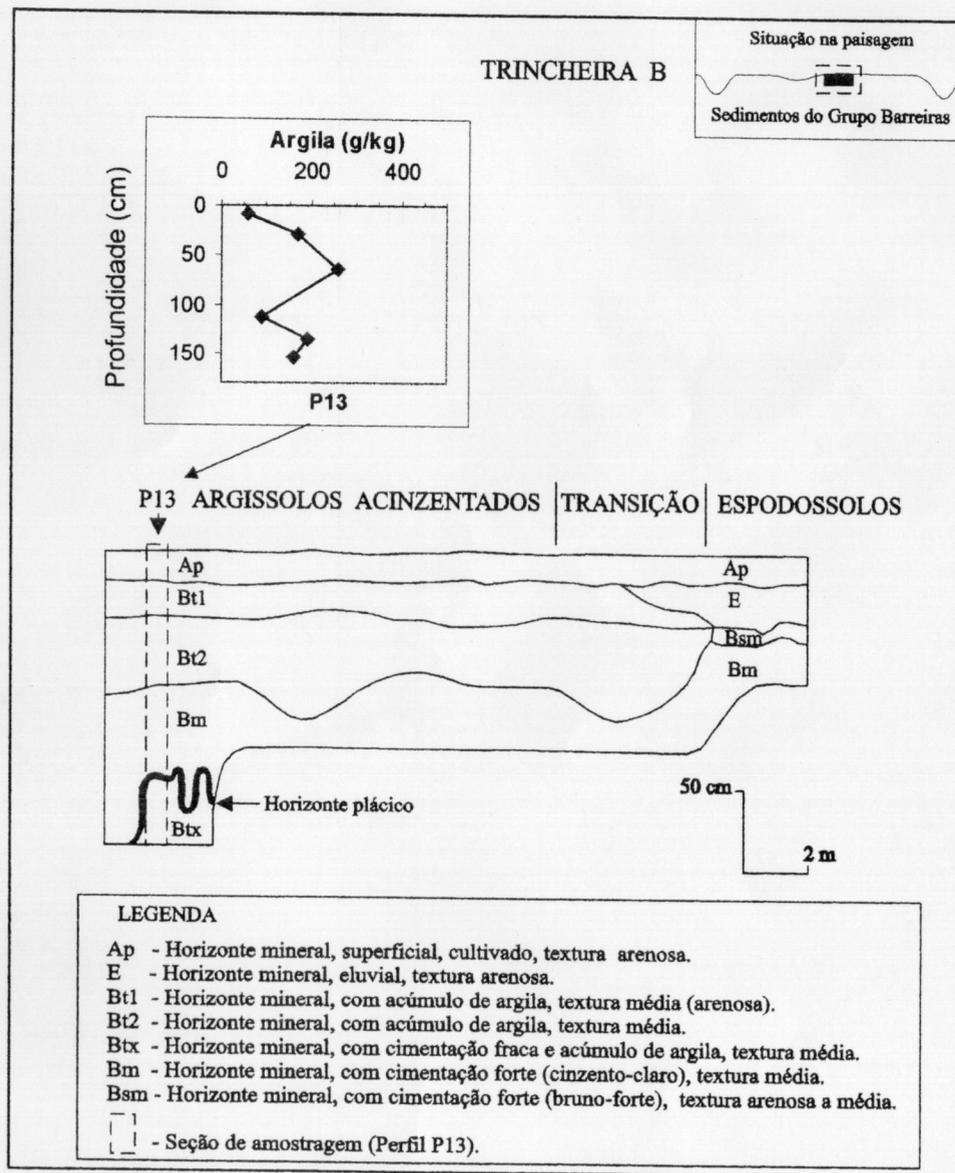


Figura 5.16 - Vista espacial da organização morfológica de horizontes, com destaque para a degradação e/ou perda de argila na passagem Argissolos Acinzentados/Espodosolos entre P13 e P12.

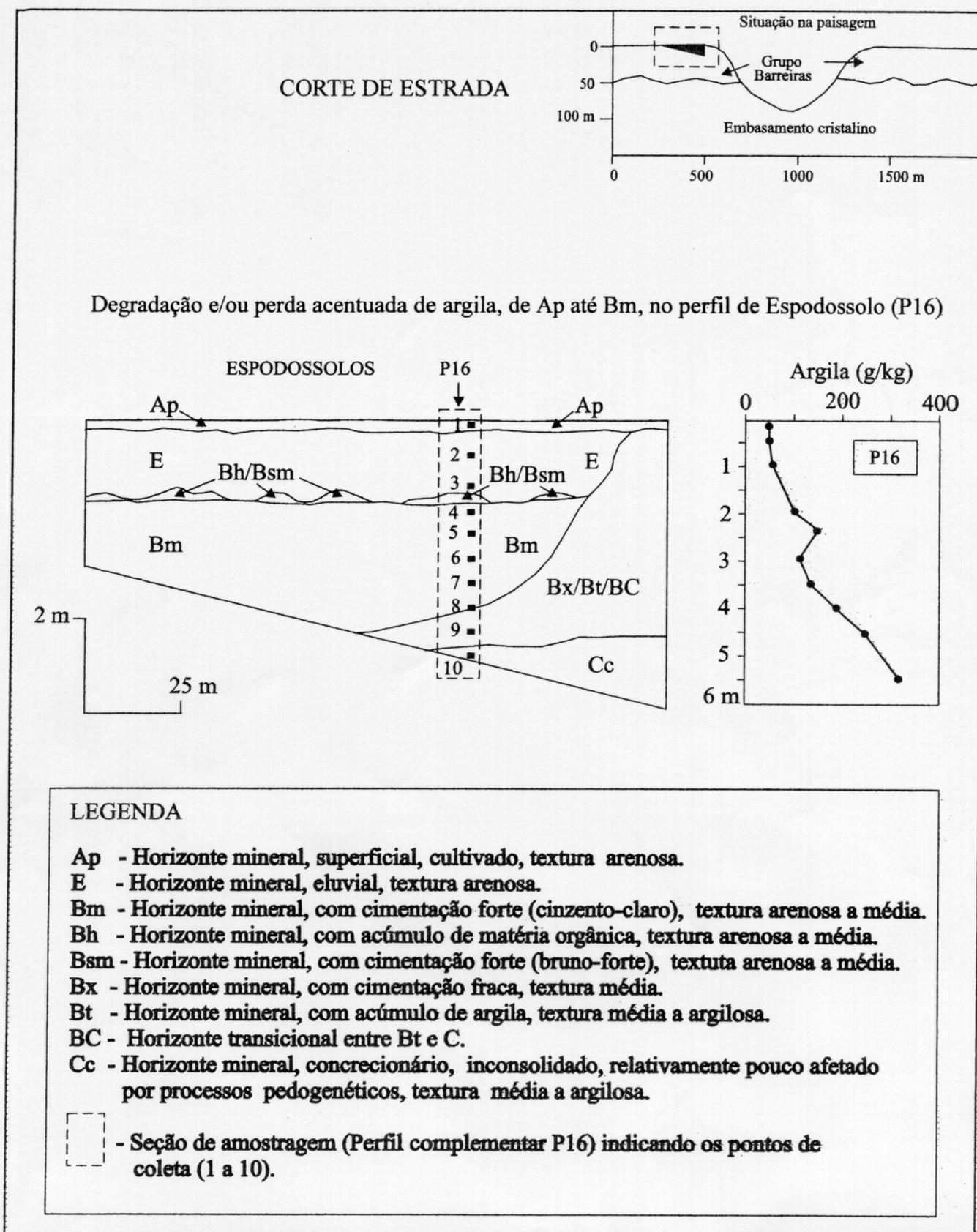


Figura 5.17 - Vista esquemática espacial da organização morfológica de horizontes, com destaque para a degradação e/ou perda de argila no perfil de Espodosolo (perfil complementar P16).

O horizonte concrecionário Cc, da mesma forma que o Btc na passagem Argissolos Amarelos/Argissolos Acinzentados, sugeriu uma provável presença de um lençol freático que oscilava na altura deste horizonte em épocas pretéritas. Porém, atualmente as condições climáticas e de drenagem não permitem a formação de lençol freático no local, indicando que devem ter ocorrido mudanças significativas do regime de umidade e de drenagem na região, ao longo do tempo geológico.

No Caso desta seção vertical, a pedogênese levou à formação de horizontes do tipo E alábico, Bsm, Bm e Bx, indicando a ação de processos de podzolização na gênese dos horizontes cimentados.

SÍNTESE E CONCLUSÕES

A avaliação da consistência no estado úmido foi a forma mais eficiente para diferenciar materiais de horizontes com cimentação fraca de outros materiais não-cimentados, coesos e não-coesos. A diferenciação foi estabelecida por meio da avaliação de propriedades fráguas presentes na maior parte do volume dos horizontes com cimentação fraca.

Horizontes com cimentação fraca e forte foram diferenciados por meio da caracterização morfológica de campo, complementada com testes de imersão em água, ácido (HCl 1N) ou base (NaOH 1M e/ou 4M). Materiais com cimentação fraca esboroaram-se normalmente em mais da metade do volume quando imersos em água ou HCl 1N e apresentaram propriedades fráguas também na maior parte do volume.

Por outro lado, materiais com cimentação forte esboroaram-se em menos da metade do volume em água ou HCl 1N e em mais da metade do volume em solução de NaOH 1M e/ou 4M. Deve-se destacar que materiais de horizontes com cimentação forte também desestabilizam-se em soluções ácidas muito concentradas (HCl 3N e/ou 6N).

Os horizontes com cimentação da classe forte mostraram variações importantes em termos de quantidade e tamanho de materiais esboroados em soluções de NaOH 1M e/ou 4M, assim como em relação à estabilidade na imersão em solução de HCl 1N. Os materiais com cimentação da classe fraca também apresentaram variações significativas em termos de quantidade e tamanho de frações esboroadas nas soluções de HCl 1N e NaOH 1M. Estas variações, de certa forma, refletiram o maior ou menor grau de desenvolvimento das cimentações nesses materiais.

Observações gerais realizadas em diversos materiais de horizontes com cimentação forte e fraca foram indicativas de certas relações entre as cimentações e variações texturais. Os horizontes com cimentação forte estudados foram observados apenas em materiais com textura

arenosa a média, com teor de argila inferior a 200 g/kg, enquanto os horizontes com cimentação fraca foram desenvolvidos em condições granulométricas muito diversificadas, desde a faixa arenosa até a argilosa.

Em nenhum solo estudado verificaram-se horizontes com cimentação forte com acúmulo significativo de argila. Portanto, foram caracterizados como Bm, Bsm ou Bhsm.

Os horizontes com cimentação fraca foram observados em Argissolos Amarelos, Argissolos Acinzentados, assim como em alguns Espodossolos. Nos Argissolos, formaram-se associados aos horizontes pedogenéticos Bt, e por isto foram notados como horizontes Btx. Nos Espodossolos, sem acúmulo significativo de argila, estes horizontes foram caracterizados como do tipo Bx.

Nas transformações pedológicas das suaves depressões observou-se que os horizontes subsuperficiais com cimentação fraca (tipo Btx ou Bx) evoluem até aqueles com cimentação forte (tipo Bm) de forma contínua, lateral e verticalmente, em função de um conjunto de processos pedogenéticos que levam à degradação e/ou perda significativa de argila na zona de formação destes horizontes.

CAPÍTULO 6 - Mineralogia

Os sedimentos que deram origem aos solos desenvolvidos no ambiente dos tabuleiros são considerados muito simples, pois são constituídos basicamente por caulinita e quartzo. Em função desta característica, estudaram-se apenas dois perfis de solos com horizontes cimentados pertencentes às classes dos Argissolos Amarelos e dos Espodosolos.

A caracterização mineralógica foi desenvolvida de forma qualitativa, por difração de raios-X (DRX), tanto na amostra total como na fração-argila, após eliminação da matéria orgânica. Dados semiquantitativos foram obtidos da fração-areia e cascalho, por meio de contagens de grãos, utilizando-se métodos óticos.

Visando implementar a caracterização mineralógica da fração-argila, determinou-se a composição química total (pela técnica do ICP-AES) de amostras selecionadas consideradas representativas dos diversos níveis de endurecimento dos solos. As análises foram desenvolvidas após eliminação da matéria orgânica e antes e após eliminação de fases amorfas pelo método do oxalato de amônio.

O objetivo da caracterização mineralógica foi conhecer a natureza das fases cristalinas constituintes dos horizontes cimentados, assim como dos solos nos quais estes horizontes foram desenvolvidos. Objetivou-se também verificar possíveis diferenças entre as partes cimentadas e não-cimentadas.

AMOSTRA TOTAL

Os resultados mostraram que a composição mineralógica reflete um sistema bifásico, composto essencialmente por caulinita e quartzo, variando apenas as proporções (Figuras 6.1 e 6.2). Apesar dos fortes contrastes físicos e morfológicos entre os horizontes cimentados e não-cimentados, as análises por DRX não mostraram qualquer evidência da presença dos horizontes cimentados.

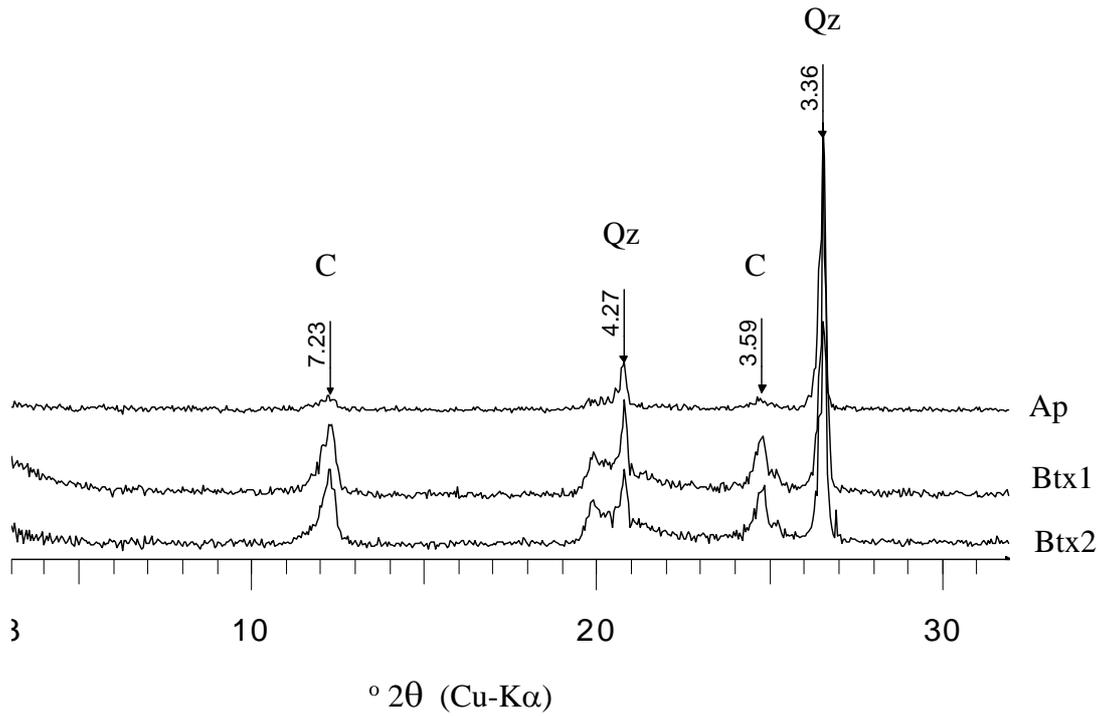


Figura 6.1 – Difratoformas de raios-X da amostra total (pó) relativos a horizontes selecionados do perfil P11 (Argissolo Amarelo). (C: caulinita; Qz: quartzo).

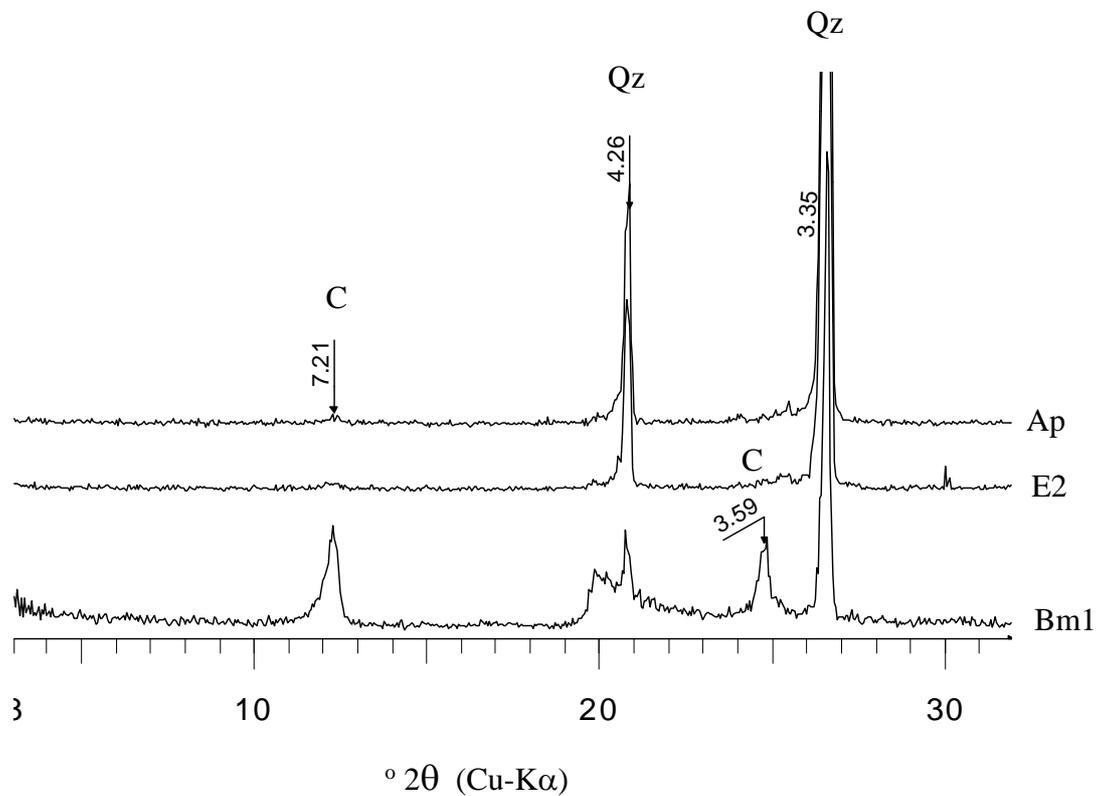


Figura 6.2 – Difratoformas de raios-X da amostra total (pó) relativos a horizontes selecionados do perfil P12 (Espodosolo). (C: caulinita; Qz: quartzo).

FRAÇÃO-ARGILA

A fração-argila em condição natural mostrou uma composição essencialmente caulínica (Figuras 6.3 e 6.4), sendo, portanto, um sistema mineralógico considerado muito simples. Secundariamente, e em proporções muito pequenas, foram detectados anatásio, rutilo e goethita. Estudos de SILVA et al. (1997) e JACOMINE (1974), realizados na mesma região, indicaram, além dos citados minerais, a presença de haloisita. Dados de MELO & SANTOS (1996), relativos a solos de ambientes similares, indicaram ainda a presença de lepidocrocita, cristobalita e ilita.

Amostras selecionadas tratadas com hidrazina, após eliminação da matéria orgânica (Figura 6.5), indicaram ser compostas de uma mistura de caulinitas ordenadas e desordenadas, conforme constatações de RIBEIRO (1998) no estudo de caulinitas dos tabuleiros costeiros do recôncavo baiano. A fração ordenada mostrou um deslocamento da reflexão d(001) para a faixa de 10,05 a 10,06 Å e a parte desordenada permaneceu com o valor de d(001) ao redor de 7,02 Å, conforme observações de WADA & YAMADA (1968) e MÖLLER & ARAKI (1984).

No concernente à composição química total da fração-argila, dado a sua importância no conjunto de propriedades dos solos, foram estudadas quatro amostras representativas dos diversos níveis de endurecimento dos mesmos (Quadro 6.1).

Os resultados evidenciaram quatro características que merecem destaque. A primeira foi um crescente grau de hidratação das argilas conforme os níveis de endurecimento dos materiais, como pode ser notado pelos valores de perda ao fogo (PF). Inferiu-se que esta característica relacionada ao aumento de hidratação muito provavelmente deve estar correlacionado à presença de fases amorfas associadas às argilas. Pode-se destacar uma das amostras com cimentação forte (P9-Bsm) que mostrou o dobro da hidratação esperada para materiais caulínicos, isto é, um valor de PF = 29,06%. Os valores normais esperados seriam em torno de 13,96% (WEAVER, 1989).

A segunda característica foi o maior conteúdo de ferro no material com cimentação fraca (P11-Btx1) ou não-cimentado e coeso (P11-PA-Bt). Estes maiores valores foram verificados nos solos da classe dos Argissolos Amarelos que estão posicionados em melhores condições de drenagem na paisagem, portanto, favorecendo à precipitação do ferro.

A terceira característica foi a variação da relação molar K_i ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) observada antes e após o tratamento das amostras com oxalato de amônio. Esta relação, antes do tratamento, mostrou-se pouco variável quando observada entre os materiais coesos (P11-PA- Bt) e aqueles

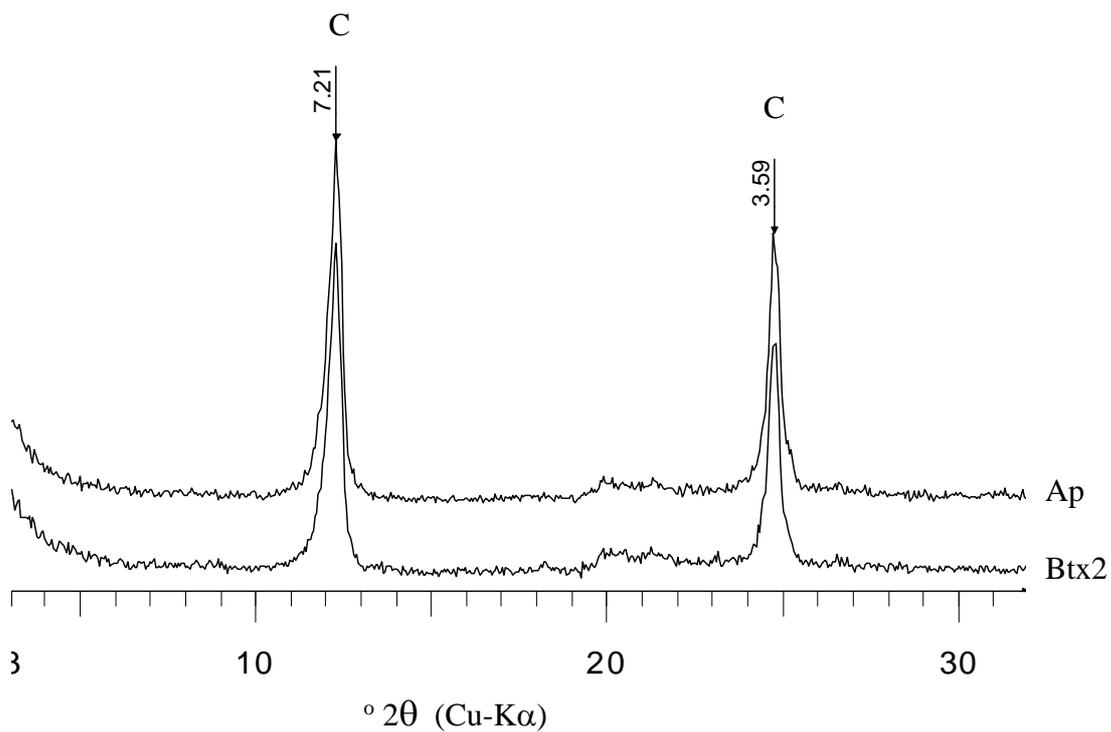


Figura 6.3 – Difratomogramas de raios-X da fração-argila (sem matéria orgânica) relativos a horizontes selecionados do perfil P11 (Argissolo Amarelo). (C: caulinita).

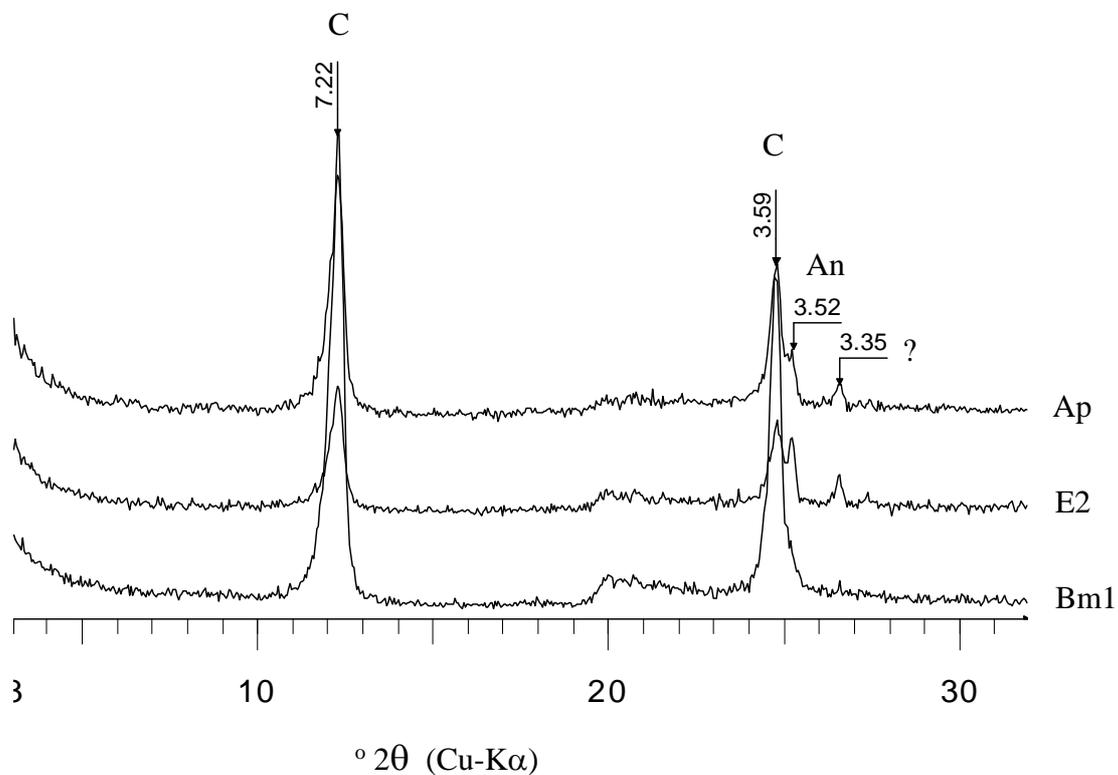


Figura 6.4 – Difratomogramas de raios-X da fração-argila (sem matéria orgânica) relativos a horizontes selecionados do perfil P12 (Espodossolo). (C: caulinita; An: anatásio).

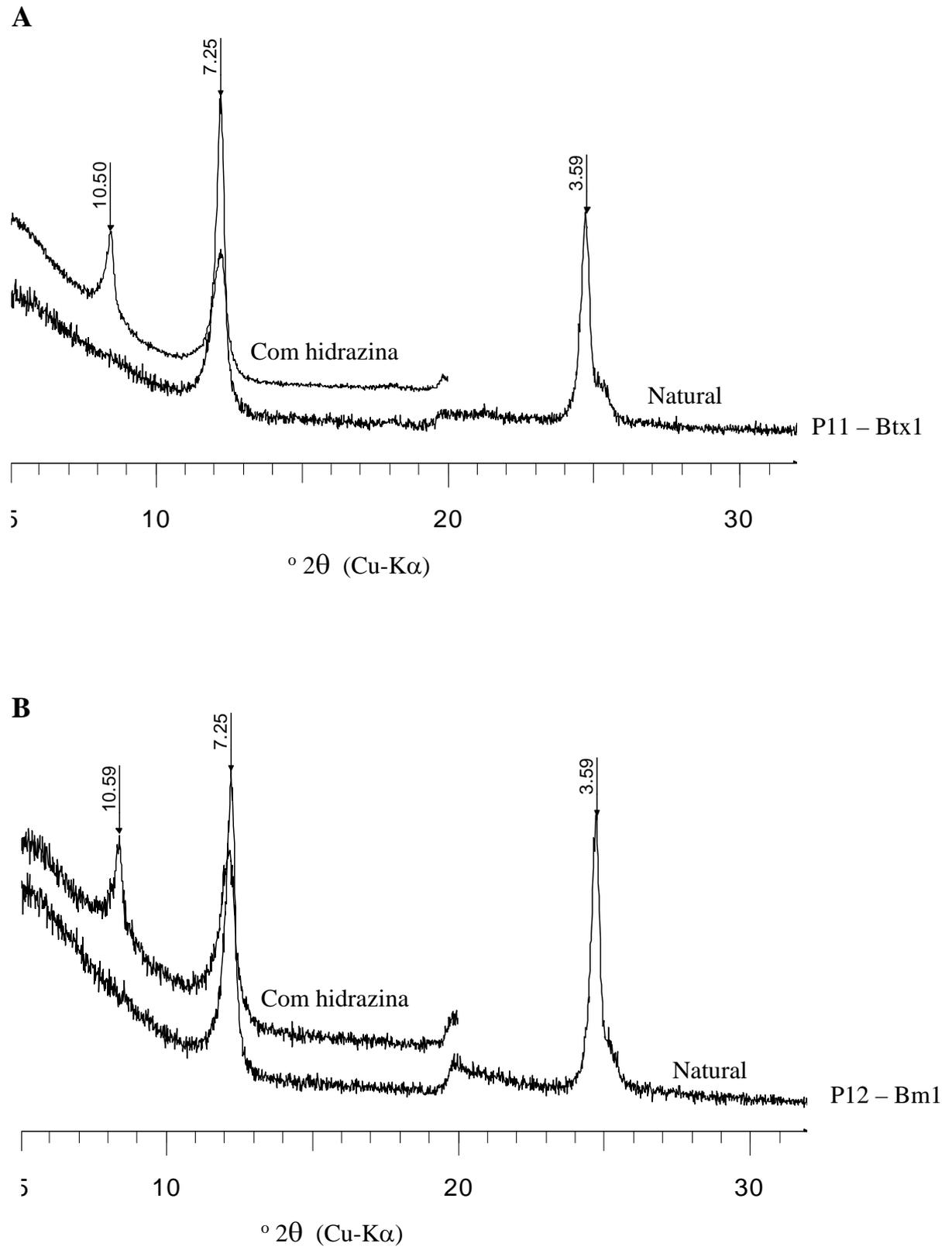


Figura 6.5 – Difratoigramas de raios-X da fração-argila caulínica (sem matéria orgânica) em condição natural e após tratamento com hidrazina monohidratada. A: horizonte com cimentação fraca (P11-Btx1); e B: horizonte com cimentação forte (P12-Bm1).

Quadro 6.1 - Análise química total da fração-argila caulinitica, com eliminação da matéria orgânica, antes e após tratamento com oxalato de amônio

Óxido	Amostras							
	P11-PA-Bt (coeso)		P11-Btx1		P12-Bm1		P9-Bsm/E	
	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após
----- % -----								
SiO ₂	41,5	42,70	40,15	41,79	41,20	43,78	25,28	31,96
Al ₂ O ₃	36,82	36,59	37,24	36,70	38,28	37,50	39,14	37,15
Fe ₂ O ₃	3,61	3,58	4,28	3,72	1,48	1,52	1,09	1,43
MgO	1,15	0,14	0,95	0,13	0,18	0,07	0,49	0,25
CaO	0,06	0,03	0,04	0,07	0,04	0,03	0,09	0,07
Na ₂ O	0,05	0,06	0,06	0,04	0,05	0,03	0,03	0,01
K ₂ O	0,30	0,27	0,28	0,25	0,22	0,22	0,07	0,08
P ₂ O ₅	0,08	0,03	0,06	0,03	0,08	0,02	0,17	0,15
MnO	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
TiO ₂	2,41	2,42	2,23	2,25	2,27	2,14	2,30	3,14
PF	14,18	14,34	14,73	14,78	16,00	15,02	29,06	25,64
Total	100,17	100,18	100,02	99,76	99,81	100,36	97,73	99,90

com cimentação fraca (P11-Btx1). Mesmo assim apresentou uma ligeira tendência decrescente, com o aumento do grau de endurecimento dos materiais. Por outro lado, nos materiais com cimentação forte a relação mostrou mudanças drásticas e nestes materiais atingiu os valores mais baixos. Estas variações foram decorrentes do aumento nos teores de Al₂O₃ em relação aos de SiO₂, uma vez que após o tratamento com o oxalato de amônio, que extraiu mais alumínio do que silício, a principal mudança foi o aumento da relação molar Ki (Figura 6.6 A). Este aumento indicou claramente a saída de um certo excesso de alumínio relacionado com fases amorfas e/ou de baixo grau de cristalinidade associado às argilas e extraível pelo oxalato de amônio (Figura 6.6 B).

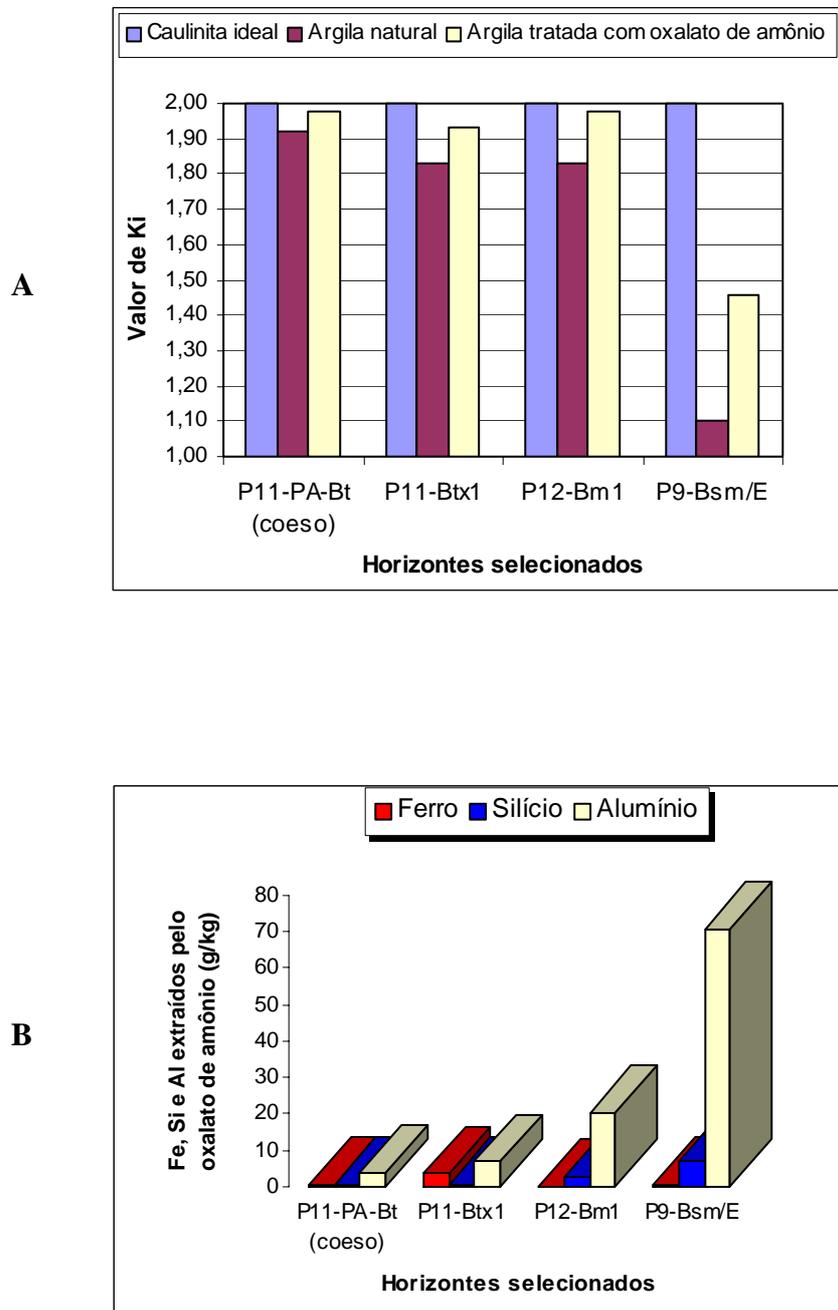


Figura 6.6 – Variações da relação molar k_i e do conteúdo de fases amorfas extraíveis seletivamente pelo oxalato de amônio em horizontes selecionados com diversos níveis de endurecimento. A: relação molar k_i da caulinita ideal, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, e na fração-argila caulínica antes e após tratamento com oxalato de amônio. B: ferro, silício e alumínio extraídos pelo oxalato de amônio (Fe_o , Si_o e Al_o) no tratamento da fração-argila caulínica do item A.

A quarta característica foi a presença de potássio em quantidades que sugerem a presença de baixos teores de mica nas argilas (DEER et al., 1992) conforme detectou-se pela mineralogia ótica. Segundo WEAVER (1989), pequenas quantidades de mica são comuns em praticamente todos os solos.

Os teores de ferro na faixa de 1,09 a 4,28 % foram relacionados principalmente à presença de goethita [α -FeO(OH)] e fases hidratadas amorfas e/ou de baixo grau de cristalinidade. A goethita foi detectada por DRX, enquanto que fases amorfas e/ou de baixo grau de cristalinidade foram extraídas em pequena quantidade pelo oxalato de amônio. Pequenas quantidades de ferro também podem fazer parte da estrutura do anatásio e da própria caulinita (WEAVER, 1989; DEER et al., 1992). Estudos recentes desenvolvidos com argilas caulínicas dos tabuleiros costeiros mostraram que estas argilas podem incorporar cerca de 1,47 a 2,80% de ferro nas suas estruturas (MELO et al., 2001).

Os teores de TiO₂ foram relacionados com a presença de anatásio e rutilo. Os demais óxidos (CaO, MgO, Na₂O, P₂O₅ e MnO) estão de acordo com os resultados de análises de argilas caulínicas com baixos teores de mica (DEER et al., 1992; WEAVER, 1989).

GRÃOS

Com relação à fração-areia, observações realizadas em amostras selecionadas mostraram que o mineral dominante é o quartzo, associado com pequenas proporções de fragmentos de quartzito. Em conjunto, estes minerais somaram cerca de 70 a 90% desta fração. Nódulos argilosos, contendo quartzo incluso, mostraram valores de até 30% e nódulos e/ou crostas ferruginosas, de 1 a 3%. Em proporções muito baixas, normalmente de 1 a 2%, ou como traços, puderam ser observados ainda muscovita, zircão, leucoxênio, estaurolita, turmalina, cianita, ilmenita, rutilo, feldspato alterado e crostas ferruginosas.

A fração-cascalho foi observada apenas nos Argissolos Amarelos e Argissolos Acinzentados, sendo composta por quartzo mais quartzito (50 a 100%). Nódulos argilosos, com quartzo incluso, mostraram valores alcançando até 50% e concreções ferruginosas em torno de 2%.

SÍNTESE E CONCLUSÕES

As análises mineralógicas foram desenvolvidas na amostra total e nas frações-argila, areia e cascalho de horizontes selecionados cimentados e não-cimentados. A composição da amostra total (DRX) caracterizou um sistema bifásico, composto essencialmente por caulinitas e

quartzo. A fração-argila, por sua vez, mostrou ser constituída predominantemente por caulinitas. Estas, tratadas com hidrazina, revelaram que são compostas por uma fração ordenada e outra desordenada em termos cristalográficos. Ainda na fração-argila, constataram-se proporções muito baixas de minerais como anatásio, rutilo e goethita.

A relação molar K_i da fração-argila, obtida antes e após extração seletiva de fases amorfas pelo oxalato de amônio, mostrou que existe um certo excesso de alumínio em relação à sílica na composição das argilas caulínicas. Os resultados indicaram que se trata de fases amorfas e/ou de baixo grau de cristalinidade, ricas em alumínio, associadas às argilas.

Na fração-areia, assim como no cascalho, quartzo ou quartzo mais quartzitos e nódulos argilosos contendo quartzo incluso, foram os componentes dominantes, somando mais de 95% do total. Em proporções muito baixas (1 a 3%), verificaram-se nódulos e/ou crostas ferruginosas. Com teores normalmente inferiores a 2%, ou como traços, foram observados muscovita, zircão, leucoxênio, estauroлита, turmalina, cianita, ilmenita, rutilo, feldspato alterado e crostas ferruginosas.

Este conjunto de características mineralógicas evidenciou que os fortes contrastes físicos e/ou morfológicos entre horizontes cimentados e os não-cimentados não são discerníveis pela mineralogia de fases cristalinas isoladamente. Por outro lado, houve indícios de que fases amorfas extraídas pelo oxalato de amônio estão correlacionadas com os diversos níveis de endurecimento dos horizontes cimentados.

CAPÍTULO 7 - Balanço geoquímico de Si, Al e Fe: uma primeira aproximação

O balanço geoquímico de massa permite calcular perdas e ganhos de elementos químicos no perfil de alteração, incluindo o solo. Os cálculos são desenvolvidos visando observar mudanças do perfil de alteração em relação ao material de origem (EGLI & FITZE, 2000; BRIMHALL & DIETRICH, 1987). Servem, portanto, para diagnosticar, quantitativamente, a entrada e a saída de elementos químicos resultantes da ação do intemperismo no curso da evolução do perfil de alteração. Entre outras aplicações, o balanço geoquímico de massa integrado com resultados de análises físicas, químicas e mineralógicas, tem sido utilizado na avaliação quantitativa do intemperismo químico e de processos pedogenéticos (LANGLEY-TURNBAUGH & BOCKHEIM, 1998; CHADWICK et al., 1990; BRIMHALL & DIETRICH, 1987; OLIVEIRA, 1998; CHIQUET et al., 2000).

Para efetivação do balanço geoquímico de massa em solos que normalmente apresentam variações volumétricas no curso da evolução pedológica, são considerados dois referenciais, isto é, o material de origem e um elemento químico considerado imóvel (EGLI & FITZE, 2000). Como ponto de partida, é imprescindível a caracterização do material de origem (rochas ou sedimentos). Para solos desenvolvidos *in situ*, o material de origem é representado pelas rochas locais. Nos solos formados a partir de sedimentos, torna-se difícil estimar a composição inicial do material de origem. Entretanto, nesses casos, os horizontes ou camadas menos alterados são considerados como material de origem. A partir de rochas coerentes ou de sedimentos, possíveis fontes de erros no balanço de massa podem resultar da heterogeneidade do material de origem (EGLI & FITZE, 2000).

O objetivo principal do balanço geoquímico de massa deste estudo foi estimar perdas e ganhos de Si, Al e Fe relacionados à formação de solos com horizontes cimentados desenvolvidos no ambiente de suaves depressões nos tabuleiros costeiros. Os estudos foram realizados em uma suave depressão com sistema de drenagem aberto lateralmente, ao longo de uma seqüência pedológica formada por Argissolos Amarelos, Argissolos Acinzentados e Espodossolos. Foi estudado ainda um perfil de Espodossolo noutra suave depressão com sistema

de drenagem fechado lateralmente visando correlacionar resultados do balanço de massa com condições de drenagem, relevo e com processos pedogenéticos.

As equações utilizadas para os cálculos de mudanças volumétricas, perdas e ganhos absolutos e fluxo de massa de elementos químicos no perfil de alteração ou em horizontes específicas constam no capítulo 4.

Os elementos Si, Al e Fe foram selecionados como foco do balanço de massa em função da sua abundância e por se comportarem, isoladamente ou de forma combinada, como agentes cimentantes no ambiente pedogenético em estudo.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA TOTAL

Os quadros 7.1 e 7.2 mostram, respectivamente, a composição química total dos solos componentes da seqüência pedológica desenvolvidos na suave depressão com sistema de drenagem fechado lateralmente e a do perfil de Espodosolo localizado noutra suave depressão com sistema de drenagem fechado lateralmente.

Os resultados mostraram predomínio de SiO_2 , Al_2O_3 e baixas proporções de Fe_2O_3 e TiO_2 (Quadro 7.1 e 7.2). Portanto, trata-se de solos extremamente dessaturados de bases, de modo que a composição química total reflete a mineralogia caulinítica da fração-argila e a natureza quartzosa das frações mais grosseiras.

No concernente a solos desenvolvidos de sedimentos, como os do presente estudo, a natureza do material de origem é difícil de se conhecer. Entretanto, conforme sugestões de EGLI & FITZE (2000), tomou-se como referencial a média da composição química total dos horizontes ou camadas menos alterados, coletados na faixa de profundidade de 6,0 a 8,2 m (Quadro 7.3). Neste caso as coletas foram realizadas em torno das áreas abaciadas selecionadas, observando-se sempre cortes profundos de estrada onde não havia indícios de mudanças de estratos dos sedimentos do Grupo Barreiras.

O BALANÇO GEOQUÍMICO

Em todos os perfis de solos estudados, os resultados sempre indicaram expansão volumétrica nos horizontes superficiais não-cimentados (Quadros 7.4 e 7.5) devido, provavelmente, à presença da matéria orgânica, à atividade biológica e aos menores teores de Ti não compensados pelo aumento significativo da densidade global. Em subsuperfície, nos horizontes cimentados, verificaram-se tanto ligeiras reduções como pequenas expansões volumétricas. As reduções decorreram, provavelmente, da concentração relativa de Ti em função das perdas dos elementos móveis não compensadas pela diminuição da densidade global.

Comportamento geoquímico de Si, Al e Fe na seqüência pedológica selecionada

Com relação ao silício, em termos globais (Quadro 7.4), verificaram-se perdas absolutas na borda da suave depressão (parte mais alta), onde situam-se os Argissolos Amarelos, e ganhos na parte mais central da mesma, onde foram desenvolvidos os Argissolos Acinzentados e Espodosolos. As perdas correlacionaram-se ao fluxo lateral das águas, dado a relativa mobilidade deste elemento em relação ao alumínio e ao ferro. Na parte mais central da depressão, devido ao fluxo lateral convergente, o Si mostrou acúmulo mesmo havendo um sistema de drenagem aberto lateralmente. Neste caso a adição de Si pelo fluxo lateral das águas com taxa superior às perdas pelas águas de drenagem, possivelmente possa explicar o acúmulo desse elemento.

Quadro 7.1 - Composição química total de uma seqüência de solos com horizontes cimentados desenvolvidos em uma suave depressão nos tabuleiros costeiros

Horizonte	Espes-sura (cm)	Óxidos (%)										PF (%)	Total (%)
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃		
P11 - Argissolo Amarelo													
Ap	0-15	81,73	10,11	0,01	0,06	0,01	0,04	0,08	0,94	0,04	1,11	6,31	100,44
Btx1	-38	65,82	20,92	0,01	0,05	0,01	0,04	0,14	1,26	0,03	2,78	9,57	100,63
Btx2	-70	62,30	23,91	0,01	0,05	<0,01	0,03	0,15	1,35	0,02	2,49	10,40	100,71
Btx3	-110	64,90	22,37	0,01	0,06	<0,01	0,05	0,15	1,36	0,03	2,28	9,04	100,25
Btx4	-170+	59,91	25,75	0,01	0,06	0,01	0,05	0,18	1,50	0,02	2,74	10,24	100,47
P13 - Argissolo Acinzentado													
Ap	0-18	93,33	2,95	0,01	0,07	0,02	0,04	0,03	0,55	0,03	0,22	2,72	99,97
Bt1	-38	91,81	4,46	0,01	0,06	0,01	0,03	0,04	0,71	0,02	0,29	2,26	99,70
Bt2	-90	85,29	8,87	0,01	0,06	<0,01	0,04	0,07	1,16	0,02	0,51	3,75	99,78
Bm	-135	75,66	15,08	0,01	0,05	<0,01	0,04	0,08	1,11	0,02	0,64	7,26	99,95
Plácico	-137	56,00	23,36	0,01	0,06	<0,01	0,04	0,12	1,35	0,02	8,24	11,67	100,87
Btx	-170+	71,50	18,03	0,01	0,05	<0,01	0,04	0,11	1,44	0,02	1,37	7,48	100,05
P12 - Espodosolo													
Ap	0-20	94,56	1,74	0,01	0,07	0,03	0,05	0,02	0,64	0,04	0,15	2,50	99,81
E1	-40	94,92	2,00	0,01	0,07	<0,01	0,04	0,01	0,83	0,03	0,16	1,63	99,70
E2	-85	93,49	2,72	0,01	0,07	<0,01	0,04	0,02	1,27	0,02	0,24	2,16	100,04
Bm1	-120	62,01	24,12	0,01	0,05	<0,01	0,04	0,12	1,28	0,03	0,93	12,12	100,71
Bm2	-150+	66,65	22,25	0,01	0,05	<0,01	0,04	0,12	1,34	0,02	0,93	9,04	100,45

Quadro 7.2 - Composição química total de um perfil de Espodossolo (perfil complementar P16) com horizontes cimentados desenvolvido de em uma suave depressão nos tabuleiros costeiros

Horizonte	Espessura (cm)	Óxidos (%)										PF (%)	Total (%)
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃		
Perfil complementar P16 - Espodossolo													
Ap	0-20	95,72	1,02	0,01	0,01	0,09	<0,01	0,02	0,49	0,02	0,19	2,12	99,69
E1	-50	97,51	0,71	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,50	0,01	0,13	0,93	99,85
E2	-110	96,82	1,10	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,72	0,01	0,20	1,06	99,96
Bm1	-160	76,98	14,45	0,01	0,04	0,01	<0,02	0,06	0,91	0,02	0,54	6,68	99,70
Bm2	-210	69,84	18,60	0,01	0,04	<0,01	<0,02	0,08	0,99	0,02	1,47	7,60	98,65
Bm3	-260	69,50	18,92	0,01	0,03	0,01	0,03	0,07	0,99	0,03	1,81	8,73	100,13
Bm4	-310	65,93	21,68	0,01	0,03	<0,01	<0,02	0,09	1,16	0,03	2,25	9,09	100,27
Bx	-360	67,00	20,58	0,01	0,04	<0,01	<0,02	0,08	1,10	0,03	2,31	8,80	99,95
BC	-430	69,71	19,29	0,01	0,03	<0,01	<0,02	0,09	1,10	0,02	1,75	7,91	99,91
Cc	-500+	53,44	13,96	0,01	0,05	<0,01	0,02	0,13	0,82	0,04	23,93	8,20	100,64

Quadro 7.3 - Composição química total do material de origem de solos com horizontes cimentados desenvolvidos em suaves depressões nos tabuleiros costeiros a partir de sedimentos do Grupo Barreiras

Horizonte	Profundidade (m)	Óxidos (%)										PF (%)	Total (%)
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃		
C1	6,5	75,19	15,70	<0,01	0,06	<0,01	<0,02	0,16	1,25	0,03	1,06	5,85	99,30
C2	8,2	70,68	18,13	0,01	0,05	0,01	0,03	0,15	1,27	0,02	2,33	6,84	99,52
C3	6,0	72,76	18,27	0,01	0,05	0,03	0,03	0,14	1,24	0,02	0,93	6,95	100,43
Média	6,9	72,88	17,37	<0,01	0,05	<0,02	<0,03	0,15	1,25	0,02	1,44	6,55	99,75

Quadro 7.4 - Balanço geoquímico de massa de uma seqüência de solos com horizontes cimentados desenvolvidos em uma suave depressão nos tabuleiros costeiros

Horizonte	Espes-sura (cm)	$\rho^{(1)}$ (g cm ⁻³)	$\varepsilon_{i,w}^{(2)}$	$\tau_{i,w}^{(3)}$			$m_{j,fluxo} \text{ (g cm}^{-2}\text{)}^{(4)}$		
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Si	Al	Fe
P11 - Argissolo Amarelo									
Ap	0-15	1,59	+0,45	+0,48	-0,23	+0,02	+2,96	-0,38	0,00
Btx1	-38	1,74	-0,01	-0,10	+0,19	+0,91	-1,38	+0,71	+0,37
Btx2	-70	1,71	-0,06	-0,21	+0,27	+0,60	-4,26	+1,47	+0,36
Btx3	-110	1,64	-0,02	-0,18	+0,19	+0,46	-4,38	+1,24	+0,33
Btx4	-170+	1,51	-0,04	-0,31	+0,23	+0,59	-11,55	+2,30	+0,65
Total	-	-	-	-	-	-	-18,61	+5,34	+1,71
P13 - Argissolo Acinzentado									
Ap	0-18	1,70	+1,33	+1,91	-0,61	-0,65	+8,69	-0,75	-0,09
Bt1	-38	1,72	+0,78	+1,22	-0,55	-0,64	+8,17	-0,99	-0,13
Bt2	-90	1,55	+0,21	+0,26	-0,45	-0,62	+6,66	-3,10	-0,47
Bm	-135	1,79	+0,09	+0,16	-0,03	-0,50	+3,94	-0,20	-0,36
Plácico	-137	1,68	-0,04	-0,29	+0,25	+5,31	-0,36	+0,08	+0,19
Btx	-170+	1,63	-0,07	-0,14	-0,09	-0,17	-2,96	-0,51	-0,11
Total	-	-	-	-	-	-	+24,24	-5,47	-0,97
P12 - Espodossolo									
Ap	0-20	1,63	+1,08	+1,53	-0,80	-0,80	+8,37	-1,23	-0,13
E1	-40	1,78	+0,47	+0,95	-0,83	-0,83	+7,70	-1,81	-0,20
E2	-85	1,63	+0,05	+0,26	-0,84	-0,83	+6,64	-5,77	-0,62
Bm1	-120	1,74	-0,02	-0,17	+0,36	-0,36	-3,62	+2,06	-0,22
Bm2	-150+	1,73	-0,06	-0,14	+0,20	-0,39	-2,66	+1,02	-0,22
Total	-	-	-	-	-	-	+16,93	-5,73	-1,39
Material de origem									
C	-	1,74	0	0	0	0	0	0	0

⁽¹⁾ ρ : densidade (média de três repetições); ⁽²⁾ $\varepsilon_{i,w}$: variação volumétrica do perfil de alteração (w) em função de um elemento imóvel (i); ⁽³⁾ $\tau_{i,w}$: função transporte de massa do elemento móvel (j); ⁽⁴⁾ $m_{j,fluxo}$: fluxo de massa do elemento móvel (j).

Quadro 7.5 - Balanço geoquímico de massa de um perfil de Espodosolo (perfil complementar P16) com horizontes cimentados desenvolvido de uma suave depressão nos tabuleiros costeiros

Horizonte	Espes-sura (cm)	$\rho^{(1)}$ (g cm ⁻³)	$\varepsilon_{i,w}^{(2)}$	$\tau_{j,w}^{(3)}$			$m_{j,fluxo} (g\ cm^{-2})^{(4)}$		
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Si	Al	Fe
Ap	0-20	1,54	+1,88	+2,35	-0,85	-0,66	+9,72	-0,94	-0,08
E1	-50	1,63	+2,67	+3,60	-0,86	-0,69	+17,54	-1,13	-0,10
E2	-110	1,58	+1,91	2,51	-0,83	-0,63	+30,84	-2,74	-0,23
Bm1	-160	1,81	+0,32	+0,45	+0,14	-0,48	+10,16	+0,85	-0,32
Bm2	-210	1,79	+0,23	+0,21	+0,35	+0,29	+5,09	+2,28	+0,21
Bm3	-260	1,82	+0,21	+0,21	+0,38	+0,59	+5,17	+2,52	+0,43
Bm4	-310	1,73	+0,08	-0,03	+0,34	+0,08	-0,83	+2,52	+0,55
Bx	-360	1,63	+0,21	+0,04	+0,34	+0,82	+0,98	+2,25	+0,59
BC	-430	1,63	+0,21	+0,08	+0,26	+0,38	+2,76	+2,41	+0,39
Cc	-500+	2,09	+0,27	+0,12	+0,23	+24,45	+3,94	+2,03	+23,68
Total	-	-	-	-	-	-	+85,37	+10,05	25,12
Material de origem									
C	-	1,74	0	0	0	0	0	0	0

⁽¹⁾ ρ : densidade (média de três repetições); ⁽²⁾ $\varepsilon_{i,w}$: variação volumétrica do perfil de alteração (w) em função de um elemento imóvel (i); ⁽³⁾ $\tau_{j,w}$: função transporte de massa do elemento móvel (j); ⁽⁴⁾ $m_{j,fluxo}$: fluxo de massa do elemento móvel (j).

Deve-se ressaltar que, em subsuperfície, ao longo dos horizontes cimentados (Btx e Bm), os valores do transporte e do fluxo de massa indicaram predomínio de perdas de Si, independentemente da posição topográfica. Por outro lado, nos horizontes mais superficiais não-cimentados, os valores foram indicativos de ganhos.

Nos Argissolos Acinzentados, entretanto, ocorreram ganhos de Si no horizonte cimentado Bm, caracterizando uma condição diferenciada na variação lateral do sistema de horizontes cimentados. Interpretou-se que a presença de um horizonte plácico, localizado abaixo do Bm, deve ter restringido o fluxo das soluções, alterando assim a dinâmica do Si o que provavelmente favoreceu o acúmulo desse elemento no horizonte Bm.

Já o alumínio apresentou comportamento inverso, em relação ao do silício (Quadro 7.4). Em geral, configuraram-se ganhos nas bordas da depressão, no segmento de área dos Argissolos Amarelos, e perdas na parte mais central da área abaciada, onde dominam os Argissolos Acinzentados e Espodosolos.

Nos Argissolos Amarelos, os ganhos de Al ocorreram de forma crescente com a profundidade, mas restringiram-se aos horizontes subsuperficiais, com cimentação fraca (Btx) (Quadro 7.4). Por se tratar de Argissolos, onde a pedogênese tipicamente envolve processos de translocação de argila (perdas nos horizontes mais superficiais e acúmulo em subsuperfície), inferiu-se que os ganhos de Al devem estar correlacionados com a iluviação de argila, uma vez que o alumínio apresenta baixa mobilidade vertical em condições normais de pH. Portanto, a remobilização vertical deste elemento deve ter ocorrido no contexto da pedogênese típica dos Argissolos.

A parte central da suave depressão, onde distribuem-se Argissolos Acinzentados e Espodosolos, corresponde ao ambiente mais influenciado por processos de podzolização. Entretanto, deve-se ressaltar que a textura na faixa de arenosa a média dos Espodosolos denotou uma evolução em condições de acidólise parcial, em consequência de uma podzolização moderada ou incompleta (BONNEAU & SOUCHIER, 1994). Contudo, na podzolização, ainda que incompleta, ácidos orgânicos podem extrair átomos de alumínio dos argilominerais, complexá-los e mobilizá-los vertical ou lateralmente (DUCHAUFOR, 1983). Por conseguinte, as perdas globais desses solos muito provavelmente resultaram da influência de processos de podzolização e do sistema de drenagem aberto lateralmente, facilitando a exportação do elemento.

Muito embora o balanço geoquímico global tenha sido de perdas, os resultados mostraram que uma pequena parcela de alumínio ficou retida na zona dos horizontes com cimentação forte (Bm1 e Bm2) dos Espodosolos (Quadro 7.4). Nestes solos, a zona típica de perdas correspondeu aos horizontes mais superficiais Ap, E1 e E2.

No concernente ao ferro, o balanço geoquímico mostrou duas zonas bem distintas na seqüência pedológica. Na borda da depressão, com melhores condições de drenagem, verificaram-se ganhos. Por outro lado, na parte central da mesma, com restrições de drenagem, configuraram-se perdas. A primeira zona corresponde à área dos Argissolos Amarelos, e a segunda, a dos Argissolos Acinzentados e Espodosolos (Quadro 7.4).

A presença de um horizonte plácico (fina camada com alta concentração ferruginosa) nos Argissolos Acinzentados pode estar relacionada à zona do perfil onde ocorreram mudanças bruscas de condutividade hidráulica, favorecendo a precipitação e o acúmulo do ferro no período de secagem do solo (UNITED STATES, 1999).

Nas zonas de perdas, observou-se que a exportação do ferro está relacionada não apenas aos processos de podzolização, mas também às condições de hidromorfia, ainda que de forma temporária. Tanto a podzolização como a hidromorfia são condições que favorecem a solubilização e a mobilização do ferro (DUCHAUFOR, 1983; BONNEAU & SOUCHIER, 1994). Como a depressão apresenta um sistema de drenagem aberto lateralmente, deve ter favorecido ao processo de exportação desse elemento.

Comportamento geoquímico de Si, Al e Fe no perfil de Espodossolo

Com o objetivo de interpretar perdas e ganhos de Si, Al e Fe no sentido vertical de um sistema com horizontes cimentados, estudou-se um perfil de Espodossolo abrangendo uma seção vertical em torno de cinco metros (Quadro 7.5) localizado em uma suave depressão fechada lateralmente.

O silício apresentou ganhos na maior parte do perfil (Quadro 7.5), que muito provavelmente decorreram do fluxo lateral convergente das águas para as partes mais baixas da depressão. Neste caso, a condição de drenagem fechada lateralmente também foi considerada como um dos fatores a favor dos ganhos.

Com relação ao alumínio, verificaram-se perdas e ganhos ao longo do perfil estudado (Quadro 7.5). Os ganhos ocorreram ao longo do sistema de horizontes cimentados e inclusive nos horizontes abaixo do sistema. Por outro lado, a zona característica de perdas correspondeu aos horizontes mais superficiais Ap, E1 e E2. Portanto, ganhos absolutos de alumínio não foram exclusivos dos horizontes cimentados.

No concernente ao ferro, por ser uma suave depressão com drenagem fechada lateralmente, os resultados indicaram ganhos na maior parte do sistema de horizontes cimentados (Bm e Bx) (Quadro 7.5) mesmo havendo condições de mobilização do ferro (podzolização e hidromorfia, ainda que temporária). Neste sistema, o maior ganho do elemento ocorreu no horizonte com cimentação fraca (Bx). No horizonte Bm1, que corresponde ao topo dos horizontes cimentados, observou-se uma ligeira perda de ferro. Provavelmente, isso decorreu de uma mobilização vertical, devido às condições de hidromorfia, estabelecida periodicamente em contato com este horizonte. Os horizontes mais superficiais (Ap, E1 e E2) corresponderam à zona típica de perda de ferro.

Por outro lado, na posição mais inferior do perfil, verificou-se um grande acúmulo de ferro, mas devido à formação do horizonte concrecionário (Cc), independentemente de processos de podzolização.

SÍNTESE E CONCLUSÕES

Na seqüência pedológica estudada, integrando solos de uma suave depressão com sistema de drenagem aberto lateralmente, observou-se que na borda da depressão, com melhores condições de drenagem, onde foram desenvolvidos os Argissolos Amarelos, ocorreram perdas absolutas de Si e ganhos de Al e Fe. Já na parte mais central da depressão, onde formaram-se os Argissolos Acinzentados e Espodossolos, ao contrário, observaram-se perdas globais de Al e Fe e ganhos de Si. Entretanto, destaca-se que nos horizontes cimentados dos Espodossolos ocorreram ganhos de Al e perdas naqueles dos Argissolos Acinzentados. Ganhos de Fe só foram verificados no horizonte plácico desenvolvido nos Argissolos Acinzentados.

O estudo de um perfil de Espodossolo em uma suave depressão, com sistema de drenagem fechado lateralmente, mostrou predomínio de ganhos de Si, Al e Fe numa seção de cinco metros de profundidade. Houve ganho de Si praticamente em toda extensão do perfil. Já o Al apresentou perdas nos horizontes mais superficiais, não-cimentados, e acúmulo nos horizontes cimentados e não-cimentados subsuperficiais. O Fe mostrou perdas nos horizontes mais superficiais, inclusive no topo dos horizontes cimentados, e ganhos nos demais horizontes subsuperficiais cimentados e não-cimentados. O maior acúmulo entre os horizontes cimentados ocorreu na zona com cimentação fraca. Entretanto, ao longo de todo perfil, o maior acúmulo deste elemento foi observado no horizonte concrecionário localizado na parte mais inferior do perfil de alteração, independentemente de processos de podzolização.

Portanto, na parte interna das depressões, que corresponde ao segmento de área onde converge o fluxo lateral das águas, as perdas e os ganhos de Si, Al e Fe foram diversificados. Mostraram ser dependentes da atuação de processos de podzolização, da translocação mecânica de argila, dos sistemas de drenagem (aberto ou fechado), do posicionamento no relevo e de condições de hidromorfismo.

Com base apenas em perdas e ganhos absolutos de Si, Al e Fe, não foi possível individualizar com precisão sistemas com horizontes cimentados integrantes dos solos desenvolvidos no ambiente das suaves depressões. Entretanto, observou-se que em geral ocorreram ganhos absolutos de alumínio, acompanhado ou não de silício e ferro, no contexto desses ambientes.

CAPÍTULO 8 - Agentes cimentantes e a formação de horizontes cimentados

Horizontes cimentados em ambientes úmidos foram encontrados em várias partes do globo terrestre, desde a zona tropical até aquelas de climas frios. Na costa leste da Austrália, foram estudados hardpans cimentados por compostos amorfos contendo sílica sempre acompanhada de alumínio e, por vezes, com alumínio em maior quantidade (THOMPSON et al., 1994). Na região sudeste dos Estados Unidos, foram identificados fragipãs cuja cimentação provavelmente resultou da ação de aluminossilicatos amorfos (KARATHANASIS, 1989). No sudoeste do Canadá observou-se horizonte dúrico fortemente cimentado por materiais amorfos contendo várias proporções de Al, Si e Fe (McKEAGUE & SPROUT, 1975), matéria orgânica (McKEAGUE & PROTZ, 1980), assim como também aluminossilicatos amorfos associados com imogolita (McKEAGUE & KODAMA, 1981).

Em horizontes espódicos, tem sido constatado que aluminossilicatos amorfos e/ou pobremente cristalinos desempenham papel importante como agentes cimentantes (FARMER et al., 1980; FARMER et al., 1984; FARMER et al., 1985). Entretanto, alguns estudos (McKEAGUE & WANG, 1980; LEE et al., 1988; McHARDY & ROBERTSON, 1983) atribuíram apenas ao alumínio complexado com matéria orgânica o papel de agente cimentante principal.

Estudos recentes, desenvolvidos nos tabuleiros costeiros do Nordeste do Brasil (FILIZOLA et al., 2001), indicaram que géis aluminosos, alumino-silicosos ou alumino-ferruginosos foram responsáveis pelas características dos materiais endurecidos. Para BOULET et al. (1998), nos horizontes com cimentação forte (tipo duripã), os agentes cimentantes foram complexos organometálicos. Porém, segundo SILVA et al. (1997), Al, Si e Fe, em fases amorfas, constituíram os agentes cimentantes, mas sendo o Al o agente principal. Conforme MOREAU (2001), a sílica e o alumínio desempenharam papel relevante na gênese de horizontes com cimentação forte (tipo duripã) ou fraca (tipo fragipã). Recentemente, ROMERO (2003) considerou que compostos amorfos de Al e Si foram determinantes nos horizontes com

cimentação forte (tipo duripã), mas também sugeriu a participação da sílica como agente cimentante.

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes à caracterização dos agentes cimentantes, os principais atributos diagnósticos dos horizontes cimentados, assim como os principais processos pedogenéticos envolvidos na formação desses horizontes no ambiente das suaves depressões nos tabuleiros costeiros. A caracterização dos agentes cimentantes foi desenvolvida especialmente com base em extrações seletivas de fases amorfas por diferentes métodos.

EXTRAÇÃO DE SILÍCIO, ALUMÍNIO E FERRO PELO OXALATO DE AMÔNIO (Si_o , Al_o e Fe_o)

As extrações foram realizadas em horizontes com diversos graus de cimentação e/ou endurecimento tanto em seqüências de horizontes de perfis de solos selecionados (P11, P12, P13 e P16) como em horizontes selecionados de diferentes solos.

Extrações em seqüências de horizontes de perfis selecionados

Os resultados mostraram que fases amorfas relacionadas aos agentes cimentantes são constituídas predominantemente por Al_o , seguido de proporções mais baixas de Si_o e Fe_o (Figuras 8.1 e 8.2). Nos horizontes com cimentação forte (tipo Bm), identificados no perfil de Argissolo Acinzentado (P13) e nos perfis de Espodosolos (P12 e P16), verificaram-se os maiores teores de Al_o , sempre seguidos de Si_o e Fe_o . Já nos horizontes com cimentação fraca (tipo Btx ou Bx), com ocorrência nos perfis de Argissolo Amarelo (P11), Argissolo Acinzentado (P13) e Espodosolo (P16), os teores de Al_o em geral foram mais baixos e seguidos de Fe_o e Si_o . Por sua vez, os horizontes não-cimentados individualizam-se de forma relativa pelos baixos teores de Al_o , Si_o e Fe_o .

Argissolos Amarelos. No perfil P11 (Figura 8.1 A), verificou-se um rápido decréscimo nos teores de Al_o e Fe_o com a profundidade do horizonte Btx1 até o Btx4. Este fato foi correlacionado à expressão e ao volume de materiais com cimentação fraca que decrescem de cima para baixo.

Argissolos Acinzentados. No perfil P13 (Figura 8.1 B) destacaram-se duas características marcantes dos processos de cimentação. A primeira relaciona-se ao teor mais elevado de Al_o no horizonte com cimentação forte (Bm), e a segunda refere-se ao conteúdo relativo mais baixo de Al_o , seguido de Fe_o e Si_o no horizonte com cimentação fraca (Btx). Separando estes dois horizontes, existe um horizonte plácico caracterizado pelo alto conteúdo de Fe_o , seguido de Al_o e Si_o .

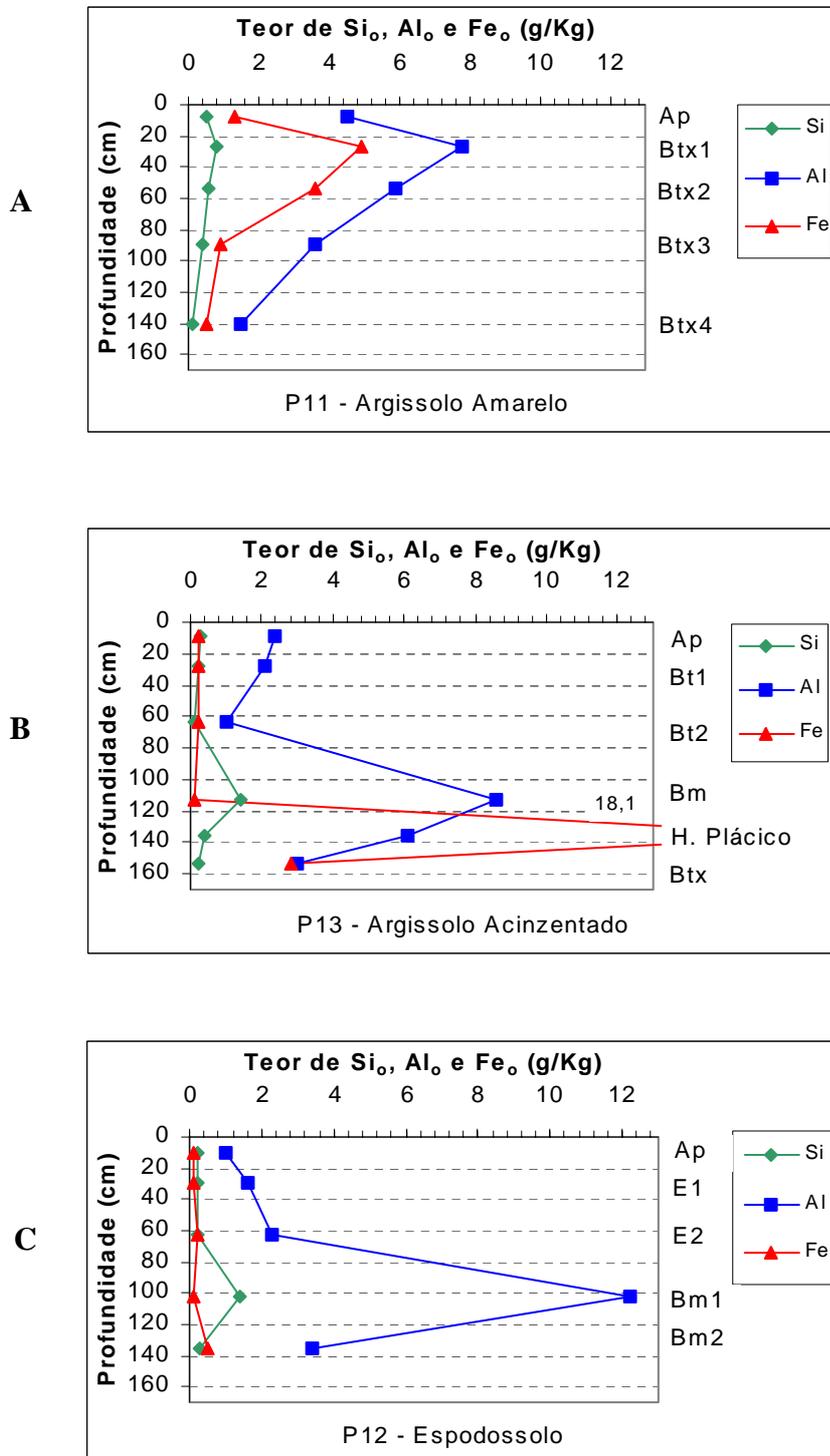


Figura 8.1 – Extração de silício, alumínio e ferro pelo oxalato de amônio (Si_o, Al_o e Fe_o) em três perfis de solo. A: Argissolo Amarelo (P11) apresentando horizontes com cimentação fraca (Btx); B: Argissolo Acinzentado (P13) apresentando horizontes com cimentação forte (Bm) e fraca (Btx); e C: Espodosolo (P12) apresentando horizontes com cimentação forte (Bm).

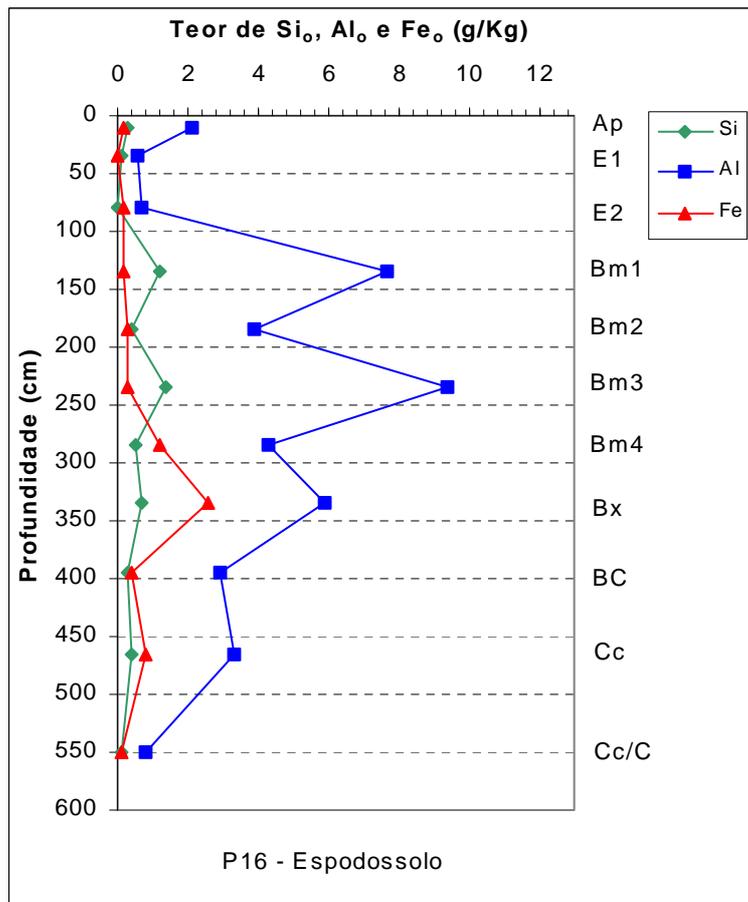


Figura 8.2 – Extração de alumínio, silício e ferro pelo oxalato de amônio (Al_o, Si_o e Fe_o) em um perfil de Espodossolo (perfil complementar P16) apresentando horizontes com cimentação forte (Bm) e fraca (Bx).

Espodossolos. O perfil P12 (Figura 8.1 C) e o perfil complementar P16 (Figura 8.2) mostraram, como no caso anterior, o conteúdo mais alto de Al_o seguido de Si_o e Fe_o nos horizontes com cimentação forte (Bm). É importante destacar, especialmente nos horizontes cimentados do perfil P16, as irregularidades significativas nos teores de Al_o e o acúmulo de Fe_o na zona do horizonte com cimentação fraca (Bx).

Extrações em horizontes selecionados

Extrações seletivas realizadas em horizontes subsuperficiais selecionados com cimentação forte ou fraca, assim como naqueles não-cimentados, mostraram uma relativa e nítida diferenciação entre estas categorias de horizontes (Figura 8.3).

Horizontes com cimentação forte. Em geral os teores mais elevados das extrações relacionaram-se aos horizontes com cimentação forte, sendo $Al_o \gg Si_o > Fe_o$ com valores de Fe_o praticamente nulos (Figura 8.3 B). Porém, no detalhe (Figura 8.3 A) observa-se alguns valores de Al_o iguais ou mesmo menores do que certos valores observados em horizontes com cimentação fraca. Isto sugere que além dos teores dos agentes cimentantes devem existir outros fatores envolvidos com os graus das cimentações.

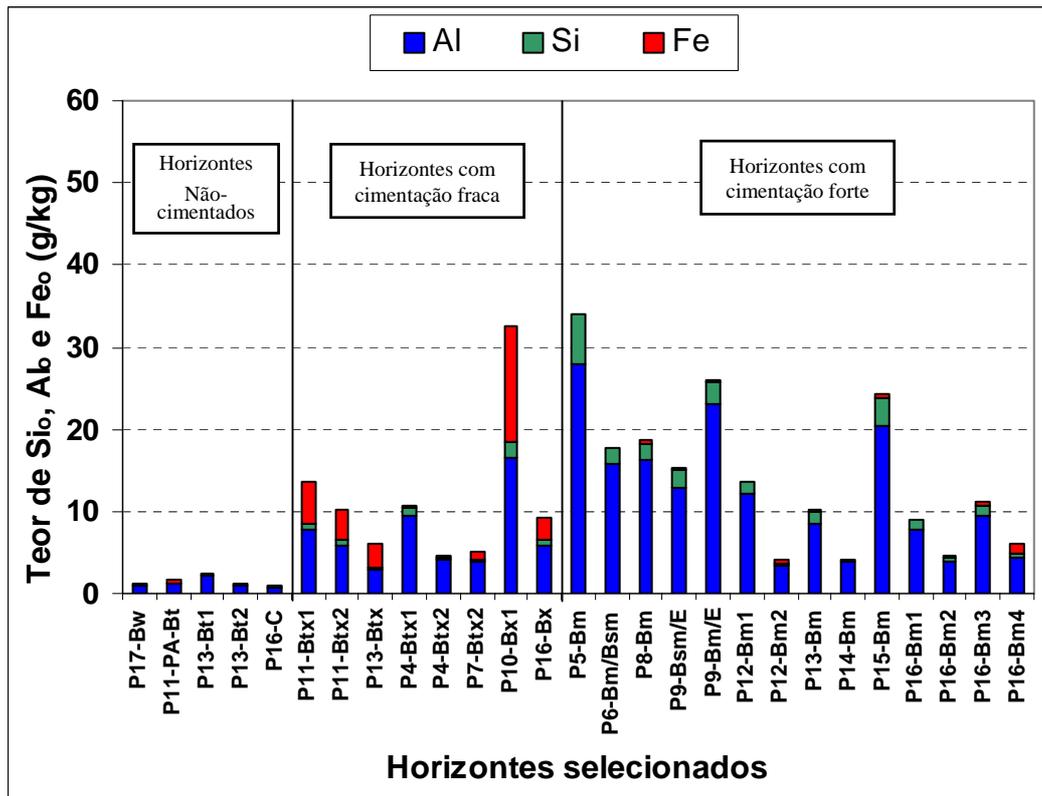
Horizontes com cimentação fraca. Nestes horizontes constatou-se que, em média, $Al_o > Fe_o > Si_o$, mas com teores de Al_o representando pouco mais da metade dos valores observados nos horizontes com cimentação forte (Figura 8.3 B). Por outro lado, os teores de Fe_o foram cerca de dez vezes mais elevados do que nos horizontes com cimentação forte.

Horizontes não-cimentados. Nestes, as extrações seletivas foram muito baixas, diferenciando-se claramente dos horizontes cimentados. Os teores elementares ficaram na ordem $Al_o > Fe_o > Si_o$ (Figura 8.3 B), mas sendo muito baixos os valores de Fe_o e Si_o . Entre os horizontes desta categoria, o P17-Bw (da Chapada do Araripe) e o P16-C (dos tabuleiros costeiros) (Figura 8.3 A) representam horizontes considerados não-coesos. Como pode ser notado, os teores das extrações seletivas não permitiram diferenciar os horizontes coesos dos não-coesos.

EXTRAÇÃO DE SILÍCIO, ALUMÍNIO E FERRO PELO TIRON (Si_T , Al_T e Fe_T)

As extrações em horizontes selecionados (Figura 8.4) mostraram as mesmas tendências gerais daquelas obtidas pelo método do oxalato de amônio (Figura 8.3). Entretanto, os teores elementares foram ligeiramente mais elevados, especialmente com relação ao silício.

A



B

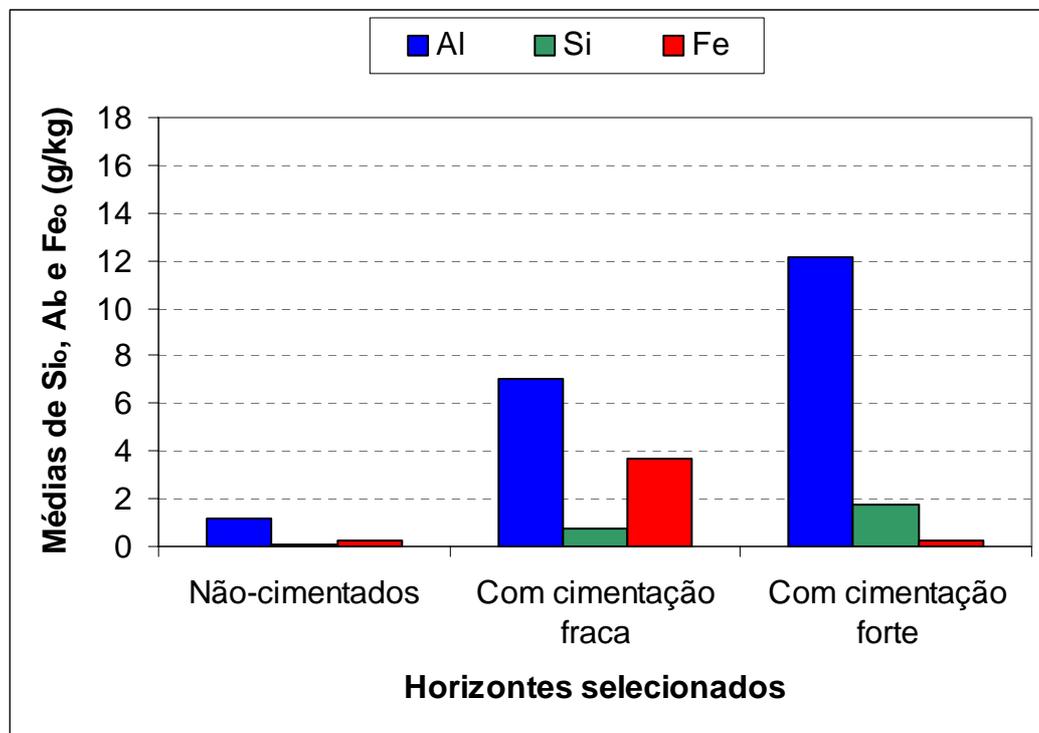
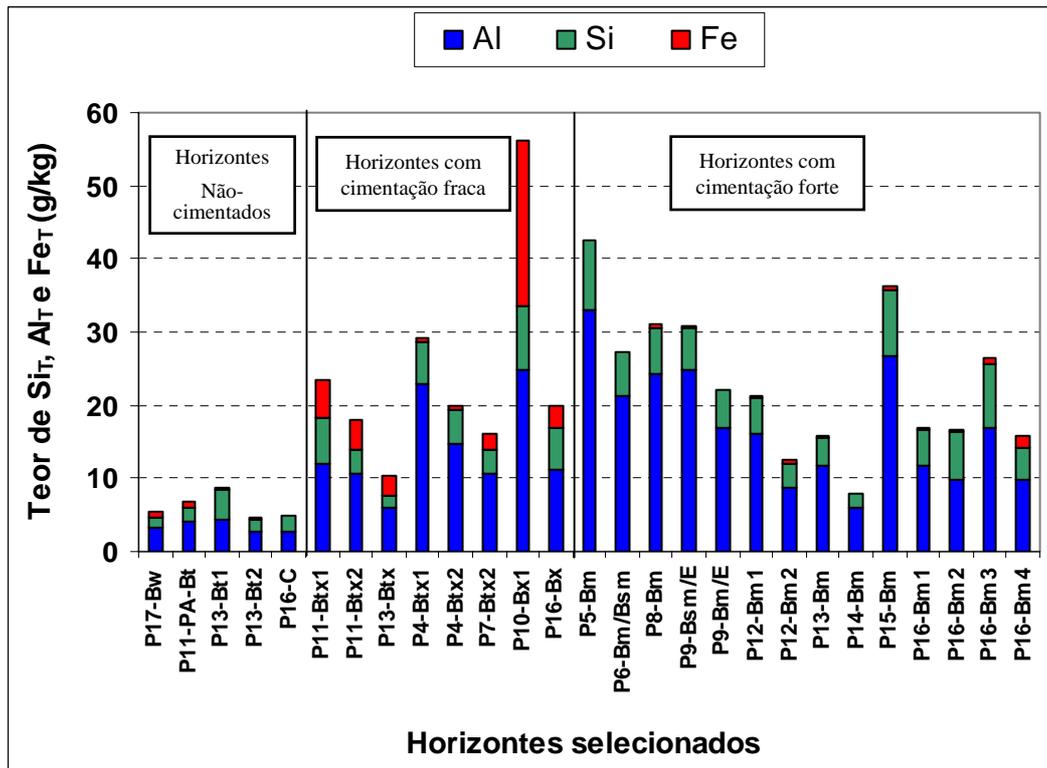


Figura 8.3 – Extração de silício, alumínio e ferro pelo oxalato de amônio (Si_o , Al_o e Fe_o) em horizontes selecionados, cimentados e não-cimentados. A: variação dos teores de Si_o , Al_o e Fe_o em três classe de horizontes, isto é, com cimentação forte, fraca e não-cimentados; B: média dos teores de Si_o , Al_o e Fe_o por classe de horizontes.

A



B

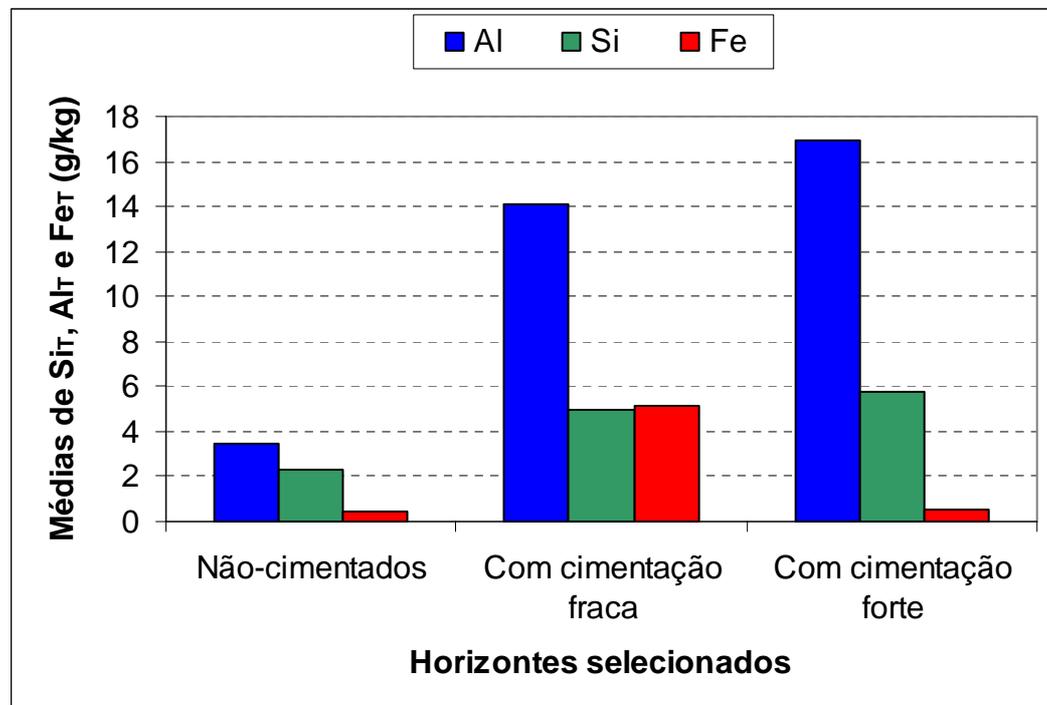


Figura 8.4 – Extração de silício, alumínio e ferro pelo Tiron (Si_T , Al_T e Fe_T) em horizontes selecionados, cimentados e não-cimentados. A: variação dos teores de Si_T , Al_T e Fe_T em três classe de horizontes, isto é, com cimentação forte, fraca e não-cimentados; B: média dos teores de Si_T , Al_T e Fe_T por classe de horizontes.

DIFERENÇAS ENTRE OS TEORES DE Si EXTRAÍDOS PELO TIRON E OXALATO DE AMÔNIO

Esta diferença, especificada como $\Delta Si = Si_T - Si_o$, serve de base para estimativas de sílica de fases opalinas (KODAMA & ROSS, 1991). Entretanto, resultados de KODAMA & WANG (1989) mostraram valores de ΔSi negativos atingindo até - 8,6 g/kg. Isto sugere que nas estimativas destas fases a margem de erro a ser considerada deve situar-se pelo menos na faixa de $\pm 8,6$ g/kg.

A fim de se verificar a presença e o papel cimentante dessas fases, foram avaliadas variações de ΔSi com base em vinte e quatro amostras de horizontes cimentados selecionados, assim como plotaram-se valores de $\Delta Si = Si_T - Si_o$ ao longo de três perfis de solo selecionados compreendendo horizontes cimentados e não-cimentados (Figura 8.5). Os resultados mostraram valores de ΔSi sempre inferiores a 8 g/kg (Figura 8.5) ficando a maioria entre 2 e 4 g/kg (Figura 8.5 D). Além disso, nos perfis selecionados, os valores de ΔSi mostraram-se decrescentes dos horizontes não-cimentados para os cimentados ou foram relativamente equivalentes (Figura 8.5 A, B e C). Portanto, os resultados obtidos são muito baixos para indicar a presença de fases opalinas. MOODY & GRAHAM (1997) estimaram e confirmaram a presença de tais fases no estudo de um horizonte cimentado com $\Delta Si = 37,8$ g/kg. Porém, neste caso ΔSi apresentou um valor cerca de quatro vezes maior do que a margem de erro a ser considerada nas estimativas.

EXTRAÇÃO DE ALUMÍNIO E FERRO PELO PIROFOSFATO DE SÓDIO (Al_p e Fe_p)

A figura 8.6 apresenta valores de Al_p , Fe_p , assim como os teores de carbono total, obtidos a partir de horizontes cimentados selecionados. Os resultados mostraram que o Al_p é o cátion predominante na fase orgânica, seguido de teores relativamente muito baixos de Fe_p . Observou-se ainda que, em média, os teores de Al_p e os de carbono foram mais elevados nos horizontes com cimentação forte enquanto os de Fe_p mostraram um ligeiro destaque nos horizontes com cimentação fraca (Figura 8.6 B). Portanto, complexos organometálicos com altos teores de alumínio, que podem atuar como agentes cimentantes, destacaram-se quantitativamente nos horizontes com cimentação forte.

Em função das extrações pelos métodos do pirofosfato de sódio (Al_p) e do oxalato de amônio (Al_o), estimou-se que cerca de 60 a 80% do alumínio extraível ocorre na fração mineral, e de 20 a 40%, em compostos orgânicos. Extrações seletivas realizadas por McKEAGUE & SPROUT (1975), a partir de horizontes com cimentação forte (horizontes dúricos) da região sudoeste do Canadá, também mostraram predomínio de alumínio na fração mineral. Por outro lado, em horizontes tipo ortstein, da Flórida, observou-se predomínio de alumínio extraível,

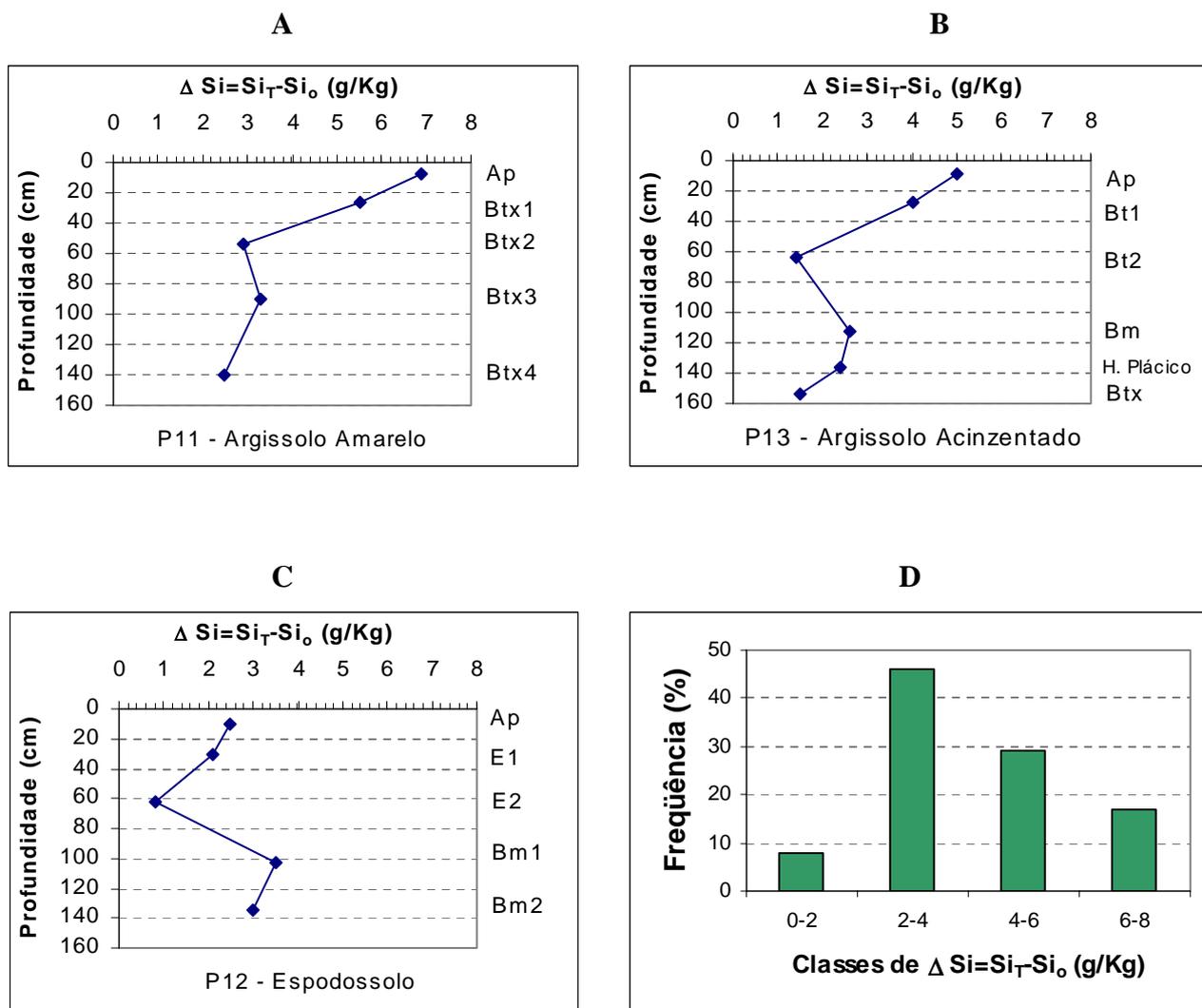
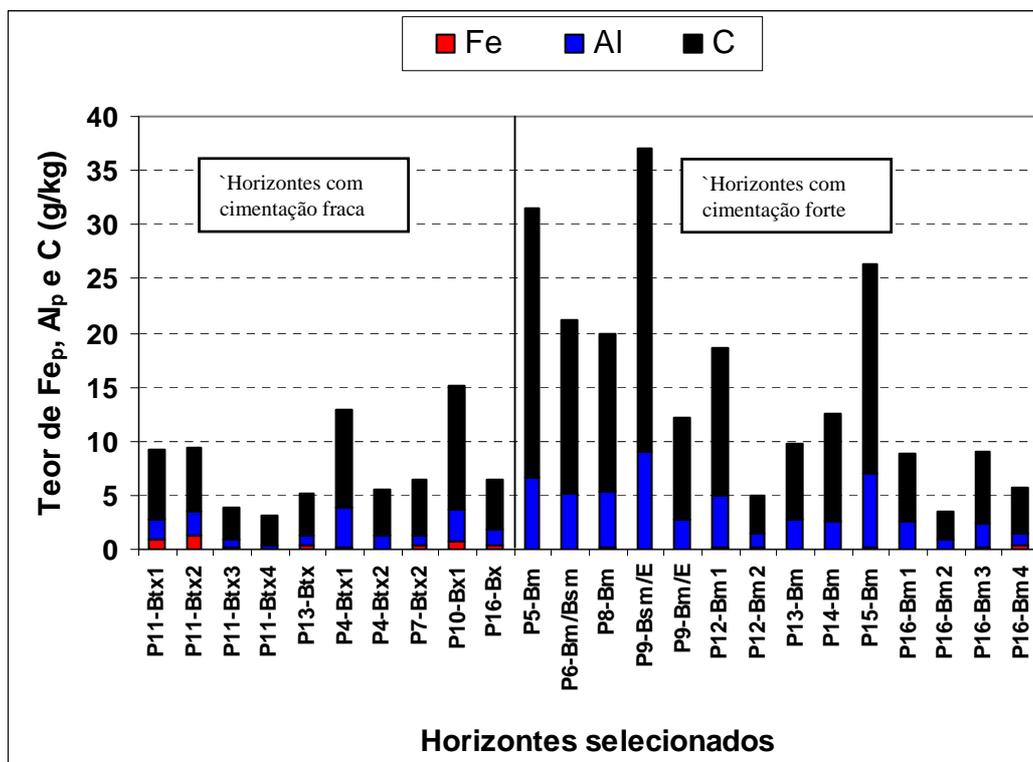


Figura 8.5 – Variações de $\Delta Si = Si_T - Si_O$ em três perfis de solo e em horizontes cimentados selecionados. A: Argissolo Amarelo (P11) apresentando horizontes com cimentação fraca (Btx); B: Argissolo Acinzentado (P13) apresentando horizontes com cimentação forte (Bm) e fraca (Btx); C: Espodosolo (P12) apresentando horizontes com cimentação forte (Bm); e D: classes de freqüência de ΔSi com base em vinte e quatro amostras de horizontes cimentados.

A



B

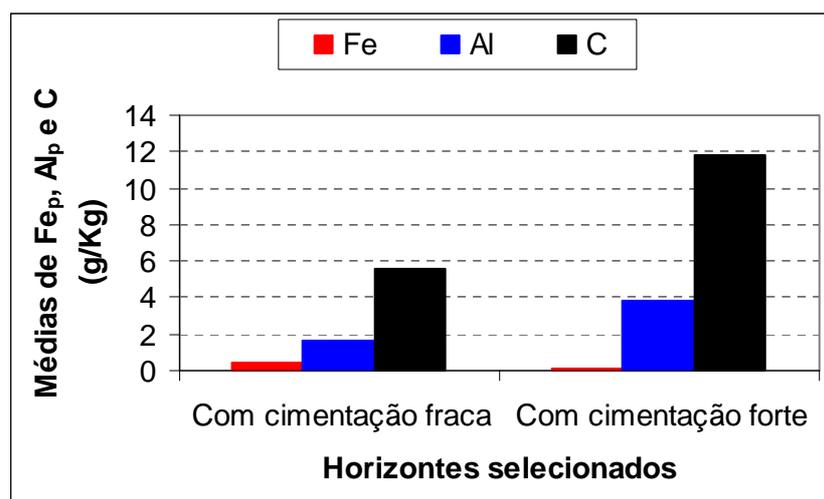


Figura 8.6 – Extração de alumínio e ferro da fração orgânica pelo pirofosfato de sódio (Al_p e Fe_p) e o conteúdo de carbono total (C) em horizontes cimentados selecionados. A: variação dos teores de Al_p , Fe_p e C nas classe de horizontes com cimentação forte e fraca; B: média dos teores de Al_p , Fe_p e C por classe de horizontes.

considerado como agente cimentante principal, associado com fases orgânicas (LEE et al., 1988b).

As proporções do conteúdo de Al em fases minerais não-cristalinas e na fração orgânica de horizontes cimentados selecionados no ambiente das suaves depressões nos tabuleiros costeiros podem ser observadas na figura 8.7.

A mobilização e a precipitação de Al e Fe nos horizontes cimentados, onde normalmente ocorrem processos de podzolização, dependem da relação cátion/ânion, pH, Eh e da natureza da matéria orgânica (SKJEMSTAD, 1992; DUCHAUFOR, 1983). Entretanto, em meios ácidos e com boa aeração, esta relação basicamente é que comanda a mobilização (DUCHAUFOR, 1983).

Os resultados obtidos a partir de horizontes cimentados selecionados indicaram que as condições de precipitação ocorreram quando a relação $(Al_p + Fe_p)/C$ atingiu valores da ordem de $0,35 \pm 0,08$ (Figura 8.8). Resultados experimentais (SKJEMSTAD, 1992) indicaram que, entre pH 4 e 5, a máxima floculação ocorre quando a relação cátion/ânion (Al/C) atinge valores em torno de 0,33, portanto, muito próximo do resultado médio obtido.

Observando possíveis correlações entre os teores de $Al_p \times C$ e $Fe_p \times C$ verificou-se que existe uma relação linear muito forte entre o Al_p e C ($r = 0,98$), ao passo que entre Fe_p e C a relação não tem significância ($r = -0,19$) ao nível de 5% de probabilidade. Resultados similares também foram observados no estudo de Espodossolos da costa leste da Austrália (SKJEMSTAD et al., 1992).

Estes resultados indicaram, portanto, que o Al apresenta grande afinidade por complexos orgânicos (Figura 8.9), sendo decisivo no aumento da relação cátion/ânion e na precipitação de complexos organometálicos nos horizontes cimentados.

VALORES DA RELAÇÃO Al/Si INDICATIVOS DE ALUMINOSSILICATOS AMORFOS

A relação molar Al/Si, obtida por meio da expressão $[(Al_o - Al_p)/Si_o]^{1,04}$ (PARFITT & WILSON, 1985), foi calculada com dados de vinte e quatro amostras de horizontes cimentados selecionados. A relação variou na faixa de 3,5 a 11,5, com moda entre 5,5 e 7,5 (Figura 8.10).

Um aspecto muito relevante foi a alta correlação entre Al e Si extraídos da fração mineral ($r = 0,95$) (Figura 8.11). Considerando resultados das extrações envolvendo conjuntamente a fração mineral e a orgânica, percebeu-se que as relações entre Al e Si ainda permaneceram elevadas (Figura 8.12). A alta correlação entre Al e Si da fração mineral não-cristalina e a moda da relação molar Al/Si entre 3,5 e 7,5 sugeriram uma associação destes elementos como aluminossilicatos amorfos, porém com composição diferente das alofanos. É conveniente

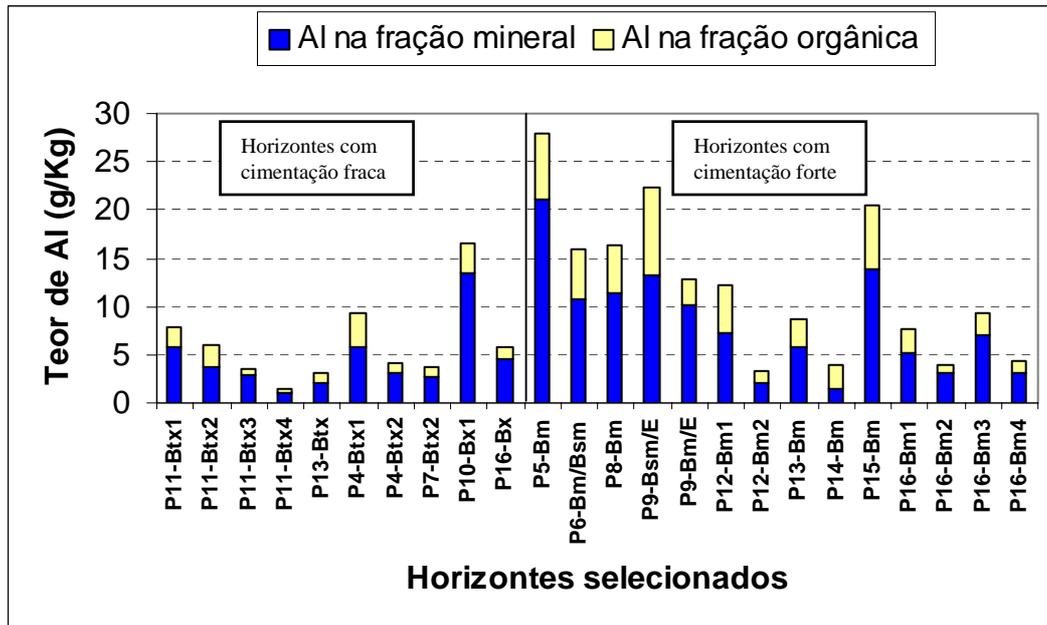


Figura 8.7 – Proporção do conteúdo de alumínio, em fases não-cristalinas, na fração mineral e orgânica de horizontes cimentados selecionados.

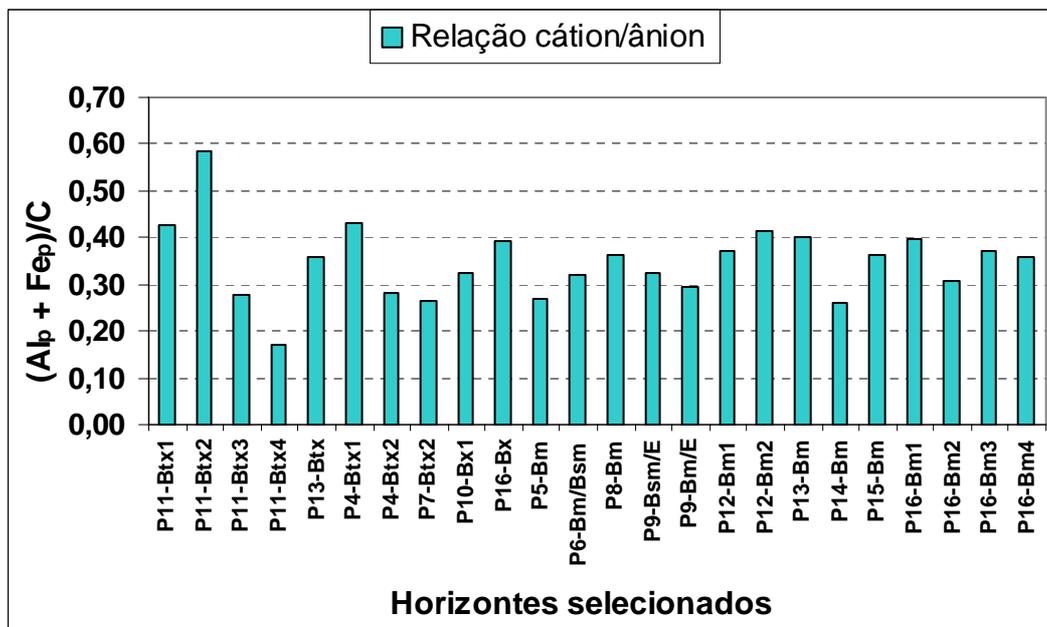


Figura 8.8 – Variação da relação cátion/ânion, $[(Al_p + Fe_p)/C]$, em horizontes cimentados selecionados. A relação média estimada foi de $0,35 \pm 0,08$.

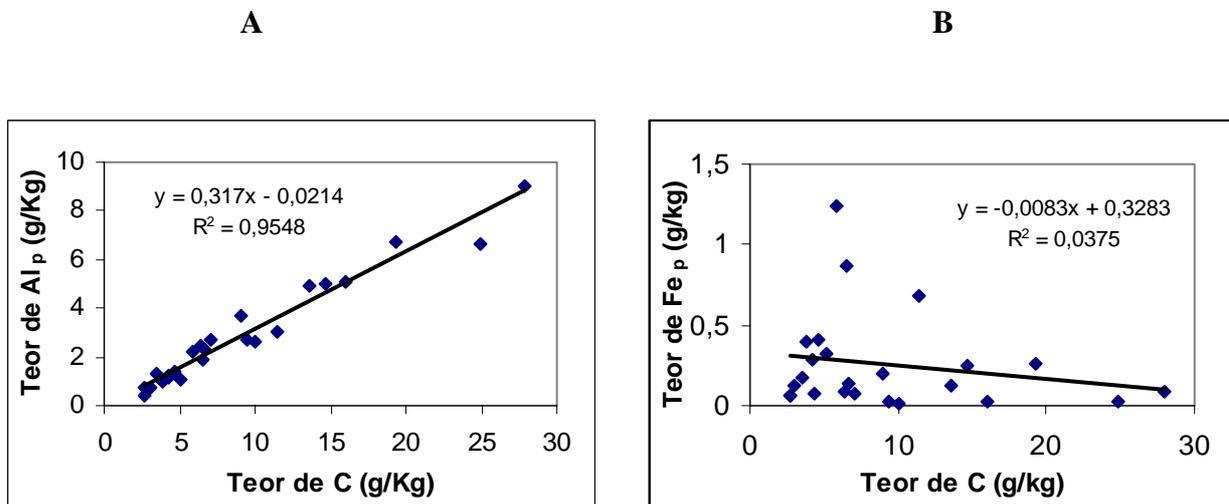


Figura 8.9 – Correlação dos teores de alumínio e ferro extraídos pelo pirofosfato de sódio (Al_p e Fe_p) com teores de carbono total (C) em horizontes cimentados selecionados (vinte e quatro amostras). A: a correlação entre Al_p e C; e B: a correlação entre Fe_p e C.

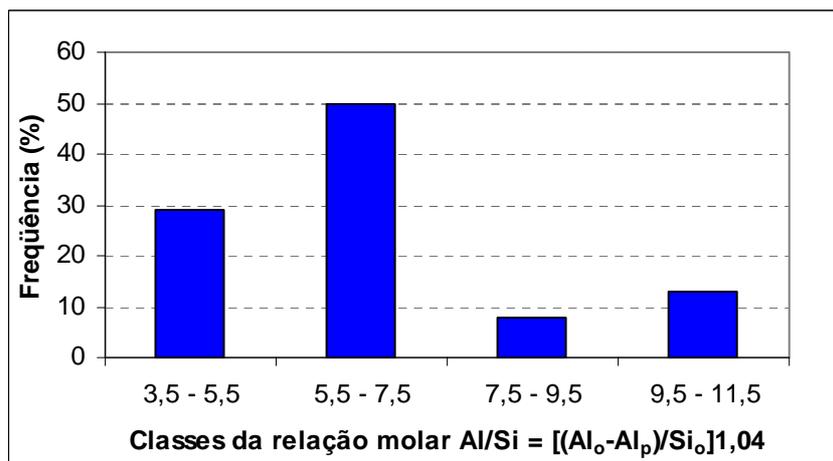


Figura 8.10 – Classes da relação molar Al/Si com base em extrações seletivas da fração mineral não-cristalina de horizontes cimentados selecionados (vinte e quatro amostras).

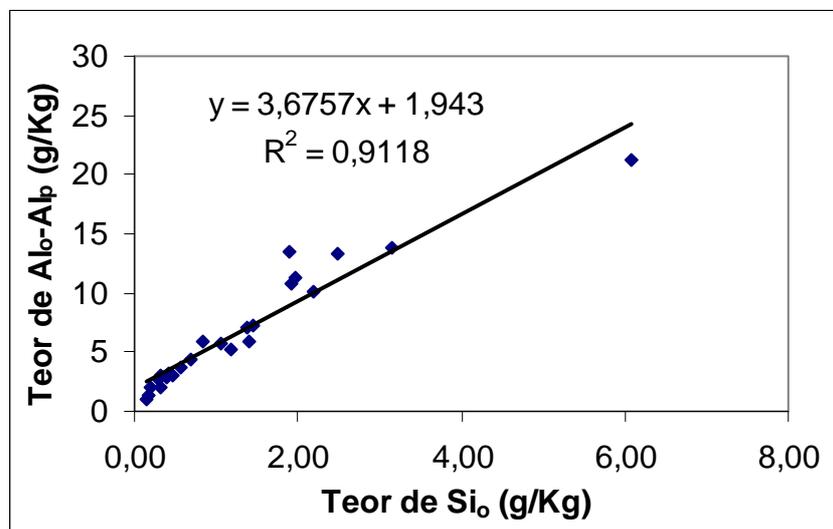


Figura 8.11 – Correlação entre os teores de Al e Si extraídos seletivamente da fração mineral não-cristalina em horizontes cimentados selecionados (vinte e quatro amostras). $Al = (Al_o - Al_p)$ e $Si = Si_o$.

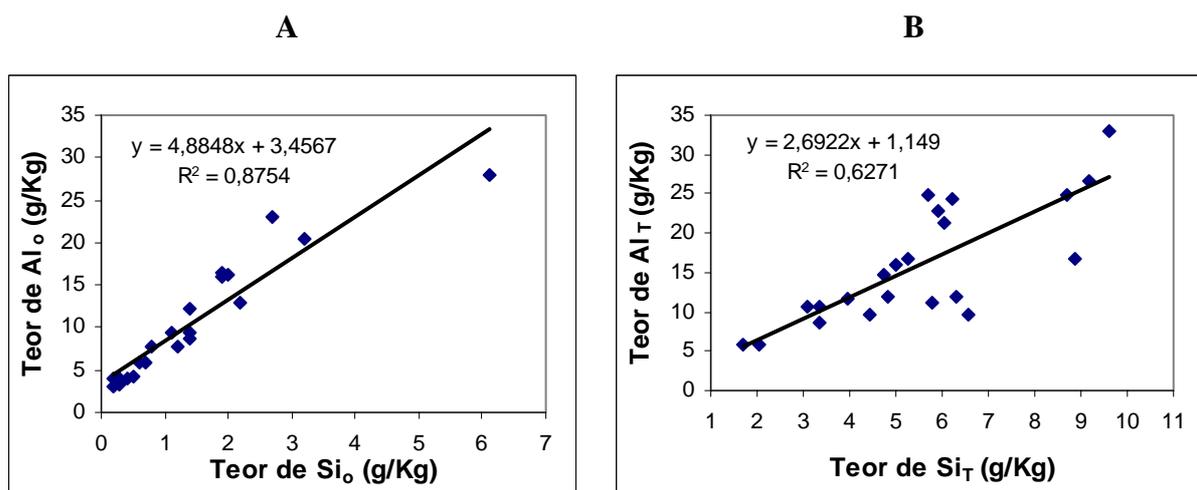


Figura 8.12 – Correlação entre os teores de Al e Si extraídos seletiva e conjuntamente da fração mineral não-cristalina e da fração orgânica em horizontes cimentados selecionados (vinte e quatro amostras). A: extrações pelo oxalato de amônio (Al_o e Si_o); B: extrações pelo Tiron (Al_T e Si_T).

lembrar que em geral as alofanas apresentam uma relação molar média Al/Si = 2, com variações mais freqüentes ente 1,1 e 2,9, podendo ocorrer casos extremos na faixa de 0,4 a 4,2 (PARFITT & KIMBLE, 1989).

Embora materiais alofânicos e correlatos sejam comuns atuando como agentes cimentantes em Espodosolos (FARMER et al., 1980; McKEAGUE & KODAMA, 1981; FARMER et al., 1984), em certos casos a cimentação resulta de aluminossilicatos com excesso de alumínio (THOMPSON et al., 1996; McKEAGUE & SPROUT, 1975), conforme se observou no presente estudo.

NATUREZA DOS AGENTES CIMENTANTES

A tradução de concentrações elementares em fases amorfas que atuam com agentes cimentantes, de onde os elementos foram extraídos, não é uma tarefa simples. Entretanto, vários fatores foram levados em conta buscando-se deduzir a natureza dos agentes cimentantes. Os mais importantes foram: (1) os teores de Al, Si e Fe extraídos seletivamente de fases não-cristalinas e suas relações com horizontes cimentados e não-cimentados; (2) as correlações e a relação molar entre Al e Si da fase mineral não-cristalina de horizontes cimentados; (3) as correlações de Al e Fe com teores de carbono e suas relações com horizontes cimentados; (4) os valores de $\Delta Si = Si_T - Si_o$ e suas relações com horizontes cimentados e não-cimentados; (5) a estabilidade de horizontes cimentados quando imersos em soluções de oxalato de amônio, Tiron e pirofosfato de sódio.

Os resultados das extrações seletivas mostraram que o Al é o elemento que participa em maior quantidade nas fases amorfas relacionadas aos agentes cimentantes, ficando de 60 a 80% na fração mineral e de 20 a 40% na fração orgânica. O Si ocorre numa proporção relativamente baixa, mas sempre correlacionado com os teores de Al, especialmente na fração mineral. O Fe revelou comportamento muito diferente das tendências de Al e Si. Nos horizontes com cimentação forte, onde os teores de Al e Si foram mais elevados, os de Fe, ao contrário, praticamente foram nulos. Já nos horizontes com cimentação fraca, onde os teores de Al e Si normalmente foram mais baixos em relação aos horizontes com cimentação forte, os de Fe apresentaram os valores mais elevados, normalmente ultrapassando os de Si.

Em adição a essas características, também foi observado que o pirofosfato de sódio, entre os demais extratores, foi o único que mostrou poder de desestabilizar de forma parcial amostras (2 a 5 cm de diâmetro) de horizontes com cimentação forte. Entretanto, as amostras imersas nas soluções de pirofosfato só iniciaram a desestabilização após 50 dias.

Conforme discutido anteriormente, os agentes cimentantes mais prováveis de serem encontrados nos horizontes cimentados são os seguintes: sílica opalina, compostos ferruginosos, complexos organometálicos e aluminossilicatos amorfos.

No concernente à sílica em fases opalinas, os valores de $\Delta Si = Si_T - Si_o < 8$ g/kg e suas relações com horizontes cimentados e não-cimentados indicaram que estas fases, se presentes, não foram decisivas nos processos de cimentação. Em adição, o Tiron, que é efetivo na dissolução de fases opalinas não produziu nenhuma desestabilização em amostras com cimentação forte num prazo de 60 dias, reforçando a idéia que essas fases, se presentes, não mostraram papel importante nas cimentações.

Com relação aos compostos ferruginosos, excluindo-se o horizonte plácico com altas concentrações ferruginosas, nos demais horizontes cimentados não houve correlação do ferro extraível (não-cristalino) com as cimentações. Ao contrário, nos horizontes com cimentação forte, os teores de ferro foram praticamente nulos e nos horizontes com cimentação fraca, atingiram os teores mais elevados. Portanto, é pouco provável que compostos ferruginosos (não-cristalinos) isoladamente estejam relacionados aos processos de cimentação.

Já com relação aos complexos organometálicos, o efeito do pirofosfato de sódio, causando desestabilização parcial em amostras de horizontes com cimentação forte e a alta correlação entre Al_p e C, indicaram que esses complexos com altos teores de alumínio são agentes que participam nos processos de cimentação.

No que concerne aos aluminossilicatos amorfos, a alta correlação entre Al e Si extraídos seletivamente da fração mineral não-cristalina e a estreita relação dos teores destes elementos com os graus de cimentação foram os principais aspectos indicativos de sua condição como agentes cimentantes.

O conjunto de resultados obtidos e as considerações sobre os possíveis agentes cimentantes permitiram deduzir que os agentes cimentantes principais nos horizontes estudados são aluminossilicatos amorfos. Os complexos organometálicos com altos teores de alumínio também atuam como agentes cimentantes, mas desempenham papel secundário.

Um outro aspecto interessante a se ressaltar é que a composição dos aluminossilicatos amorfos deste estudo é diferente de alofanas, pois são muito mais concentrados em alumínio.

Estimativa da composição geral dos aluminossilicatos amorfos

A composição geral dos aluminossilicatos amorfos que atuam como agentes cimentantes foi estimada em função dos teores de alumínio e silício extraíveis, assim como levando em conta o grau de hidratação da fração mineral não-cristalina. A fórmula geral destes compostos, expressa em óxidos, pode ser escrita como $(Al_2O_3)_x.SiO_2.n(H_2O)$, da mesma forma que se

representa genericamente a composição das alofanas. Portanto, de acordo com esta fórmula, precisa-se estimar os valores de x e n . O valor do índice x relaciona-se à relação molar Al/Si, e o de n , ao grau de hidratação [% $(\text{H}_2\text{O})^+$].

Estimativa do valor x . O cálculo do índice x foi efetuado com os seguintes procedimentos:

(I) Conversão dos teores de Al e Si da fração mineral não-cristalina em percentagens dos óxidos correspondentes (% Al_2O_3 e % SiO_2). A conversão foi realizada multiplicando-se % $(\text{Al}_o - \text{Al}_p)$ e % Si_o respectivamente pelos fatores 1,89 e 2,14;

(II) Partindo-se de uma fórmula genérica de aluminossilicatos amorfos expressa como $a(\text{Al}_2\text{O}_3).b(\text{SiO}_2).n(\text{H}_2\text{O})$ e sem peso molecular conhecido, estimaram-se os coeficientes a e b proporcionalmente a % (Al_2O_3) e % (SiO_2) obtidos das extrações seletivas. Em função da soma destes óxidos [% $(\text{Al}_2\text{O}_3) + \%(\text{SiO}_2)$] e dos pesos moleculares (PM) de (Al_2O_3) e de (SiO_2) , estabeleceram-se as seguintes proporções:

$$(A) \%(\text{Al}_2\text{O}_3) = a(\text{PM de } \text{Al}_2\text{O}_3) / [\%(\text{Al}_2\text{O}_3) + \%(\text{SiO}_2)] \text{ e}$$

$$(B) \%(\text{SiO}_2) = b(\text{PM de } \text{SiO}_2) / [\%(\text{Al}_2\text{O}_3) + \%(\text{SiO}_2)].$$

Em um caso com $(\text{Al}_2\text{O}_3) = 3,99\%$, $(\text{SiO}_2) = 1,30\%$, sendo PM de $(\text{Al}_2\text{O}_3) = 102$ e o PM de $(\text{SiO}_2) = 60$, substituindo-se estes valores nas proporções (A) e (B), resultou em $a = 0,2069$ e $b = 0,1146$;

(III) Para que a fórmula geral preconizada $(\text{Al}_2\text{O}_3)_x.(\text{SiO}_2).n(\text{H}_2\text{O})$ seja equivalente à genérica $a(\text{Al}_2\text{O}_3).b(\text{SiO}_2).n(\text{H}_2\text{O})$, é necessário que o coeficiente b seja unitário. Então, dividindo-se os coeficientes proporcionais a e b pelo valor de b , permite-se que o coeficiente de (SiO_2) seja unitário. Deste modo, $x = a/b$ e, neste exemplo, seu valor estimado foi 1,8.

Calculando-se os valores de x , por meio deste método, para os diversos resultados das extrações seletivas, advindas dos horizontes cimentados selecionados, obteve-se a fórmula geral $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1,8-4,4}.\text{SiO}_2.n(\text{H}_2\text{O})$.

Estimativas do grau de hidratação [% $(\text{H}_2\text{O})^+$]. Os cálculos estimativos do grau de hidratação (valor de $n(\text{H}_2\text{O})^+$ em termos percentuais), foram desenvolvidos com base na análise química total da fração-argila. As análises foram realizadas em amostras selecionadas com diversos níveis de cimentação e hidratação, antes e após extrações de fases amorfas pelo método do oxalato de amônio. Os resultados analíticos dessas amostras foram apresentados no capítulo 6. Considerando os valores de perda ao fogo, os teores de Al_2O_3 e SiO_2 extraídos pelo oxalato de amônio e a análise química total, antes e após as extrações seletivas, estimou-se uma variação do grau de hidratação na faixa de 14 a 42%.

Portanto, como uma primeira aproximação, a fórmula geral dos aluminossilicatos amorfos hidratados pode ser expressa por $(Al_2O_3)_{1,8-4,4}.SiO_2.n(H_2O)$ com grau de hidratação $[(H_2O)^+]$ estimado entre 14 e 42%.

O PAPEL DE COMPONENTES DA MATRIZ NAS CIMENTAÇÕES

Os teores de agentes cimentantes, isoladamente, não explicaram o porquê das cimentações fortes ou fracas adequadamente. Ocorreram casos em que os teores das extrações seletivas foram mais baixos nos horizontes com cimentação forte ou, ao contrário, com teores mais elevados naqueles com cimentação fraca. Portanto, deve existir outros fatores que direta ou indiretamente influenciam nas cimentações. Observações gerais indicaram que tanto o conteúdo da fração-argila como o de impregnações ferruginosas (não-cristalinas) são fatores que interferem nos graus das cimentações. Entretanto, na literatura este assunto é pouco explorado. Quase sempre as atenções são voltadas para os agentes cimentantes.

Com base nos resultados analíticos e em observações de campo, pôde-se destacar três situações importantes com relação aos teores da fração-argila. A primeira relaciona-se aos horizontes cimentados com matriz argilosa. A segunda refere-se aos horizontes cimentados com matriz arenosa a média, mas com teor de argila inferior a 200 g/kg. A terceira diz respeito à matriz argilosa de horizontes não-cimentados com aspecto coeso e não-coeso.

Com relação aos horizontes cimentados com matriz argilosa, os resultados dos testes de imersão em água, ácido e base mostraram que todos eles enquadraram-se na classe de cimentação fraca. Nesses horizontes, as extrações seletivas mostraram teores de fases amorfas em geral inferiores aos teores verificados nos horizontes com cimentação forte, mas com alguns resultados similares ou mesmo superiores. Portanto, em relação aos teores de fases amorfas extraídos desta categoria de horizontes, o maior conteúdo da fração-argila (acima de 200 g/kg de solo) mostrou-se ser determinante ou pelo menos um dos mais relacionados à condição de cimentação fraca.

No concernente aos horizontes cimentados com matriz arenosa a média com teor de argila inferior a 200 g/kg, observaram-se duas condições que merecem ser destacadas. Na primeira, referente aos horizontes com cimentação forte, verificou-se que em geral os teores de aluminossilicatos amorfos associados com complexos organometálicos foram os mais elevados e os teores de ferro extraível de fases não-cristalinas, ao contrário, foram os mais baixos. Na segunda condição referente aos horizontes com cimentação fraca, constatou-se que os teores de aluminossilicatos e complexos organometálicos foram geralmente mais baixos em relação aos horizontes com cimentação forte. Entretanto, houve casos em que os teores de aluminossilicatos

e complexos organometálicos foram mais elevados, porém sempre ocorreram associados com teores elevados de ferro ($Fe_o > Si_o$) extraível de fases não-cristalinas.

No que se refere aos horizontes não-cimentados com matriz argilosa (coesos e não-coesos), as extrações seletivas mostraram os teores mais baixos de fases amorfas que atuam como agentes cimentantes. Portanto, deduziu-se que, entre outros fatores, o conteúdo muito baixo de agentes cimentantes não permite o desenvolvimento de processos de cimentação. Entretanto, é importante destacar que apenas com base nas extrações seletivas de fases amorfas não foi possível diferenciar horizontes coesos dos não-coesos.

Com relação à influência dos materiais ferruginosos (não-cristalinos), destaca-se que o conteúdo de Fe_o foi muito baixo ou praticamente nulo na matriz dos horizontes com cimentação forte. Por outro lado, nos horizontes com cimentação fraca os teores foram em geral os mais elevados e na maioria dos casos com $Fe_o > Si_o$. Nesta condição, é provável que tenham ocorrido interações $Fe \times Si$ e/ou $Fe \times Al$. Segundo JONES & HANDRECK (1963), o Fe(III) atua competindo com o Al pela sílica solúvel (H_4SiO_4) e, em consequência, perturba a interação de íons hidróxi-Al com o ácido silícico (HUANG, 1991). Portanto, o maior conteúdo de Fe_o nos horizontes com cimentação fraca pode ser um indicativo de que houve restrições à formação de aluminossilicatos amorfos com poder de cimentação. Esta suposição é coerente com dados experimentais obtidos por FARMER & FRASER (1982). Conforme estes autores, a interação mista $Al_2O_3-Fe_2O_3-H_2O$, em condições ácidas (pH 4,5), oferece resistência à formação de precipitados e a interação $Fe_2O_3-SiO_2-H_2O$ não permite a formação de compostos análogos com alofana.

ANÁLISE MICROMORFOLÓGICA

Sob o ponto de vista micromorfológico, foram poucas as diferenças entre horizontes cimentados e não-cimentados coesos. A organização relacionada dos constituintes mostrou-se praticamente a mesma, sendo a microestrutura tipicamente massiva e a contextura porfirogrânica, conforme conceitos de BREWER & PAWLUK (1975). As frações grosseiras apresentaram-se constituídas predominantemente por quartzo e raros minerais opacos. A fração fina, que embebe completamente os grãos do esqueleto, é formada principalmente por um plasma caulínico. Este plasma, impregnado com pequena quantidade de materiais amorfos, mostrou coloração variando de bruno-amarelado a bruno muito claro-acinzentado. As diferenciações mais importantes observadas ficaram restritas, portanto, às feições pedológicas.

Comparando-se horizontes cimentados formados em Argissolos e Espodossolos com horizontes coesos desenvolvidos em Argissolos, o que se constatou como diferença foi a maior quantidade de argilãs nos horizontes coesos.

Nos horizontes cimentados, além dos argilãs outras feições pedológicas como ferrãs e ferri-argilãs destacaram-se, particularmente, nos horizontes com cimentação fraca (Figura 8.13). Organo-argilãs e/ou organo-ferrãs mostraram-se mais freqüentes nos horizontes com cimentação forte.

No que concerne aos horizontes não-cimentados, pode-se individualizá-los em duas categorias, isto é, os coesos e os não-coesos. Comparando-se os horizontes coesos desenvolvidos em Argissolos dos tabuleiros costeiros com os não-coesos formados em Latossolos da Chapada do Araripe, verificou-se duas diferenças fundamentais. A primeira relaciona-se aos argilãs, presentes apenas nos horizontes coesos dos Argissolos. A segunda e mais importante reside na organização estrutural. Os horizontes coesos apresentaram sempre aspecto massivo ao passo que os não-coesos mostraram uma estrutura tipicamente microagregada (Figura 8.14).

Por meio das observações micromorfológicas, tentou-se identificar fases amorfas relacionadas aos agentes cimentantes. Entretanto, só foi possível inferir feições relacionadas aos complexos organometálicos em função da presença de organo-argilãs e organo-ferrãs. Os materiais ferruginosos, como ferrãs, ferri-argilãs ou organo-ferrãs, apresentaram-se sempre em destaque, graças ao contraste de cor em relação ao fundo matricial. Porém, com exceção do horizonte plácico, com alto conteúdo ferruginoso, esses materiais não mostraram correlação direta com as cimentações.

Os aluminossilicatos amorfos hidratados que atuam como agentes cimentantes principais não puderam ser identificados por meio da microscopia ótica, provavelmente em função de sua distribuição uniforme em toda matriz e/ou da ausência de características contrastantes em relação à matriz cimentada. No estudo de horizontes dúricos, McKEAGUE & PROTZ (1980) também não conseguiram identificar agentes cimentantes constituídos por Al, Fe e Si combinados em diversas proporções.

ANÁLISE POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA

O refinamento de comparações entre horizontes cimentados e não-cimentados foi realizado com base em resultados obtidos por meio de microscópio eletrônico de varredura (MEV) e microsonda eletrônica (ME). O mapeamento elementar em áreas de feições selecionadas em lâminas de seção delgada (com auxílio da microscopia ótica) foi realizado em MEV, e as microanálises quantitativas pontuais, por meio de ME.

Na figura 8.15, as imagens de densidades de pontos em função do sinal de raios-X característico dos elementos Al e Si indicaram que estes elementos distribuem-se de forma associada e com um padrão de distribuição relativamente uniforme, tanto em segmentos de áreas

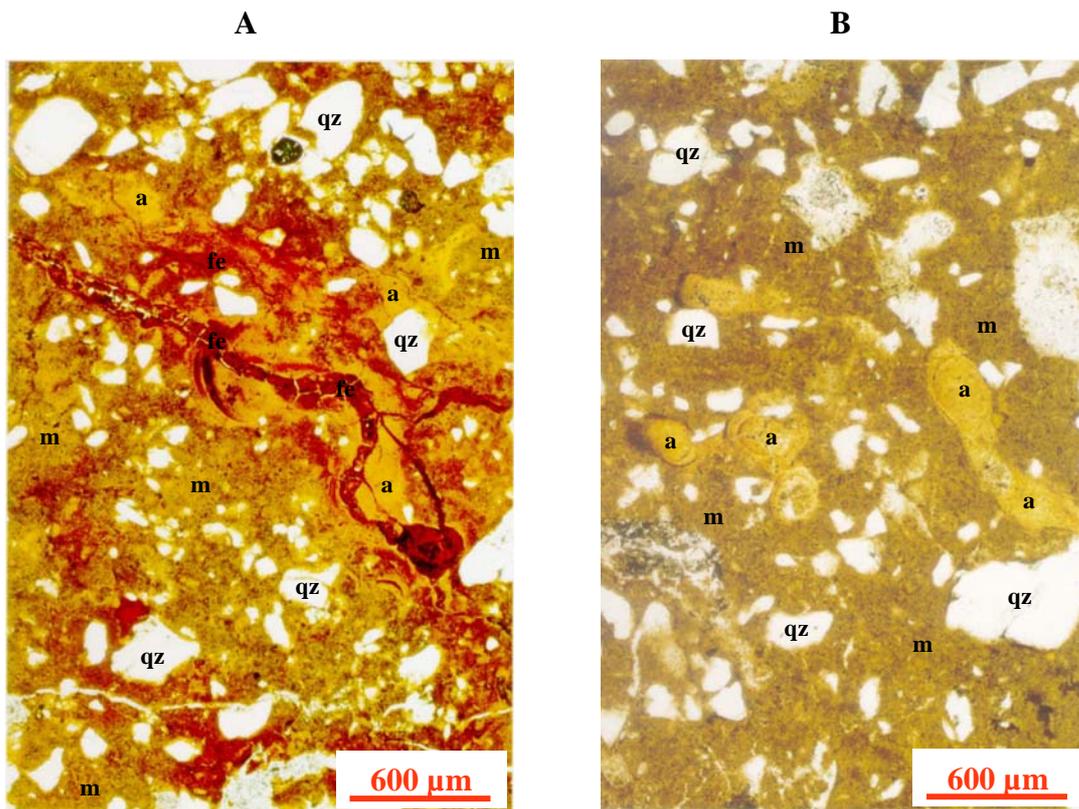


Figura 8.13 – Aspecto massivo de horizontes cimentados (PPL). A: horizonte com cimentação fraca (P11-Btx2), destacando-se ferrãs e argilãs; B: horizonte com cimentação forte (P16-Bm2), com destaque aos argilãs. (m: matriz fina; qz: quartzo; a: argilã; e fe: ferrã).

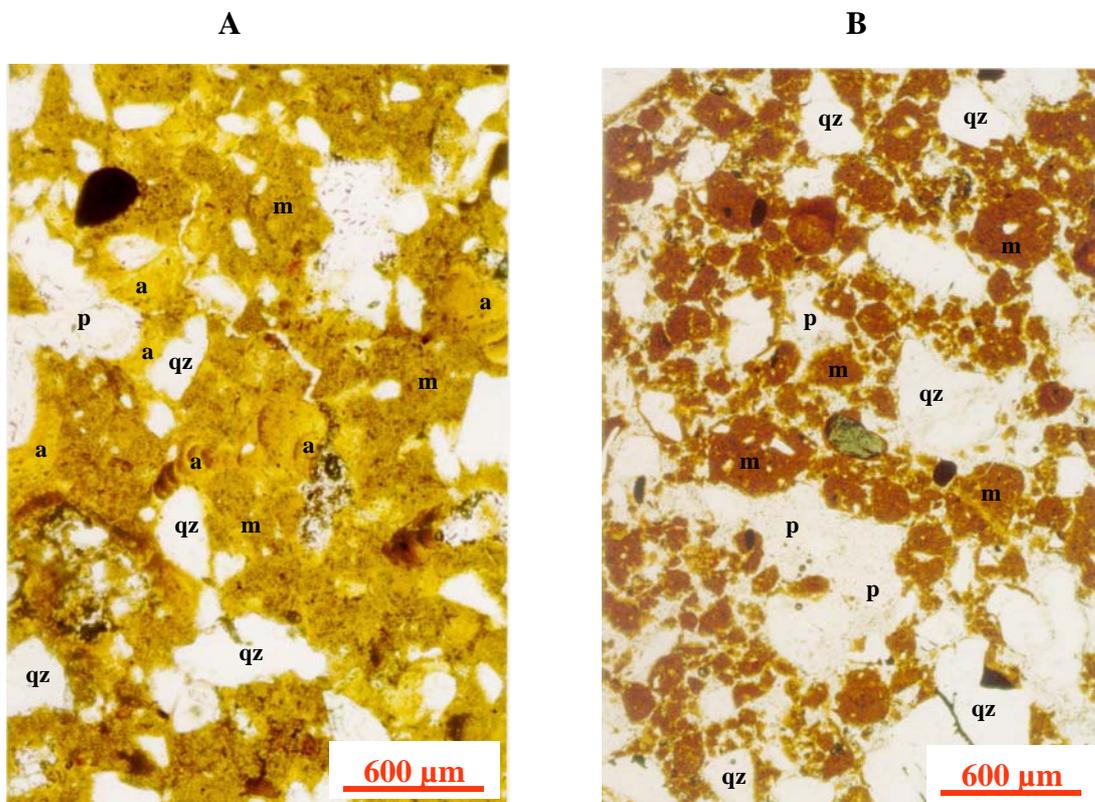
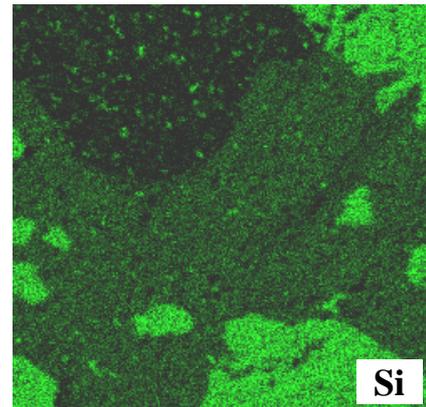
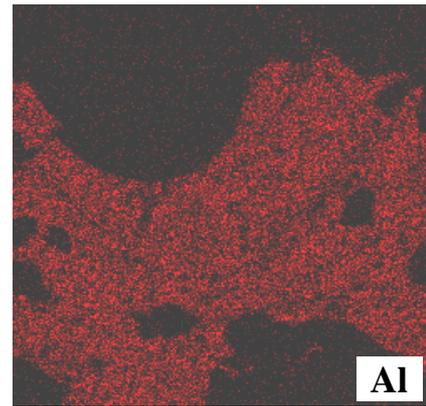
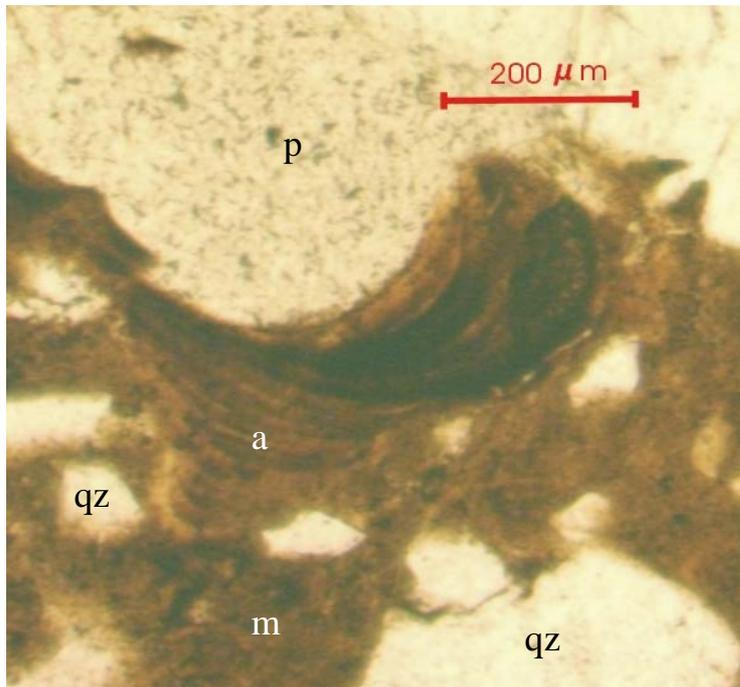


Figura 8.14 – Aspecto estrutural diferenciado entre horizontes não-cimentados (PPL). A: horizonte coeso (P11-PA-Bt) de um Argissolo Amarelo dos tabuleiros costeiros com aspecto massivo; B: horizonte não-coeso (P17-Bw) de um Latossolo Amarelo da Chapada do Araripe com aspecto microagregado. (m: matriz fina; qz: quartzo; a: argilã; e p: poro).

A



B

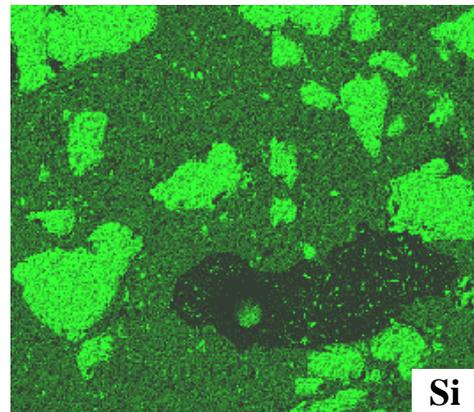
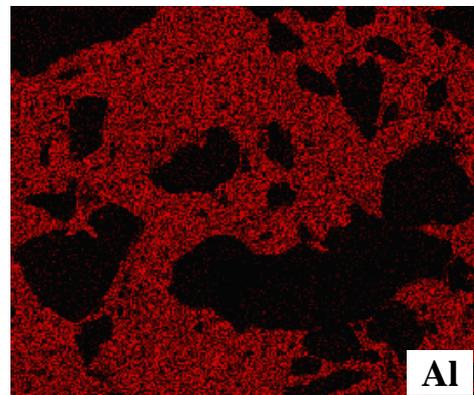
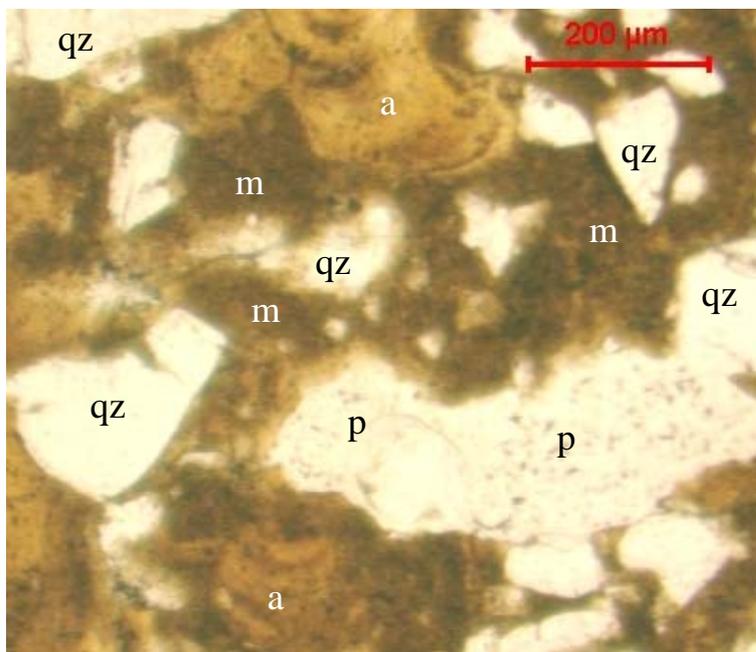


Figura 8.15 – Mapeamento de Al e Si por MEV em áreas selecionadas pela microscopia ótica, abrangendo argilãs e parte da matriz fina circunvizinha. A: horizonte com cimentação forte (P16-Bm2); B: horizonte não-cimentado coeso (P11-PA-Bt). (m: matriz fina; p: poro; a: argilã; e qz: quartzo).

de argilãs como naqueles da matriz fina circunvizinha. Este padrão foi observado tanto em horizontes cimentados (P16-Bm2) como em horizontes não-cimentados coesos (P11-PA-Bt). Ainda que de forma qualitativa, as imagens também foram indicativas de que o Al predomina em relação ao Si, conforme observações de MOREAU (2001) no estudo de horizontes cimentados e coesos desenvolvidos em solos dos tabuleiros costeiros do sul da Bahia.

Já as microanálises quantitativas pontuais (ME) desenvolvidas em amostras de horizontes selecionados mostraram que existe um certo excesso de Al relacionado à fração-argila caulinitica, sobretudo nos horizontes com cimentação forte. Esse excesso foi observado por meio do exame da relação elementar Al/Si (Quadro 8.1). Na caulinita, com fórmula $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, a relação Al/Si é aproximadamente unitária ($\text{Al/Si} = 0,96 \cong 1,0$). Entretanto, na fração-argila dos horizontes cimentados, a relação variou na faixa de 1,0 a 2,0, e na do horizonte não-cimentado coeso, entre 0,90 e 1,09 (Quadro 8.1).

Considerando que na caulinita ideal, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, o Al e o Si ocorrem com teores bem definidos, respectivamente de 20,9% e 21,7%, pôde-se estimar o alumínio excedente (Al_{exc}) na fração-argila caulinitica, isto é, acima de 20,9%, por meio da expressão:

$$\text{Al}_{\text{exc}} = 21,7 \text{ Al/Si} - 20,9$$

sendo Al/Si a relação elementar obtida por meio das microanálises (ou análises) químicas. Nos horizontes com cimentação forte, em média Al/Si foi 1,50, correspondendo a um Al_{exc} em torno de 11,6%. Para o horizonte com cimentação fraca, a média de Al/Si foi 1,09, resultando em um Al_{exc} ao redor de 2,7%. No horizonte não-cimentado coeso, a média de Al/Si foi 1,02, indicando um Al_{exc} de 1,2%. Estes resultados, portanto, mostraram as mesmas tendências observadas por meio das extrações seletivas, porém com médias mais elevadas. Isso ocorreu principalmente em função das microanálises terem sido realizadas na fração-argila, mais concentrada em fases amorfas aluminosas, em relação à terra fina.

Entretanto, pode-se dizer que, de modo geral, as microanálises químicas obtidas por meio de microsonda eletrônica refletiram o excesso de alumínio da fração-argila essencialmente caulinitica. A maior parcela do excesso deve-se aos aluminossilicatos amorfos hidratados que atuam como agentes cimentantes principais.

ATRIBUTOS DIAGNÓSTICOS E TIPOS DE HORIZONTES CIMENTADOS

Nesta seção o objetivo principal foi destacar atributos diagnósticos qualitativos e quantitativos relacionados aos horizontes cimentados identificados em Argissolos Amarelos, Argissolos Acinzentados e Espodossolos dos tabuleiros costeiros.

Quadro 8.1 - Microanálises quantitativas da fração-argila obtidas por microsonda eletrônica em amostras selecionadas de horizonte cimentado e não-cimentado coeso

Pontos analisados	Elementos (%)										Al/Si
	Si	Al	Mn	Mg	Ca	Na	K	Ti	P	Fe	
Amostra P9-Bsm/E: horizonte com cimentação forte											
1	11,35	22,73	0,03	0,27	0,13	0,02	0,04	1,31	0,09	0,66	2,00
2	11,79	22,79	0,00	0,27	0,15	0,01	0,08	0,89	0,10	0,60	1,93
3	12,01	22,30	0,00	0,23	0,12	0,02	0,06	1,02	0,06	0,65	1,86
4	12,59	23,32	0,01	0,25	0,14	0,01	0,06	0,97	0,13	0,54	1,77
5	12,72	23,18	0,02	0,24	0,13	0,01	0,04	1,12	0,09	0,62	1,82
6	11,62	22,53	0,00	0,26	0,13	0,02	0,05	1,37	0,08	0,64	1,94
Amostra P12-Bm1: horizonte com cimentação forte											
1	19,26	21,42	0,00	0,36	0,07	0,04	0,21	1,06	0,02	1,01	1,11
2	17,96	21,33	0,00	0,37	0,10	0,05	0,15	1,26	0,02	0,96	1,19
3	17,88	19,93	0,00	0,47	0,13	0,03	0,17	1,09	0,02	1,30	1,11
4	19,63	19,62	0,00	0,38	0,06	0,05	0,19	1,13	0,02	1,01	1,00
5	18,17	20,49	0,02	0,28	0,05	0,03	0,15	0,92	0,05	0,87	1,13
6	18,21	20,58	0,00	0,27	0,03	0,01	0,16	1,18	0,04	0,84	1,13
Amostra P11-Btx1: horizonte com cimentação fraca											
1	18,41	19,56	0,01	0,38	0,02	0,04	0,24	1,17	0,01	2,85	1,00
2	17,62	19,33	0,03	0,34	0,03	0,02	0,19	1,15	0,04	2,57	1,10
3	17,30	19,23	0,00	0,39	0,03	0,03	0,21	1,28	0,02	2,55	1,09
4	17,54	19,39	0,03	0,35	0,00	0,03	0,21	1,46	0,04	2,42	1,10
5	16,69	18,92	0,01	0,38	0,02	0,02	0,18	1,38	0,05	3,26	1,13
6	17,01	18,75	0,00	0,33	0,02	0,02	0,17	1,27	0,01	2,84	1,10
Amostra P11-PA-Bt: horizonte não-cimentado coeso											
1	17,47	19,00	0,00	0,56	0,06	0,04	0,24	1,46	0,03	2,07	1,09
2	18,76	19,72	0,00	0,56	0,05	0,19	0,50	1,25	0,04	2,41	1,06
3	17,69	19,31	0,00	0,53	0,01	0,04	0,25	1,37	0,04	2,10	1,09
4	19,62	17,67	0,03	0,56	0,04	0,08	0,31	1,18	0,04	2,13	0,90
5	18,71	18,62	0,00	0,36	0,01	0,02	0,23	1,21	0,03	2,31	0,99
6	18,65	18,79	0,00	0,41	0,03	0,02	0,21	1,21	0,06	2,18	1,01

Obs.: O fechamento das análises (em % óxidos) variou entre 80 e 86% nas amostras P12-Bm1, P11-Btx1 e P11-PA-Bt. Na amostra P9-Bsm/E, com maior teor de amorfos e água, o fechamento variou entre 71 e 74%. A diferença (14 a 29%) que representa a água estrutural dos minerais mostrou coerência com valores de perda ao fogo (PF) das argilas, também com valores entre 14 e 29%.

Visando maior clareza nas interpretações, para cada perfil de solo associaram-se informações gerais, abrangendo o conjunto de horizontes e informações mais específicas, relativas aos horizontes cimentados e a alguns dos horizontes não-cimentados. As informações gerais foram: (1) a seqüência de horizontes; (2) a espessura; (3) a cor dominante; (4) o pH; (5) o teor de carbono. As informações mais específicas, implementando as primeiras, foram: (1) a natureza dos agentes cimentantes principais; (2) os teores de alumínio e ferro extraídos pelo

oxalato de amônio ($Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$); (3) os valores da densidade ótica do extrato do oxalato (DOEO).

Os atributos apresentados pelos diversos horizontes cimentados (Quadros 8.2 a 8.4), sobretudo aqueles relacionados aos agentes cimentantes principais, indicam que esses horizontes enquadram-se nos tipos: (1) horizonte dúrico (McKEAGUE & SPROUT, 1975; MILES et al., 1979; McKEAGUE & PROTZ, 1980); (2) ortstein (UNITED STATES, 1999); (3) fragipã (EMBRAPA, 1999; UNITED STATES, 1999); (4) horizonte plácico (EMBRAPA, 1999; UNITED STATES, 1999).

Segundo definições da EMBRAPA (1999) e UNITED STATES (1999), nenhum dos horizontes cimentados desenvolvido nas suaves depressões dos tabuleiros costeiros apresentou o conjunto de características requeridas para duripãs. Embora horizontes acinzentados com cimentação forte, desenvolvidos em Argissolos Acinzentados e/ou Espodossolos, venham sendo classificados tradicionalmente com duripãs, eles não apresentam a sílica opalina e/ou outros tipos de compostos silicosos como agentes cimentantes principais. Logo, não atendem à definição de duripã (EMBRAPA, 1999; UNITED STATES, 1999).

Com exceção do horizonte plácico, cimentado principalmente por compostos ferruginosos associados com complexos organometálicos, os demais horizontes apresentaram em comum os mesmo tipos agentes cimentantes, constituídos por aluminossilicatos amorfos hidratados e, secundariamente, por complexos organometálicos com altos teores de alumínio. A sílica opalina, se presente, não mostrou correlação com as cimentações. Entretanto, ressalta-se que, sob o ponto de vista físico, muitos dos horizontes com cimentação forte mostraram características semelhantes a duripãs.

Os horizontes do tipo dúrico foram diagnosticados em Argissolos Acinzentados e mais freqüentemente em Espodossolos. Os do tipo ortstein, mostraram ser típicos de solos da classe dos Espodossolos. Já os fragipãs, comuns em solos dos tabuleiros costeiros, foram diagnosticados em Argissolos Amarelos, Argissolos Acinzentados e, menos freqüentemente, em Espodossolos. O horizonte plácico, assim como fragipãs, também foi observado em Argissolos Amarelos, Argissolos Acinzentados e em Espodossolos.

Os resultados acima discutidos, envolvendo os tipos de horizontes cimentados e os seus respectivos atributos diagnósticos, levam a algumas reflexões sobre a necessidade de ajustes nas definições atuais. Conforme EMBRAPA (1999) e UNITED STATES (1999), as definições de horizonte espódico ou de ortstein, não são suficientemente abrangentes para enquadrar horizontes do tipo dúrico, particularmente devido às especificações da natureza dos agentes cimentantes. Como todos são horizontes desenvolvidos por processos pedogenéticos semelhantes

e com ocorrência muitas vezes lado a lado e de forma contínua, infere-se que podem ser tratados globalmente como o mesmo tipo de horizonte.

Se, entretanto, forem considerados como horizontes distintos, será necessário aprimorar e incorporar a definição de horizonte dúrico no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999) que não contempla este tipo de horizonte. No entanto, visando simplificar a lista de horizontes diagnósticos subsuperficiais, recomenda-se ampliar a definição de horizonte espódico de modo a abranger todos estes horizontes.

Quadro 8.2 - Síntese de atributos diagnósticos de horizontes cimentados desenvolvidos em Argissolos Amarelos e Argissolos Acinzentados dos tabuleiros costeiros

Horizonte	Prof. (cm)	Cor dominante	pH (1:2,5)		C (%)		Al ₀ +½Fe ₀ (%)	DOEO ⁽¹⁾	Agente cimentante ⁽²⁾	Horizonte cimentado
			H ₂ O	KCl	Total	Orgânico				
P7 - Argissolo Amarelo										
Ap	0-17	10YR 3/2	5,6	5,0	-	0,45	-	-	-	-
BA	-35	10YR 6/4	4,9	4,7	-	0,33	-	-	-	-
Bt	-70	10YR 6/4	4,6	4,5	-	0,37	-	-	-	-
Btx	-85	10YR 6/4	4,6	4,5	-	0,46	-	-	-	-
Plácico	-87	2,5YR 3/4	4,9	4,8	1,47	0,79	2,41	0,613	Fe + CO	Plácico
Btx1	-135	10YR 6/4	4,8	4,6	-	0,40	-	-	ASA + CO	Fragipã
Btx2	200+	7,5YR 5/6	5,1	5,0	0,5	0,21	0,42	0,078	ASA + CO	Fragipã
P11 - Argissolo Amarelo										
Ap	0-15	10YR 4/3	4,6	4,5	1,32	1,02	0,51	-	-	-
Btx1	-38	10YR 5/6	5,2	4,9	0,65	0,65	1,02	0,122	ASA + CO	Fragipã
Btx2	-70	10YR 5/6	5,1	4,9	0,59	0,48	0,77	-	ASA + CO	Fragipã
Btx3	-110	2,5Y 7/4	4,7	4,6	0,30	0,25	0,40	-	ASA + CO	Fragipã
Btx4	-170+	2,5Y 7/4	4,7	4,5	0,27	0,19	0,17	-	ASA + CO	Fragipã
P4 - Argissolo Acinzentado										
Ap	0-18	10YR 2/1	6,3	5,7	-	0,67	-	-	-	-
Bt1	-33	10YR 4/2	5,6	5,1	-	0,50	-	-	-	-
Bt2	-63	10YR 5/2	5,9	5,1	-	0,53	-	-	-	-
Btx1	-120	10YR 7/2	5,1	4,9	0,90	0,74	0,95	0,162	ASA + CO	Fragipã
Btx2	-150+	10YR 7/2	5,0	4,7	0,43	0,40	0,42	0,081	ASA + CO	Fragipã
P8 - Argissolo Acinzentado										
Ap	0-17	10YR 3/3	5,3	5,0	-	0,70	-	-	-	-
AE	-35	10YR 4/3	5,0	4,9	-	0,53	-	-	-	-
Bt	-70	10YR 6/3	5,6	5,0	-	0,65	-	-	-	-
Btx/Bs	-85	10YR 6/3	5,8	5,3	-	0,98	-	-	-	-
Bm	-160+	10YR 7/3	5,7	5,4	1,46	1,01	1,65	0,345	ASA + CO	Dúrico
P13 - Argissolo Acinzentado										
Ap	0-18	10YR 3/2	5,1	4,6	0,88	0,72	0,25	0,071	-	-
Bt1	-38	10YR 6/3	4,5	4,6	0,39	0,39	0,22	0,071	-	-
Bt2	-90	10YR 6/2	4,3	4,5	0,31	0,26	0,11	0,051	-	-
Bm	-135	10YR 7/2	4,9	5,0	0,70	0,41	0,86	0,131	ASA + CO	Dúrico
Plácico	-137	5YR 3/4	4,7	4,9	0,98	0,66	1,51	0,297	Fe + CO	Plácico
Btx	-170+	10YR 7/2	4,7	4,7	0,38	0,30	0,44	0,086	ASA + CO	Fragipã

⁽¹⁾DOEO: densidade ótica do extrato do oxalato; ⁽²⁾ASA: aluminossilicatos amorfos hidratados; CO: complexos organometálicos com altos teores de alumínio.

Quadro 8.3 - Síntese de atributos diagnósticos de horizontes cimentados desenvolvidos em Espodosolos (não-hidromórficos) dos tabuleiros costeiros

Horizonte	Prof. (cm)	Cor dominante	pH (1:2,5)		C (%)		Al _o +1/2Fe _o (%)	DOEO ⁽¹⁾	Agente cimentante ⁽²⁾	Horizonte cimentado
			H ₂ O	KCl	Total	Orgânico				
P5 - Espodosolo										
Ap	0-18	10YR 3/1	4,8	4,3	-	0,75	-	-	-	-
E	-110	10YR 7/2	5,4	4,7	-	0,10	-	-	-	-
Bhs	-115	5YR 3/3	4,8	4,3	-	1,44	-	-	-	-
Bm	-145	10YR 7/2	5,0	4,8	2,49	1,84	2,79	0,721	ASA + CO	Dúrico
Bhsm	-180+	5YR 3/3	5,0	4,7	-	2,01	-	-	ASA + CO	Ortstein
P9 - Espodosolo										
Ap	0-25	10YR 3/2	4,6	4,3	-	0,89	-	-	-	-
E	-95	10YR 5/3	5,1	4,9	-	0,20	-	-	-	-
Bhs/E	-160	10YR 3/3	5,4	4,8	-	1,56	-	-	ASA + CO	-
Bsm/E	-190	10YR 5/4	5,0	4,9	2,79	2,42	2,23	1,125	ASA + CO	Ortstein
Bm/E	-260	10YR 7/2	5,3	5,2	0,94	0,50	1,29	0,199	ASA + CO	Dúrico
P10 - Espodosolo										
Ap	0-18	10YR 3/3	4,0	4,3	-	1,14	-	-	-	-
E1	-38	10YR 5/4	4,2	4,6	-	0,46	-	-	-	-
E2	-55	2,5Y 7/6	4,2	4,6	-	0,47	-	-	-	-
Bs	-73	10YR 4/4	4,9	5,1	3,44	3,02	3,97	0,854	ASA + CO	-
Plácico	-74,5	2,5YR 2/4	5,2	5,5	2,23	2,02	4,91	1,319	Fe + CO	Plácico
Bx1	-90	10YR 5/6	5,4	5,6	1,44	0,93	2,35	-	-	Fragipã
Bx2	-150+	10YR 6/3	5,4	5,4	-	1,20	-	-	-	Fragipã
P12 - Espodosolo										
Ap	0-20	10YR 3/1	5,3	4,5	1,07	0,64	0,10	-	-	-
E1	-40	10YR 5/3	4,8	4,7	0,51	0,39	0,16	-	-	-
E2	-85	10YR 4/2	5,0	4,9	0,61	0,42	0,24	-	-	-
Bm1	-120	10YR 7/2	5,1	4,9	1,36	0,88	1,22	0,222	ASA + CO	Dúrico
Bm2	150+	10YR 7/2	5,1	5,0	0,35	0,38	0,36	0,036	ASA + CO	Dúrico
Perfil complementar P16 - Espodosolo										
Ap	0-20	10YR 3/2	-	-	-	-	-	-	-	-
E1	-50	10YR 5/3	-	-	-	-	-	-	-	-
E2	-110	10YR 5/3	-	-	-	-	-	-	-	-
Bm1	-160	10YR 7/3	-	-	0,64	-	0,78	0,097	ASA + CO	Dúrico
Bm2	-210	10YR 7/2	-	-	0,27	-	0,40	0,028	ASA + CO	Dúrico
Bm3	-260	10YR 7/4	-	-	0,66	-	0,95	0,092	ASA + CO	Dúrico
Bm4	-310	10YR 7/4	-	-	0,42	-	0,49	0,046	ASA + CO	Dúrico
Bx	-360	10YR 7/3	-	-	0,46	-	0,72	0,066	ASA + CO	Fragipã
BC	-430	10YR 7/3	-	-	0,31	-	0,31	0,036	-	-
Cc	-500+	2,5YR 4/6	-	-	0,23	-	0,37	0,027	-	-

⁽¹⁾DOEO: densidade ótica do extrato do oxalato; ⁽²⁾ASA: aluminossilicatos amorfos hidratados; CO: complexos organometálicos com altos teores de alumínio.

Quadro 8.4 - Síntese de atributos diagnósticos de horizontes cimentados desenvolvidos em Espodossolos hidromórficos dos tabuleiros costeiros

Horizonte	Prof. (cm)	Cor dominante	pH (1:2,5)		C (%)		Al ₀ +½Fe ₀ (%)	DOEO ⁽¹⁾	Agente cimentante ⁽²⁾	Horizonte cimentado
			H ₂ O	KCl	Total	Orgânico				
P6 - Espodossolo										
Ap	0-18	10YR 2/1	5,3	4,8	-	0,82	-	-	-	-
E	-127	10YR 7/2	5,1	4,7	-	0,06	-	-	-	-
Bs	-130	7,5YR 3/4	6,6	6,0	-	1,62	-	-	-	-
Bm/Bsm	-170+	10YR 6/3	5,3	4,8	1,60	1,41	1,59	0,469	ASA + CO	Dúrico/ortstein
P14 - Espodossolo										
Ap	0-18	10YR 3/2	4,1	3,5	-	1,51	-	-	-	-
E1	-110	10YR 6/2	4,4	4,3	-	0,08	-	-	-	-
E2	-128	10YR 4/2	4,2	4,1	-	0,12	-	-	-	-
Bhs	-133	10YR 2/2	3,9	3,9	-	2,11	-	-	-	-
Bm	-170+	10YR 6/2	4,4	4,4	1,00	0,79	0,40	0,342	ASA + CO	Dúrico
P15 - Espodossolo										
Ap	0-18	10YR 3/2	5,5	5,5	-	1,64	-	-	-	-
E	-80	10YR 5/3	5,0	4,4	-	0,27	-	-	-	-
Bhs	-83	10YR 3/3	5,1	4,4	-	3,62	-	-	-	-
Bm	-120+	10YR 7/4	5,2	4,9	1,93	1,42	2,07	0,398	ASA + CO	Dúrico

⁽¹⁾DOEO: densidade ótica do extrato do oxalato; ⁽²⁾ASA: aluminossilicatos amorfos hidratados; CO: complexos organometálicos com altos teores de alumínio.

PROCESSOS PEDOGENÉTICOS ENVOLVIDOS NA FORMAÇÃO DE AGENTES CIMENTANTES E HORIZONTES CIMENTADOS

No ambiente das suaves depressões dos tabuleiros costeiros, comumente ocorrem transformações pedológicas que levam à formação de solos com horizontes cimentados. Neste contexto, uma das feições mais notáveis foi o progressivo decréscimo nos teores de argila, à medida que são formados os horizontes cimentados e/ou intensificam-se os processos de cimentação. Nas transformações pedológicas mais completas, os processos pedogenéticos culminam com a formação de Espodossolos. Noutros, considerados menos completos, formam-se Argissolos Acinzentados ou solos intermediários entre estes e os Espodossolos. De qualquer modo, verificou-se sempre a degradação e/ou perda de argila no curso das transformações que levaram à formação dos horizontes cimentados.

Então quais os processos pedogenéticos que levam à degradação e/ou perda de argila e à formação dos horizontes cimentados? Em conformidade com os solos desenvolvidos nas transformações pedológicas (de Argissolos a Espodossolos), dois processos gerais foram evidentes. O primeiro, com efeitos mais drásticos, refere-se ao processo de podzolização. O segundo, com efeitos menos intensos, diz respeito ao processo de lessivagem (transporte

mecânico de argila), que se destaca na formação dos Argissolos. Entretanto, ao longo das seqüências de transformação, estes processos produziram efeitos de forma inter-relacionada.

O principal objetivo desta seção foi evidenciar processos pedogenéticos e mecanismos envolvidos na formação dos agentes cimentantes e horizontes cimentados. Em particular foi dado ênfase (1) aos efeitos da podzolização na formação dos agentes cimentantes, analisando a mobilidade e a precipitação dos mesmos; (2) aos efeitos de regime de umidade das depressões; (3) às implicações do transporte mecânico de argila e suas interações com os agentes cimentantes.

A podzolização moderada ou parcial

No ambiente das suaves depressões, a textura dos Espodosolos varia normalmente na faixa de arenosa a média. Isso denota claramente que a atuação da podzolização não foi suficientemente agressiva para eliminar por completo as argilas e por isso foi considerada, em conformidade com BONNEAU & SOUCHIER (1994), como moderada ou parcial.

Na podzolização moderada, o processo de alteração acidolítico desenvolve-se na faixa de pH de 4 a 5, de modo que o ataque aos minerais aluminossilicatados não é muito agressivo e, em conseqüência, a desaluminização ocorre de forma parcial. Como parte do alumínio posto em solução pode reagir com a sílica solúvel e formar novos aluminossilicatos, a podzolização moderada pode ser considerada como um processo de aluminossilicalitização (BONNEAU & SOUCHIER, 1994).

A mobilização e precipitação de complexos organometálicos e minerais

O alumínio extraído das argilas por meio do ataque acidolítico tem pelo menos dois destinos. Parte pode reagir com ácidos orgânicos e formar complexos organometálicos solúveis com carga negativa (SKJEMSTAD et al, 1992; ANDERSON et al., 1982) e parte pode reagir com a sílica solúvel (H_4SiO_4) e formar aluminossilicatos. Vários estudos foram indicativos de que o alumínio reage com a sílica e forma complexos inorgânicos solúveis de aluminossilicatos com carga positiva (FARMER et al., 1980; TAYLOR, 1988; CHILDS et al., 1983; ANDERSON et al., 1982), permitindo a mobilização do alumínio via mineral. Dependendo das condições de pH do meio, além dos complexos inorgânicos solúveis, o alumínio também pode ser mobilizado nas formas de Al^{3+} ou $Al(OH)^{2+}$ (CHILDS et al., 1983).

Os resultados das extrações seletivas mostraram que a maior parcela do alumínio de fases não-cristalinas, presente nos horizontes cimentados, ocorre na fração mineral (60 a 80%). Portanto, sugerem que uma parcela significativa do alumínio deve ter sido mobilizada via complexos inorgânicos solúveis e uma fração mais reduzida, via complexos orgânicos.

Com relação ao ferro, presente em pequenas quantidades nos solos da região, observou-se que o elemento incorpora-se e mobiliza-se em quantidades muito limitadas via complexos organometálicos. Entretanto, pode ser mobilizado também, independentemente de complexos orgânicos, em condições redutoras.

Os complexos organometálicos, por conseguinte, transportaram, vertical e/ou lateralmente, quantidades mais significativas de alumínio e teores muito reduzidos de ferro. No transporte, quando a relação cátion/ânion $[(Al_p + Fe_p)/C]$ atingiu valores ao redor de $0,35 \pm 0,08$, verificou-se que foi a condição de precipitação destes complexos. Na forma precipitada (insolúvel), estes complexos constituem agentes cimentantes.

A precipitação do alumínio via fases inorgânicas pode ocorrer em função de mudanças de pH (em horizontes mais profundos) (CHILDS et al., 1983; FARMER et al., 1980) ou em função de mudanças no equilíbrio de cargas que mantêm os complexos solúveis estáveis. O desequilíbrio pode resultar da adsorção de ânions (FARMER et al., 1980) como complexos orgânicos ou em função do contato com superfícies carregadas negativamente (FARMER et al., 1980), como as superfícies de argilas. Nos horizontes cimentados, observaram-se valores de ΔpH predominantemente maior que zero, indicando que na zona de precipitação destes complexos o balanço de cargas das superfícies é negativo. A profundidade do início da precipitação de complexos minerais e orgânicos variou com maior frequência entre 60 e 120 cm. A profundidade máxima em que estes complexos precipitam pouco se conhece.

A mobilização e a precipitação de complexos organometálicos e minerais também são influenciadas pelas condições de umidade das suaves depressões. No período das chuvas as condições são favoráveis à mobilização dos complexos organometálicos e minerais, assim como do ferro reduzido, particularmente nas depressões que acumulam água (hidromorfia). Na época seca, ao contrário, as condições são oxidantes e condicionam a precipitação do ferro, bem como restringem a mobilização dos complexos orgânicos e minerais.

Uma característica notável, bastante influenciada pelas condições de umidade, relaciona-se às zonas de acumulação de ferro não-cristalino. Nestas zonas, foram observados sempre horizontes com cimentação fraca ou não-cimentados. Por outro lado, nas zonas de formação dos horizontes com cimentação forte verificou-se sempre conteúdo de ferro muito baixo ou praticamente nulo.

Portanto, o regime de umidade influencia não apenas na redistribuição dos complexos organometálicos e minerais, mas também na mobilização do ferro não-complexado. O ferro transportado, via orgânica e/ou mineral, ao precipitar-se, pode ser concentrado em finas camadas, formando horizonte plácico, ou em zonas do perfil onde pode interagir nos processos de cimentação.

O transporte mecânico de argila

As análises físicas e micromorfológicas mostraram que processos de translocação de argila, típicos dos Argissolos, ocorrem também nos Espodosolos. As análises em lâminas de seção delgada mostraram o preenchimento total ou parcial de poros por argilãs, nos diversos tipos de horizontes cimentados, independentemente das classes de solos. Ferri-argilãs ou ferrãs foram mais freqüentes nos horizontes com cimentação fraca, e os organo-argilãs, nos horizontes com cimentação forte.

Portanto, a translocação e o acúmulo de argila foi um processo marcante na formação dos diversos tipos de horizontes cimentados e, sobretudo, nos horizontes coesos. Certamente contribuiu para o aumento da densidade, reduzindo a porosidade, e para o desenvolvimento do aspecto massivo dos horizontes. Entretanto, ressalta-se que nos horizontes com cimentação forte o acúmulo de argila, em nenhum caso observado, foi suficiente para caracterizar horizonte Bt.

Considerando que as transformações pedológicas do ambiente das suaves depressões nos tabuleiros costeiros que levaram à formação de horizontes cimentados foram resultantes da atuação de processos de podzolização moderada, transporte mecânico de argila e condições de hidromorfia, ainda que temporária, foi possível estabelecer um roteiro da formação dos agentes cimentantes e dos horizontes cimentados, conforme a figura 8.16.

SÍNTESE E CONCLUSÕES

A combinação entre três métodos de extração seletiva de fases amorfas e testes de imersão com solução dos extratores, permitiu caracterizar adequadamente os principais agentes cimentantes envolvidos na formação dos horizontes cimentados dos solos estudados. Os métodos utilizados foram o do oxalato de amônio, Tiron e pirofosfato de sódio.

A alta correlação entre Al e Si extraídos seletivamente da fração mineral não-cristalina e a estreita relação dos teores destes elementos com os graus de cimentação indicaram que aluminossilicatos amorfos atuam como agentes cimentantes. As extrações também indicaram que 60 a 80% do Al concentra-se na fração mineral e de 20 a 40% na fração orgânica.

Verificou-se também que o pirofosfato de sódio, entre os demais extratores, foi o único que mostrou poder de desestabilizar amostras (2 a 5 cm de diâmetro) de horizontes com cimentação forte, mas requerendo um período mínimo de 50 dias. Em função desta observação e com base na alta correlação entre Al_p e C, deduziu-se que complexos organometálicos com altos teores de alumínio também participam dos processos de cimentação.

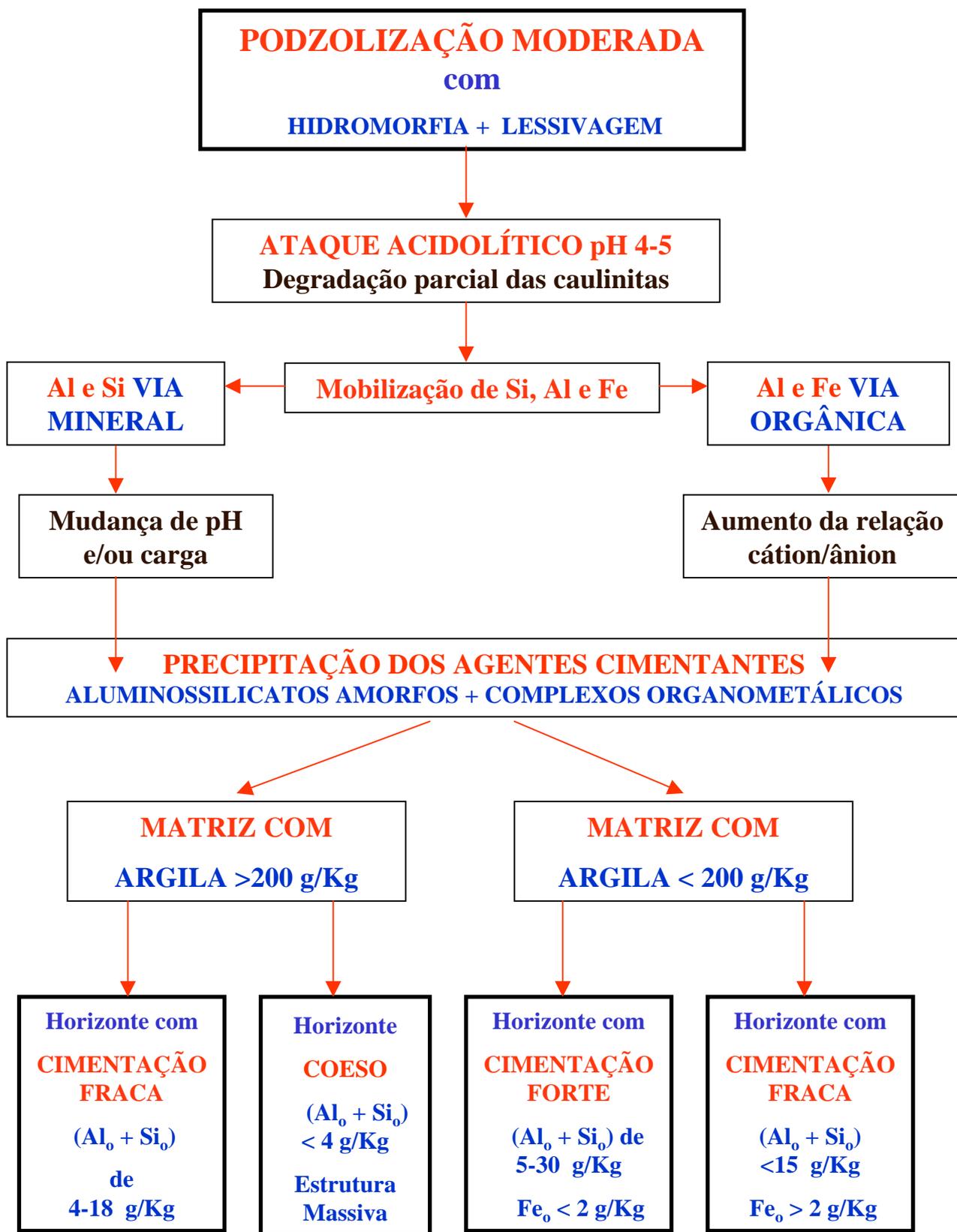


Figura 8.16 – Esquema geral da formação de agentes cimentantes, horizontes cimentados e horizontes coesos no ambiente das suaves depressões nos tabuleiros costeiros.

Os valores de $\Delta Si = Si_T - Si_o$, indicativos de sílica opalina, obtidos por meio das extrações com o Tiron e oxalato de amônio, foram sempre inferiores a 8 g/kg e não mostraram correlação com os horizontes cimentados.

Excluindo-se o horizonte plácico, formado por altas concentrações ferruginosas, nos demais horizontes cimentados não houve correlação de ferro extraível (não-cristalino) com as cimentações. Ao contrário, nos horizontes com cimentação forte em todos os casos observados, os teores de ferro extraível foram praticamente nulos.

Portanto, o conjunto de resultados obtidos permitiu deduzir que os agentes cimentantes principais são aluminossilicatos amorfos hidratados. Os complexos organometálicos com altos teores de alumínio também atuam como agentes cimentantes, mas desempenham um papel secundário.

Ressalta-se, porém, que os aluminossilicatos amorfos deste estudo são diferentes de alofanos, pois são muito mais concentrados em alumínio.

Uma primeira aproximação da fórmula geral destes aluminossilicatos amorfos hidratados pode ser expressa por $(Al_2O_3)_{1,8-4,4}.SiO_2.n(H_2O)$ com grau de hidratação $[\%(H_2O)^+]$ variando de 14 a 42%.

As proporções e interações entre as frações finas e os agentes cimentantes foram considerados fatores determinantes nos graus de cimentação uma vez que os mesmos não puderam ser explicados apenas em função dos teores dos agentes cimentantes. Em geral, quando os horizontes apresentaram conteúdo da fração-argila superior a 200 g/kg e $(Al_o + Si_o)$ entre 4 e 18 g/kg, as cimentações foram fracas. Entretanto, com este mesmo conteúdo da fração-argila, sendo a estrutura massiva e $(Al_o + Si_o) < 4$ g/kg, os horizontes apresentaram-se não-cimentados, mas coesos. Nos casos dos horizontes com conteúdo da fração-argila menor ou igual a 200 g/kg, verificaram-se duas situações. Com $(Al_o + Si_o)$ variando entre 5 e 30 g/kg e $Fe_o < 2$ g/kg, as cimentações foram sempre fortes. Mas, nos casos com $(Al_o + Si_o) < 15$ g/kg e $Fe_o > 2$ g/kg, as cimentações foram sempre fracas.

Com base em atributos diagnósticos, particularmente considerando a natureza dos agentes cimentantes e os graus de cimentação, os horizontes cimentados subsuperficiais identificados em solos dos tabuleiros costeiros foram classificados como horizonte dúrico, ortstein, fragipã e horizonte plácico.

A podzolização moderada, o transporte mecânico de argila e condições de hidromorfia mostraram ser os principais mecanismos envolvidos na formação dos agentes cimentantes e horizontes cimentados desenvolvidos no ambiente das suaves depressões dos tabuleiros costeiros.

Parte 4

HORIZONTES CIMENTADOS EM NEOSSOLOS REGOLÍTICOS E PLANOSSOLOS DA DEPRESSÃO SERTANEJA

CAPÍTULO 9 - Características morfológicas e físicas

Na depressão sertaneja, horizontes tipo duripã e/ou fragipã ocorrem em solos normalmente desenvolvidos a partir de rochas ácidas, como granitos e gnáisses, particularmente nas classes dos Neossolos Regolíticos e Planossolos (OLIVEIRA et al., 1992; BRASIL, 1972; EMBRAPA, 1975; EMBRAPA, 1999). Os Neossolos Regolíticos com presença de horizontes fortemente cimentados comumente formam associações intrincadas com Planossolos e integram um conjunto de solos com características morfológicas relativamente similares. As semelhanças devem-se às mudanças abruptas entre os materiais cimentados e os não-cimentados nos Neossolos Regolíticos e às transições texturais abruptas dos Planossolos. Nestas associações, a distinção entre essas classes de solos requer um exame detalhado dos teores de argila e das variações texturais ao longo dos perfis de solo. Porém, em função da cimentação forte dos materiais, muitas vezes torna-se difícil uma avaliação de classes de textura em condições de campo, requerendo, portanto, análises laboratoriais.

Solos similares, classificados como Regossolos (Neossolos Regolíticos), e solos solonéticos (Planossolos) foram observados no ambiente semi-árido da Austrália, com horizontes cimentados tipo hardpan (LITCHFIELD & MABBUTT, 1962). Solos com fragipã, possivelmente similares aos Planossolos do Nordeste do Brasil, também foram identificados no sudeste dos Estados Unidos (GROSSMAN & CARLISLE, 1969).

Devido à escassez de informações sobre horizontes cimentados em solos do ambiente semiárido do Nordeste do Brasil, objetivou-se caracterizar os principais aspectos morfológicos e físicos de horizontes tipo duripã, em solos da classe dos Neossolos Regolíticos, e de horizontes tipo fragipã, em um solo da classe dos Planossolos. Também visou-se estabelecer características diagnósticas destes horizontes por meio de testes de campo e laboratório.

HORIZONTES TIPO DURIPÃ EM NEOSSOLOS REGOLÍTICOS

Características morfológicas

A área selecionada, onde ocorrem Neossolos Regolíticos com horizontes cimentados, localiza-se no extremo oeste do Estado de Alagoas, entre as cidades de Delmiro Gouveia e Água Branca (Figura 9.1). É importante destacar que estes solos apresentam desde horizontes com cimentação fraca (fragipã) até aqueles com cimentação forte ou mesmo extremamente forte (tipo duripã).

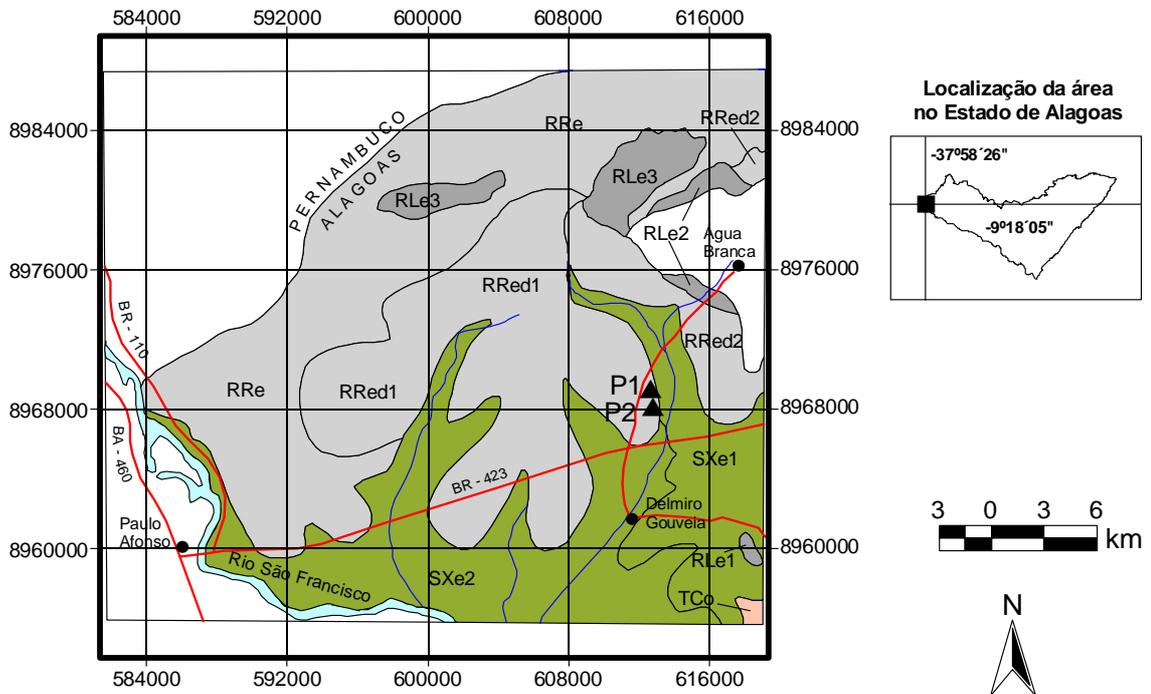
Os horizontes tipo duripã (Cmn) foram observados de forma contínua e com limite superior formando transição abrupta entre as partes cimentadas e não-cimentadas (Figura 9.2), de forma similar às transições texturais abruptas, típicas dos Planossolos. Por conseguinte, exames detalhados dos teores de argila, assim como das variações texturais ao longo dos perfis de solo, foram imprescindíveis para o diagnóstico destes horizontes.

Em termos de profundidade e espessura, os Neossolos Regolíticos mostraram-se predominantemente pouco profundos a profundos e com horizonte tipo duripã (Cmn) na faixa de 40 a 140 cm de profundidade, com espessura média em torno de 60 cm (Quadro 9.1). Neste caso, os horizontes cimentados mostraram espessura e profundidade semelhantes aos horizontes equivalentes observados nos Estados Unidos (BLANK & FOSBERG, 1991a) e na Austrália (LITCHFIELD & MABBUTT, 1962).

Os horizontes tipo duripã apresentaram cores predominantemente acinzentadas e com pouco contraste em relação aos horizontes não-cimentados (Figura 9.2). Por serem horizontes com fortes restrições de drenagem, normalmente apresentam mosqueados, sendo os mais comuns do tipo bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4) e pontuações pretas (10YR 2/1). Em termos de comparações de cores, mostraram-se diferentes dos hardpans bruno-avermelhado e bruno-avermelhado-escuro da Austrália (BETTNEY & CHURCHWARD, 1974; LITCHFIELD & MABBUTT, 1962), assim como de duripãs não-carbonáticos da Califórnia, com cores bruno-amarelado-escuro e bruno-forte (EGHBAL & SOUTHARD, 1993).

A textura ao longo dos perfis de solo, inclusive na mudança dos horizontes cimentados para os não-cimentados, mostrou uma variação relativamente pequena, normalmente dentro da faixa arenosa a média, com baixo conteúdo de argila.

Na Austrália (LITCHFIELD & MABBUTT, 1962), foram observados hardpans com textura na faixa arenosa, porém, nos Estados Unidos (EGHBAL & SOUTHARD, 1993; BLANK & FOSBERG, 1991a), os duripãs mostraram variações mais amplas, desde classes arenosas até argilosas.



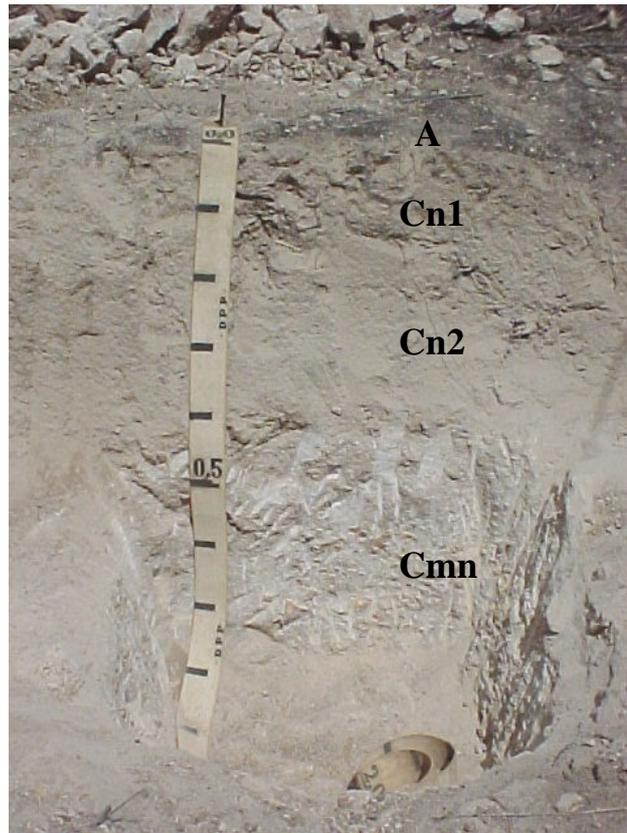
LEGENDA DE SOLOS

- TCo - LUVISSOLOS CRÔMICOS Órticos vérticos + NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos e Psamíticos típicos + PLANASSOLOS HÁPLICOS Eutróficos solódicos, todos fase relevo suave ondulado e plano.
- SXe1 - PLANOSSOLOS HÁPLICOS Eutróficos solódicos + NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos e Psamíticos típicos, todos fase relevo suave ondulado e plano.
- SXe2 - PLANOSSOLOS HÁPLICOS Eutróficos solódicos e NÁTRICOS Órticos típicos e arênicos + NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos e Psamíticos típicos, todos fase relevo plano e suave ondulado.
- RRed1 - NEOSSOLOS REGOLÍTICOS Eutróficos e Distróficos fragipânicos fase relevo plano e suave ondulado.
- RRed2 - NEOSSOLOS REGOLÍTICOS Eutróficos e Distróficos fragipânicos fase relevo plano e suave ondulado + NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos e Psamíticos, típicos fase relevo suave ondulado e ondulado.
- RRe - NEOSSOLOS REGOLÍTICOS Eutróficos fragipânicos lépticos fase relevo suave ondulado + NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos e Psamíticos, típicos fase relevo suave ondulado e ondulado + PLANASSOLOS NÁTRICOS Órticos arênicos e típicos fase relevo plano e suave ondulado.
- RLe1 - NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos e Psamíticos típicos fase relevo ondulado e forte ondulado + AFLORAMENTOS DE ROCHA.
- RLe2 - NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos e Psamíticos típicos fase relevo forte ondulado e montanhoso + AFLORAMENTOS DE ROCHA.
- RLe3 - NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos e Psamíticos típicos fase relevo ondulado a montanhoso + AFLORAMENTOS DE ROCHA.

OBS.: ambiente com vegetação tipo caatinga hipoxerófila e hiperxerófila

Figura 9.1 – Mapa de solos (EMBRAPA, 1975) mostrando áreas com domínios de Neossolos Regolíticos e os locais onde foram coletados dois perfis de solo desta classe (P1 e P2) com presença de horizontes com cimentação forte, tipo duripã.

A



B

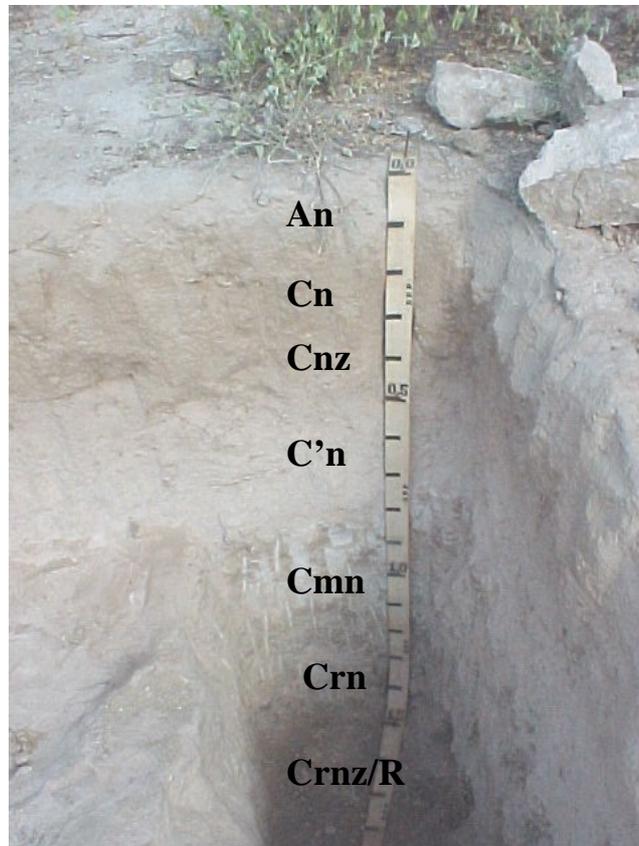


Figura 9.2 – Neossolos Regolíticos apresentando horizontes com cimentação forte (Cmn), tipo duripã. A: perfil P1; B: perfil P2.

Quadro 9.1 - Síntese de características morfológicas de Neossolos Regolíticos apresentando horizontes com cimentação forte (Cmn), tipo duripã

Horizonte	Profundidade (cm)	Cor (solo úmido)		Textura	Estrutura ⁽¹⁾	Consistência ⁽²⁾		
		Fundo	Mosqueado			Seca	Úmida	Molhada
Perfil P1								
A	0 - 10	10YR 4/4	-	franco-arenosa	fr. pq. e md. bsa. e gs.	lig. dura	m. friável	não pl. e não peg.
Cn1	- 22	10YR 5/4	-	franco-arenosa	fr. pq. e md. bsa. e gs.	lig. dura	m. friável	não pl. e não peg.
Cn2	- 40	10YR 5/4	-	franco-arenosa	fr. pq. e md. bsa. e ba.	dura	friável	não pl. e não peg.
Cmn	- 80+	10YR 6/3	10YR 4/4	areia-franca	maciça	ext. dura	ext. firme	não pl. e não peg.
Perfil P2								
An	0 - 12	10YR 4/4	-	franco-arenosa	fr. pq. e md. bsa. e gs.	lig. dura	friável	não pl. e não peg.
Cn	- 36	10YR 5/4	-	franco-arenosa	fr. pq. e md. bsa.	lig. dura	friável	não pl. e não peg.
Cnz	- 55	7,5YR 6/4	-	franco-arenosa	fr. pq. e md. bsa.	lig. dura	friável	não pl. e não peg.
C'n	- 80	10YR 6/3	-	franco-arenosa	fr. pq. e md. bsa. e gs.	lig. dura	m. friável	não pl. e não peg.
Cmn	- 120	10YR 5/3	10YR 2/1	franco-arenosa	maciça	ext. dura	ext. firme	não pl. e não peg.
Crn	- 140	Rocha muito alterada (saprolito)						
Crnz/R	- 155+	Rocha alterada com partes pouco alterada (saprolito).						

⁽¹⁾ fr.: fraca; mo.: moderada; pq.: pequena; md.: média; gd.: grande; bsa.: blocos subangulares; ba.: blocos angulares; gs.: grãos simples. ⁽²⁾ lig.: ligeiramente; m.: muito; ext.: extremamente; pl.: plástica; peg.: pegajosa.

Com relação à estrutura, nos casos examinados, os materiais cimentados foram tipicamente massivos. Por outro lado, os duripãs de regiões áridas dos Estados Unidos (ESTADOS UNIDOS, 1999), assim como os hardpans da Austrália (BETTNEY & CHURCHWARD, 1974), apresentaram estruturas do tipo laminar.

A consistência indicou ser um importante parâmetro de avaliação morfológica para o diagnóstico de horizontes cimentados, especialmente no estado úmido. Nos perfis examinados (Quadro 9.1), os horizontes tipo duripã mostraram consistência úmida extremamente firme, contrastando de forma drástica com os horizontes não-cimentados, friáveis e muito friáveis. No estado seco, os horizontes tipo duripã apresentaram-se extremamente duros, e os não-cimentados, duros a ligeiramente duros. No estado molhado, as partes cimentadas e não-cimentadas comportaram-se de forma semelhante, sendo não plásticas e não pegajosas devido aos baixos teores de argila.

No concernente às transições, a passagem entre os horizontes cimentados e não-cimentados foi observada de forma abrupta com topografia plana. Os fortes contrastes morfológicos relacionaram-se, especialmente, às mudanças drásticas de consistência.

Características físicas

A composição granulométrica dos horizontes tipo duripã situou-se na faixa arenosa a média, com baixo conteúdo de argila (menos de 100 g/kg) (Quadro 9.2). Entre os horizontes cimentados e não-cimentados, as variações foram relativamente pequenas, não caracterizando mudanças texturais abruptas. A argila dispersa em água e o grau de flocculação, que são parâmetros relacionados de forma inversa, mostraram comportamento similar tanto nos horizontes cimentados como naqueles não-cimentados.

A densidade nos horizontes tipo duripã apresentou valores relativamente superiores aos dos horizontes subjacentes não-cimentados (Quadro 9.2). Neste caso, foi um parâmetro indicativo da presença dos horizontes cimentados.

Quadro 9.2 - Síntese de características físicas de Neossolos Regolíticos apresentando horizontes com cimentação forte (Cmn), tipo duripã

Horizonte	Profundidade cm	Granulometria ⁽¹⁾				Argila dispersa em H ₂ O	Grau de flocculação	Densidade do solo ⁽²⁾ kg dm ⁻³
		Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila			
Perfil P1								
A	0 - 10	466	289	165	80	20	75	1,7
Cn1	- 22	472	305	143	80	40	50	1,66
Cn2	- 40	487	286	147	80	80	0	1,74
Cmn	- 80+	571	258	110	61	20	67	1,86
Perfil P2								
An	0 - 12	424	358	138	80	60	25	1,66
Cn	- 36	443	334	122	101	60	41	1,60
Cnz	- 55	398	348	174	80	60	25	1,68
C'n	- 80	393	339	208	60	40	33	1,66
Cmn	- 120	492	245	182	81	61	25	1,84
Crn	- 140	569	104	202	125	125	0	1,76
Crnz/R	- 155+	670	141	87	102	102	0	1,88
R	-	-	-	-	-	-	-	2,61

⁽¹⁾ Método do densímetro. ⁽²⁾ Média de três repetições pelo método do torrão parafinado (horizontes cimentados) ou anel volumétrico (horizontes não-cimentados).

HORIZONTES TIPO FRAGIPÃ EM PLANOSSOLOS

Características morfológicas

A área estudada ocorre em uma mancha de Neossolos Regolíticos associados com Planossolos, na parte central do Estado de Pernambuco (Figura 9.3). Observações de campo indicaram que os Planossolos apresentam desde horizontes com cimentação fraca até aqueles com cimentação forte. No perfil estudado (Quadro 9.3), o horizonte Btxn1, que denotava um grau de cimentação forte em condições de campo, ao ser submetido aos testes de imersão em soluções ácidas (Quadro 9.5), comportou-se como um material com cimentação fraca.

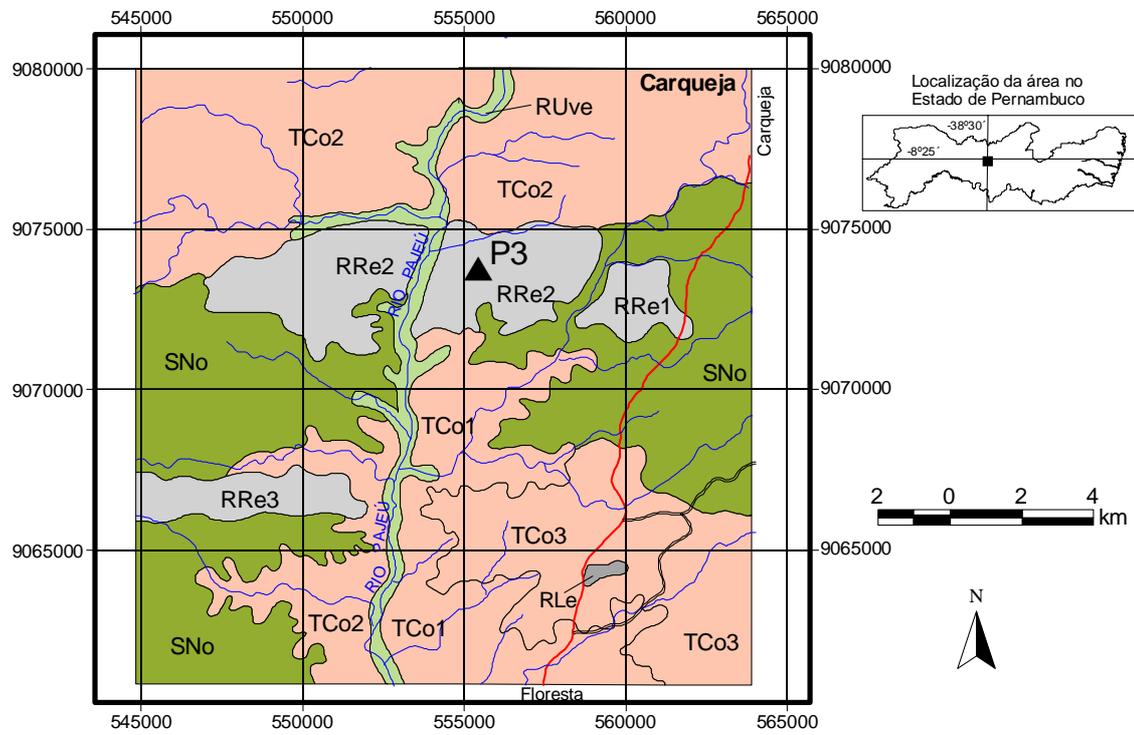
Quadro 9.3 - Síntese de características morfológicas de um solo da classe dos Planossolos apresentando horizontes com cimentação fraca (Btxn1 e Btxn2), tipo fragipã

Horizonte	Profundidade (cm)	Cor (solo úmido)		Textura	Estrutura ⁽¹⁾	Consistência ⁽²⁾		
		Fundo	Mosqueado			Seca	Úmida	Molhada
Perfil P3								
A	0 - 11	10YR 5/3	-	areia	gs. e fr. pq. e md. bsa.	macia	m. friável	não pl. e não peg.
E	- 34	10YR 6/3	-	areia	fr. pq. e md. bsa. e gs.	macia	m. friável	não pl. e não peg.
En	- 52	10YR 7/2	-	areia	fr. pq. e md. bsa. e gs.	macia e lig. dura	m. friável	não pl. e não peg.
Btxn1	- 56	10YR 5/2	7,5YR 5/6	franco-arenosa	maciça e fr. gd. laminar	ext. dura	ext. firme	lig. pl. e lig. peg.
Btxn2	- 100	10YR 5/2		franco-arenosa	maciça e fr. gd. ba. e bsa. e fr. md. prismática	ext. dura	firme e m. firme	lig. pl. e lig. peg.
R	- 105+	Rocha praticamente não alterada (granito)						

⁽¹⁾ fr.: fraca; mo.: moderada; pq.: pequena; md.: média; gd.: grande; bsa.: blocos subangulares; ba.: blocos angulares; gs.: grãos simples. ⁽²⁾ lig.: ligeiramente; m.: muito; ext.: extremamente; pl.: plástica; peg.: pegajosa.

Em termos de profundidade, os horizontes com cimentação fraca foram observados predominantemente na faixa de 40 a 120 cm. Com relação à espessura, as observações gerais de campo indicaram valores na faixa de 30 a 60 cm.

As cores acinzentadas dos horizontes cimentados tipo fragipã e os não-cimentados subjacentes mostraram contrastes relativamente pequenos (Figura 9.4 e Quadro 9.3). Porém, em função dos horizontes tipo fragipã restringirem a drenagem natural do solo, normalmente ocorrem com mosqueados. Neste perfil foram observados mosqueados com cor do tipo brunoforte (7,5YR 5/6).



LEGENDA DE SOLOS

	TCo1 - LUVISSOLOS CRÔMICOS Órticos vérticos + NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos típicos + PLANOSSOLOS NÁTRICOS Órticos vérticos, todos fase relevo suave ondulado e plano.
	TCo2 - LUVISSOLOS CRÔMICOS Órticos vérticos + PLANOSSOLOS NÁTRICOS Órticos vérticos + NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos típicos, todos fase relevo suave ondulado e plano.
	TCo3 - LUVISSOLOS CRÔMICOS Órticos planossólicos + PLANOSSOLOS NÁTRICOS Órticos vérticos + NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos típicos, todos fase relevo plano e suave ondulado.
	SNo - PLANOSSOLOS NÁTRICOS Órticos vérticos + NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos típicos + NEOSSOLOS REGOLÍTICOS Eutróficos solódicos lépticos, todos relevo suave ondulado e plano.
	RUve - NEOSSOLOS FLÚVICOS Ta Eutróficos + CAMBISSOLOS HÁPLICOS Ta Eutróficos solódicos e típicos, todos fase relevo plano.
	RRe1 - NEOSSOLOS REGOLÍTICOS Eutróficos fragipânicos lépticos + NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos e Psamíticos, típicos, todos fase relevo plano e suave ondulado.
	RRe2 - NEOSSOLOS REGOLÍTICOS Eutróficos solódicos lépticos + NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos e Psamíticos, típicos, todos fase relevo plano e suave ondulado.
	RRe3 - NEOSSOLOS REGOLÍTICOS Eutróficos solódicos lépticos + NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos e Psamíticos, típicos + PLANOSSOLOS NÁTRICOS Órticos típicos e arênicos, todos fase relevo plano e suave ondulado.
	RLe - NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos típicos + ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS Eutróficos típicos, todos fase relevo ondulado e forte ondulado + AFLORAMENTOS DE ROCHAS.
	OBS.: ambiente com vegetação tipo caatinga hiperxerófila

Figura 9.3 – Mapa de solos mostrando áreas com domínios de Neossolos Regolíticos associados com Planossolos e o local onde foi coletado o perfil de Planossolo (perfil P3) com presença de horizontes com cimentação fraca, tipo fragipã.

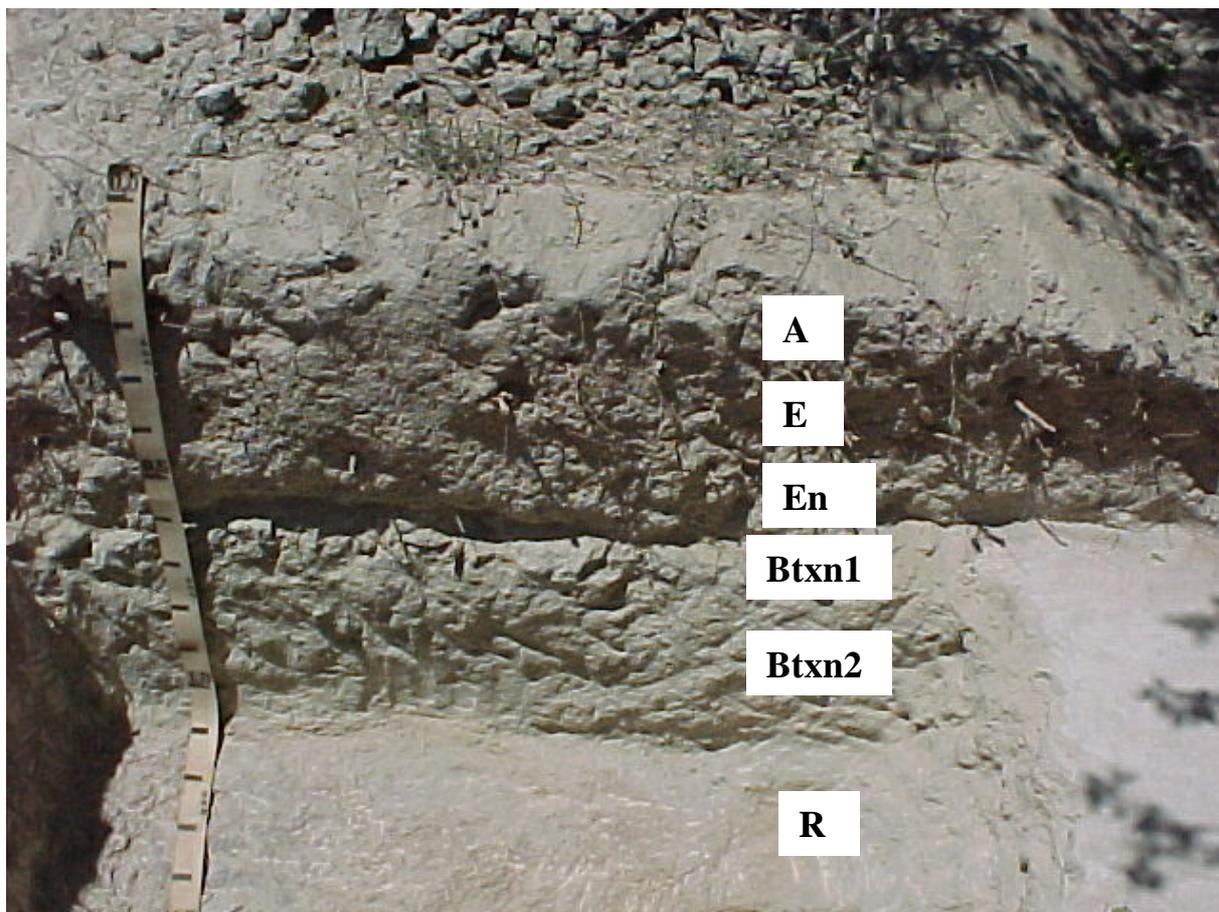


Figura 9.4 – Planossolo (perfil P3) apresentando horizontes com cimentação fraca (Btxn1 e Btxn2), tipo fragipã, sobrejacente à camada R (granito).

Ao contrário das pequenas variações texturais dos Neossolos Regolíticos, nos Planossolos, o horizonte B plânico é precedido por uma mudança de textura abrupta. No perfil estudado, os horizontes tipo fragipã mostraram-se coincidentes, em toda extensão, com o horizonte B plânico (Btxn1 e Btxn2) e com textura na faixa média. Nos horizontes sobrejacentes, a textura situou-se na faixa arenosa.

Com relação à estrutura, no horizonte tipo fragipã mais superficial (Btxn1), observaram-se grandes domínios maciços associados a formas grandes laminares. No horizonte mais subsuperficial (Btxn2), além dos volumes maciços, também foram observadas estruturas fracas em blocos e prismáticas.

Nos horizontes tipo fragipã, a consistência no estado úmido (Quadro 9.3) variou de firme a extremante firme, sendo muito friável nos demais horizontes não-cimentados. No solo seco, os horizontes com fragipã mostraram-se extremamente duros, e os não-cimentados, variando de macios a ligeiramente duros. No estado molhado, os horizontes com fragipã apresentaram-se ligeiramente plásticos e ligeiramente pegajosos, enquanto que os não-cimentados, mostraram-se não plásticos e não pegajosos.

No que concerne às transições, a passagem dos horizontes fragipânicos para os não-fragipânicos foi observada de forma abrupta tanto no aspecto textural como em relação à consistência no estado úmido ou seco.

Características físicas

Os horizontes tipo fragipã (Btxn1 e Btxn2) apresentaram composição granulométrica na faixa média com teores de argila inferiores a 200 g/kg (Quadro 9.4). Nos horizontes não-cimentados, a textura situou-se na faixa arenosa, mostrando um contraste abrupto em relação aos horizontes fragipânicos subjacentes.

A argila dispersa em água mostrou valores mais elevados nos horizontes tipo fragipã, coincidentes em toda extensão com o horizonte B plânico, de certa forma refletindo os significativos volumes maciços destes horizontes.

A densidade do solo nos horizontes tipo fragipã apresentou valores relativamente superiores aos dos horizontes sobrejacentes não-cimentados (Quadro 9.4) e neste caso foi indicativa da presença dos horizontes fragipânicos.

Quadro 9.4 - Síntese de características físicas de um solo da classe dos Planossolos apresentando horizontes com cimentação fraca (Btxn1 e Btxn2), tipo fragipã

Horizonte	Profundidade cm	Granulometria ⁽¹⁾				Argila dispersa em H ₂ O	Grau de flocculação	Densidade do solo ⁽²⁾ kg dm ⁻³
		Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila			
Perfil P3								
A	0 - 11	589	317	54	40	20	50	1,49
E	- 34	639	274	47	40	20	50	1,60
En	- 52	643	282	35	40	20	50	1,68
Btxn1	- 56	532	188	98	182	61	66	2,17
Btxn2	- 100	530	86	282	102	102	0	1,98
R	- 105+	Rocha praticamente não alterada (granito)						2,50

⁽¹⁾ Método do densímetro. ⁽²⁾ Média de três repetições pelo método do torrão parafinado (horizontes cimentados) ou anel volumétrico (horizontes não-cimentados).

CLASSES DE CIMENTAÇÃO

Conforme resultados dos testes de imersão em água, ácido e base (Quadro 9.5), os materiais foram enquadrados em duas classes gerais de cimentação: a forte e a fraca. A classe de cimentação forte enquadrou os materiais estáveis ou que esboroaram-se ou fraturaram em menos da metade do volume em água ou HCl 1N, porém esboroaram-se ou fraturaram, na maior parte do volume, em solução básica muito concentrada (NaOH 4M) (Figura 9.5). Na imersão em solução de NaOH 1M, assim como em solução ácida muito concentrada (HCl 6N), os materiais com cimentação forte permaneceram estáveis.

Para o enquadramento na classe de cimentação fraca, foi necessário combinar os resultados dos testes de imersão em água com os da imersão em ácido (HCl 1N). Os casos considerados como pertencentes à classe de cimentação fraca foram os seguintes: (1) materiais que esboroaram-se ou fraturaram (às vezes em pedaços maiores que 6 mm) em mais da metade do volume na imersão em água ou HCl 1N; (2) materiais que, apesar de esboroarem-se ou fraturarem em menos da metade do volume em água, esboroaram-se ou fraturaram em mais da metade do volume na imersão em HCl 1N. Nesta categoria, enquadrou-se o horizonte P3-Btxn1 (Quadro 9.5 e Figura 9.5). No campo, materiais deste horizonte esboroaram-se em menos da metade do volume em água. Por outro lado, na imersão em ácido (HCl 1N), em condições laboratoriais, o esboroamento foi completo, comportando-se como material com cimentação fraca. Por não atender aos requisitos da classe de cimentação forte, que exige estabilidade ou

Quadro 9.5 - Estimativas do volume de material esboroado nos testes de imersão em água, ácido e base em amostras selecionadas de horizontes cimentados

Amostra	Textura	Testes de imersão com materiais de 2 a 5 cm de diâmetro						Classes de cimentação
		Água ⁽¹⁾	Ácido (HCl) ⁽²⁾			Base (NaOH) ⁽²⁾		
			1N	3N	6N	1M	4M	
----- Volume esboroado em g kg ⁻¹ -----								
P1 - Cmn	areia-franca	0	0	0	0	0	1000	forte
P2 - Cmn	areia-franca	0	0	0	0	0	1000	forte
P3 - Btxn1	franco-arenosa	< 400	1000	-	-	1000	-	fraca ^(*)
P3 - Btxn2	franco-arenosa	± 500	> 500	-	-	1000	-	fraca

⁽¹⁾Testes realizados no campo com duração de 2 a 6 horas. ⁽²⁾Testes realizados no laboratório com duração de 10 dias. ^(*)Material com cimentação fraca por esboroar-se ou fraturar em mais da metade do volume em HCl 1N.

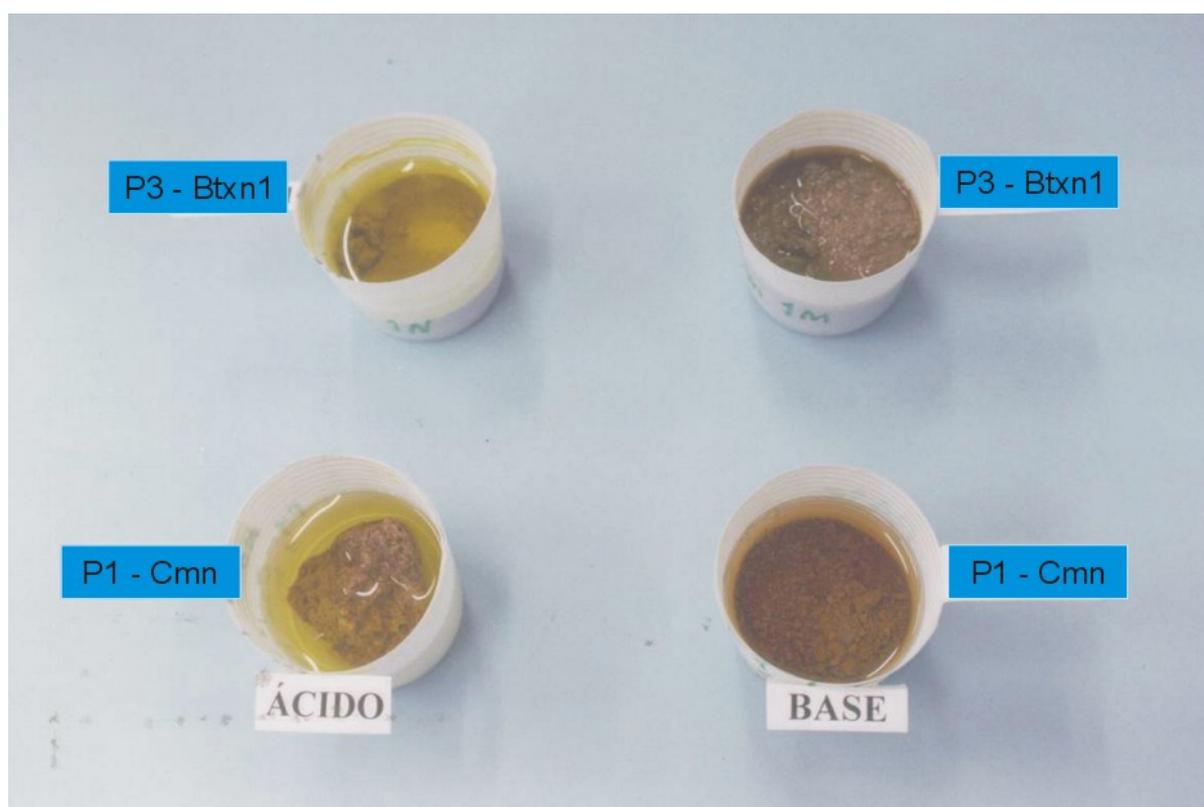


Figura 9.5 - Amostra de horizonte com cimentação fraca (P3-Btxn1) e com cimentação forte (P1-Cmn) imersas em solução ácida (HCl 1N) e básica (NaOH 4M) no período de 10 dias.

esboroamento em menos da metade do volume em HCl 1N, foram enquadrados na classe de cimentação fraca. Estudos de KNOX (1957) mostraram que um material considerado como fragipã permaneceu estável ou pouco afetado na imersão em água, durante 14 dias.

Inferiu-se que a desestabilização dos horizontes cimentados, tipo duripã, foi efetiva em solução alcalina muito concentrada (Figura 9.5) em função do aumento drástico da solubilidade de compostos silicosos (DOVE & RIMSTIDT, 1994; KRAUSKOPF & BIRD, 1995), que atuam como agentes cimentantes nestes materiais.

Caracterização do material esboroadado

Os resultados dos testes de imersão em água, ácido ou base (Quadro 9.5) indicaram apenas uma estimativa do volume de materiais esboroados e/ou fraturados. Entretanto, foi importante conhecer os diversos tamanhos e teores de fragmentos esboroados, para que se pudesse melhor avaliar o efeito das soluções ácidas (HCl 1N) ou básicas (NaOH 1M ou 4M) nos materiais submetidos aos testes. Visando obter estas informações, os materiais esboroados foram quantificados nas classes de tamanho de 0-2, 2-4, 4-6 e > 6 mm.

Os materiais dos horizontes com cimentação fraca, identificados na classe dos Planossolos, quando imersos nas soluções de HCl 1N ou NaOH 1M, esboroaram-se em mais da metade do seu volume em fragmentos inferiores a 2 mm (Figura 9.6 A). Por outro lado, os materiais dos horizontes com cimentação forte, identificados nos solos da classe dos Neossolos Regolíticos, permaneceram totalmente estáveis em soluções ácidas de HCl 1N ou mesmo 6N, assim como também em solução básica de NaOH 1M. O esboroamento só efetivou-se em soluções básicas muito concentradas (NaOH 4M). Nesta solução, o material cimentado foi reduzido em fragmentos inferiores a 2 mm (Figura 9.6 B).

SÍNTESE E CONCLUSÕES

As características morfológicas e físicas que efetivamente diferenciaram horizontes com cimentação fraca (tipo fragipã) daqueles com cimentação forte (tipo duripã) foram as seguintes: (1) a consistência do material no estado úmido, observando-se a presença de propriedades fráguas; (2) o volume de material esboroadado em função dos testes de imersão em água, ácido (HCl 1N) ou base (NaOH 1M e/ou 4M).

Outras características como a cor, textura, consistência (no estado seco ou molhado), densidade do solo, entre outras, foram consideradas como acessórias, pois não apresentaram padrões exclusivos para diagnosticar os horizontes cimentados.

Os materiais com cimentação forte, tipo duripã, diferenciaram-se daqueles com cimentação fraca por permanecem estáveis na maior parte do volume, quando foram imersos em

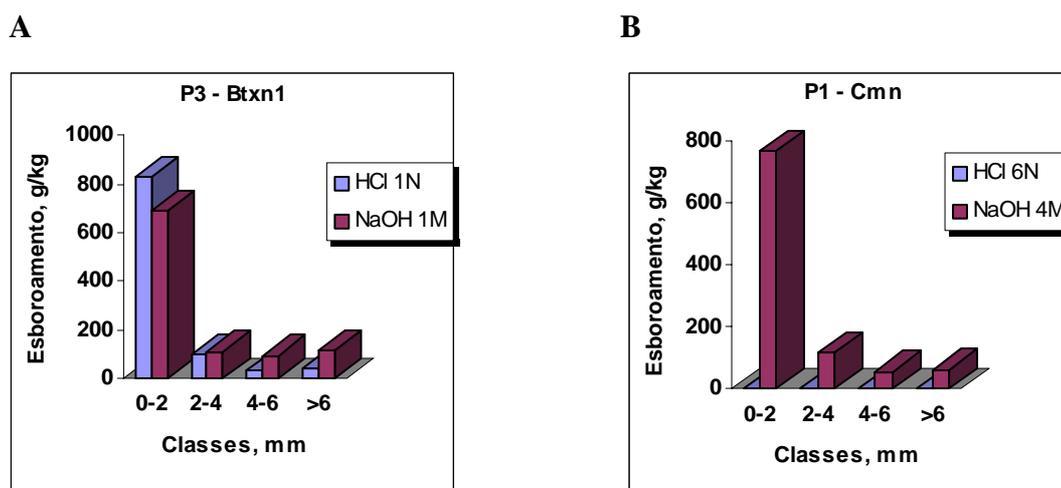


Figura 9.6 - Classes de tamanho de materiais esboroados em soluções ácidas e básicas. A: horizonte com cimentação fraca; e B: horizonte com cimentação forte.

água ou HCl 1N, mas esboroaram-se em mais da metade do volume em solução concentrada de NaOH 4M. Portanto, para enquadrar horizontes com cimentação fraca ou forte nas definições de fragipã ou duripã, além dos testes de imersão em água e de avaliação de propriedades fráguas, entre outros requisitos, foram necessários testes laboratoriais de imersão em soluções ácidas e básicas.

No solo da classe dos Planossolos, foram observados materiais com comportamento diferenciado dos padrões normais. Amostras aparentando cimentação forte no campo (Horizonte Btxn1) mostraram cimentação fraca nos testes de imersão em solução de HCl 1N. Este tipo de comportamento indicou, portanto, que além dos testes de campo são necessários testes laboratoriais visando diferenciar as cimentações fortes das fracas.

Horizontes com cimentação forte, tipo duripã, foram confirmados nos solos da classe dos Neossolos Regolíticos, na faixa de textura arenosa a média, com teores de argila inferiores a 100 g/kg. Os horizontes com cimentação fraca foram observados no perfil de solo da classe dos Planossolos, na faixa de textura média, com teores de argila entre 100 e 200 g/kg.

Entre os horizontes com cimentação da classe fraca, apenas o horizonte Btxn2 apresentou atributo de espessura suficiente para ser um horizonte diagnóstico do tipo fragipã. Já os horizontes com cimentação forte para serem enquadrados como duripãs, ainda dependem da natureza dos agentes cimentantes principais, requerendo, portanto, estudos complementares.

CAPÍTULO 10 - Mineralogia

A caracterização mineralógica dos horizontes cimentados foi desenvolvida de forma qualitativa, por difração de raios-X (DRX), tanto na amostra total como na fração-argila. Dados semiquantitativos foram obtidos da fração-areia e cascalho por meio de contagens de grãos identificados com base em propriedades óticas e microtestes químicos. A caracterização mineralógica do material de origem (camada R) foi realizada a partir de lâminas de seção delgada com base em propriedades óticas dos minerais constituintes.

O objetivo da caracterização mineralógica foi conhecer a natureza das fases cristalinas constituintes dos horizontes cimentados, assim como dos solos nos quais estes horizontes foram desenvolvidos. Visou-se, também, identificar possíveis diferenças entre as partes cimentadas e não-cimentadas.

FRAÇÃO-ARGILA

Inicialmente foram realizadas análises da amostra total com vistas a uma caracterização preliminar da composição global e a definição de tratamentos a serem desenvolvidos na fração-argila. Nesta fase dos estudos utilizaram-se amostras do saprolito e do horizonte cimentado do perfil P2 (Neossolo regolítico). No saprolito, horizonte Crn (Figura 10.1), os resultados indicaram a presença de quartzo, feldspatos e argilominerais 2:1 (provavelmente incluindo argilominerais do grupo da esmectita). No horizonte cimentado (Cmn), destacaram-se quartzo e feldspatos.

Na fase seguinte realizou-se a caracterização mineralógica da fração-argila em amostras selecionadas do perfil P2 (Neossolo Regolítico) e do perfil P3 (Planossolo).

Neossolo Regolítico. Nesta classe de solos, foram analisadas amostras do horizonte cimentado (Cmn) e do horizonte não-cimentado subjacente ao mesmo (Crn). Na parte subjacente, que corresponde à zona do saprolito (horizonte Crn), os resultados indicaram a presença de esmectita, ilita e caulinita. No horizonte cimentado (Cmn), a caulinita passou a

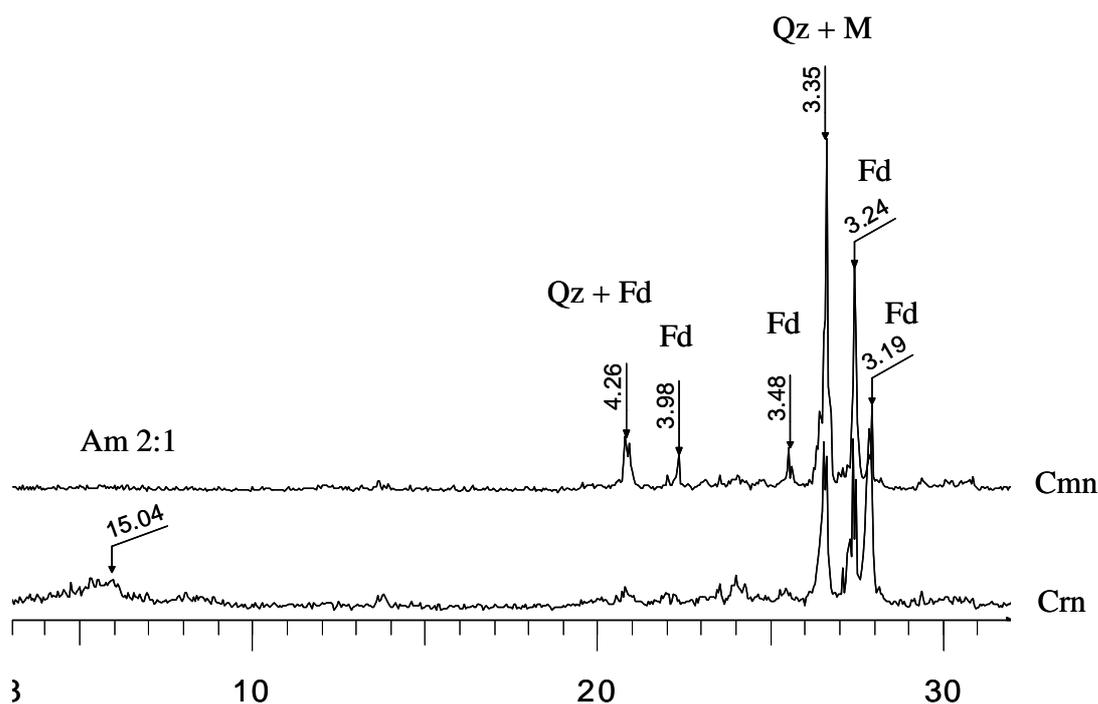


Figura 10.1 – Difratoogramas de raios-X da amostra total (pó) relativos a horizontes selecionados do perfil P2 (Neossolo Regolítico). (Qz: quartzo; Fd: feldspato; M: mica; Am 2:1: argilomineral tipo 2:1).

ser o argilomineral dominante, acompanhada com pequenas proporções de ilita (Figura 10.2). Portanto, nesta classe de solo o horizonte cimentado tipo duripã já corresponde a uma zona do perfil de alteração tipicamente caulínica.

Planossolo. Nesta classe de solos, a caracterização mineralógica foi desenvolvida no horizonte com cimentação fraca, tipo fragipã (Btxn2), que faz contato direto com a camada R e no horizonte não-cimentado sobrejacente (En). Os resultados (Figura 10.3) mostraram que a caulinita é o argilomineral dominante, mesmo no horizonte que faz contato direto com a camada R (Btxn2). Associadas com a caulinita, sempre foram observadas pequenas quantidades de ilita.

Uma topossequência de solos composta por dois perfis de Neossolos Regolíticos com fragipã e um perfil de Planossolo, desenvolvida a partir de gnaisses na região agreste de Pernambuco (OLIVEIRA NETO, 1992), mostrou também a caulinita como o principal argilomineral constituinte da fração-argila. Observa-se, portanto, que em geral a caulinita destaca-se como o principal argilomineral formado a partir da alteração de rochas ácidas (granitos, gnaisses e outras de composição similar), mesmo em condições de clima semi-árido.

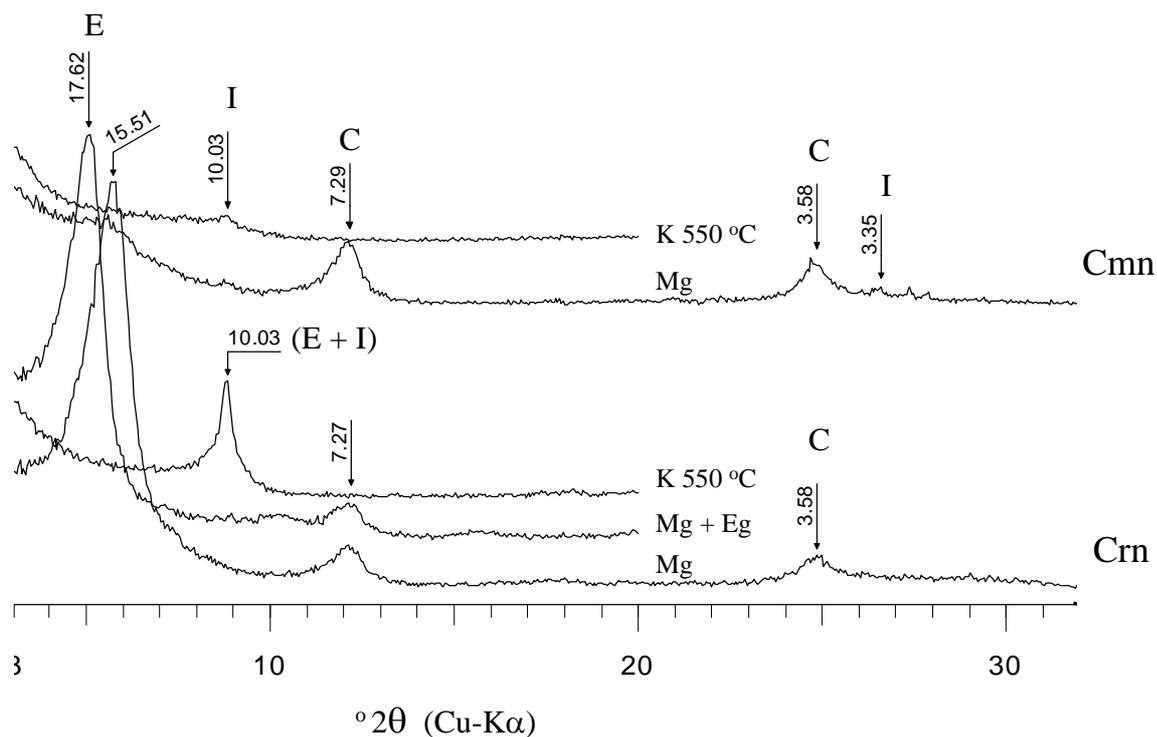


Figura 10.2 – Difratoformas de raios-X da fração-argila, submetida a vários tratamentos, relativos aos horizontes Crn e Cmn do perfil P2 (Neossolo Regolítico). (E: esmectita; I: ilita; C: caulinita; Mg: saturação por magnésio; K: saturação por potássio; Eg: solvatação por etileno glicol).

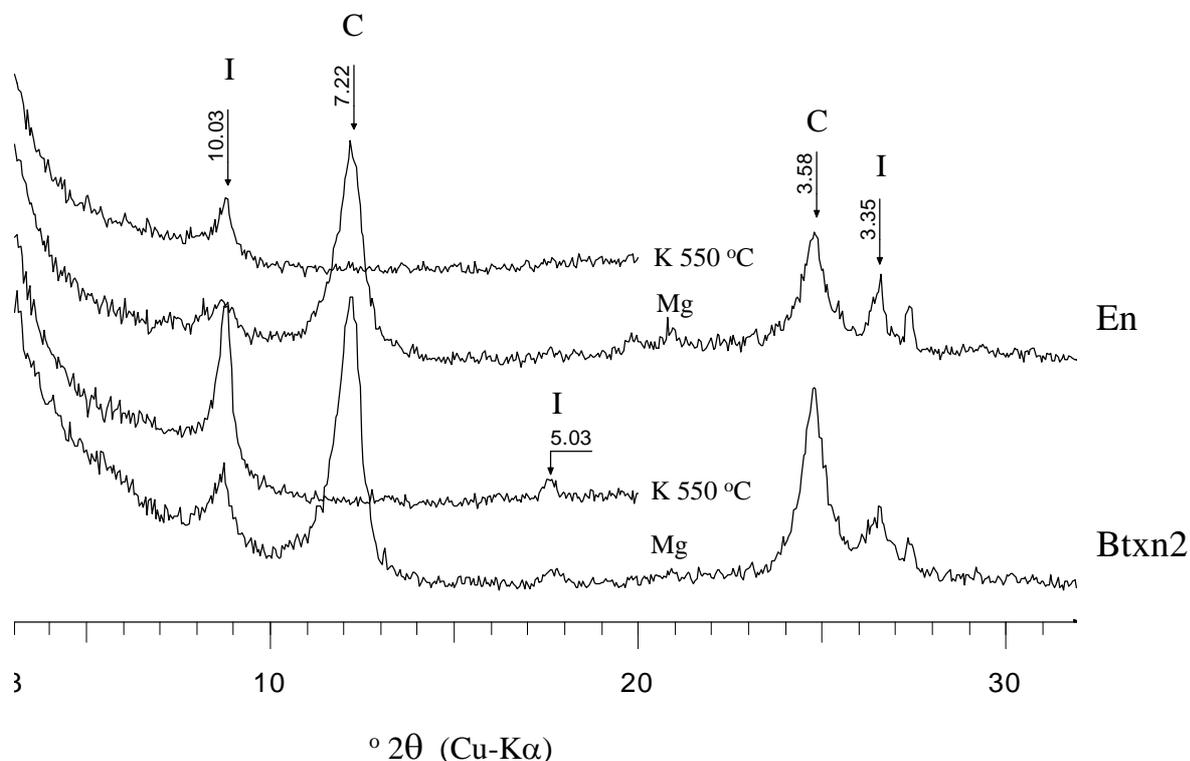


Figura 10.3 – Difratoformas de raios-X da fração-argila, submetida a vários tratamentos, relativos aos horizontes Btxn2 e En do perfil P3 (Planossolo). (I: ilita; C: caulinita; Mg: saturação por magnésio; K: saturação por potássio).

GRÃOS

Com base em análises realizadas em amostras selecionadas dos principais horizontes dos perfis de Neossolos Regolíticos e do perfil de Planossolo, observou-se que quartzo e feldspatos são os minerais dominantes nas frações areia e cascalho.

Na fração-areia fina, em ambas as classes de solo, os teores de quartzo situaram-se na faixa de 50 a 65%, e os de feldspatos, entre 25 e 30%, tanto nos horizontes cimentados como naqueles não-cimentados. Epidoto ou epidoto mais anfibólio foram observados em baixos percentuais (1 a 2%), assim como biotita mais muscovita, com menos de 1%.

Nos horizontes cimentados, constatou-se a presença de nódulos argilosos ou mesmo arenosos, com teores na faixa de 5 a 12%. Nesses nódulos foram observados, inclusos, quartzo, feldspatos, epidoto e anfibólios. Observaram-se ainda nódulos de óxido de manganês com percentuais de 1 a 2%. Minerais como ilmenita, turmalina, magnetita, hematita e zircão, foram observados como traços.

No concernente à fração-areia grossa de ambas as classes de solo, o quartzo variou de 40 a 67% e feldspatos, de 30 a 35%, mantendo-se as mesmas proporções tanto nos horizontes cimentados como nos não-cimentados. Biotita, anfibólios e epidoto foram observados com teores abaixo de 2%. Nos horizontes cimentados verificaram-se nódulos argilosos ou de manganês com teores na faixa de 1 a 7%. Como traços foram mais freqüentes ilmenita, turmalina, hematita e magnetita.

A fração-cascalho, tanto nos horizontes cimentados como naqueles não-cimentados, apresentou quartzo e feldspatos com teores respectivamente na faixa de 35 a 80% e 18 a 40%. Nódulos de óxido de manganês foram observados com percentuais abaixo de 7%, porém restringindo-se às zonas dos horizontes cimentados ou do saprolito.

MATERIAL DE ORIGEM (CAMADA R)

Rochas do tipo granito observadas em afloramentos próximos aos locais de coleta dos perfis de Neossolos Regolíticos e do perfil de Planossolo foram consideradas como a principal fonte de material de origem dos solos desenvolvidos nas áreas estudadas. Para caracterização das rochas, foram coletadas amostras em afloramentos próximos ao perfil P2 (Neossolo Regolítico) e na camada R do perfil P3 (Planossolo). Observações em lâminas de seção delgada mostraram que os minerais dominantes destas rochas são feldspatos e quartzo. As micas mostraram-se sempre presentes, porém em pequenas proporções.

Entre os feldspatos observados, predominaram os alcalinos, principalmente microclínio e pertitas. Plagioclásios também foram observados, porém em menores proporções. Em função da

coleta do material rochoso ter sido realizada na parte mais superficial dos afloramentos, quantidades significativas dos feldspatos foram observados em processos de alteração, principalmente para argilominerais.

O Quartzo foi observado preenchendo espaços entre os grãos de feldspatos e muito raramente como inclusão em pertitas ou microclínio. As superfícies dos grãos comumente apresentaram microfissuras preenchidas com material ferruginoso. A extinção da maioria dos grãos mostrou-se ondulante.

As micas (biotita e muscovita) foram observadas em pequenas quantidades. A biotita apresentou-se entre grãos de feldspatos, mas sempre bastante alterada, e com pleocroísmo acentuado. A muscovita, por sua vez, foi verificada sempre associada com biotita, mas em menores proporções. Em luz polarizada, mostrou tons esverdeados, porém tornando-se incolor em luz normal. Muito raramente observaram-se sericitas na superfície de grãos de feldspatos.

SÍNTESE E CONCLUSÕES

Na fração-argila dos horizontes cimentados, tanto nos Neossolos Regolíticos como no Planossolo, a caulinita apresentou-se como o argilomineral dominante, mas sempre acompanhada com pequenas proporções de Illita. Esmectitas destacaram-se apenas no saprolito de perfil de Neossolo Regolítico (P2).

Nas frações areia e cascalho, quartzo e feldspatos foram os minerais dominantes. Os teores de quartzo situaram-se na faixa de 35 a 80%, e os de feldspatos, entre 18 e 40%. Nódulos de óxido de manganês com teor de até 7% foram observados nos horizontes cimentados e no saprolito do perfil P2. Biotita e muscovita em geral não ultrapassaram de 1%. Como traços, e com maior frequência na fração-areia fina, foram observados ilmenita, turmalina, magnetita, hematita e zircão.

Os fortes contrastes físicos e/ou morfológicos entre horizontes cimentados e aqueles não-cimentados não puderam ser diferenciados pela mineralogia de fases cristalinas isoladamente.

CAPÍTULO 11 - Balanço geoquímico de massa: uma primeira aproximação

As perdas e ganhos de elementos químicos no perfil de alteração, resultantes da ação do intemperismo, podem ser avaliados quantitativamente por meio do balanço geoquímico de massa (EGLI & FITZE, 2000; BRIMHALL & DIETRICH, 1987). O balanço quando integrado com resultados de análises físicas, químicas e mineralógicas, tem sido utilizado na avaliação quantitativa do intemperismo químico e de processos pedogenéticos (LANGLEY-TURNBAUGH & BOCKHEIM, 1998; CHADWICK et al., 1990; BRIMHALL & DIETRICH, 1987; CHIQUET et al., 2000).

O cálculo do balanço de massa em solos, que normalmente apresentam variações volumétricas, leva em conta dois referenciais, isto é, o material de origem (rochas ou sedimentos) e um elemento químico considerado imóvel (EGLI & FITZE, 2000). Neste estudo, o material de origem dos solos corresponde a rochas graníticas e para o cálculo das variações volumétricas, utilizou-se o Ti como elemento químico considerado imóvel. Deve-se ressaltar que possíveis fontes de erros no balanço de massa podem advir da heterogeneidade do material originário (EGLI & FITZE, 2000).

O objetivo principal deste estudo foi estimar perdas e ganhos de elementos maiores em solos com horizontes cimentados no ambiente da depressão sertaneja. Os solos estudados foram um perfil da classe dos Neossolos Regolíticos com horizonte tipo duripã e outro da classe dos Planossolos com horizontes tipo fragipã. Os objetivos específicos foram: (1) estabelecer a caracterização pedogeoquímica dos solos; (1) verificar possíveis diferenças entre horizontes cimentados e não-cimentados com base em perdas e ganhos dos principais elementos envolvidos em cimentações pedogenéticas.

Para os cálculos do balanço de massa selecionaram-se os elementos Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na e K, por serem os mais abundantes no perfil de alteração. As equações utilizadas nos cálculos do balanço constam no capítulo 4.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA TOTAL

O quadro 11.1 mostra a composição química total dos solos e do material de origem representado por rochas graníticas.

Com relação à natureza das rochas analisadas (camada R), verificou-se que os teores de SiO_2 situam-se pouco acima de 70%, Al_2O_3 ao redor de 14% e K_2O em torno de 5%, em reflexo à composição mineralógica do material de origem predominantemente constituído por quartzo e feldspatos, com pequenas proporções de micas. Os resultados estão de acordo com a composição média de rochas graníticas (NOCKOLDS et al., 1987) e com aqueles obtidos por MELFI et al. (1983) no estudo de intemperismo de rochas graníticas da região.

As modificações nas concentrações de óxidos observadas ao longo dos perfis de alteração (Quadro 11.1) resultaram da ação combinada de vários fatores. Ressalta-se que o exame apenas das variações percentuais dos óxidos, pode induzir interpretações errôneas. Por exemplo, o aumento nos teores de SiO_2 , da base para o topo do perfil de alteração, não pode ser interpretado como ganho de sílica. Estas modificações estão relacionadas às diminuições nas concentrações de outros elementos que, por sua vez, causam a impressão de um aparente ganho de SiO_2 . O método adequado para verificação destas variações, em termos de perdas e ganhos, é o balanço geoquímico de massa.

O BALANÇO GEOQUÍMICO

No quadro 11.2, estão apresentados os resultados dos cálculos do balanço geoquímico de massa desenvolvidos com relação aos elementos Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na e K. Os resultados indicaram que no processo de alteração houve reduções volumétricas crescentes com a profundidade ($\epsilon_{i,w} < 0$). Tais reduções resultaram provavelmente de dois fatores principais: (1) da erosão geoquímica no perfil de alteração representada por perdas globais diferenciadas ($\tau_{j,w} < 0$), conforme o comportamento geoquímico dos elementos, fluxo das águas e condições de drenagem local; e (2) do aumento significativo da densidade do solo na zona dos horizontes cimentados.

Comportamento geoquímico dos elementos

O comportamento geoquímico de Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na e K no perfil de alteração foi inferido com base em resultados da análise química total e estimativas de perdas e ganhos destes elementos. Em geral, com exceção do Mg, os demais elementos mostraram perdas (Quadro 11.2).

Com relação ao silício, a perda global nos dois solos estudados, na forma de SiO_2 , variou na faixa de 27 a 84%. No perfil de Planossolo, a redução variou de 27 a 65%, e no de Neossolo

Regolítico, de 39 a 84%. A diminuição das perdas de Si da base para o topo, em ambos os solos, pode estar relacionadas com variações composicionais do material de origem e/ou com contribuições de fontes externas de Si em função do posicionamento dos solos na paisagem.

O alumínio que originalmente situava-se quase na sua totalidade em feldspatos, mostrou perdas (expressa em Al_2O_3) na faixa de 54 a 79%, no perfil de Neossolo Regolítico, e de 64 a 72% no perfil de Planossolo. É importante destacar que a solubilidade do Al é mínima entre pH 6 e 8 (FAURE, 1998), mas aumenta acentuadamente à medida que se distancia destes limites (BIRKELAND, 1999; FAURE, 1998). No saprolito do perfil de Neossolo Regolítico, atualmente, ainda pode ocorrer mobilidade do Al, pois o pH situa-se em torno de 8,8, permitindo a formação das fases móveis de Al. Entretanto, a eliminação destas fases vai depender particularmente do fluxo das águas e das modificações de pH ao longo da evolução do perfil de alteração. Estudos de PARAHYBA (1993), desenvolvidos com Planossolos derivados de gnaisses no Agreste de Pernambuco, utilizando o quartzo como mineral-índice, também mostraram perdas significativas de Al na faixa de 51 a 55%.

Quadro 11.1 - Composição química total de solos com horizontes cimentados e do material de origem (granitos) na depressão sertaneja

Horizonte	Espesura (cm)	Óxidos (%)										PF (%)	Total (%)
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃		
P2 - Neossolo Regolítico													
An	0-12	77,76	11,14	0,01	0,09	0,16	1,12	6,28	0,19	0,02	0,57	1,72	99,06
Cn	-36	78,53	11,09	0,00	0,09	0,16	1,05	6,02	0,20	0,02	0,63	1,68	99,47
Cnz	-55	77,97	11,24	0,01	0,08	0,17	1,21	6,29	0,20	0,02	0,52	1,27	98,98
C'n	-80	77,72	11,47	0,01	0,07	0,21	1,48	6,59	0,21	0,02	0,36	0,79	98,93
Cmn	-120	76,17	12,13	0,01	0,16	0,21	1,34	5,54	0,24	0,02	1,07	1,96	98,85
Crn	-140	64,20	16,86	0,17	1,32	1,15	3,49	4,26	0,56	0,17	3,37	3,27	98,82
Crnz/R	155+	65,28	16,05	0,12	1,46	1,67	4,16	3,69	0,61	0,18	3,69	2,10	99,01
R	-	73,50	13,94	0,02	0,16	0,56	4,03	5,06	0,11	0,06	0,99	0,67	99,10
P3 - Planossolo													
A	0-11	85,89	7,00	0,01	0,05	0,15	0,36	4,60	0,17	0,02	0,32	0,86	99,43
E	-34	85,09	6,99	0,01	0,05	0,14	0,33	4,45	0,16	0,02	0,37	0,75	98,36
En	-52	86,33	7,04	0,01	0,05	0,15	0,37	4,64	0,16	0,02	0,29	0,61	99,67
Btxn1	-56	80,80	10,07	0,01	0,14	0,15	0,42	4,46	0,27	0,02	1,18	2,10	99,62
Btxn2	-100	74,51	13,97	0,03	0,30	0,20	0,60	3,93	0,29	0,02	2,09	3,87	99,81
R	-105+	74,14	13,71	0,03	0,19	0,87	3,16	5,05	0,10	0,03	1,38	0,54	99,20

Quadro 11.2 - Balanço geoquímico de massa em solos com horizontes cimentados desenvolvidos a partir de granitos na depressão sertaneja

Horizonte	Profundidade (cm)	$\rho^{(1)}$ (g cm ⁻³)	$\varepsilon_{i,w}^{(2)}$	$\tau_{j,w}^{(3)}$						$m_{j,fluxo} (g\ cm^{-2})^{(4)}$							
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Si	Al	Fe	Ca	Mg	Na	K
P2 - Neossolo Regolítico																	
An	0-12	1,66	-0,09	-0,39	-0,54	-0,67	-0,83	-0,67	-0,84	-0,28	-4,64	-1,37	-0,16	-0,11	-0,02	-0,86	-0,40
Cn	-36	1,60	-0,10	-0,41	-0,56	-0,65	-0,84	-0,69	-0,86	-0,34	-9,86	-2,88	-0,31	-0,23	-0,05	-1,78	-0,99
Cnz	-55	1,68	-0,14	-0,41	-0,55	-0,71	-0,83	-0,72	-0,83	-0,31	-8,17	-2,34	-0,28	-0,19	-0,04	-1,43	-0,75
C'n	-80	1,66	-0,18	-0,45	-0,57	-0,81	-0,80	-0,77	-0,81	-0,32	-12,37	-3,35	-0,45	-0,25	-0,06	-1,92	-1,07
Cmn	-120	1,84	-0,35	-0,52	-0,60	-0,50	-0,83	-0,54	-0,85	-0,50	-28,85	-7,12	-0,56	-0,53	-0,08	-4,07	-3,37
Crn	-140	2,05	-0,75	-0,83	-0,76	-0,33	-0,60	+0,62	-0,83	-0,83	-59,87	-11,73	-0,48	-0,50	+0,12	-5,17	-7,28
Crnz/R	-155+	1,88	-0,75	-0,84	-0,79	-0,33	-0,46	+0,64	-0,81	-0,87	-45,44	-9,14	-0,36	-0,29	+0,10	-3,78	-5,72
R		2,61	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total											-169,2	-37,93	-2,60	-2,10	-0,03	-19,01	-19,58
P3 - Planossolo																	
A	0-11	1,49	-0,01	-0,32	-0,70	-0,86	-0,90	-0,84	-0,93	-0,46	-3,10	-1,41	-0,23	-0,15	-0,03	-0,60	-0,53
E	-34	1,60	-0,02	-0,28	-0,68	-0,83	-0,90	-0,83	-0,93	-0,42	-5,72	-2,90	-0,47	-0,33	-0,05	-1,27	-1,03
En	-52	1,68	-0,07	-0,27	-0,68	-0,87	-0,89	-0,83	-0,93	-0,42	-4,55	-2,39	-0,41	-0,27	-0,04	-1,05	-0,85
Btxn1	-56	2,17	-0,57	-0,59	-0,72	-0,68	-0,93	-0,72	-0,95	-0,67	-4,78	-1,22	-0,15	-0,13	-0,02	-0,52	-0,65
Btxn2	-100	1,98	-0,56	-0,65	-0,64	-0,47	-0,92	-0,45	-0,93	-0,73	-56,62	-11,63	-1,13	-1,42	-0,13	-5,44	-7,65
R	-105+	2,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total											-74,77	-19,55	-2,39	-2,30	-0,27	-8,88	-10,71

⁽¹⁾ Média de três repetições da densidade global (ρ); ⁽²⁾ $\varepsilon_{i,w}$ = variação volumétrica; ⁽³⁾ $\tau_{j,w}$ = função transporte de massa; ⁽⁴⁾ $m_{j,fluxo} (g\ cm^{-2})$ = fluxo de massa.

As perdas totais de ferro (em Fe_2O_3) situaram-se na faixa de 33 a 87% e, muito provavelmente, foram resultantes das condições de má drenagem dos solos. Na época das chuvas, o ferro oxidado, Fe(III), passa para a forma reduzida, Fe(II), e neste estado torna-se móvel, podendo ser subtraído do perfil de alteração, conforme o fluxo das águas e as condições de drenagem.

As Bases (Ca, Mg, Na e K) mostraram comportamento diversificado. O Ca e o Na, por serem elementos relacionados aos plagioclásios, que são feldspatos de fácil intemperização, mostraram as perdas mais elevadas. Na forma de óxidos, as perdas variaram na faixa de 46 a 95%. O Mg, diferentemente dos demais elementos, mostrou perdas e ganhos. A zona de ganho foi constatada apenas no saprolito do perfil de Neossolo Regolítico. Nesta zona observou-se o desenvolvimento de argilominerais secundários do grupo da esmectita (Capítulo 10), que devem ter fixado uma parcela de Mg às suas estruturas e/ou ter adsorvido na forma de cátion compensador de cargas. O potássio, apesar da sua alta mobilidade, mostrou perdas na faixa de 28 a 87%, portanto, de modo similar ao SiO_2 . Este fato deve-se à ocorrência do K predominantemente associado aos feldspatos alcalinos que são relativamente resistentes ao intemperismo e restringem a liberação do elemento. A fixação de K nas estruturas dos argilominerais neoformados também pode ter restringido suas perdas.

Conforme resultados do balanço geoquímico, tanto no perfil de Neossolo Regolítico como no de Planossolo, prevalecem perdas absolutas ($\tau_{j,w} < 0$) dos elementos químicos Si, Al e Fe (relacionados às cimentações pedogenéticas) na zona de formação dos horizontes cimentados (Cmn, Btxn1 e Btxn2). Neste caso, os resultados do balanço não permitiram inferir quais os elementos químicos participaram dos processos de cimentação nos solos estudados.

CARACTERIZAÇÃO PEDOGEOQUÍMICA DOS SOLOS

A caracterização pedogeoquímica trata de estabelecer o estado da evolução geoquímica da fração mineral nos solos (MELFI & PEDRO, 1977). Conforme os resultados da análise química total (Quadro 11.1) e do balanço geoquímico de massa (Quadro 11.2), pôde-se inferir que o processo atuante na evolução relaciona-se a uma hidrólise parcial, pois tanto a dessilicificação como as perdas de bases foram incompletos. A dessilicificação (na forma de SiO_2) do perfil de Planossolo variou de 27 a 65% e no de Neossolo Regolítico, de 39 a 84%. Nos dois solos as perdas de CaO variaram de 46 a 93%, as de MgO de 45 a 84%, as de Na_2O de 81 a 95% e as de K_2O de 28 a 87% (Quadro 11.1). Em conformidade com os resultados das análises mineralógicas (Capítulo 10), a alteração

hidrolítica dos perfis estudados, mesmo com perdas de bases incompletas, relaciona-se com uma evolução pedogeoquímica predominantemente no sentido da monossilitização.

SÍNTESE E CONCLUSÕES

O balanço geoquímico de massa revelou perda parcial de sílica e de bases, tanto no perfil de Neossolo Regolítico como no de Planossolo. Nos dois solos as perdas globais de SiO_2 variaram na faixa de 27 a 84%, sendo mais elevadas no perfil de Neossolo Regolítico. As perdas de bases variaram na faixa de 28 a 95%, na ordem $\text{Na}_2\text{O} > \text{CaO} > \text{MgO} > \text{K}_2\text{O}$.

Nos horizontes cimentados (Cmn, Btxn1 e Btxn2) de ambos os solos, constataram-se perdas absolutas ($\tau_{j,w} < 0$), mesmos dos elementos comumente associados às cimentações pedogenéticas, como é o caso de Si, Al e Fe. Portanto, neste caso o balanço geoquímico de massa não permitiu inferir os elementos químicos que participam da composição dos agentes cimentantes.

Conforme evidenciou-se por meio do balanço geoquímico de massa, os solos estudados foram desenvolvidos por processos de alteração hidrolítico incompleto, com evolução da fração-argila formando predominantemente argilominerais do grupo da caulinita. Portanto, em termos pedogeoquímicos a evolução de fração mineral ocorreu predominantemente no sentido da monossilitização.

CAPÍTULO 12 - Agentes cimentantes e horizontes cimentados

Horizontes cimentados por sílica, desenvolvidos em ambientes semi-áridos e áridos, foram encontrados em várias regiões do globo terrestre, como na Austrália, na África e nas Américas.

Na Austrália, foram caracterizados hardpans cimentados por sílica (LITCHFIELD & MARBUTT, 1962; CHARTRES, 1985; SULLIVAN, 1994) e, em certos casos, por aluminossilicatos amorfos, particularmente aqueles desenvolvidos a partir de rochas graníticas (BUTT, 1983; THORNER et al., 1987). Por sua vez, estudos de CHARTRES & NORTON (1994) caracterizaram horizontes considerados como duripãs apresentando, além de Si, proporções significativas de Al na composição dos agentes cimentantes.

Na região oeste dos Estados Unidos, foi verificado que compostos amorfos de sílica, mesmo em pequenas quantidades, constituem os agentes cimentantes de duripãs (FLACH et al., 1973), particularmente nas formas de opala e calcedônia (FLACH et al., 1973).

Na região Nordeste do Brasil tem sido reportado apenas a presença de horizontes cimentados tipo fragipã e/ou duripã em Neossolos Regolíticos e em Planossolos (BRASIL, 1972; EMBRAPA, 1975; OLIVEIRA et al., 1992; OLIVEIRA, 2001).

Neste capítulo são apresentados resultados referentes à natureza de agentes cimentantes e de horizontes cimentados formados em Neossolos Regolíticos e em Planossolos da depressão sertaneja. A caracterização dos agentes cimentantes foi desenvolvida especialmente com base em extrações seletivas de fases amorfas por diferentes métodos.

EXTRAÇÃO DE SILÍCIO, ALUMÍNIO E FERRO PELO TIRON (Si_T , Al_T e Fe_T)

As extrações foram realizadas em seqüências de horizontes dos perfis P2 (Neossolo Regolítico) e P3 (Planossolo), assim como em horizontes selecionadas entre três perfis de solos pertencentes a essas mesmas classes.

Extrações em seqüências de horizontes nos perfis selecionados

As extrações seletivas mostraram três características que merecem ser destacadas. A primeira evidenciou um acúmulo significativo de Si_T , seguido de Al_T e Fe_T , nos horizontes cimentados (P1-Cmn, P3-Btxn1 e P3-Btxn2) (Figura 12.1). A segunda revelou que tanto nos horizontes cimentados com naqueles não-cimentados, os teores de Si_T prevaleceram sobre os de Al_T e Fe_T . A terceira indicou que ocorrem diferenças de contrastes entre os horizontes cimentados e os não-cimentados conforme as classes de solos.

Planossolo. Neste solo (perfil P3), com maior conteúdo de argila e mudança textural abrupta, os teores de Si_T , seguido de Al_T e Fe_T , mostraram um contraste bem acentuado entre os horizontes com cimentação fraca (Btxn1 e Btxn2) e os não-cimentados (Figura 12.1 B). Este resultado leva a crer que os agentes cimentantes guardam uma certa associação com a fração-argila, refletindo, portanto, as mudanças bruscas desta fração, típica dos solos desta classe (Figura 12.1 B).

Neossolo Regolítico. No perfil representativo desta classe (P2), com baixo conteúdo de argila e sem variação textural acentuada, os teores de Si_T , seguido de Al_T e Fe_T , mostraram um contraste relativamente pequeno entre o horizonte cimentado (Cmn) e os não-cimentados. Em adição, os resultados também mostraram que os maiores teores Si_T , seguido de Al_T e Fe_T , foram extraídos em materiais do saprolito (Figura 12.1 A), ficando evidenciado que os maiores teores das extrações não guardam necessariamente uma relação direta com as cimentações, pois o saprolito deste perfil de solo corresponde a uma zona não-cimentada. Este fato reforça a idéia posta anteriormente que outros fatores podem estar envolvidos nos processos de cimentação como é o caso, por exemplo, do conteúdo da fração-argila.

Extrações em horizontes selecionados

Os resultados apresentados na figura 12.2 mostram que praticamente não se pode diferenciar horizontes com cimentação forte daqueles com cimentação fraca com base apenas nos teores elementares das extrações seletivas. Acredita-se que vários fatores devem contribuir para a diferenciação dos graus de cimentação, particularmente a relação do conteúdo agentes cimentantes/fração-argila.

EXTRAÇÃO DE SILÍCIO, ALUMÍNIO E FERRO PELO OXALATO DE AMÔNIO (Si_o , Al_o e Fe_o)

As extrações seletivas por categorias de horizontes selecionados mostraram valores muito baixos, mas sempre com Al_o maior que Fe_o e Si_o . Apesar das diferenças marcantes entre os

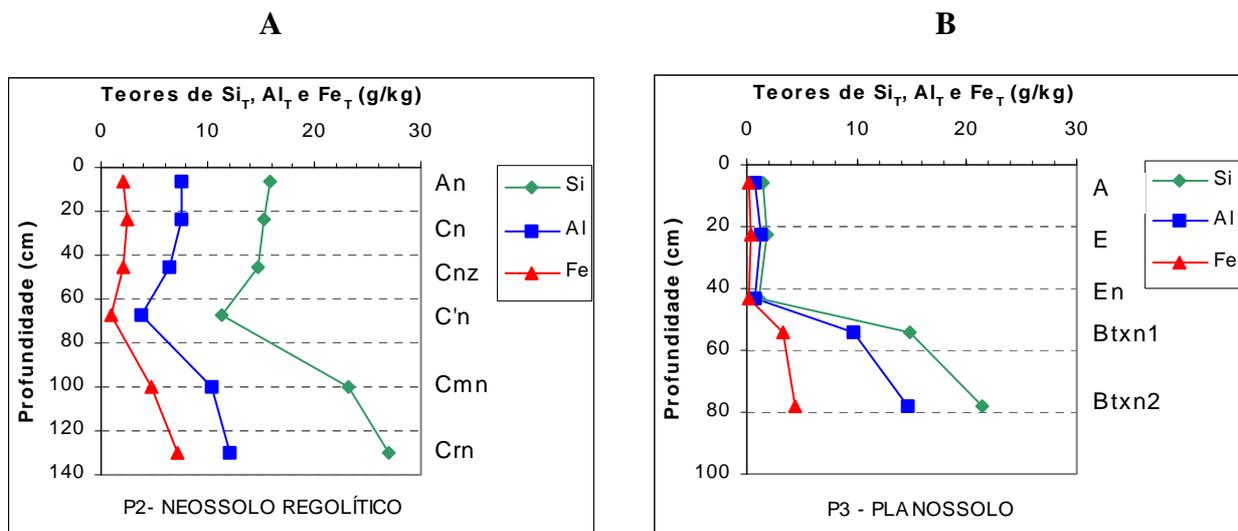


Figura 12.1 – Extração de silício, alumínio e ferro pelo Tiron (Si_T , Al_T e Fe_T) em dois perfis de solo com horizontes cimentados. A: Neossolo Regolítico (perfil P2) apresentando horizonte com cimentação forte (Cmn); B: Planossolo (perfil P3) apresentando horizontes com cimentação fraca (Btxn1 e Btxn2).

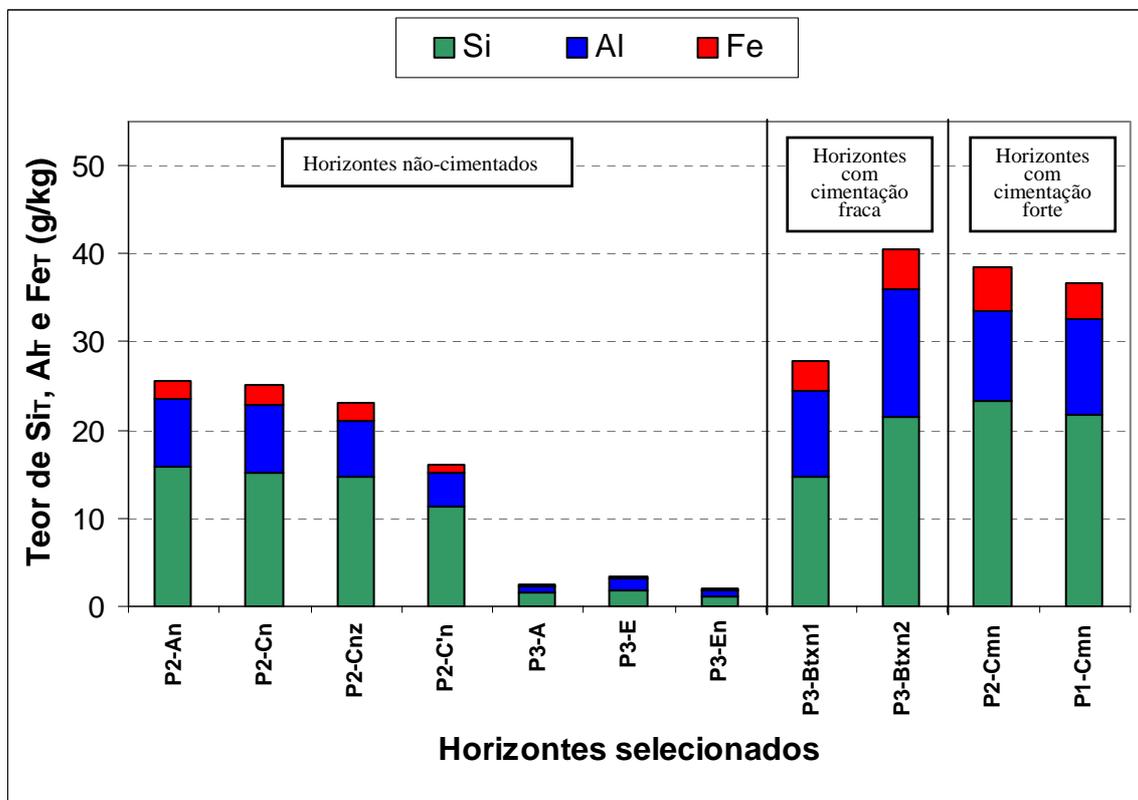


Figura 12.2 – Extração de silício, alumínio e ferro pelo Tiron (Si_T , Al_T e Fe_T) em três classes de horizontes selecionados, isto é, com cimentação forte, fraca e não-cimentados.

horizontes cimentados e os não-cimentados, as extrações mostraram resultados relativamente similares (Figura 12.3), indicando que o método do oxalato de amônio não funciona adequadamente para extração de agentes cimentantes nesses horizontes.

DIFERENÇAS ENTRE OS TEORES DE Si EXTRAÍDOS PELO TIRON E OXALATO DE AMÔNIO

A estimativa de fases opalinas foi obtida em função das diferenças entre os teores de Si extraídos pelos métodos do Tiron e oxalato de amônio ($\Delta Si = Si_T - Si_o$) (KODAMA & ROSS, 1991).

Os resultados mostraram que os valores mais elevados de $\Delta Si = Si_T - Si_o$, entre 14 e 23 g/kg, correspondem aos horizontes cimentados, e os mais baixos, entre 0,99 e 11,20 g/kg, aos horizontes não-cimentados (Figura 12.4). Os valores de ΔSi , entre 14 e 23 g/kg, superiores à margem de erro de $\pm 8,6$ g/kg (KODAMA & WANG, 1989) e relacionados aos horizontes cimentados, sugerem, portanto, a presença de fases opalinas nesses horizontes. Entretanto, outras técnicas analíticas devem ser empregadas para corroborar esta hipótese.

ANÁLISE MICROMORFÓGICA

A caracterização micromorfológica foi desenvolvida buscando-se entender a natureza e o arranjo relacionados dos constituintes, bem como a identificação de possíveis feições pedológicas indicativas de agentes cimentantes.

Nos horizontes com cimentação forte (tipo duripã), as frações grosseiras mostraram-se constituídas essencialmente por quartzo e feldspatos (K-feldspatos e plagioclásios), tendo ainda raros minerais opacos. As frações finas, conforme caracterizou-se por análises de difração de raios-X (DRX), mostraram uma composição predominantemente caulínica, com pequenas quantidades de argilominerais 2:1. A organização estrutural foi observada sempre massiva. A porosidade, tipo cavidade, apresentou-se predominantemente com preenchimento por material iluvial. A organização relacionada dos constituintes foi verificada com dois padrões distribuídos irregularmente. O mais dominante caracterizou-se por apresentar grãos do esqueleto bastante adensados e com pouco plasma envolvendo os grãos, mas sem deixar espaços porosos entre os mesmos. O segundo, pouco expressivo, apresentou-se com grãos do esqueleto menos adensados e totalmente embebidos pela matriz fina. Portanto, este tipo de organização caracterizou, aproximadamente, a textura complexa porfirogrânica-clamídica de BREWER & PAWLUK (1975). As feições pedológicas que se destacaram, embora em pequena quantidade, foram argilões microlaminados ou em camadas, preenchendo total ou parcialmente cavidades, assim como

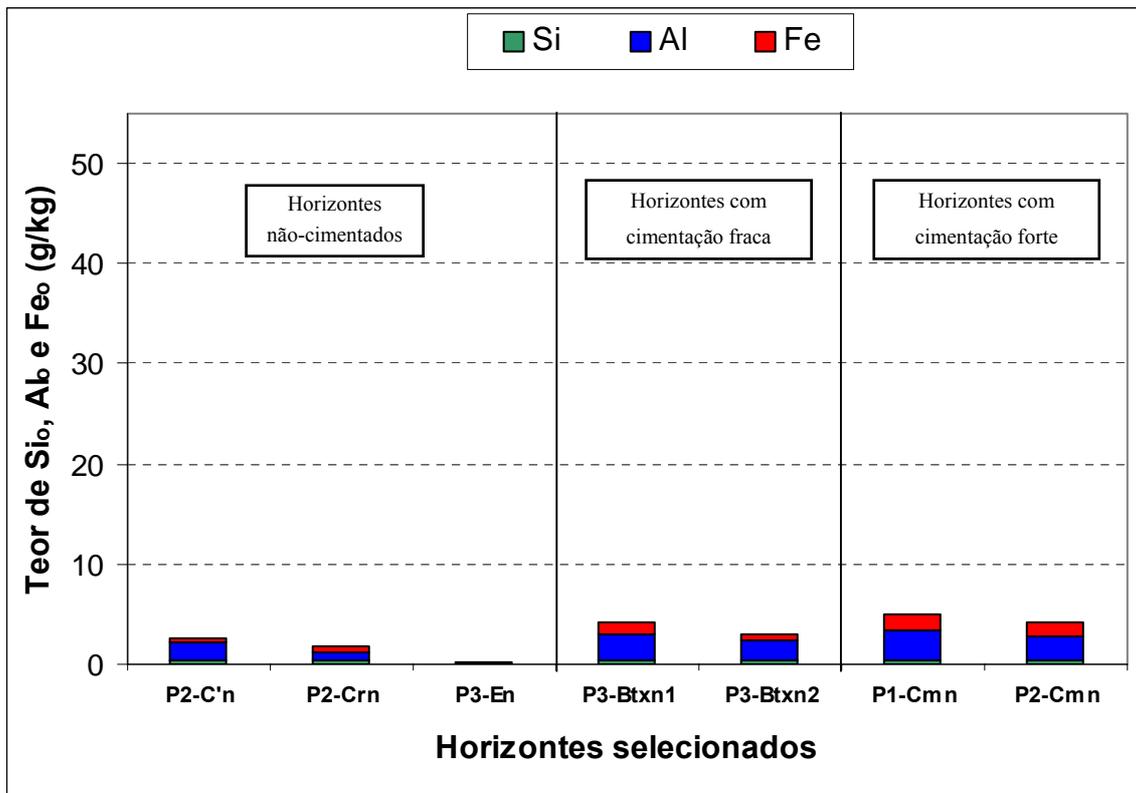


Figura 12.3 – Extração de silício, alumínio e ferro pelo oxalato de amônio (Si_o , Al_o e Fe_o) em três classes de horizontes selecionados, isto é, com cimentação forte, fraca e não-cimentados.

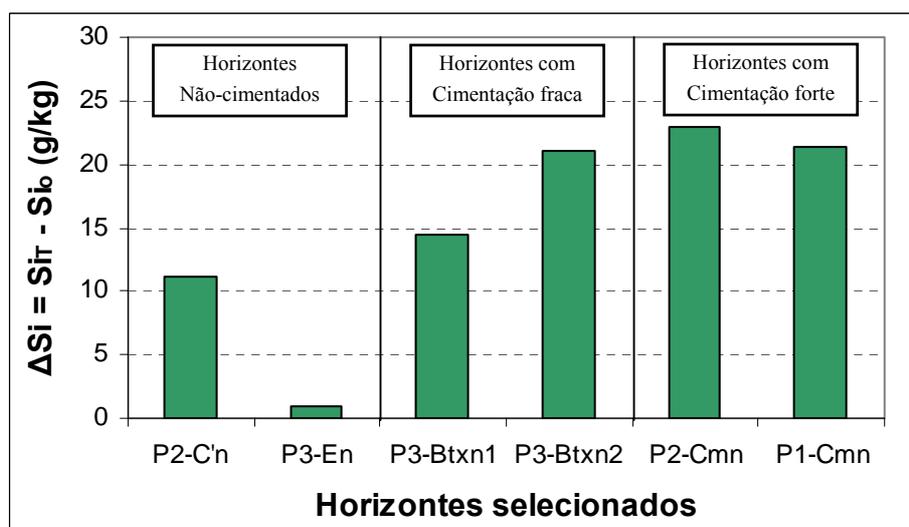


Figura 12.4 – Variações de $\Delta Si = Si_T - Si_o$ em três classes de horizontes selecionados, isto é, com cimentação forte, fraca e não-cimentados.

algumas áreas irregulares isotrópicas, possivelmente relacionada com pedofeições amorfas.

No concernente aos horizontes com cimentação fraca (tipo fragipã), qualitativamente, as frações grosseiras e finas, assim como a microestrutura e a porosidade, mostraram-se similares às dos horizontes com cimentação forte. Quantitativamente, as frações finas foram mais abundantes nos horizontes com cimentação fraca. Já a organização relacionada dos constituintes caracterizou-se por apresentar frações grosseiras totalmente embebidas pela matriz fina e, portanto, tipificando a contextura porfirogrânica de BREWER & PAWLUK (1975). Quanto às feições pedológicas, observaram-se argilãs, ferrãs, glébulas ferruginosas e algumas áreas irregulares isotrópicas com possíveis feições amorfas.

Em termos micromorfológicos, os horizontes com cimentação forte e fraca apresentaram-se com grandes semelhanças (Figura 12.5). Entretanto, foram notadas algumas diferenciações com relação à fração fina e às feições pedológicas. No primeiro caso, a diferenciação foi mais quantitativa, mostrando predomínio das frações finas nos horizontes com cimentação fraca. No segundo, observaram-se glébulas e ferrãs que se destacaram nos horizontes com cimentação fraca.

Um dos objetivos específicos das observações microscópicas foi identificar possíveis feições pedológicas correlacionadas com fases amorfas que atuam como agentes cimentantes. Entretanto, só foi possível verificar algumas áreas isotrópicas associadas com poros e por vezes dispersas irregularmente na matriz mas, pela microscopia ótica, não foi possível identificar a natureza dos materiais constituintes destas feições.

ANÁLISE POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA

A figura 12.6 mostra o mapeamento de Si e Al em áreas selecionadas de uma amostra do horizonte com cimentação forte (P1-Cmn) e indica duas características relevantes. A primeira é a predominância de Si sobre Al na fração fina predominantemente caulinítica, sugerindo a impregnação de agentes cimentantes ricos em Si. A segunda relaciona-se à distribuição elementar com um padrão menos rico em Si na matriz fina dos argilãs, em relação à matriz fina fora dos poros.

Observações realizadas em fraturas frescas (Figura 12.7), com auxílio de microanálises semiquantitativas (EDS), também indicaram excesso de Si sobre Al na fração fina, assim como a presença de feições muito silicosas, mas sempre acompanhadas por pequenas proporções de Al.

Portanto, os resultados obtidos por MEV corroboraram aqueles obtidos pelas extrações seletivas realizadas pelo método do Tiron, que destacou o predomínio de Si sobre Al nas fases amorfas silicosas dissolvidas por este método.

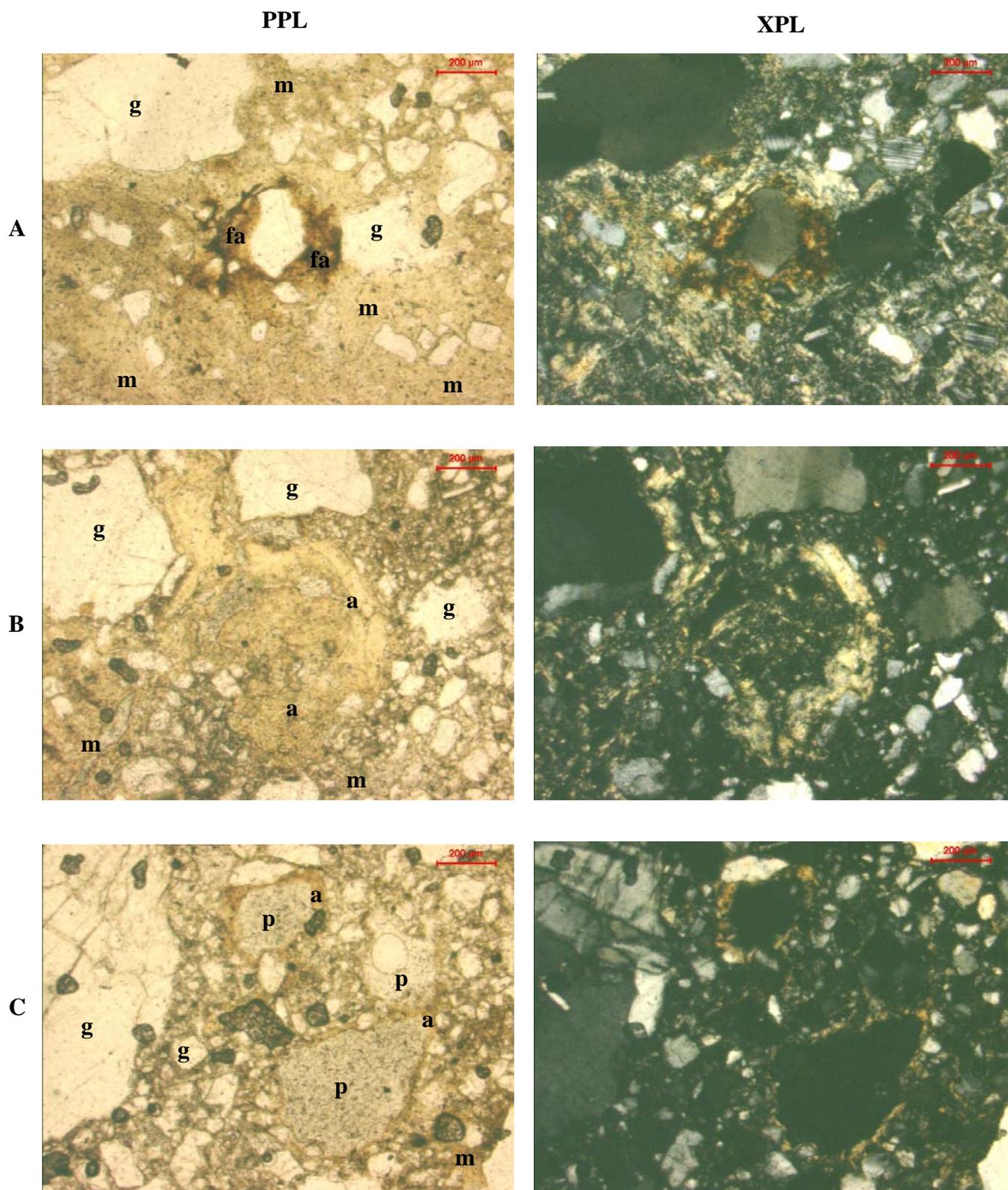


Figura 12.5 – Aspecto massivo de horizontes cimentados selecionados. A: horizonte com cimentação fraca (P3-Btxn2), tipo fragipã, destacando-se áreas com ferri-argilãs; B: horizontes com cimentação forte (P1-Cmn), tipo duripã, destacando-se áreas com argilãs; C: horizonte com cimentação forte (P2-Cmn), tipo duripã, destacando-se áreas de poros com argilãs nas bordas (m: matriz fina; a: argilã; fa: ferri-argilã; p: poro; g: grãos do esqueleto).

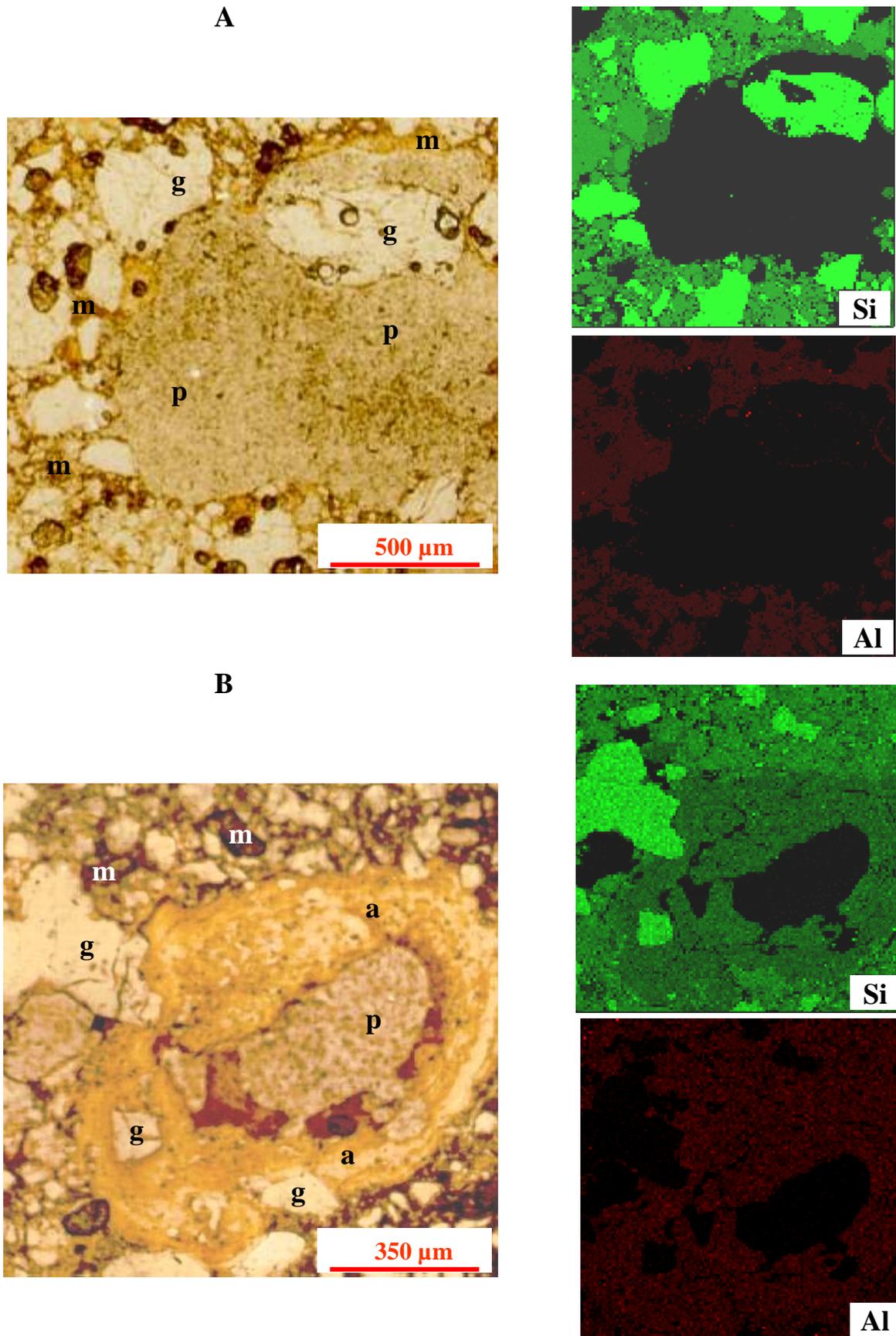


Figura 12.6 – Mapeamento de Si e Al por MEV em áreas selecionadas pela microscopia ótica numa amostra do horizonte com cimentação forte (Cmn) do perfil P1 (Neossolo Regolítico). A: área com pouca matriz fina em torno de um poro sem preenchimento; B: área com pouca matriz fina em torno de um poro preenchido parcialmente por argilãs (m: matriz fina; p: poro; a: argilã; e g: grãos do esqueleto).

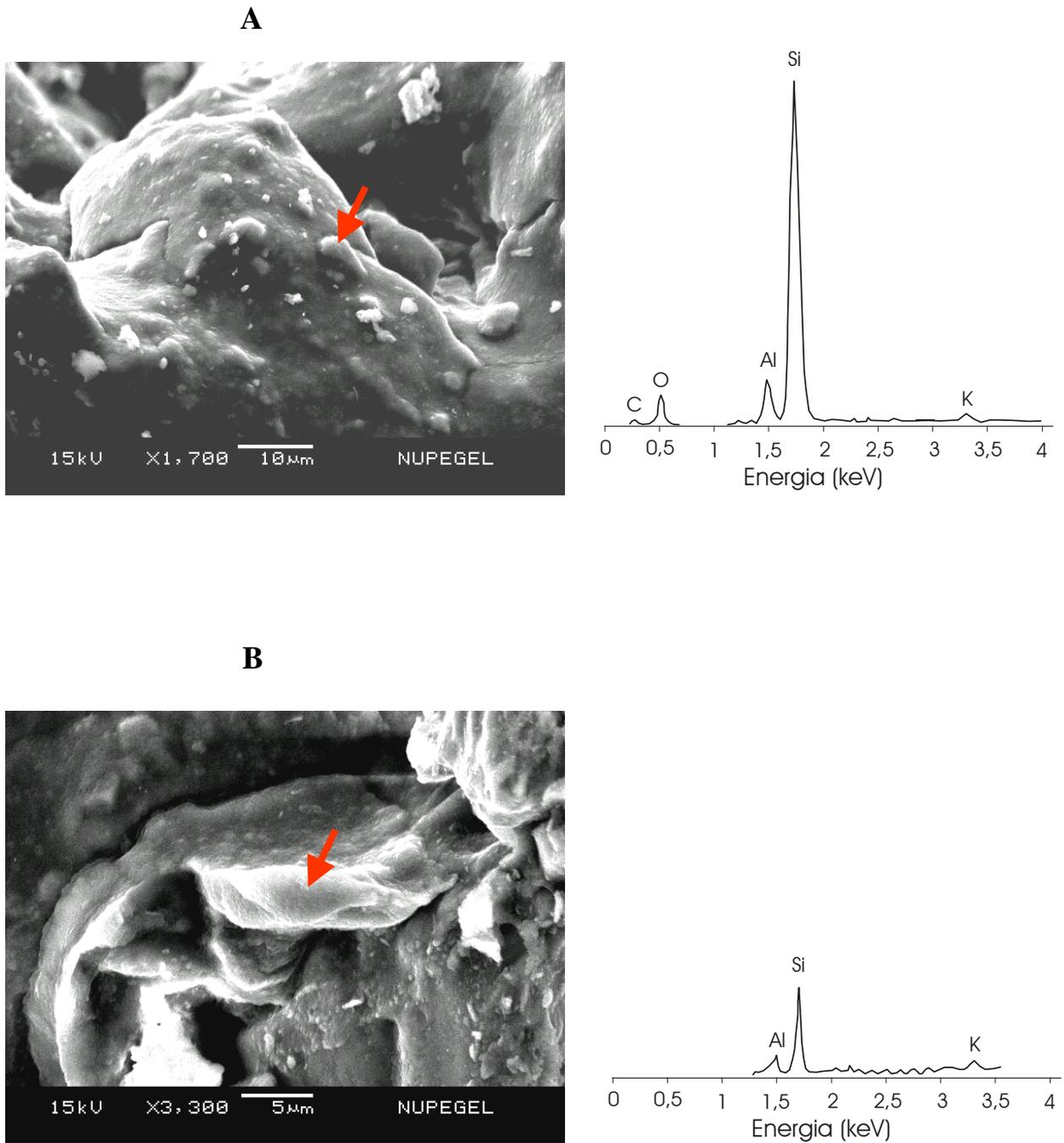


Figura 12.7 – Imagem (MEV) de fraturas frescas do horizonte com cimentação forte (Cmn) do perfil P1 (Neossolo Regolítico). A: área da matriz fina impregnada com agentes cimentantes silicosos acompanhados por baixo conteúdo de alumínio. Nesta área destacam-se plaquetas silicosas (seta) parcialmente embebidas pela matriz fina; B: área da matriz fina cimentada por compostos silicosos com destaque a uma feição muito silicosa. (A seta indica o local analisado, representado pelo espectro à direita).

Por outro lado, microanálises pontuais desenvolvidas com uso de microsonda eletrônica (ME), também confirmaram que existe um certo excesso de Si relacionado à fração-argila, predominantemente caulinitica, separada de horizontes cimentados selecionados. Este excesso foi observado por meio do exame da relação elementar Si/Al (Quadro 12.1) que apresentou valores muito superiores aos esperados para argilas cauliniticas. Na caulinita ideal, com fórmula $Al_2Si_2O_5(OH)_4$, a relação Si/Al é aproximadamente unitária ($Si/Al \cong 1,0$). Entretanto, na fração-argila do horizonte com cimentação forte (P2-Cmn), a relação variou de 1,68 a 2,07, e na do horizonte com cimentação fraca (P3-Btxn1), entre 1,61 e 1,71.

Quadro 12.1 - Microanálises químicas quantitativas, pontuais, obtidas por microsonda eletrônica em amostras selecionadas da fração-argila de horizontes cimentados

Pontos analisados	Elementos (%)										Si/Al
	Si	Al	Mn	Mg	Ca	Na	K	Ti	P	Fe	
Amostra P2-Cmn: horizonte com cimentação forte											
1	22,44	12,94	0,02	1,85	0,06	0,13	0,83	0,67	0,01	4,29	1,73
2	21,27	12,50	0,01	1,72	0,07	0,31	1,03	1,82	0,06	4,16	1,70
3	21,41	12,63	0,00	1,88	0,04	0,19	0,92	0,59	0,01	4,30	1,69
4	23,22	13,18	0,00	1,71	0,10	0,16	0,95	0,31	0,03	3,56	1,76
5	21,18	12,58	0,00	1,76	0,19	0,23	1,30	1,14	0,03	4,53	1,68
6	23,54	11,36	0,00	1,44	0,14	0,62	1,62	0,48	0,02	3,46	2,07
Amostra P3-Btxn1: horizonte com cimentação fraca											
1	23,25	13,98	0,01	0,31	0,02	0,10	4,09	0,80	0,02	3,27	1,66
2	22,94	13,37	0,04	0,39	0,04	0,12	4,06	0,64	0,04	3,22	1,71
3	22,93	14,19	0,02	0,43	0,05	0,19	3,72	0,71	0,02	4,00	1,61
4	24,20	14,28	0,00	0,34	0,04	0,12	3,30	0,47	0,03	3,35	1,69
5	23,33	14,51	0,03	0,39	0,05	0,13	3,02	0,63	0,04	3,79	1,61
6	23,69	14,39	0,01	0,35	0,03	0,09	3,02	0,67	0,02	3,54	1,65

Obs.: O fechamento das análises (em % óxidos) variou entre 81 e 85%, na amostra P2-Cmn, e entre 85 e 89%, na amostra P3-Btxn1.

Tendo como base os teores de Si e Al na caulinita ideal, respectivamente 21,7% e 20,9%, estimaram-se os teores de Si em excesso (Si_{exc}) na fração-argila predominantemente caulinitica, isto é, acima de 21,7%, por meio da expressão:

$$Si_{exc} = 20,9 Si/Al - 21,7$$

sendo Si/Al a relação elementar obtida por meio das microanálises (ou análises) químicas. No horizonte com cimentação forte (P2-Cmn), a média da relação Si/Al foi 1,77, representando um Si_{exc} em torno de 15,3%. Já no horizonte com cimentação fraca (P3-Btxn1), a relação Si/Al

apresentou um valor médio de 1,65, correspondendo a um Si_{exc} em torno de 12,8%. São, portanto, resultados muito superiores às extrações seletivas pelo método do Tiron, com valores de Si_T sempre abaixo de 3%. A principal causa de $Si_{exc} > Si_T$ deve-se ao fato de as microanálises terem sido realizadas na fração-argila que é mais concentrada em fases amorfas silicosas em relação à terra fina. Outras fontes de Si, que também podem ter contribuído para elevar os valores de Si_{exc} , foram pequenas quantidades de argilominerais 2:1 (com relação Si/Al maior que da caulinita) presentes na fração-argila, conforme detectou-se nas análises mineralógicas por DRX (Capítulo 10).

Entretanto, de modo geral as microanálises químicas pontuais serviram de base para confirmar o excesso de Si contido na fração-argila que, pelo menos em parte, está relacionado às fases amorfas que atuam como agentes cimentantes.

NATUREZA DOS AGENTES CIMENTANTES

Os resultados das extrações seletivas, implementados com o apoio da microscopia eletrônica, ainda que restritos a quatro horizontes cimentados (dois com cimentação forte e dois com cimentação fraca), evidenciaram que os compostos amorfos que atuam como agentes cimentantes são de natureza silicosa, embora sempre acompanhados por alumínio. Conforme resultados das extrações pelo método do Tiron, a relação molar Si/Al destes compostos situa-se na faixa de 1,5 a 2,0, indicando uma participação importante do Al nos mesmos.

Apesar do baixo conteúdo de Si extraído pelo método do Tiron (menos de 3%), os valores de $\Delta Si = Si_T - Si_o$, entre 14 e 23 g/kg, foram indicativos da presença de sílica opalina nos horizontes cimentados. Entretanto, as observações por microscopia ótica e eletrônica não permitiram a confirmação da presença dessas fases.

HORIZONTES CIMENTADOS

A formação dos horizontes cimentados, conforme os materiais estudados, deve-se fundamentalmente à presença de frações finas impregnadas com agentes cimentantes silicosos, sempre acompanhados por alumínio, envolvendo e cimentando as frações grosseiras.

Os horizontes com cimentação fraca (Btxn1 e Btxn2), desenvolvidos no perfil de Planossolo, apresentaram um conjunto de características típicas de fragipãs. Entretanto, apenas o Btxn2 com 44 cm atendeu às exigências de espessura mínima (10 cm) (EMBRAPA, 1999) para ser considerado como um horizonte diagnóstico tipo fragipã.

Os horizontes com cimentação forte (Cmn), desenvolvidos nos solos da classe dos Neossolos Regolíticos, são cimentados por compostos silicosos e preencheram basicamente

todos os requisitos para serem enquadrados como duripãs. Entretanto, apesar dos valores de $\Delta Si = Si_T - Si_o$ terem sido indicativos da presença de fases opalinas nesses horizontes, as observações por microscopia ótica e eletrônica não permitiram confirmar a presença dessas fases.

Portanto, o detalhe que precisa ser considerado é a natureza dos agentes cimentantes principais. Conforme foi discutido anteriormente, trata-se de compostos amorfos silicosos, sempre acompanhados por alumínio. Como as características requeridas para duripã envolvem, não apenas acúmulo de Si na forma de opala, mas também noutras formas (não especificadas com detalhes) (UNITED STATES, 1999), então os horizontes com cimentação forte deste estudo enquadram-se como duripãs. Entretanto, vê-se a necessidade de ampliar adequadamente a definição deste tipo de horizonte, de modo a abranger cimentações causadas por Si na forma de opala e por outros compostos silicosos acompanhados por alumínio, como os do presente estudo.

No concernente aos agentes cimentantes, observou-se que os horizontes com cimentação forte (Cmn) deste estudo guardam algumas relações com os hardpans e silcretos cimentados por aluminossilicatos amorfos silicosos desenvolvidos a partir de rochas graníticas na região oeste da Austrália (BUTT, 1983). Já os horizontes com cimentação fraca formados no perfil de Planossolo, possivelmente apresentam algumas relações com os fragipãs da região sudeste dos Estados Unidos (KARATHANASIS, 1989), cujos agentes cimentantes foram deduzidos como aluminossilicatos amorfos silicosos.

SÍNTESE E CONCLUSÕES

Embora a quantidade de horizontes cimentados estudados tenha sido relativamente pequena (dois com cimentação forte e dois com cimentação fraca), os resultados evidenciaram que os agentes cimentantes são compostos amorfos silicosos, sempre acompanhados por alumínio. A composição silicosa ficou evidenciada pelo fato dos compostos terem sido extraídos adequadamente pelo método do Tiron, que funciona em pH alcalino, mas não acontecendo o mesmo com oxalato de amônio que funciona em pH ácido.

O mapeamento de Si e Al por MEV, em áreas selecionadas de um horizonte com cimentação forte (P1-Cmn), mostrou um amplo predomínio de Si sobre Al na fração-fina predominantemente caulínica. Da mesma forma, microanálises quantitativas pontuais realizadas por meio de microsonda eletrônica também indicaram o predomínio de Si sobre Al na fração-argila caulínica, confirmando a presença de agentes cimentantes silicosos nesta fração.

Os horizontes com cimentação fraca do perfil de Planossolo (Btxn1 e Btxn2) apresentaram características típicas de fragipã, mas só atendeu ao requisito de espessura mínima (10 cm), para ser diagnóstico, o horizonte Btxn2.

Os horizontes com cimentação forte (Cmn), desenvolvidos nos solos da classe dos Neossolos Regolíticos, apresentaram todos os requisitos de horizontes tipo duripã. No que concerne aos agentes cimentantes silicosos, os valores de $\Delta Si = Si_T - Si_o$, entre 14 e 23 g/kg, foram indicativos da presença de fases opalinas nesses horizontes, embora as observações por microscopia ótica e eletrônica não tenham permitido a confirmação dessas fases. Logo, por serem horizontes cimentados por compostos silicosos, foram considerados como duripãs.

Houve evidências de que os graus de cimentação (forte e fraco), entre várias causas, podem estar relacionadas às proporções agentes cimentantes/frações finas. Entretanto, a pequena quantidade de observações não permitiu estabelecer adequadamente as relações entre estas proporções.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nestas considerações finais pretendeu-se integrar as informações, considerando as questões levantadas no início dos trabalhos, os objetivos almejados, bem como os principais resultados obtidos ao longo da pesquisa.

No início dos estudos, as questões formuladas foram as seguintes: (1) os contrastes de condições climáticas (zona úmida e seca) e de material de origem (geologia) que condicionam a formação de diferentes solos, seriam fatores diferenciadores da composição dos horizontes cimentados e dos agentes cimentantes? (2) O silício, o alumínio e o ferro, principalmente em fases amorfas, seriam os principais elementos químicos envolvidos na composição dos agentes cimentantes? (3) Estes elementos variariam em proporção em função do clima (quantidade e distribuição de chuvas), do material de origem e da drenagem local? (4) Em cada ambiente climático e geológico, o grau de cimentação e/ou endurecimento variaria dentro e entre solos, sem modificações na natureza dos agentes cimentantes?

Os resultados mostraram que a composição dos agentes cimentantes principais e a dos horizontes cimentados de parecem ficar subordinada às diferenças climáticas. Nos tabuleiros costeiros, os agentes cimentantes principais são compostos minerais aluminosos, identificados como aluminossilicatos amorfos hidratados, e desempenhando papel secundário ocorrem complexos organometálicos com altos teores de alumínio. Por outro lado, na depressão sertaneja, os resultados indicaram que os agentes cimentantes principais são compostos silicosos, embora sempre acompanhados por alumínio.

Independentemente dos tipos de solos e das variações de condições de drenagem, a composição dos agentes cimentantes minerais mostrou-se relativamente similar em cada ambiente climático. Constatou-se que o Si e o Al, variando as proporções conforme o clima, constituem os elementos essenciais da composição dos agentes cimentantes minerais. O Fe, por sua vez, só demonstrou importância como agente cimentante quando acumulado em finas camadas ferruginosas. Nestas camadas, o acúmulo do Fe foi verificado com altas proporções em fases minerais amorfas e em associação com complexos organometálicos.

Ressalta-se que não foram questionadas, inicialmente, as razões que diferenciariam os horizontes com cimentação forte daqueles com cimentação fraca. Porém, no decorrer das

investigações, observou-se que as proporções entre o conteúdo de frações finas e os teores de agentes cimentantes são fatores determinantes nessas diferenciações. Entretanto, estas proporções só foram observadas com mais detalhes nos horizontes cimentados desenvolvidos nos tabuleiros costeiros. Neste ambiente foi verificado também que o ferro, apesar de não ser essencial na composição dos agentes cimentantes principais, denotou interferir no grau das cimentações. Em geral, os horizontes com maior conteúdo de ferro em fases amorfas apresentaram menor grau de cimentação.

No que se refere aos objetivos iniciais, pretendeu-se esclarecer a natureza de agentes cimentantes e dos horizontes cimentados considerados como fragipãs e duripãs, desenvolvidos em solos do Nordeste do Brasil, com ênfase na região dos tabuleiros costeiros. Visou-se também inferir processos pedogenéticos relacionados à formação dos horizontes cimentados.

No que diz respeito aos agentes cimentantes, foi verificado que compostos aluminosos identificados como aluminossilicatos amorfos hidratados e, secundariamente, complexos organometálicos, são os agentes cimentantes dos horizontes com cimentação forte ou fraca desenvolvidos em Argissolos e Espodossolos no ambiente das suaves depressões dos tabuleiros costeiros. Por outro lado, compostos silicosos, embora sempre acompanhados por alumínio, foram identificados como os agentes cimentantes principais dos horizontes cimentados desenvolvidos em Neossolos Regolíticos e Planossolos da depressão sertaneja.

Com relação aos horizontes com cimentação fraca, considerados como fragipãs, e aqueles com cimentação forte, considerados como duripãs, os resultados obtidos permitiram estabelecer algumas considerações:

- ♦ Na zona úmida dos tabuleiros costeiros, os horizontes com cimentação fraca apresentaram um conjunto de características que permitiram enquadrá-los como fragipãs. Por outro lado, os horizontes com cimentação forte, inicialmente considerados como duripãs, devido à natureza dos agentes cimentantes, foram enquadrados como horizonte dúrico ou como ortstein. Os de alta concentração ferruginosa, em finas camadas e associados com complexos organometálicos, foram considerados como horizonte plácico. Ressalta-se que em função da natureza dos agentes cimentantes principais, nenhum horizonte com cimentação forte, tradicionalmente considerado como duripã, pôde ser enquadrado nesta categoria de horizontes. Portanto, parece ser inadequado o uso tradicional do termo duripã para expressar horizontes cimentados essencialmente por compostos aluminosos.

- ♦ Na depressão sertaneja, dois horizontes com cimentação fraca, desenvolvidos em um perfil de Planossolo, mostraram características típicas de fragipãs, mas em função da espessura apenas um deles foi considerado como horizonte diagnóstico tipo fragipã. Por sua vez, os horizontes com cimentação forte, desenvolvidos em Neossolos Regolíticos, apresentaram um

conjunto de características, em especial a natureza silicosa dos agentes cimentantes principais, que permitiram considerá-los como duripãs.

Com relação à formação dos horizontes cimentados, foi dada ênfase ao ambiente dos tabuleiros costeiros, onde foram planejados e obtidos dados em maior quantidade. Neste ambiente, constatou-se que a podzolização moderada, o transporte mecânico de argila e condições hidromórficas, ainda que temporárias, foram os mecanismos mais importantes relacionados à pedogênese dos horizontes cimentados. Na depressão sertaneja, os dados obtidos foram muito limitados e não permitiram o estabelecimento de processos pedogenéticos envolvidos na formação dos horizontes cimentados. Entretanto, inferiu-se que os agentes cimentantes devem ter sido formados como resultado da alteração de feldspatos, e que, em função das proporções frações finas/agentes cimentantes, envolvendo os grãos da fração grosseira, desenvolveram-se os diferentes tipos de horizontes cimentados, com cimentação forte ou fraca.

BIBLIOGRAFIA

- AJMONE-MARSAN, F.; PAGLIAI, M.; PINI, R. Identification and Properties of Fragipan Soils in the Piemonte Region of Italy. *Soil Science Society of American Journal*, v. 58, n. 3, p. 891-900, 1994.
- ALLEN, B. L.; HAJEK, B. F. Mineral occurrence in soil environments. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Eds.) *Minerals in soil environments*. 2.ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p.199-278. (SSSA Book Series, 1).
- ALLEY, N. F. Age and origin of laterite and silcrete duricrusts and their relationship to episodic tectonism in the mid-north of South Australia. *Journal of the Geological Society of Australia*, v. 24, p. 107-116, 1977.
- ANDERSON, H. A.; BERROW, M. L.; FARMER, V. C.; HEPBURN, A.; RUSSELL, J. D.; WALKER, A. D. A reassessment of podzol formation processes. *Journal of Soil Science*, v. 33, p. 125-136, 1982.
- ANDRADE, S.; HYPOLITO, R.; ULBRICH, H.G. J.; SILVA, M.L. Iron (II) oxide determination in rocks and minerals. *Chemical Geology*, v. 182, p. 85-89, 2002.
- ARIAS, M.; BARRAL, M.T.; DIAZ-FIERROS, F. Effects of associations between humic acids and iron or aluminium on the flocculation and aggregation of kaolin and quartz. *European Journal of Soil Science*, v. 74, n. 3, p. 335-343, 1996.
- ASSALLAY, A. M.; JEFFERSON, I.; ROGERS, C. D. F.; SMALLEY, I. J. Fragipan formation in loess soils: development of the Bryant hydroconsolidation hypothesis. *Geoderma*, v. 83, p. 1-16, 1998.
- BEAUVAIS, A.; ROQUIN, C. Petrological differentiation patterns and geomorphic distribution of ferricretes in Central Africa. *Geoderma*, v. 73, n. 1-2, p. 63-82, 1996.
- BENNETT, P. C. Quartz dissolution in organic-rich aqueous system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 55, v. 7, p. 1781-1797, 1991.
- BENNETT, P. C.; MELCER, M. E.; SIEGEL, D. I.; HASSETT, I. P. The dissolution of quartz in dilute aqueous solutions of organic acids at 25 °C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 57, p. 1521-1530, 1988.
- BETTENAY, E.; CHURCHWARD, H. M. Morphology and stratigraphic relationship of the Wiluna Hardpan in arid western Australia. *Journal of the Geological Society of Australia*, v. 21, p. 73-80, 1974.
- BIRKELAND, P.W. *Soil and geomorphology*. 3.ed. New York: Oxford University Press. 1999. 430 p.
- BLANK, R. R.; COCHRAN, B.; FOSBERG, M. A. Duripans of Southwestern Idaho: polygenesis during the Quaternary Deduced through Micromorphology. *Soil Science Society of American Journal*, v. 62, n. 3, p. 701-709, 1998.
- BLANK, R. R.; FOSBERG, M. A. Duripans of the Owyhee Plateau region of Idaho: genesis of opal and sepiolite. *Soil Science*, v. 152, p. 116-133, 1991a.
- BLANK, R. R.; FOSBERG, M. A. Duripans of Idaho, U.S.A.: in situ alteration of eolian dust (loess) to an opal-A/X-ray amorphous phase. *Geoderma*, v. 48, p. 131-149, 1991b.

- BONNEAU, M.; SOUCHIER, B. *Pédologie*, 2: constituants et propriétés du sol. Paris: Masson. 1994. 665 p.
- BOULET, R.; FRITSCH, E.; FILIZOLA, H. F.; ARAÚJO FILHO, J. C.; LEPRUN, J. C.; SILVA, F. B. R.; BALAN, E. Fragipãs, duripãs, e bandas ferruginosas dos tabuleiros costeiros do nordeste do Brasil: distribuição, mineralogia, gênese. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13., Águas de Lindóia. 1996. *Trabalhos*. Piracicaba: Sbscs/Slcs, 1996. CD-ROM.
- BOULET, R.; FRITSCH, E.; FILIZOLA, H. F.; ARAÚJO FILHO, J. C.; LEPRUN, J. C.; BARRETTO, F.; BALAN, E.; TESSIER, D. Iron bands, fragipans and duripans in the northeastern plateaus of Brazil - properties and genesis. *Canadian Journal of Soil Science*, v. 78, n. 3, p. 519-530, 1998.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. *Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco*. Recife: DNPEA 2v. 1972. (Boletim Técnico, 26; SUDENE. DRN. Série Pedologia, 14).
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria-Geral. Projeto Radambrasil. *Folhas SC 24/25 Aracaju/Recife*: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: MME, 1983. 856 p. il., 7 mapas. (Levantamento de Recursos Naturais, 30).
- BRAVARD, S.; RIGHI, D. Geochemical differences in an Oxisol-Spodosol toposequence of Amazonia, Brazil. *Geoderma*, v. 44, p. 29-42, 1989.
- BREWER, R. The basis of interpretation of soil micromorphological data. *Geoderma*, v. 8, p. 81-94. 1972.
- BREWER, R. *Fabric and mineral analysis of soils*. New York: Robert E. Krieger, 1976. 482 p.
- BREWER, R.; PAWLUK, S. Investigation of some soils developed in Hummocks of the canadian sub-artic and southern-artic regions 1. Morphology and micromorphology. *Canadian Journal of Soil Science*, v. 55, p. 301-319, 1975.
- BRIMHALL, G. H.; CRISTOPHER, J. L.; FORD, C.; BRATT, J.; TAYLOR, G.; WARIN, O. Quantitative geochemical approach to pedogenesis: importance of parent material reduction, volumetric expansion, and eolian influx in laterization. *Geoderma*, v. 51, p. 51-91, 1991.
- BRIMHALL, G. H.; DIETRICH, W. E. Constitutive mass balance relations between chemical composition, volume, density, porosity, and strain in metasomatic hydrochemical systems: results on weathering and pedogenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 51, p. 567-587. 1987.
- BULLOCK, P.; FEDEROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T. *Handbook for soil thin section description*. England: Waine Research Publ., 1985. 152 p.
- BUOL, S. W.; HOLE, F. D.; McCRAKEN, R. J.; SOUTHARD, R. J. *Soil genesis and classification*. 4.ed. Ames: Iowa State University Press, 1997. 360 p.
- BUTT, C. R. M. Aluminosilicate cementation of saprolites, grits and silcretes in Western Australia. *Journal of the Geological Society of Australia*, v. 30, n. 1-2, p. 179-186, 1983.
- CARNICELLI, S.; FERRARI, G. A.; PAGLIAI, M. Micromorphology and soil management. In: RINGROSE-VOASE, A. J.; HUMPHREYS, G. S. (Eds.) *Soil micromorphology: studies in management and genesis*. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 677-686. (Developments in Soil Science, 22)
- CARVALHO, A.; BOULANGÉ, B.; MELFI, A.J.; LUCAS, Y. (Eds.) *Brazilian bauxites*. São Paulo: USP/FAPESP/ORSTOM, 1997. 331 p.
- CARY, L. W.; JONG, B. H. W. S.; DIBBLE Jr, W. E. A ²⁹Si NMR study of silica species in dilute aqueous solution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 46, n. 7, p. 1317-1320, 1982.

- CHADWICK, O. A.; BRIMHALL, G. H.; HENDRICKS, D. M. From a black to a gray box - a mass balance interpretation of pedogenesis. *Geomorphology*, v. 3, p. 369-390, 1990.
- CHADWICK, O. A.; HENDRICKS, D. M.; NETTLETON, W. D. Silica in duric soils: I. A depositional model. *Soil Science Society of American Journal*, v. 51, n. 4, p. 975-982, 1987a.
- CHADWICK, O. A.; HENDRICKS, D. M.; NETTLETON, W. D. Silica in duric soils: II. Mineralogy. *Soil Science Society of American Journal*, v. 51, n. 4, p. 982-985, 1987b.
- CHADWICK, O. A.; HENDRICKS, D. M.; NETTLETON, W. D. Silicification of Holocene Soils in Northern Monitor Valley, Nevada. *Soil Science Society of American Journal*, v. 53, p. 158-164, 1989.
- CHADWICK, O. A.; NETTLETON, W. D. Micromorphologic evidence of adhesive and cohesive forces in soil cementation. In: DOUGLAS, L. A. (Ed.). *Soils micromorphology: a basic and applied science*. Amsterdam: Elsevier, 1990. p. 207-212,
- CHARTRES, C. J. A preliminary investigation of hardpan horizons in North-West New South Wales. *Australian Journal of Soil Research*, v. 23, p. 325-337, 1985.
- CHARTRES, C. J.; FITZGERALD, J. D. Properties of siliceous cements in some australian solis and saprolites. In: DOUGLAS, L. A. (Ed.) *Soils micromorphology: a basic and applied science*. Amsterdam: Elsevier, 1990. p.199-205.
- CHARTRES, C. J.; NORTON, L. D. Micromorphological and chemical properties of Australian soils with hardsetting and duric horizons. *Micromorphology and soil management*. In: RINGROSE-VOASE, A. J.; HUMPHREYS, G. S. (Eds) *Soil micromorphology: studies in management and genesis*. Amsterdam: Elsevier, 1994, p.825-834. (Developments in Soil Science, 22).
- CHEN, X.Y. Pedogenic gypcrete formation in arid central Australia. *Geoderma*, v. 77, n. 1, p. 39-61, 1997.
- CHILDS, C. W.; PARFITT, R. L.; LEE, R. Movement of aluminium as an inorganic complex in some podzolized soils, New Zealand. *Geoderma*, v. 29, n. 2, p.139-155, 1983.
- CHIQUET, A.; COLIN, F.; HAMELIN, B.; MICHARD, A.; NAHON, D. Chemical mass balance of calcrete genesis on the Toledo granite (Spain). *Chemical Geology*, v. 170, p. 19-35, 2000.
- DANTAS, J. R. A. *Mapa geológico do Estado de Pernambuco*. Recife: DNPM, 1980, 2 mapas, 112 p. il.
- DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. *Introduction to rock-forming minerals*. 2.ed. China: Longman Scientific & Technical, 1992. 696 p.
- DIXON, J. B. Kaolin and serpentine group minerals. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Eds.) *Minerals in soil environments*. 2.ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 467-525. (SSSA Book Series, 1).
- DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Eds.) *Minerals in soil environments*. 2.ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989. 1244 p. (SSSA Book Series, 1).
- DOUGLAS, L. A.; THOMPSON, M. L. (Eds.) *Soil micromorphology and soil classification*. Madison: Soil Science Society of America, 1985. 216 p. (SSSA Special Publication, 15).
- DOVE, P. M.; RIMSTIDT, J. D. Silica-water interactins. *Reviews in Mineralogy*, v. 29, p. 259-308, 1994.
- DREES, L. R.; WILDING, L. P.; SMECK, N. E.; SENKAYI, A. L. Silica in soils: quartz and disordered silica polymorphs. In: DIXON, J. B.; WEED, S.B. (Eds.) *Minerals in soil environments*. 2.ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 913-974. (SSSA Book Series, 1).

- DUCHAUFOR, P. *Pédologie, 1: pédogenèse et classificasson*. 2.ed. Paris: Masson, 1983. 491 p.
- DUNCAN, M. M.; FRANZMEIER, D. P. Role of Free Silicon, Aluminum, and Iron in Fragipan Formation. *Soil Science Society of American Journal*, v. 63, n. 4, p. 923-929, 1999.
- DURY, G. H. Duricrusted residuals on the barrier and cobar pediplains of new South Wales. *Journal of the Geological Society of Australia*, v. 13, p. 299-307, 1966.
- EASH, N. S.; SANDOR, J. A. Soil chronosequence and geomorphology in semiarid valley in the Andes of southern Peru. *Geoderma*, v. 65, p. 59-79, 1995.
- EGHBAL, M. K.; SOUTHARD, R. J. Stratigraphy and genesis of Durorthids and Haplargids on disesteed alluvial fans, western Mojave Desert, California. *Geoderma*, v. 59, p.151-174, 1993.
- EGLI, M.; FITZE, P. Formulation of pedologic mass balance based on immobile elements: a revision. *Soil Science*, v. 165, p. 437-443, 2000.
- EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. *Definição e notação de horizontes e camadas do solo*. 2.ed. rev. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1988. 54p. (EMBRAPA-SNLCS. Documentos, 3).
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos de análise de Solo*. 2 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. 212 p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília: Embrapa Produção de Informação, 1999. 412 p.
- EMBRAPA. Centro de Pesquisas Pedológicas. *Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado de Alagoas*. Recife: EMBRAPA, 1975. 532 p. (EMBRAPA-CPP. Boletim Técnico, 35; SUDENE. Série Recursos de Solos, 5).
- EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. *Definição e notação de horizontes e camadas do solo*. 2.ed. rev. atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1988. 54 p. (Embrapa-SNLCS. Documentos, 3).
- FANNING, D. S.; FANNING, M. C. B. *Soil: morphology, genesis and classification*. New York: J. Wiley. 1989, 395 p.
- FAO. *World Reference Base for Soil Resources: draft*. Paris: Unesco, 1994. 161 p
- FARMER, V. C.; FRASER, A. R. Chemical and colloidal stability of sols in the Al_2O_3 - Fe_2O_3 - SiO_2 - H_2O system: their role in podzolization. *Journal of Soil Science*, v. 33, p. 737-742, 1982.
- FARMER, V. C.; FRASER, A. R.; ROBERTSON, L.; SLEEMAN, J. R. Proto-imogolite allophane in podzol concretion in Australia: possible relationship to aluminous ferralitic (lateritic) cementation. *Journal of Soil Science*, v. 35, p. 333-340, 1984.
- FARMER, V. C.; McHARDY, W. J.; ROBERTSON, L.; WALKER, A; WILSON, M. J. Micromorphology and sub-microscopy of allophane and imogolite in a podzol Bs horizon: evidence for translocation and origin. *Journal of Soil Science*. v. 36, p. 87-95, 1985.
- FARMER, V. C.; RUSSELL, J. D.; BERROW, M. L. Imogolite and proto-imogolite allophane in spodic horizons: evidence for a mobile aluminium silicate complex in podzol formation. *Journal of Soil Science*, v. 31, p. 673-684, 1980.
- FAURE, G. *Principles and applications of geochemistry: a comprehensive textbook for geology students*. 2.ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998, 600 p.
- FILIZOLA, H. F.; LAMOTTE, M.; FRITSCH, E.; BOULET, R.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SILVA, F. B. R.; LEPRUN, J. C. Os fragipãs e duripãs das depressões dos tabuleiros costeiros do Nordeste brasileiro: uma proposta de evolução. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 25, p. 947-963, 2001.

- FLACH, K. W.; NETTLETON, W. D.; GILE, L. H.; CADY, J. G. Pedocementation: induration by silica, carbonates, and sesquioxides in the quaternary. *Soil Science*, v. 107, n. 6, p. 442-453, 1969.
- FLACH, K.W.; NETTLETON, W. D.; NELSON, R. E. The micromorphology of silica-cemented soil horizons in Western North America. In: RUTHERFORD, G. K. (Ed.) *Soil microscopy*. Kingston: Limestone Press, 1973. p. 714-729.
- FRANZMEIER, D. P.; CHARTRES, C. J.; WOOD, J. T. Hardsetting Soils in Southeast Australia: Landscape and Profile Processes. *Soil Science Society of American Journal*, v. 60, p. 1178-1187, 1996.
- FRANZMEIER, D. P.; NORTON, L. D.; STEINHADT, G. C. Fragipan formation in loess of the Midwestern United States. In: SMECK, N. E.; CIOLKOSZ, E. J. (Eds.). *Fragipans: their occurrence, classification, and genesis*. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 69-97. (SSSA Special Publication, 24).
- GERARD, J. (Weathering of granitic formation: environment and clay mineral formation. In: ROBINSON, D. A.; WILLIAMS, R. B. G. (Eds.) *Rock weathering and landform evolution*. New York: John Wiley & Sons, 1994. p.3-20.
- HABECKER, M. A.; McSWEENEY, K.; MADISON, F. W. Identification and Genesis of Fragipans in Ochrepts of North Central Wisconsin. *Soil Science Society of American Journal*, v. 54, p. 139-146, 1990.
- HOLLINGSWORTH, I. D.; FITZPATRICK, R. W. Nature and origin of duripan in a Durixeralf-Duraqualf toposequence: micromorphological aspects. Micromorphology and soil management. In: RINGROSE-VOASE, A. J.; HUMPHREYS, G. S. (Eds) *Soil micromorphology: studies in management and genesis*. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 835-844. (Developments in Soil Science, 22).
- HSU, P. H. Aluminium Hydroxides and Oxidroxides. In: DIXON, J. B. e WEED, S. B. (Eds.) *Minerals in soil environments*. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p.331-378. (SSSA Book Series, 1).
- HUANG, P. M. Ionic factors affecting the formation of short-range ordered aluminosilicates. *Soil Science Society of American Journal*, v. 55, p. 1172-1180, 1991.
- HUNDNAL, W. H.; WILLIAMS, D. Fragipan distribution in the South Central States. In: SMECK, N. E.; CIOLKOSZ, E. J. (Eds.) *Fragipans: their occurrence, classification, and genesis*. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 43-68. (SSSA Special Publication, 24).
- JACOMINE, P. K. T. *Fragipans em solos de "tabuleiros": características , gênese e implicações no uso agrícola*. 1974. 83 f. Tese (Livre-Docência) - Escola Superior de Agricultura, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.
- JAMES, H.R.; RANSOM, M.D.; MILES, R.J. Fragipan Genesis in Polygenetic Soils on the Springfield Plateau of Missouri. *Soil Science Society of American Journal*, v. 59, p. 151-160, 1995.
- JANASI, V. A.; ANDRADE, S.; ULBRICH, H.H. G. J. A correção do *drift* instrumental em ICP-AES com espectrômetro seqüencial e a análise de elementos maiores, menores e traços em rochas. *Boletim IG-USP, Série Científica*, v. 26:45-58, 1995.
- JONES, B.; ROSEN, M.R.; RENAUT, R. W. Silica cemented beachrock from lake Taupo, north island, New Zeland. *Journal of Sedimentary Research*, v. 67, p. 805-814, 1997.
- JONES, L. H. P.; HANDRECK, K. A. Effects of iron and aluminium oxides on silica in solution in soils. *Nature*, v. 198, n. p. 852-853, 1963.

- JONES, L. H. P.; HANDRECK, K. A. Silica in soils, plants, and animals. *Advances in Agronomy*, v. 19, p. 107-149, 1967.
- JONGMANS, A.G.; DENAIX, L.; VAN OORT, F.; NIEUWENHUYSE, A. Induration of C Horizons by Allophane and Imogolite in Costa Rican Volcanic Soils. *Soil Science Society of American Journal*, v. 64, p. 254-262, 2000.
- KARATHANASIS, A. D. Solution chemistry of fragipans: thermodynamic approach to understanding fragipan formation. In: SMECK, N. E.; CIOLKOSZ, E. J. (Eds.) *Fragipans: their occurrence, classification, and genesis*. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p.113-139. (SSSA Special Publication, 24).
- KASTNER, M. K.; KEENE, J. B.; GIESKES, J. M. Diagenesis of siliceous oozes-I. Chemical controls on the rate of opal-A to opal-CT transformation - an experimental study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 41, p. 1041-1059. 1997.
- KAWANO, M.; TOMITA, K. Amorphous aluminium hydroxide formed at the earliest weathering stages of K-feldspar. *Clays and Clay Minerals*, v. 44, p. 672-676, 1996.
- KHALAF, F. I. Petrography and diagenesis of silcrete from kuwait, arabian gulf. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 58, p. 1014-1022, 1998.
- KIMPE, C. R. Clay and silt analysis. In: CARTER, M. R. (Ed.) *Soil sampling and methods of analysis*. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993, p.719-730.
- KIRSCH, H. *Mineralogia aplicada*. São Paulo, EDUSP, 1972. 291 p.
- KNOX, E. G. Fragipan horizons in New York soils: III. The basis of rigidity. *Soil Science Society American Proceedings*, v. 21, p. 326-330, 1957.
- KODAMA, H.; WANG, C. Distribution and Characterization of Noncrystalline Inorganic Components in Spodosols and Spodosol-Like Soils. *Soil Science Society of American Journal*, v. 53, p. 526-534. 1989.
- KODAMA, H.; ROSS, J. Tiron dissolution method used to remove and characterize inorganic components in soils. *Soil Science Society of American Journal*, v. 55, p. 1180-1187, 1991.
- KRAUSKOPF, K. B.; BIRD, D. K. *Introduction to geochemistry*. 3.ed. New York: McGraw-Hill, 1995. 647 p.
- LANGFORD-SMITH, T.; DURY, H. Distribution, character, and attitude of the duricrust in the northwest of new South Wales and the adjacent areas of Queensland. *American Journal of Science*, v. 263, p. 170-190, 1965.
- LANGLEY-TURNBAUGH, S.J.; BOCKHEIN, J.G. Mass balance of soil evolution on late Quaternary marine terraces in coastal Oregon. *Geoderma*, v. 84, n. 4, p. 265-288, 1998.
- LEE, F.Y.; YUAN, T.L.; CARLISLE, V.W. Nature of Cementing Materials in Ortstein Horizons of Selected Florida Spodosols: I. Constituents of Cementing Materials. *Soil Science Society of American Journal*, v. 52, p. 1411-1418. 1988a.
- LEE, F. Y.; YUAN, T. L.; CARLISLE, V. W. Nature of Cementing Materials in Ortstein Horizons of Selected Florida Spodosols: II. Soil Properties and Chemical Form(s) of Aluminum. *Soil Science Society of American Journal*, v. 52, p. 1796-1801, 1988b.
- LEMOES, R.C.; SANTOS, R.D. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. 3.ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. 83 p.
- LINDBO, D. L.; VENEMAN, P. L. M. Fragipans in the Northeastern United States. In: SMECK, N. E.; CIOLKOSZ, E. J. (Eds.) *Fragipans: their occurrence, classification, and genesis*. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p.11-31. (SSSA Special Publication, 24).

- LINDBO, D. L.; RHOTON, F. E.; BIGHAM, J. M.; HUNDALL, W. H. JONES, F. S.; SMECK, N. E.; TYLER, D. D. Bulk Density and Fragipan Identification in Loess Soils of the Lower Mississippi River Valley. *Soil Science Society of American Journal*, v. 58, p. 884-891, 1994.
- LITCHFIELD, W. H.; MABBUTT, J. A. Hardpan in soils of semi-arid western Australia. *Journal of Soil Science*, v. 13, p. 148-159, 1962.
- LUCAS, Y.; CHAUVEL, A.; BOULET, R.; RANZANI, G.; SCATOLINI, F. Transição Latossolos-Podzóis sobre a Formação Barreiras na região de Manaus, amazônia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 8, p. 325-335, 1984.
- McBURNETT, S. L.; FRANZMEIER, D. P. Pedogenesis and cementation in Calcareous Till in Indiana. *Soil Science Society of American Journal*, v. 61, n. 4, p. 1098-1104, 1997.
- McHARDY, W. J.; ROBERTSON, L. An optical, scanning electron microscopic and microanalytical study of cementation in some Podzols. *Geoderma*, v. 30, p. 161-170, 1983.
- McINTOSH, P.D.; KEMP, R.A. Consolidated horizons in soils formed in eolian deposits in Southland, New Zealand. *Geoderma*, v. 50, p. 109-124, 1991.
- McKEAGUE, J. A.; CLINE, M. G. Silica in soils. *Advances in Agronomy*, v. 15, p. 339-396, 1963.
- McKEAGUE, J. A.; KODAMA, H. Imogolite in cemented horizons of some british columbia soils. *Geoderma*, v. 25, n. 3-4, p. 189-197, 1981.
- McKEAGUE, J. A.; PROTZ, R. Cement of duric horizons, micromorphology and energy dispersive analysis. *Canadian Journal of Soil Science*, v. 60, p. 45-52, 1980.
- McKEAGUE, J. A.; SPROUT, P. N. Cemented subsoils (duric horizons) in some soils of British Columbia. *Canadian Journal of Soil Science*, v. 55, p. 189-203, 1975.
- McKEAGUE, J. A.; WANG, C. Micromorphology and energy dispersive analysis of ortstein horizons of podzolic soils from New Brunswick and Nova Scotia, Canada. *Canadian Journal of Soil Science*, v. 60, p. 9-21, 1980.
- MELFI, A. J.; CERI, C. C.; KRONBERG, B. I.; FYFE, W. S. McKINNON, B. Granitic weathering: a Brazilian study. *Journal of Soil Science*, v. 34, p. 841-851, 1983.
- MELFI, A. J.; PEDRO, G. Estudo geoquímico dos solos e formações superficiais. Parte 1: caracterização e repartição dos principais tipos de evolução pedogeoquímica. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 7, p. 271-286, 1977.
- MELO, F. R. R.; SANTOS, M. C. Micromorfologia e mineralogia de dois solos de tabuleiro costeiro de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 20, p. 99-108, 1996.
- MELO, V. F.; SINGH, B.; SCHAEFER, C. E. G. R.; NOVAIS, R. F.; FONTES, M. P. F. Chemical and mineralogical properties of kaolinite-rich brazilian soils. *Soil Science Society of American Journal*. v. 65, 1324-1333. (2001).
- MILES, N. M.; WANG, C.; McKEAGUE, J. A. Chemical and clay mineralogical properties of ortstein soils from the marine provinces. *Canadian Journal of Soil Science*, v. 59, p. 287-299, 1979.
- MILNES, A.R.; THIRY, M. Silcretes. In: MARTINI, I. P.; CHESWORTH, W. (Eds.) *Weathering, soils & paleosols*. New York: Elsevier, 1992. p.349-377. (Development in Earth Surface Processes, 2).
- MILNES, A. R.; TWDALE, C. R. An overview of silicification in Cainozoic Landscapes of arid central and southern Australia. *Australian Journal of Soil Research*, v. 21, p. 387-410. 1983.
- MILNES, A. R.; WRIGHT, M. J.; THIRY, M. Silica accumulations in saprolites and soils in South Australia. In: NETTLETON, W. D. (Ed.) *Occurrence, characteristics, and genesis of*

- carbonate, gypsum, and silica accumulation in soils*. Madison: Soil Science Society of America, 1991. p. 121-149. (SSSA Special Publication, 26).
- MOODY, L. E.; GRAHAM, R. C. Silica-cemented terrace edges, central California coast. *Soil Science Society of American Journal*, v. 61, n. 6, p. 1723-1729, 1997.
- MÖLLER, M. R. F.; ARAKI, S. *Intersalação de caulinitas separadas de Latossolos*. Belém: EMBRAPA-CPATU, 1984. 20 p. (Boletim de Pesquisa, 61).
- MOODY, L.E.; GRAHAM, R. C. Silica-cemented terrace edges, central California coast. *Soil Science Society of American Journal*, v. 61, n. 6, p. 1723-1729, 1997.
- MOORE, D. M.; REYNOLDS, R. C. *X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals*. Oxford: Oxford University Press, 1989. 332 p.
- MOREAU, A. M. S. S. *Gênese, Mineralogia e Micromorfologia de Horizontes Coeso, Fragipã e Duripã em Solos do Tabuleiro Costeiro do Sul da Bahia*. 2001. 137 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG..
- MORI, P. E.; REEVES, S.; CORREIA, C.T.;HAUKKA, M. Development of fused glass disc XRF facility and comparison with the pressed powder pellet technique at Instituto de Geociências, São Paulo University. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 29, p. 441-446, 1999.
- MORRIS, R. C.; FLETCHER, A. B. Increased solubility of quartz following ferrous-ferric iron reactions. *Nature*, v. 330, n. 6148, p. 558-561, 1987.
- MURPHY, C. P. *Thin section preparation of soil and sediments*. Berkhsamsted: A B Academic Press, 1986. 149 p.
- NIMER, E. *Climatologia do Brasil*. 2.ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1989. 421 p.
- NIMLOS, T. J. The density and strength of mexican tepetate (duric materials). *Soil Science*, v. 147, p. 23-33. 1989.
- NOCKOLDS, S. R.; KNOX, R. W.O. B.; CHINNER, G. A. *Petrology for students*. London: Cambridge University Press, 1978. 435 p.
- NORFLEET, M. L.; KARATHANASIS, A. D. Some physical and chemical factors contributing to fragipan strength in Kentucky soils. *Geoderma*, v. 71, n. 3-4, p. 289-301, 1996.
- NORRISH, K.; TAYLOR, R. M. The isomorphous replacements of iron by aluminium in soil goethites. *Journal of Soil Science*, v. 12, p. 294-306, 1961.
- NORTON, L. D. Micromorphology of silica cementation in soils. Micromorphology and soil management. In: RINGROSE-VOASE, A. J.; HUMPHREYS, G. S. (Eds) *Soil micromorphology: studies in management and genesis*. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.811-824. (Developments in Soil Science, 22).
- OKAMOTO, G.; OKURA, T.; GOTO, K. (Properties of silica in water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 12, p. 123-132, 1957.
- OLIVEIRA, J. B.; JACOMINE, P. K. T.; CAMARGO, M. N. *Classes gerais de solos do Brasil: guia auxiliar para seu reconhecimento*. Jaboticabal: FUNEP, 1992. 201 p.
- OLIVEIRA, J. B. *Pedologia aplicada*. Jaboticabal: FUNEP, 2001. 414 p.
- OLIVEIRA NETO, M. B. *Pedogênese de uma toposseqüência no agreste de Pernambuco*. 1992. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Agronomia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.
- OLIVEIRA, V.A *Estudo da relação com o substrato litológico, fertilidade potencial e grau de intemperismo dos principais latossolos do Planalto Central Goiano*. 1998. 164 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

- OLLIER, C. *Weathering*. 2.ed.. London: Longman Group Limited, 1984. 270 p. (Geomorphology Texts, 2).
- PAGLIAI, M. Micromorphology and soil management. In: RINGROSE-VOASE, A. J.; HUMPHREYS, G. S. (Eds) *Soil micromorphology: studies in management and genesis*. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 623-640. (Developments in Soil Science, 22).
- PARAHYBA, R. B. V. *Gênese de solos planossólicos do Agreste de Pernambuco*. 1993. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Agronomia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.
- PARFITT, R. L.; KIMBLE, J. M. Condition for formation of allophane in soils. *Soil Science Society of American Journal*, v. 53, p. 971-977, 1989.
- PARFITT, R. L.; WILSON, A. D. Estimation of allophane and halloysite in three sequences of volcanic soils, New Zealand. *Catena supplement*, v. 7, p.1-8, 1985.
- PETRI, S.; FÚLFARO, V. J. *Geologia do Brasil*. São Paulo: EDUSP, 1983. 631 p.
- RANST, E. V.; UTAMI, S. R.; SHAMSHUDDIN, J. Andisols on volcanic ash from Java island, Indonesia: physico-chemical properties and classification. *Soil Science*, v. 167, p. 68-79, 2002.
- REED, S. J. B. *Electron microprobe analysis*. 2.ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. 303 p.
- RIBEIRO, L. P. *Os Latossolos Amarelos do recôncavo baiano: gênese, evolução e degradação*. Salvador: Sepantec-CADCT, 1998. 99 p.
- RIGHI, D.; MEUNIER, A. (). Origin of clays by rock weathering and soil formation. In: VELDE, B. (Ed.) *Origin and mineralogy of clays: clays and the environment*. Berlin: Springer-Verlag, 1995. p. 43-160.
- RIMSTIDT, J. D.; BARNES, H. L. The kinetics of silica-water reactions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 44, n. 11, p. 1683-1699, 1980.
- RIMSTIDT, J. D.; COLE, D. R. Geothermal mineralization I: the mechanism of formation of the Beowawe, Nevada, siliceous sinter deposit. *American Journal of Science*, v. 283, p. 861-875, 1983.
- RINGROSE-VOASE, A. J.; HUMPHREYS, G. S. (Eds) *Soil micromorphology: studies in management and genesis*. Amsterdam: Elsevier, 1994. 886 p. (Developments in Soil Science, 22).
- ROBERTSON, I. D. M.; BUTT, C. R. M. *Atlas of weathered rocks*. Australia: CSIRO/CRCLEME/AMIRA, 1997. (CSIRO Division of Exploration Geoscience Report, 390).
- ROMERO, R. E. *Gênese e degradação de duripãs em uma toposseqüência dos tabuleiros costeiros, Conde - BA*. 2003. 144 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.
- ROSS, G. J.; WANG, C. Extractable Al, Fe, Mn, and Si. In: CARTER, M. R. (Ed.) *Soil sampling and methods of analysis*. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993. p.239-246.
- ROSS, G. M.; CHIARENZELLI, J. R. Paleoclimatic significance of widespread proterozoic silcretes in the bear and churchill provinces of the northwestern canadian shield. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 55, p. 196-204, 1985.
- SANTOS, M. C.; MERMUT, A. R.; RIBEIRO, M. R. Micromorfologia de solos com argila de atividade baixa no sertão de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 15, p. 83-91, 1991.
- SEGALEN, P. Note sur une méthode de détermination des certains sols a hydroxides tropicaux. *Cahiers Orstom, Série Pédologie*, v. 6, p.105-126, 1969.

- SILVA, F. B. R.; RICHÉ, G. R.; TONNEU, J. P.; SOUZA NETO, N. C.; BRITO, L. T.; CORREIA, R. C.; CAVALCANTI, A. C.; SILVA, F. H. B. B.; SILVA, A. B.; ARAÚJO FILHO, J. C.; LEITE, A. P. *Zoneamento Agroecológico do Nordeste: diagnóstico do quadro natural e agrossocioeconômico*. Petrolina: EMBRAPA/CPATSA-CNPS, 1993. 2v. (Convênio EMBRAPA-CPATSA/ORSTON-CIRAD. Documentos, 80).
- SILVA, F. B. R.; LEPRUN, J. C.; BOULET, R. Duripãs em solos dos tabuleiros costeiros do Nordeste do Brasil: mineralogia, micromorfologia e gênese. 1997. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997. Rio de Janeiro. *Resumos expandidos*. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. CD-ROM.
- SKJEMSTAD, J. O.; FITZPATRICK, R. W.; ZARCINAS, B. A.; THOMPSON, C. H. Genesis of Podzols on Coastal Dunes in Southern Queensland. II. Geochemistry and Forms of Elements as Deduced from Various Soil Extraction Procedures. *Australian Journal of Soil Research*, v. 30, p. 615-644, 1992.
- SKJEMSTAD, J. O. Genesis of podzols on coastal dunes on Southern Queensland. III. The role of aluminium-organic complex in profile development. *Australian Journal of Soil Research*, v. 30, p. 645-665, 1992.
- SMALE, D. Silcretes and associated silica diagenesis in southern Africa and Australia. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 43, p. 1077-1089, 1973.
- SMECK, N. E.; CIOLKOSZ, E. J. (Eds.) *Fragipans: their occurrence, classification, and genesis*. Madison: Soil Science Society of America, 1989. 153 p. (SSSA Special Publication, 24).
- SMITH, B. J.; WHALLEY, W. B. Observations on the composition and mineralogy of an algerian duricrust complex. *Geoderma*, v. 28, p. 285-311, 1982.
- SMITH, C.W.; JOHNSTON, M. A.; LORENTZ, S. The effect of soil compaction and soil physical properties on the mechanical resistance of South African forestry soils. *Geoderma*, v. 78, p. 93-111, 1997.
- STEINHARDT, G. C.; FRANZMEIER, D. P. Silica associated with fragipan and non-fragipan horizons. *Soil Science Society of American Journal*, v. 46, p. 656-657, 1982.
- STEPHENS, C. G. Laterite and silcrete in Australia: a study of genetic relationships of loaterite and silcrete and their companion materials, and their collective significance in the formation of the weathered mantle, soils, relief and drainage of the Australian continent. *Geoderma*, v. 5, p. 5-51, 1971.
- STEVENSON, F. J. *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1994. 496 p.
- SUDENE. *Dados pluviométricos mensais do Nordeste - Estado de Pernambuco*. Recife: Sudene, 1990a. 363 p. (Série Pluviometria, 6).
- SUDENE *Dados pluviométricos mensais do Nordeste - Estado de Alagoas*. Recife: Sudene, 1990b. 116 p. (Série Pluviometria, 7).
- SULLIVAN, L. A. Micromorphology and composition of silica accumulations in a hardpan. Micromorphology and soil management. In: RINGROSE-VOASE, A. J.; HUMPHREYS, G. S. (Eds) *Soil micromorphology: studies in management and genesis*. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.845-863. (Developments in Soil Science, 22).
- SULLIVAN, L.A.; KOPPI, A.J. Micromorphology of authigenic celestobarite in a duripan from Australia. *Geoderma*, v. 64, p. 357-361, 1995.
- SUMMERFIELD, M. A. Petrography and genesis of silcrete from the Kalahari basin and cape coastal zone, southern Africa. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 53, n. 3, p. 895-909, 1983.

- SUMMERFIELD, M. A. Isovolumetric weathering and silcrete formation, southern cape province, South Africa. *Surface Processes and Landforms*, v. 9, p. 135-141, 1984.
- TARDY, Y.; ROQUIN, C. Geochemistry and evolution of lateritic landscape. In: MARTINI, I.P.; CHESWORTH, W. (Eds.). *Weathering, soils & paleosols*. New York: Elsevier, 1992. p. 407-443. (Development in Earth Surface Processes, 2).
- TAYLOR, R.M. Proposed mechanism for the formation of soluble Si-Al and Fe(III)-Al hydroxy complexsx in soils. *Geoderma*, v. 42, p. 65-77, 1988.
- THIRY, M. Silicifications continentales. In: PAQUET, H.; CLAVER, N. (Eds.) *Sédimentologie et géochimie de la surface: colloque à la mémoire de George Millot*. Paris, Academie des Sciences, 1993. p.177-198.
- THIRY, M.; AYRAULT, M. B.; GRISONI, J-C. Ground-water silicification and leaching in sands: Example of the Fontainebleau Sand (Oligocene) in the Paris Basin. *Geological Society of American Bulletin*, v. 100, n. 8, p.1283-1290, 1998.
- THIRY, M.; MILLOT, G. Mineralogical forms of silica and their sequence of formation in silcrettes. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 57, p. 343-352, 1987.
- THOMPSON, C. H.; BRIDGES, E. M.; JENKINS, D. A. An exploration of some relict hardpans in the coastal lowlands of southern Queensland. In: RINGROSE-VOASE, A. J.; HUMPHREYS, G. S. (Eds.) *Soil micromorphology: studies in management and genesis*. Amsterdam: Elsevier, 1994, p.233-245. (Developments in Soils Science, 22).
- THOMPSON, C. H.; BRIDGES, E. M.; JENKINS, D. A. Pans in humus podzols (Humods and Aquods) in coastal southern Queensland. *Australian Journal of Soil Research*, v. 34, p.161-182. 1996.
- THORNBER, M. R.; BETTENAY, E.; RUSSELL, W. G. R. A mechanism of aluminosilicate cementation to form hardpan. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 51, n. 9, p. 2303-2310, 1987.
- UNITED STATES. Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. Soil Survey Staff. *Soil Taxonomy: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. 2.ed. Washington: USDA, 1999. 869 p. (Agriculture Handbook, 436).
- WADA, K.; YAMADA, H. Hidrazine intercalation-intersalation for differentiation of kaolin minerals from chlorites. *The American Mineralogist*, v. 53, p. 334-339, 1968.
- WEAVER, C. E. *Clays, muds, and shales*. Amsterdam: Elsevier, 1989. 819 p.
- WILLIAMS, L. A.; CRERAR, D. A. Silica diagenesis, II. General mechanisms. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 55, n. 3, p. 312-321, 1985.
- WILSON, M. A.; BURT, R.; SOBECKI, T. M.; ENGEL, R. J.; HIPPLE, K. Soil Properties and Genesis of Pans in Till-Derived Andisols, Olympic Peninsula, Washington. *Soil Science Society of American Journal*, v. 60, n. 1, p. 206-218, 1996.
- WITTY, J. E.; KNOX, E. G. Identification, Role in soil taxonomy, and worldwide distribution of fragipans. In: SMECK, N. E.; CIOLKOSZ, E. J. (Eds.) *Fragipans: their occurrence, classification, and genesis*. Madison: Soil Science Society of America, 1989, p.11-31. (SSSA Special Publication, 24).

ANEXO

**DADOS MORFOLÓGICOS E ANALÍTICOS DOS PERFIS DE
SOLO ESTUDADOS**

PERFIL - 1; **NÚMERO DE CAMPO - P1;** **DATA - 22/01/2001.**

CLASSIFICAÇÃO: NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico solódico.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS - Cerca de 100 m do lado direito da estrada Delmiro Gouveia - Água Branca, 3 Km após a BR 423, município de Água Branca - AL. Coordenadas 09°18'05"S e 37°58'26"W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL - Parte ligeiramente baixa, próxima de linha de drenagem, com 0-3% de declive, sob cobertura de jurema preta, macambira, xique-xique, espinheiro, faveleira e velame.

ALTITUDE - 315 m.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA - Granitos do Pré-Cambriano.

MATERIAL ORIGINÁRIO - Produtos de alteração de rochas graníticas.

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE - Não pedregoso e não rochoso.

RELEVO LOCAL - Plano.

RELEVO REGIONAL - Plano e suave ondulado.

EROSÃO - Laminar ligeira.

DRENAGEM - Imperfeitamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA - Caatinga hiperxerófila/hipoxerófila (ocorrem palmeiras do tipo ouricuri nos arredores).

USO ATUAL - Sem uso.

CLIMA - BShh' de Koeppen. Clima muito quente, semi-árido, com estação chuvosa no inverno. Temperatura média anual 24°C e precipitação entre 500 e 750 mm.

DESCRITO E COLETADO POR - José Coelho de Araújo Filho e Adilson Carvalho

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

A - 0-10 cm; bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmido) e bruno-amarelado-claro (10YR 6/4, seco); franco-arenosa; fraca pequena e média blocos subangulares e grãos simples; ligeiramente dura, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição clara e plana.

Cn1 - 10-22 cm; bruno-amarelado (10YR 5/4, úmido) e bruno-claro-acinzentado (10YR 6/3, seco); franco-arenosa; fraca pequena e média blocos subangulares e grãos simples; ligeiramente dura, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição gradual e plana.

Cn2 - 22-40 cm; bruno-amarelado (10YR 5/4, úmido) e bruno-claro-acinzentado (10YR 6/3, seco); franco-arenosa; fraca pequena e média blocos subangulares e angulares; dura, friável, não plástica e não pegajosa; transição abrupta e plana.

Cmn - 40-80 cm+; bruno-claro-acinzentado (10YR 6/3, úmido), cinzento-claro (10YR 7/2, seco) e mosqueado pouco médio e grande distinto bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/4); areia-franca; maciça extremamente coesa; extremamente dura, extremamente firme, não plástica e não pegajosa.

RAÍZES - Comuns finas no A, poucas finas no Cn1, e raras finas no Cn2.

OBSERVAÇÕES:

1 - Muitos poros pequenos e poucos médios no A e Cn1, muitos poros pequenos no Cn2, e poucos poros pequenos no Cmn.

2 - No Cmn ocorrem poucos cascalhos e calhaus essencialmente de quartzo e alguns pedaços de rocha granítica.

3 - O material do Cmn quando imerso em água, por mais de uma semana, não dissolve e nem amolece.

4 - Classe nova sugerida: NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico duripânico solódico.

PERFIL - 2; **NÚMERO DE CAMPO** - P2; **DATA** - 23/01/2001.

CLASSIFICAÇÃO: NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS - Cerca de 300 m do lado direito da estrada Delmiro Gouveia - Água Branca, 2,8 Km após a BR 423, município de Água Branca - AL. Coordenadas 09°18'18"S e 37°58'29"W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL - Terço inferior de suave encosta, com rampa longa, próxima de linha de drenagem, com 0-4% de declive, sob cobertura de jurema preta, espinheiro, faveleira, umbuzeiro, caatingueira, anil, malva e velame.

ALTITUDE - 313 m.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA - Granitos do Pré-Cambriano.

MATERIAL ORIGINÁRIO - Produtos de alteração de rochas graníticas.

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE - Não pedregoso e não rochoso.

RELEVO LOCAL - Plano a suave ondulado.

RELEVO REGIONAL - Plano e suave ondulado.

EROSÃO - Laminar ligeira.

DRENAGEM - Imperfeitamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA - Caatinga hiperxerófila/hipoxerófila (ocorre ouricuri nos arredores).

USO ATUAL - Palma e pastagem natural.

CLIMA - BSh' de Koeppen. Clima muito quente, semi-árido, com estação chuvosa no inverno. Temperatura média anual 24°C e precipitação entre 500 e 750 mm.

DESCRITO E COLETADO POR - José Coelho de Araújo Filho e Adilson Carvalho.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- An - 0-12 cm; bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmido) e bruno-amarelado-claro (10YR 6/4, seco); franco-arenosa; fraca pequena e média blocos subangulares e grãos simples; ligeiramente dura, friável, não plástica e não pegajosa; transição clara e plana.
- Cn - 12-36 cm; bruno-amarelado (10YR 5/4, úmido) e bruno-amarelado-claro (10YR 6/4, seco); franco-arenosa; fraca pequena e média blocos subangulares; ligeiramente dura, friável, não plástica e não pegajosa; transição clara e plana.
- Cnz - 36-55 cm; bruno-claro (7,5YR 6/4, úmido) e bruno muito claro-acinzentado (10YR 7/3, seco); franco-arenosa; fraca pequena e média blocos subangulares; ligeiramente dura, friável, não plástica e não pegajosa; transição clara e plana.
- C'n - 55-80 cm; bruno-claro-acinzentado (10YR 6/3, úmido) e branco (10YR 8/2, seco); franco-arenosa; fraca pequena e média blocos subangulares e grãos simples; ligeiramente dura, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição abrupta e plana.
- Cmn - 80-120 cm; bruno (10YR 5/3, úmido), bruno-claro-acinzentado (10YR 6/3, seco) e mosqueado pouco pequeno e distinto preto (10YR 2/1); franco-arenosa; maciça extremamente coesa; extremamente dura, extremamente firme, não plástica e não pegajosa; transição clara e ondulada (30-60 cm).
- Crn - 120-140 cm; Rocha mole esfarelenta, bastante alterada, contendo argila nas partes mais intemperizadas (textura franco-arenosa); transição gradual e plana.
- Crnz/R - 140-155 cm+; Rocha granítica, branda, semi-decomposta com textura areia-franca, contendo partes com rocha original pouco alterada.

RAÍZES - Muitas finas no A, poucas finas no Cn e Cnz, e raras finas no C'n.

OBSERVAÇÕES:

- 1 - Poros comuns pequenos e raros médios no A, Cn, Cnz e C'n, e poucos poros pequenos no Cmn. O horizonte C'n tem aspecto morfológico similar a de um horizonte do tipo E.
- 2 - O material do Cmn quando imerso em água, por mais de uma semana, não esboroa.
- 3 - Próximo ao local da trincheira ocorrem Planossolos.
- 4 - Resultados de análise granulométrica pelo método da pipeta (IGc/USP) do horizonte Cmn foram: 7% de argila, 18% de silte (8% de silte fino e 10 de silte grosso) e 75% de areias (27% de areia fina e 48% de areia grossa). No horizonte Crn os resultados foram: 7% de argila, 10% de silte (4% de silte fino e 6 de silte grosso) e 83% de areias (20% de areia fina e 53% de areia grossa).
- 5 - Classe nova sugerida: NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico duripânico sódico.

Análises Físicas e Químicas

Perfil: P2

Amostra de laboratório: 01.0458/0464

Solo:

Horizonte		Frações da amostra total (g/Kg)			Composição granulométrica da terra fina (dispersão com NaOH / calgon) g/Kg				Argila dispersa em água (g/Kg)	Grau de floculação (g/100g)	% Silte %Argila	Densidade (g/cm ³)		Porosidade (cm ³ /100cm ³)
Símbolo	Profundidade (cm)	Calhaus > 20mm	Cascalho 20-2mm	Terra fina <2mm	Areia grossa 2-0,20mm	Areia fina 0,20-0,05mm	Silte 0,05-0,002mm	Argila <0,002mm				Solo	Partículas	
An	0-12	0,00	25,00	975,00	424,00	358,00	138,00	80,00	60,00	25,00	1,73		2,60	
Cn	-36	0,00	9,00	991,00	443,00	334,00	122,00	101,00	60,00	40,59	1,21		2,60	
Cnz	-55	0,00	15,00	985,00	398,00	348,00	174,00	80,00	60,00	25,00	2,18		2,60	
C'n	-80	0,00	33,00	967,00	393,00	339,00	208,00	60,00	40,00	33,33	3,47		2,63	
Cmn	-120	0,00	43,00	957,00	492,00	245,00	182,00	81,00	61,00	24,69	2,25		2,56	
Crn	-140	0,00	172,00	828,00	569,00	104,00	202,00	125,00	125,00	0,00	1,62		2,56	
Crnz/R	-155	0,00	163,00	837,00	670,00	141,00	87,00	102,00	102,00	0,00	0,85		2,67	

Horizonte	pH (1:2,5)		Complexos sortivos (cmol _c /Kg)								Valor V (sat de bases) %	100Al ³⁺ / (S + Al ³⁺) (%)	P assimilável (mg/Kg)
	Água	KCL 1N	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Valor S (soma)	Al ³⁺	H ⁺	Valor T (soma)			
An	4,80	4,20	0,60	0,50	0,25	0,14	1,49	0,10	0,10	1,69	88,17	6,29	1,00
Cn	4,50	4,40	0,70	0,80	0,13	0,31	1,94	0,00	1,30	3,24	59,88	0,00	1,00
Cnz	5,00	4,70	0,50	1,00	0,06	0,58	2,14	0,00	1,00	3,14	68,15	0,00	1,00
C'n	6,60	6,30	0,80		0,03	0,42	1,25	0,00	0,50	1,75	71,43	0,00	1,00
Cmn	7,60	6,80	0,80	2,10	0,02	1,60	4,52	0,00	0,50	5,02	90,04	0,00	1,00
Crn	8,80	7,40	2,50	8,90	0,10	10,25	21,75	0,00	0,00	21,75	100,00	0,00	170,00
Crnz/R	8,80	7,00	0,90	3,60	0,09	6,17	10,76	0,00	0,20	10,96	98,18	0,00	250,00

Horizonte	C (orgânico) g/Kg	N (g/Kg)	C/N	Ataque por H ₂ SO ₄ (1:1) - NaOH (0,8%) g/Kg						SiO ₂ /Al ₂ O ₃ (Kl)	SiO ₂ /R ₂ O ₃ (Kr)	Al ₂ O ₃ /Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ livre (g/Kg)	Equivalente de CaCO ₃ (g/Kg)
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO					
An	2,80	0,50	5,60	20,00	13,00	5,00	1,70			2,62	2,12	4,08		
Cn	2,20	0,30	7,33	23,00	18,00	5,00	2,10			2,17	1,86	5,65		
Cnz	1,40	0,20	7,00	21,00	11,00	4,00	2,00			3,25	2,77	4,32		
C'n	0,70	0,10	7,00	14,00	5,00	3,00	2,00			4,76	3,43	2,62		
Cmn	0,90	0,10	9,00	40,00	27,00	39,00	2,20			2,52	1,31	1,09		
Crn	0,80	0,10	8,00	106,00	71,00	39,00	6,90			2,54	1,87	2,86	17,00	
Crnz/R	0,70	0,10	7,00	82,00	43,00	3,00	7,50			3,24	3,09	22,50		

Horizonte	100 Na ⁺ /T (%)	Pasta saturada		Sais solúveis (extrato 1:5) ◀cmol _c /Kg de TF▶							Constantes hídricas (g/100g)			
		C. E. do extrato (mS/cm) 25°C	Água (%)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Umidade (0,003 MPa)	Umidade (1,5 MPa)	Água disponível máxima
An	8,28	0,88	23,00											
Cn	9,57	2,48	23,00											
Cnz	18,47	4,34	21,00											
C'n	24,00	1,59	20,00											
Cmn	31,87	2,29	26,00			0,01	0,50							
Crn	47,13	3,87	36,00			0,01	1,27							
Crnz/R	56,30	4,64	40,00			0,01	1,80							

PERFIL P2 - ANÁLISE MINERALÓGICA DE GRÃOS**Horizonte Cnz****CASCALHO**

60% - Quartzo, alguns contendo feldspato e biotita alterada + quartzitos;

40% - Feldspatos (K-feldspatos e plagioclásios) pouco alterados a alterados, alguns com quartzo e biotita alterada.

AREIA GROSSA

65% - Quartzo, alguns contendo feldspato e biotita alterada e inclusões de opacos + quartzitos;

30% - Feldspatos (K-feldspatos e plagioclásios) pouco alterados a alterados, alguns com quartzo e biotita alterada.

Traços - Ilmenita, magnetita, hematita, rutilo, muscovita, carvão + detritos.

AREIA FINA

65% - Quartzo, alguns contendo inclusões de opacos;

28% - Feldspatos (K-feldspatos e plagioclásios) pouco alterados a alterados, alguns com quartzo e biotita alterada;

2% - Epidoto;

2% - Anfibólio + biotita + muscovita + sericita;

2% - Nódulos ou crostas maciças silicificadas e agregados argilosos;

Traços - Ilmenita, rutilo, magnetita, hematita e zircão.

Horizonte C'n**CASCALHO**

55% - Quartzo, alguns contendo feldspato e biotita alterada + quartzitos;

40% - Feldspatos (K-feldspatos e plagioclásios) pouco alterados a alterados, alguns com quartzo e biotita alterada.

3% - Nódulos/agregados de solo contendo grãos inclusos, principalmente quartzo;

2% - Nódulos ou crostas maciças silicificadas e alguns agregados argilosos.

AREIA GROSSA

60% - Quartzo, alguns contendo feldspato e biotita alterada, epidoto, anfibólio e opacos + alguns quartzitos;

35% - Feldspatos (K-feldspatos e plagioclásios) pouco alterados a alterados, alguns com quartzo e biotita alterada, além de epidoto e anfibólio;

3% - Nódulos/agregados de solo contendo grãos inclusos de quartzo e feldspato;

1% - Anfibólio;

Traços - Ilmenita, epidoto, magnetita, hematita, turmalina, biotita, sericita, carvão + detritos.

AREIA FINA

64% - Quartzo, alguns contendo inclusões de opacos;

30% - Feldspatos (K-feldspatos e plagioclásios) pouco alterados a alterados, alguns com quartzo e biotita alterada;

2% - Epidoto;

2% - Anfibólio;

1% - Nódulos/agregados de solo contendo grãos inclusos de quartzo e feldspato;

Traços - Ilmenita, magnetita, epidoto, hematita, turmalina, biotita, sericita, zircão, carvão + detritos.

Horizonte Cmn**CASCALHO**

45% - Nódulos/agregados arenosos contendo grãos inclusos de quartzo e/ou feldspato. Alguns ocorrem escurecidos por óxido de manganês;

35% - Quartzo, alguns contendo feldspato e biotita alterada + quartzitos;

18% - Feldspatos (K-feldspatos e plagioclásios) pouco alterados a alterados, alguns com quartzo e biotita alterada;

2% - Nódulos ou crostas maciças silicificadas e alguns agregados argilosos;

Traços - Nódulos de óxido de manganês, pretos.

AREIA GROSSA

40% - Quartzo, alguns contendo feldspato e biotita alterada + quartzitos;

30% - Feldspatos (K-feldspatos e plagioclásios) pouco alterados a alterados, alguns com quartzo, biotita alterada, epidoto e opacos;

27% - Nódulos/agregados arenosos, cinza claro, contendo grãos inclusos de quartzo e/ou feldspato além de opacos, epidoto e anfibólio. Alguns ocorrem escurecidos por óxido de manganês;

1% - Epidoto + anfibólio;

1% - Nódulos de óxido de manganês, pretos;

Traços - Turmalina, Ilmenita, magnetita, hematita, biotita, muscovita, sericita, carvão + detritos.

AREIA FINA

52% - Quartzo, alguns contendo feldspato e biotita alterada + quartzitos;

25% - Feldspatos (K-feldspatos e plagioclásios) pouco alterados a alterados, alguns com quartzo e biotita alterada, epidoto, anfibólio e opacos;

12% - Nódulos/agregados, cinza claro, arenosos contendo grãos de quartzo e/ou feldspato inclusos além de raros opacos, epidoto e anfibólio. Poucos são escurecidos por óxidos de manganês;

5% - Agregados argilosos cor marrom (chocolate);

3% - Epidoto + anfibólio.

1% - Biotita;

1% - Nódulos de óxidos de manganês, pretos;

Traços - Ilmenita, magnetita, turmalina, muscovita, sericita, carvão + detritos.

Horizonte Crn**CASCALHO**

95% - Fragmentos de rocha em alteração, cor cinza, constituídos por quartzo, feldspato e biotita. Alguns fragmentos contêm epidoto e raramente anfibólio. Muitos ocorrem parcialmente recobertos e/ou escurecidos por óxidos de manganês;

5% - Quartzo;

Traços - Nódulos de óxidos de manganês, pretos, e agregados de solo, cinza claro.

AREIA GROSSA

55% - Fragmentos de rocha em alteração, cor cinza, constituídos por quartzo, feldspato e biotita. Alguns fragmentos contêm epidoto e raramente anfibólio, opacos e incrustações ferruginosas. Poucos fragmentos só contêm quartzo e biotita;

20% - Quartzo com ou sem inclusões de feldspatos;

15% - Feldspatos (K-feldspatos e plagioclásios) pouco alterados a alterados, alguns com inclusões de quartzo e biotita alterada;

4% - Biotita alterada, marrom amarelada;

2% - Epidoto;

2% - Nódulos de óxidos de manganês, pretos, e nódulos ferruginosos;

1% - Magnetita + hematita;

Traços - Turmalina, ilmenita, anfibólio, muscovita, sericita, leucoxênio, agregados de solo e carvão + detritos.

AREIA FINA

50% - Quartzo, alguns com inclusões de opacos.

30% - Feldspatos (K-feldspatos e plagioclásios) pouco alterados a alterados, alguns com inclusões de quartzo e biotita alterada;

15% - Biotita alterada, marrom amarelada + sericita;

2% - Epidoto;

1% - Nódulos de óxido de manganês, pretos, e nódulos ferruginosos;

1% - Magnetita + hematita + nódulos ferruginosos;

Traços - Turmalina, ilmenita, anfibólio, muscovita, zircão, leucoxênio, agregados de solo e/ou crostas silicificadas, carvão + detritos.

Horizonte Crnz/R**CASCALHO**

99% - Fragmentos de rocha em alteração, cor cinza, constituídos por quartzo, feldspato e biotita. Alguns fragmentos contêm epidoto e raramente anfibólio. Muitos ocorrem parcialmente recobertos e/ou escurecidos por óxidos de manganês;

Traços - Nódulos argilo-ferruginosos, alguns contendo magnetita e crostas silicificadas.

AREIA GROSSA

90% - Fragmentos de rocha em alteração, cor cinza, constituídos por quartzo, feldspato e biotita. Alguns fragmentos contêm epidoto e raramente anfibólio. Muitos ocorrem parcialmente recobertos e/ou escurecidos por óxidos de manganês;

6% - Quartzo;

3% - Biotita alterada, marrom amarelada;

Traços - Nódulos argilo-ferruginosos, de óxidos de manganês (pretos) e magnetita.

AREIA FINA

75% - Fragmentos de rocha em alteração, cor cinza, constituídos por quartzo, feldspato e biotita. Alguns fragmentos contêm epidoto e mais raramente anfibólio. Muitos ocorrem parcialmente recobertos e/ou escurecidos por óxidos de manganês;

15% - Quartzo;

7% - Biotita alterada, marrom amarelada;

2% - Epidoto;

Traços - Nódulos argilo-ferruginosos, de óxidos de manganês (pretos), magnetita e hematita.

PERFIL - 3; **NÚMERO DE CAMPO** - P3; **DATA** - 26/01/2001.

CLASSIFICAÇÃO: PLANOSSOLO NÁTRICO Órtico arênico.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS - Estrada Riacho dos Pocinhos - Lagoa das Caraíbas, distando 7,9 Km da PE 390 e 11 Km de Carqueja, município de Serra Talhada - PE. Coordenadas 08°23'02"S e 38°29'25"W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL - Topo de superfície plana, com 0-2% de declive, sob cobertura de pereiro, umburana de cambão, faveleira, caatingueira, pinhão e xique-xique.

ALTITUDE - Cerca de 380 m.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA - Granitos do Pré-Cambriano.

MATERIAL ORIGINÁRIO - Produtos de alteração de rochas graníticas.

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE - Não pedregoso e não rochoso

RELEVO LOCAL - Plano.

RELEVO REGIONAL - Plano e suave ondulado.

EROSÃO - Não aparente.

DRENAGEM - Imperfeitamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA - Caatinga hiperxerófila.

USO ATUAL - Sem uso.

CLIMA - BSw'h' de Koeppen. Clima muito quente, semi-árido, com estação chuvosa que se atrasa para o outono. Temperatura média anual 24°C e precipitação entre 400 e 500 mm.

DESCRITO E COLETADO POR - José Coelho de Araújo Filho e Adilson Carvalho.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- A - 0-11 cm; bruno (10YR 5/3, úmido) e bruno-claro-acinzentado (10YR 6/3, seco); areia; grãos simples e partes fraca pequena e média blocos subangulares; macia, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição clara e plana.
- E - 11-34 cm; bruno-claro-acinzentado (10YR 6/3, úmido) e bruno muito claro-acinzentado (10YR 7/3, seco); areia; fraca pequena e média blocos subangulares e grãos simples; macia, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição clara e plana.
- En - 34-52 cm; bruno-cinza (10YR 7/2, úmido) e branco (10YR 8/2, seco); areia; fraca pequena e média blocos subangulares e grãos simples; macia a ligeiramente dura, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição abrupta e plana.
- Btxn1- 52-56 cm; bruno-acinzentado (10YR 5/2, úmido), cinza-brunado-claro (10YR 6/2, seco) e mosqueado pouco médio distinto bruno-forte (7,5YR 7/6); franco-arenosa; maciça extremamente coesa e fraca grande laminar; extremamente dura, extremamente firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa.
- Btxn2- 56-100 cm; bruno-acinzentado (2,5Y 5/2, úmido), cinza-claro (10YR 7/2, seco), mosqueado pouco médio distinto bruno-forte (7,5YR 7/6) e mosqueados pouco pequeno e distinto preto (10YR 2/1); franco-arenosa; maciça extremamente coesa e partes fracas grandes blocos angulares e subangulares compondo ou não estruturas fracas médias a grandes prismáticas; extremamente dura, firme a muito firme, não plástica e não pegajosa.
- R - 100-105 cm+; Rocha granítica dura de cor rosada contendo pequenas pontuações de minerais escuros esparsos.

RAÍZES - Comuns finas e poucas médias no A, E e En, e poucas finas prensadas no limite entre Btxn1 e Btxn2.

OBSERVAÇÕES:

- 1 - Muitos poros pequenos e poucos médios no A, E e En, e sem poros visíveis nos horizontes Btxn1 e Btxn2.
- 2 - No teste de imersão em água (por mais de 3 horas) o material do Btxn2 amolece ou desintegra-se enquanto que no do Btxn1 apenas uma pequena parcela esboroa-se.
- 3 - O material do Btxn2, quando seco, é muito semelhante a um duripã.
- 4 - Classe nova sugerida: PLANOSSOLO NÁTRICO Órtico fragipânico arênico.

PERFIL - 4; **NÚMERO DE CAMPO** - P4; **DATA** - 01/02/2001.

CLASSIFICAÇÃO: ARGISSOLO ACINZENTADO Distrófico abrupto fragipânico.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS - Fazenda Capiatã, Usina Coruripe, no local denominado cacimbão, no lado direito da estrada Coruripe - Teotônio Vilela, município de Coruripe - AL. Coordenadas 09°59'31"S e 36°15'42"W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL - Fundo de área abaciada fechada, no topo de tabuleiro, com cerca de 0-3% de declive, sob cobertura de cana-de-açúcar.

ALTITUDE - Cerca de 108 m.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA - Sedimentos do Grupo Barreiras. Período Terciário.

MATERIAL ORIGINÁRIO - Sedimentos areno-argilosos.

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE - Não pedregoso e não rochoso..

RELEVO LOCAL - Plano abaciado (bacia superficialmente fechada).

RELEVO REGIONAL - Plano e suave ondulado.

EROSÃO - Não aparente.

DRENAGEM - Moderada a imperfeitamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA - Floresta subperenifólia.

USO ATUAL - Cana-de-açúcar.

CLIMA - As' de Koeppen. Clima tropical chuvoso, com verão seco. A estação chuvosa se adianta para o outono, antes do inverno. Temperatura média anual 25°C e precipitação entre 1500 e 1200 mm.

DESCRITO E COLETADO POR - José Coelho de Araújo Filho, Adilson Carvalho e Elmo Clarck Gomes.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- Ap - 0-18 cm; preto (10YR 2/1, úmido) e bruno-escuro (10YR 3/3, seco); areia-franca; fraca pequena e média blocos subangulares, grãos simples e partes maciça; dura com partes ligeiramente dura, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição clara e plana.
- Bt1 - 18-33 cm; bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2, úmido), cinzento-brunado-claro (10YR 6/2, seco) e mosqueado pouco pequeno difuso bruno-amarelado-escuro (10YR 4/6); franco-argiloarenosa; fraca pequena e média blocos subangulares e partes maciça; muito dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição gradual e plana.
- Bt2 - 33-63 cm; bruno-acinzentado (10YR 5/2, úmido) e cinzento-claro (10YR 7/2, seco); franco-argiloarenosa; fraca pequena e média blocos subangulares e partes maciça; muito dura, friável, plástica e pegajosa; transição clara e plana.
- Btx1 - 63-120 cm; cinzento-claro (10YR 7/2, úmido), branco (10YR 8/2, seco) e mosqueado pouco médio distinto amarelo-brunado (10YR 6/8); argiloarenosa; maciça e partes fraca pequena e média blocos angulares; extremamente dura, firme e partes muito firmes, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição gradual e plana.
- Btx2 - 120-150 cm+; cinzento-claro (10YR 7/2, úmido), branco (10YR 8/2, seco) e mosqueado comum médio e grande distinto amarelo-brunado (10YR 6/8); argila; maciça e partes fraca pequena e média blocos angulares; extremamente dura, firme com partes muito firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa.

RAÍZES - Muitas finas no Ap e raras finas no Bt1.

OBSERVAÇÕES:

- 1 - Muitos poros pequenos e comuns médios no Ap, comuns pequenos e poucos médios no Bt1 e Bt2, e poucos poros pequenos e raros médios em Btx1 e Btx2.
- 2 - O crescimento de raízes fica concentrado no horizonte Ap.
- 3 - No teste de imersão em água (por mais de 3 horas) pouco mais da metade do material de Btx1 e Btx2 dissolve ou amolece ou desintegra-se em fragmentos pequenos.
- 4 - Aparecem, em poucos locais, entre Btx1 e Btx2, manchas ferruginosas descontínuas.
- 5 - O Btx1 apresenta-se com características próximas de um horizonte com cimentação forte.
- 6 - Classe nova sugerida: ARGISSOLO ACINZENTADO Distrófico fragipânico espódico.

PERFIL - 5; **NÚMERO DE CAMPO - P5;** **DATA - 01/02/2001.**

CLASSIFICAÇÃO: EPODOSSOLO FERROCÁRBICO Órtico dúrico.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS - Fazenda Capiatã, Usina Coruripe, na região da goiabeira, lado direito da estrada Coruripe - Teotônio Vilela, município de Coruripe - AL. Coordenadas 09°59'59"S e 36°14'43"W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL - Topo de tabuleiro com ligeira depressão aberta lateralmente no início de linha de drenagem, com cerca de 0-2% de declive, sob cobertura de cana-de-açúcar.

ALTITUDE - Cerca de 104 m.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA - Sedimentos do Grupo Barreiras. Período Terciário.

MATERIAL ORIGINÁRIO - Sedimentos arenosos.

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE - Não pedregoso e não rochoso.

RELEVO LOCAL - Plano ligeiramente abaciado e aberto (início de linha de drenagem).

RELEVO REGIONAL - Plano e suave ondulado.

EROSÃO - Não aparente.

DRENAGEM - Moderada a imperfeitamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA - Floresta subperenifólia.

USO ATUAL - Cana-de-açúcar.

CLIMA - As' de Koeppen. Clima tropical chuvoso, com verão seco. A estação chuvosa se adianta para o outono, antes do inverno. Temperatura média anual 25°C e precipitação entre 1500 e 1200 mm.

DESCRITO E COLETADO POR - José Coelho de Araújo Filho, Adilson Carvalho e Elmo Clarck Gomes.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- Ap - 0-18 cm; cinzento muito escuro (10YR 3/1, úmido) e cinzento-escuro (10YR 4/1, seco); areia; grãos simples e partes fraca pequena e média granular; macia a solta, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição clara e ondulada (15-25 cm).
- E - 18-110 cm; cinzento-claro (10YR 7/2, úmido) e branco (10YR 8/1, seco); areia; grãos simples e fraca pequena e média blocos subangulares; macia a solta, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição abrupta e ondulada (85-95 cm).
- Bhs - 110-115 cm; bruno-avermelhado-escuro (5YR 3/3, úmido); areia-franca; fraca pequena e média blocos subangulares e partes maciça pouco coesa; ligeiramente dura e partes dura, friável com partes firme, não plástica e não pegajosa; transição abrupta e ondulada (2,5-7,5 cm).
- Bm - 115-145 cm; coloração variegada composta de cinzento-claro (10YR 7/2, úmido), bruno-claro-acinzentado (10YR 6/3, úmido) e bruno-oliváceo-claro (2,5Y 5/6, úmido); areia-franca; maciça muito coesa; extremamente dura, extremamente firme e partes muito firme, não plástica e não pegajosa; transição clara e ondulada (25-35 cm).
- Bhsm - 145-180 cm+; bruno-avermelhado-escuro (5YR 3/3, úmido) e mosqueado abundante grande distinto bruno muito claro-acinzentado (10YR 7/3); areia-franca; maciça pouco coesa e partes fraca média a grande blocos subangulares; dura a ligeiramente dura e partes extremamente dura, firme com partes muito firme, não plástica e não pegajosa.

RAÍZES - Muitas finas no Ap, poucas finas no E e Bhs, e raras finas no Bhsm.

OBSERVAÇÕES:

- 1 - Muitos poros pequenos e poucos médios no Ap, E e Bhs, e poucos pequenos no Bm e Bhsm.
- 2 - No horizonte caracterizado como Bm, o material quando imerso em água, por mais de duas horas, não amolece e nem dissolve. Por outro lado, nas partes onde ocorre matéria orgânica, com ou sem materiais ferruginosos, a cimentação é menos intensa ou muito fraca.
- 3 - Área com drenagem aberta, lateralmente, não formando lagoa na época das chuvas.
- 4 - Classe nova sugerida: EPODOSSOLO ALUMINILÚVICO Órtico dúrico.

PERFIL - 6; **NÚMERO DE CAMPO** - P6; **DATA** - 02/02/2001.

CLASSIFICAÇÃO: ESPODOSSOLO FERROCÁRBICO Hidromórfico típico.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS - Fazenda Capiatã - Usina Coruripe, na região da goiabeira, lado direito da estrada Coruripe - Teotônio Vilela, município de Coruripe - AL. Coordenadas 10°00'32"S e 36°15'02"W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL - Centro de suave depressão, fechada, no topo de tabuleiro, com cerca de 0-3% de declive, sob cobertura de cana-de-açúcar.

ALTITUDE - Cerca de 95 m.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA - Sedimentos do Grupo Barreiras. Período Terciário.

MATERIAL ORIGINÁRIO - Sedimentos arenosos.

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE - Não pedregoso e não rochoso.

RELEVO LOCAL - Plano abaciado fechado.

RELEVO REGIONAL - Plano e suave ondulado.

EROSÃO - Não aparente.

DRENAGEM - Imperfeitamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA - Floresta subperenifólia.

USO ATUAL - Cana-de-açúcar.

CLIMA - As' de Koeppen. Clima tropical chuvoso, com verão seco. A estação chuvosa se adianta para o outono, antes do inverno. Temperatura média anual 25°C e precipitação entre 1500 e 1200 mm.

DESCRITO E COLETADO POR - José Coelho de Araújo Filho, Adilson Carvalho e Elmo Clarck Gomes.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- Ap - 0-18 cm; preto (10YR 2/1, úmido) e bruno-acinzentado muito escuro (10YR 3/2, seco); areia-franca; grãos simples com partes maciça pouco coesa e fraca média granular; macia a solta, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição clara e plana
- E - 18-127 cm; cinzento-claro (10YR 7/2, úmido) e branco (10YR 8/2, seco); areia; maciça pouco coesa e grãos simples; macia, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição abrupta e plana.
- Bs - 127-130 cm; bruno-escuro (7,5YR 3/4, úmido) e bruno-forte (7,5YR 4/6, seco); areia-franca; maciça pouco coesa e partes fraca pequena e média blocos subangulares; ligeiramente dura e dura, friável com partes firme, não plástica e não pegajosa; transição abrupta e ondulada (1-7 cm).
- Bm/Bsm-130-170 cm+; bruno-claro-acinzentado (10YR 6/3, úmido) e mosqueados comum pequeno e médio distinto bruno-amarelado (10YR 5/6) e comum médio e grande bruno (7,5YR 4/4); franco-arenosa; maciça muito coesa; extremamente dura e dura, extremamente firme e muito firme, não plástica e não pegajosa.

RAÍZES - Muitas finas no Ap, raras finas no E e Bs.

OBSERVAÇÕES:

- 1 - Muitos poros pequenos e poucos médios no Ap e E, e poucos pequenos no Bs e Bm/Bsm.
- 2 - No teste de imersão (por mais de 3 horas), pequena quantidade do material do Bm/Bsm esboroa ou amolece na água.
- 3 - No local do perfil, a suave depressão é fechada e, no passado, tornava-se uma lagoa durante a época das chuvas. Com o manejo atual, utilizando-se terraceamento, a suave depressão não acumula água.
- 4 - Nas partes onde o material do Bs penetra no topo do Bm este torna-se menos duro.
- 5 - Classe nova sugerida: ESPODOSSOLO ALUMINILÚVICO Hidromórfico típico.

PERFIL - 7; **NÚMERO DE CAMPO - P7;** **DATA - 02/02/2001.**

CLASSIFICAÇÃO: ARGISSOLO AMARELO Distrófico fragipânico espódico.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS - Fazenda Progresso, Usina Coruripe, no limite com a Fazenda Capiatã, lado direito da estrada Coruripe - Teotônio Vilela, município de Coruripe - AL. Coordenadas 10°01'02"S e 36°14'11"W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL - Topo plano de tabuleiro, com cerca de 0-2% de declive, sob cobertura de cana-de-açúcar.

ALTITUDE - Cerca de 102 m.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA - Sedimentos do Grupo Barreiras. Período Terciário.

MATERIAL ORIGINÁRIO - Sedimentos areno-argilosos.

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE - Não pedregoso e não rochoso.

RELEVO LOCAL - Plano.

RELEVO REGIONAL - Plano e suave ondulado.

EROSÃO - Não aparente.

DRENAGEM - Moderadamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA - Floresta subperenifólia.

USO ATUAL - Cana-de-açúcar.

CLIMA - As' de Koeppen. Clima tropical chuvoso, com verão seco. A estação chuvosa se adianta para o outono, antes do inverno. Temperatura média anual 25°C e precipitação entre 1500 e 1200 mm.

DESCRITO E COLETADO POR - José Coelho de Araújo Filho, Adilson Carvalho e Elmo Clarck Gomes.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Ap - 0-17 cm; bruno-acinzentado muito escuro (10YR 3/2, úmido) e bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2, seco); areia-franca; fraca pequena e média blocos subangulares e grãos simples; macia, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição clara e plana.

BA - 17-35 cm; bruno-amarelado-claro (10YR 6/4, úmido) e bruno muito claro-acinzentado (10YR 7/4, seco); franco-arenosa; fraca pequena e média blocos subangulares; dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição gradual e plana.

Bt - 35-70 cm; bruno-amarelado-claro (10YR 6/4, úmido) e bruno muito claro-cinzentado (10YR 7/4, seco); franco-argiloarenosa; fraca pequena e média blocos subangulares e partes maciça coesa; muito dura, friável, plástica e pegajosa; transição clara e plana.

Btx - 70-85 cm; bruno-amarelado-claro (10YR 6/4, úmido) e mosqueado abundante pequeno e médio difuso bruno-amarelado (10YR 5/6); argila; fraca pequena e média blocos angulares e subangulares; muito dura, friável a firme, plástica e ligeiramente pegajosa; transição abrupta e plana.

Horizonte plácico - 85-87 cm; fina camada ferruginosa praticamente horizontal, contínua na sua maior parte, com espessura média variando na faixa de 1 a 2 cm; bruno-avermelhado-escuro (2,5YR 3/4, úmido); argila; maciça e partes fraca pequena a média laminar; firme a muito firme; transição abrupta e plana.

Btx1 - 87-135 cm; bruno-amarelado-claro (10YR 6/4, úmido) e mosqueado comum médio a grande proeminente (2,5YR 3/6); argila; fraca pequena e média blocos angulares e subangulares; friável a firme, plástica e ligeiramente pegajosa; transição gradual e plana.

Btx2 - 135-200 cm+; bruno-forte (7,5YR 5/6, úmido) e mosqueado comum pequeno a grande proeminente vermelho-escuro (2,5YR 3/6); argila; fraca pequena e média blocos angulares e subangulares; friável a firme, plástica e pegajosa.

RAÍZES - Muitas finas no Ap, poucas finas no BA, Bt, e raras finas nos demais horizontes.

OBSERVAÇÕES:

1 - Muitos poros pequenos e comuns médios no Ap, BA e Bt, comuns pequenos e raros médios no Btx, e poucos poros pequenos nos demais horizontes.

2 - Solo úmido abaixo de 87 cm de profundidade.

3 - O fragipã nos horizontes Btx1 e Btx2 é pouco desenvolvido (dissolve integralmente na água), mas ocupa mais de 50% do volume destes horizontes.

PERFIL - 8; **NÚMERO DE CAMPO** - P8; **DATA** - 02/02/2001.

CLASSIFICAÇÃO: ARGISSOLO ACINZENTADO Distrófico típico.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS - Fazenda Progresso, Usina Coruripe, no limite com a Fazenda Capiatã, no lado direito da estrada Coruripe - Teotônio Vilela, município de Coruripe - AL. Coordenadas 10°01'09"S e 36°14'18"W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL - Topo plano de tabuleiro, com cerca de 0-2% de declive, sob cobertura de cana-de-açúcar.

ALTITUDE - Cerca de 101 m.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA - Sedimentos do Grupo Barreiras. Período Terciário.

MATERIAL ORIGINÁRIO - Sedimentos areno-argilosos.

PEDREGOSIDADE - Não pedregoso.

ROCHOSIDADE - Não rochoso.

RELEVO LOCAL - Plano.

RELEVO REGIONAL - Plano e suave ondulado.

EROSÃO - Não aparente.

DRENAGEM - Moderada a imperfeitamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA - Floresta subperenifólia.

USO ATUAL - Cana-de-açúcar.

CLIMA - As' de Koeppen. Clima tropical chuvoso, com verão seco. A estação chuvosa se adianta para o outono, antes do inverno. Temperatura média anual 25°C e precipitação entre 1500 e 1200 mm.

DESCRITO E COLETADO POR - José Coelho de Araújo Filho, Adilson Carvalho e Elmo Clarck Gomes.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Ap - 0-17 cm; bruno-escuro (10YR 3/3, úmido) e bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2, seco); areia; grãos simples e fraca pequena e média blocos subangulares; macia, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição clara e plana.

AE - 17-35 cm; bruno (10YR 4/3, úmido) e bruno (10YR 5/3, seco); franco-arenosa; fraca pequena e média blocos subangulares; ligeiramente dura, muito friável, não plástica e ligeiramente pegajosa; transição gradual e plana.

Bt - 35-70 cm; bruno-claro-acinzentado (10YR 6/3, úmido) e bruno muito claro-acinzentado (10YR 7/3, seco); franco-argiloarenosa; fraca pequena e média blocos subangulares; ligeiramente dura a dura, friável, plástica e pegajosa; transição clara e ondulada (35-70 cm).

Btx/Bs-70-85 cm; bruno-claro-acinzentado (10YR 6/3, úmido) e mosqueado abundante médio distinto bruno-forte (7,5YR 4/6); franco-argiloarenosa; fraca pequena e média blocos subangulares e partes maciça; dura e partes ligeiramente dura, muito friável e partes firme, plástica e ligeiramente pegajosa; transição abrupta e ondulada (15-20 cm).

Bm - 85-160 cm+; bruno muito claro-acinzentado (10YR 7/3, úmido) e mosqueado pouco pequeno distinto bruno-amarelado (10YR 5/6); franco-arenosa; maciça; extremamente dura, extremamente firme, ligeiramente plástica e não pegajosa.

RAÍZES - Comuns finas no Ap, poucas finas no AE, e raras finas no Bt e Btx/Bs.

OBSERVAÇÕES:

1 - Muitos poros pequenos e comuns médios no Ap, comuns pequenos e poucos médios no Bt1 e Bt2, e poucos poros pequenos e raros médios em Btx1 e Btx2.

2 - A textura do horizonte Bm foi determinada em três laboratórios distintos e por duas metodologias. Pelo método do densímetro (Embrapa), os dados constam na folha em seguida. Pelo densímetro, na UFRPE, os resultados foram: 9% de argila, 7% de silte e 84% de areias. Pelo método da pipeta, o mais preciso, na USP/IGc, os resultados foram: 17% de argila, 13% de silte (7% de silte fino e 6% de silte grosso), e 70% de areias (21% de areia fina e 49% de areia grossa). Tomou-se como referência o método da pipeta.

3 - No teste de imersão (por mais de 3 horas) somente pequena quantidade de Bm esboroa ou amolece em água. Provavelmente a maior quantidade dos cimentos naturais do Bm são derivados da degradação das argilas dos horizontes superficiais (perfil em posição de topo plano). A situação topográfica não dá indícios de fluxo lateral, pois não é área abaciada.

4- Classe nova sugerida: ARGISSOLO ACINZENTADO Distrófico dúrico.

PERFIL - 9; **NÚMERO DE CAMPO** - P9; **DATA** - 03/02/2001.

CLASSIFICAÇÃO: ESPODOSSOLO FERROCÁRBICO Órtico típico.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS - Fazenda Progresso, Usina Coruripe, no lado direito da estrada Coruripe - Teotônio Vilela, município de Coruripe - AL. Coordenadas 10°05'28"S e 36°12'03"W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL - Suave depressão no topo do tabuleiro, com cerca de 0-3% de declive, sob cobertura de cana-de-açúcar.

ALTITUDE - Cerca de 61 m.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA - Sedimentos do Grupo Barreiras. Período Terciário.

MATERIAL ORIGINÁRIO - Sedimentos arenosos.

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE - Não pedregoso e não rochoso.

RELEVO LOCAL - Plano abaciado (fechado).

RELEVO REGIONAL - Plano e suave ondulado.

EROSÃO - Não aparente.

DRENAGEM - Moderadamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA - Floresta subperenifólia.

USO ATUAL - Cana-de-açúcar.

CLIMA - As' de Koeppen. Clima tropical chuvoso, com verão seco. A estação chuvosa se adianta para o outono, antes do inverno. Temperatura média anual 25°C e precipitação entre 1500 e 1200 mm.

DESCRITO E COLETADO POR - José Coelho de Araújo Filho, Adilson Carvalho e Elmo Clarck Gomes.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Ap - 0-25 cm; bruno-acinzentado muito escuro (10YR 3/2, úmido) e bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2, seco); areia-franca; grãos simples e fraca pequena e média granular; macia, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição clara e ondulada (15-30).

E - 25-95 cm; bruno (10YR 5/3, úmido) e cinzento-brunado-claro (10YR 6/2, seco); areia; grãos simples e maciça pouco coesa; macia, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição claa e plana.

Bhs/E- 95-160 cm; bruno-escuro (10YR 3/3, úmido) e bruno (10YR 5/3, seco); areia-franca; fraca pequena e média blocos subangulares, grão simples e maciça; macia com partes dura, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição abrupta e ondulada (60-80 cm).

Bsm/E-160-190 cm; bruno (7,5YR 5/4, úmido) e bruno-amarelado (710YR 5/4, seco); areia-franca; moderada e forte média e grande laminar e partes maciça; dura e partes extremamente dura, muito firme, não plástica e não pegajosa; transição abrupta e ondulada (10-40 cm).

Bm/E - 190-260 cm+; cinzento-claro (10YR 7/2, úmido), branco (10YR 8/2, seco) e mosqueado pouco médio distinto bruno-amarelado (10YR 5/6); franco-arenosa; maciça; extremamente dura, extremamente firme, não plástica e não pegajosa.

RAÍZES - Muitas finas no Ap, e poucas finas no E e Bhs/E.

OBSERVAÇÕES:

1 - Muitos poros pequenos e poucos médios no Ap, E, Bhs/E, poucos pequenos nos demais horizontes. O horizonte E penetra nas fendas dos horizontes descontínuos subjacentes.

2 - No teste de imersão (por mais de 3 horas) somente pequena quantidade de Bm esboroa-se.

3 - No local do perfil a suave depressão é fechada, lateralmente, e não acumula água no período chuvoso.

4 - No horizonte Bsm a cimentação é sempre mais branda em relação ao Bm, provavelmente devido a ação da matéria orgânica.

5 - Classe nova sugerida: ESPODOSSOLO ALUMINILÚVICO Órtico arênico.

PERFIL - 10; **NÚMERO DE CAMPO** - P10; **DATA** - 14/02/2001.

CLASSIFICAÇÃO: ESPODOSSOLO FERROCÁRBICO Órtico fragipânico.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS - Fazenda Gulandim, Usina Seresta, município de Teotônio Vilela - AL. Coordenadas 09°57'16"S e 36°23'09"W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL - Borda suave de tabuleiro, com cerca de 0-3% de declive, sob cobertura de cana-de-açúcar.

ALTITUDE - Cerca de 150 m.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA - Sedimentos do Grupo Barreiras. Período Terciário.

MATERIAL ORIGINÁRIO - Sedimentos areno-argilosos.

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE - Não pedregoso e não rochoso.

RELEVO LOCAL - Plano a suave ondulado.

RELEVO REGIONAL - Plano e suave ondulado.

EROSÃO - Não aparente.

DRENAGEM - Moderadamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA - Floresta subperenifólia.

USO ATUAL - Cana-de-açúcar.

CLIMA - As' de Koeppen. Clima tropical chuvoso, com verão seco. A estação chuvosa se adianta para o outono, antes do inverno. Temperatura média anual 25°C e precipitação entre 1500 e 1200 mm.

DESCRITO E COLETADO POR - José Coelho de Araújo Filho, Adilson Carvalho e Elmo Clarck Gomes.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- Ap - 0-18 cm; bruno-escuro (10YR 3/3, úmido) e bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, seco); areia-franca; fraca pequena e média blocos subangulares e granular; ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição abrupta e plana.
- E1 - 18-38 cm; bruno-amarelado (10YR 5/4, úmido) e bruno-amarelado-claro (10YR 6/4, seco); franco-arenosa; fraca pequena e média blocos subangulares; ligeiramente dura a dura, muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição difusa e plana.
- E2 - 38-55 cm; amarelo (2,5Y 7/6, úmido); franco-arenosa; fraca pequena e média blocos subangulares; ligeiramente dura a dura, muito friável, plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara e ondulada (15-30 cm).
- Bs - 55-73 cm; bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmido) e mosqueado abundante médio a grande distinto bruno-amarelado-claro (710YR 6/4); franco-arenosa; moderada grande a muito grande laminar composta de moderada a forte pequena e média blocos angulares e subangulares; firme a muito firme com partes friáveis, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição abrupta e ondulada (12-30 cm).
- Horizonte plácico - 73-74,5 cm; camada ferruginosa sinuosa, contígua na sua maior extensão, espessura média na faixa de 0,5 a 2 cm, bruno-avermelhado-escuro (2,5YR 2,5/4, úmido); franco-arenosa; fraca média laminar; firme a extremamente firme; transição abrupta e ondulada.
- Bx1 - 74,5-90 cm; bruno-amarelado (10Y 5/6, úmido) e mosqueado comum pequeno proeminente bruno-avermelhado-escuro (5YR 3/4); franco-arenosa; maciça e fraca pequena e média blocos subangulares; muito firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição difusa e ondulada (15-30 cm).
- Bx2 - 90-150 cm+; coloração variegada composta de bruno-amarelado (10Y 5/8, úmido) e bruno-claro-acinzentado (10YR 6/3); franco-arenosa; fraca média blocos subangulares e angulares; muito firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição difusa e ondulada.

RAÍZES - Muitas finas no Ap, poucas finas no E1, E2 e Bs, e pouca raízes penetrando em fendas de Bx1 e Bx2.

OBSERVAÇÕES:

- 1 - Muitos poros pequenos e poucos médios no Ap, E1, E2 e Bs, e poucos pequenos nos demais horizontes. Solo úmido a partir de 40 cm.
- 2 - No teste de imersão (por mais de 6 horas) parte significativa de Bx1 e Bx2 não se esboroa ou amolece em água. Particularmente no Bx1, o fragipã é bem desenvolvido em transição para horizonte com cimentação forte.
- 3- Classe nova proposta: ESPODOSSOLO ALUMINILÚVICO Órtico fragipânico.

PERFIL - 11; **NÚMERO DE CAMPO - P11;** **DATA - 14/02/2001.**

CLASSIFICAÇÃO: ARGISSOLO AMARELO Distrófico abrupto fragipânico espódico.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS - Fazenda Gulandim, Usina Seresta, município de Teotônio Vilela - AL. Coordenadas 09°57'11"S e 36°23'17"W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL - Superfície ligeiramente inclinada para o início de linha de drenagem no topo do tabuleiro, com cerca de 0-3% de declive, sob cobertura de cana-de-açúcar.

ALTITUDE - Cerca de 150 m.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA - Sedimentos do Grupo Barreiras. Período Terciário.

MATERIAL ORIGINÁRIO - Sedimentos areno-argilosos.

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE - Não pedregoso e não rochoso..

RELEVO LOCAL - Plano ligeiramente inclinado.

RELEVO REGIONAL - Plano e suave ondulado.

EROSÃO - Não aparente.

DRENAGEM - Moderadamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA - Floresta subperenifólia.

USO ATUAL - Cana-de-açúcar.

CLIMA - As' de Koeppen. Clima tropical chuvoso, com verão seco. A estação chuvosa se adianta para o outono, antes do inverno. Temperatura média anual 25°C e precipitação entre 1500 e 1200 mm.

DESCRITO E COLETADO POR - José Coelho de Araújo Filho, Adilson Carvalho e Elmo Clarck Gomes.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Ap - 0-15 cm; bruno (10YR 4/3, úmido) e bruno-claro-acinzentado (10YR 6/3, seco); franco-arenosa; fraca pequena e média blocos subangulares e granular; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição abrupta e plana.

Btx1 - 15-38 cm; Coloração variegada composta de bruno-amarelado (10YR 5/6, úmido), bruno-claro-acinzentado (10YR 6/3, úmido) e bruno-avermelhado-escuro (5YR 3/3, úmido); argila; fraca a moderada média a grande laminar composta de fraca pequena a média blocos subangulares e angulares; muito dura a extremamente dura, muito firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara e plana.

Btx2 - 38-70 cm; bruno-amarelado (10Y 5/6, úmido) e mosqueados abundantes pequenos a médios distintos bruno muito claro-acinzentado (10YR 7/3) e vermelho-amarelo (5YR 5/6); argila; fraca pequena e média blocos subangulares e angulares e partes maciças coesas; muito dura a extremamente dura, firme a extremamente firme, plástica e ligeiramente pegajosa; transição gradual e plana.

Btx3 - 70-110 cm; amarelo-claro-acinzentado (2,5Y 7/4, úmido) e mosqueado abundante médio a grande difuso bruno muito claro-acinzentado (10YR 7/3) e pouco grande proeminente vermelho (2,5YR 4/6); argila; fraca pequena e média blocos subangulares e angulares com partes maciças coesas; muito dura, firme, plástica e pegajosa; transição difusa e plana.

Btx4 - 110-170 cm+; amarelo-claro-acinzentado (2,5Y 7/4, úmido) e mosqueado abundante médio a grande difuso bruno muito claro-acinzentado (10YR 7/3) e abundante grande proeminente vermelho (2,5YR 4/6); argila; fraca pequena e média blocos subangulares e angulares com partes maciças coesas; muito dura, firme e partes friáveis, plástica e pegajosa.

RAÍZES - Muitas finas no Ap, poucas finas no Btx1, e raras nos demais horizontes.

OBSERVAÇÕES:

1 - Muitos poros pequenos e poucos médios no Ap e poucos pequenos nos demais horizontes.

2 - No teste de imersão (por mais de 2 horas) o material de Btx1 e Btx2 esboroa ou amolece em água. O fragipã é considerado medianamente desenvolvido.

3 - O perfil foi descrito na posição intermediária da passagem de um Argissolo Amarelo para um Espodossolo. No Argissolo Amarelo inicia-se a formação de um horizonte com cimentação fraca que gradativamente passa para o grau forte ao atingir o solo da classe dos Espodosolos.

PERFIL - 12; NÚMERO DE CAMPO - P12; DATA - 15/02/2001.

CLASSIFICAÇÃO: ESPODOSSOLO FERROCÁRBICO Órtico típico.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS - Fazenda Gulandim, Usina Seresta, município de Teotônio Vilela - AL. Coordenadas 09°57'05"S e 36°23'20"W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL - Superfície ligeiramente inclinada para o início de linha de drenagem no topo do tabuleiro, com cerca de 0-3% de declive, sob cobertura de cana-de-açúcar.

ALTITUDE - Cerca de 150 m.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA - Sedimentos do Grupo Barreiras. Período Terciário.

MATERIAL ORIGINÁRIO - Sedimentos arenosos.

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE - Não pedregoso e não rochoso.

RELEVO LOCAL - Plano ligeiramente inclinado.

RELEVO REGIONAL - Plano e suave ondulado.

EROSÃO - Não aparente.

DRENAGEM - Moderadamente a imperfeitamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA - Floresta subperenifólia/cerrado subperenifólio.

USO ATUAL - Cana-de-açúcar.

CLIMA - As' de Koeppen. Clima tropical chuvoso, com verão seco. A estação chuvosa se adianta para o outono, antes do inverno. Temperatura média anual 25°C e precipitação entre 1500 e 1200 mm.

DESCRITO E COLETADO POR - José Coelho de Araújo Filho, Adilson Carvalho e Elmo Clarck Gomes.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Ap - 0-20 cm; cinzento muito escuro (10YR 3/1, úmido) e cinzento-escuro (10YR 4/1, seco); areia; fraca pequena e média blocos subangulares e grãos simples; ligeiramente dura a solta, muito friável, ligeiramente plástica e não pegajosa; transição abrupta e plana.

E1 - 20-40 cm; bruno (10YR 5/3, úmido), bruno-claro-acinzentado (10YR 6/3, seco); areia; fraca pequena e média blocos subangulares e grãos simples; ligeiramente dura a solta, muito friável, ligeiramente plástica e não pegajosa; transição clara e ondulada (15-25 cm).

E2 - 40-85 cm; bruno-acinzentado-escuro (10YR 4,5/2, úmido), bruno-acinzentado (10YR 5/2, seco); areia-franca; fraca pequena e média blocos subangulares e grãos simples; ligeiramente dura a solta, muito friável, ligeiramente plástica e não pegajosa; transição abrupta e ondulada (40-50 cm).

Bm1 - 85-120 cm; cinzento-claro (2,5Y 7/2, úmido) e branco (2,5Y 8/0, seco); franco-siltosa; maciça muito coesa; extremamente dura, extremamente firme, ligeiramente plástica e não pegajosa; transição clara e plana.

Bm2 - 120-150 cm+; cinzento-claro (2,5Y 7/2, úmido), branco (2,5Y 8/0, seco) e mosqueado pouco médio distinto bruno-amarelado (10YR 5/6); franco-siltosa; maciça muito coesa; extremamente dura, extremamente firme, ligeiramente plástica e não pegajosa.

RAÍZES - Muitas finas no Ap e poucas finas em E1 e E2.

OBSERVAÇÕES:

1 - Muitos poros pequenos e poucos médios no Ap, E1 e E2, e poucos pequenos nos demais horizontes.

2 - No teste de imersão em água (durante 7 dias) o material de Bm1 e Bm2 não dissolve ou amolece, mas pode ser quebrado, em parte, com a mão.

3 - O perfil foi descrito próximo da passagem para um Argissolo Acinzentado com horizonte fortemente cimentado.

4 - A composição granulométrica, pelo método da pipeta (USP/IGc), do Bm1 foi: 13% de argila, 9% de silte (4% de silte fino e 5% de silte grosso) e 78% de areias (24% de areia fina e 54% de areia grossa).

5 - A área não forma lagoa devido a presença de uma linha de drenagem lateral e à presença de fraturas no horizonte cimentado.

6- Classe nova sugerida: ESPODOSSOLO ALUMINILÚVICO Órtico dúbico.

PERFIL - 13; **NÚMERO DE CAMPO - P13;** **DATA - 15/02/2001.**

CLASSIFICAÇÃO: ARGISSOLO ACINZENTADO Distrófico abrupto.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS - Fazenda Gulandim, Usina Seresta, município de Teotônio Vilela - AL. Coordenadas 09°57'06"S e 36°23'19"W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL - Superfície ligeiramente inclinada para o início de linha de drenagem no topo do tabuleiro, com cerca de 0-3% de declive, sob cobertura de cana-de-açúcar.

ALTITUDE - Cerca de 150 m.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA - Sedimentos do Grupo Barreiras. Período Terciário.

MATERIAL ORIGINÁRIO - Sedimentos areno-argilosos.

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE - Não pedregoso e não rochoso.

RELEVO LOCAL - Plano ligeiramente inclinado.

RELEVO REGIONAL - Plano e suave ondulado.

EROSÃO - Não aparente.

DRENAGEM - Moderadamente a imperfeitamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA - Floresta subperenifólia/cerrado subperenifólio.

USO ATUAL - Cana-de-açúcar.

CLIMA - As' de Koeppen. Clima tropical chuvoso, com verão seco. A estação chuvosa se adianta para o outono, antes do inverno. Temperatura média anual 25°C e precipitação entre 1500 e 1200 mm.

DESCRITO E COLETADO POR - José Coelho de Araújo Filho, Adilson Carvalho e Elmo Clarck Gomes.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Ap - 0-18 cm; bruno-acinzentado muito escuro (10YR 3/2, úmido) e bruno-acinzentado (10YR 5/2, seco); areia; fraca pequena e média blocos subangulares e grãos simples; ligeiramente dura, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição abrupta e plana.

Bt1 - 18-38 cm; bruno-claro-acinzentado (10YR 6/3, úmido), cinzento-brunado-claro (10YR 6/2, seco); franco-arenosa; fraca pequena e média blocos subangulares; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara e plana.

Bt2 - 38-90 cm; cinzento-brunado-claro (10YR 6/2, úmido) e cinzento-claro (10YR 7/2, seco); franco-argiloarenosa; fraca pequena e média blocos subangulares; dura, friável, plástica e pegajosa; transição abrupta e ondulada (50-56 cm).

Bm - 90-135 cm; cinzento-claro (10YR 7/2, úmido), branco (10YR 8/2, seco) e mosqueado pouco pequeno distinto amarelo-oliváceo (2,5Y 6/8); franco; maciça muito coesa e partes fraca média blocos angulares; extremamente dura, extremamente firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição abrupta e ondulada (40-50 cm).

Horizonte plácico - 135-137 cm; camada ferruginosa horizontalizada com alguns trechos descontínuos e /ou sinuoso, bruno-avermelhado-escuro (5YR 3/4, úmido) e mosqueado pouco pequeno distinto cinzento-claro (10YR 7/2; franco; fraca grande laminar; extremamente dura, extremamente firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição abrupta e ondulada.

Btx - 137-170 cm+; cinzento-claro (10YR 7/2, úmido), branco (10YR 8/2, seco) e mosqueado abundante médio proeminente bruno-forte (7,5YR 5/6); argila; fraca pequena e média blocos angulares; extremamente dura, friável com partes firmes, plástica e ligeiramente pegajosa.

RAÍZES - Muitas finas no Ap, e raras finas em Bt1 e Bt2, e algumas raízes penetrando em fendas de Bm e Btx.

OBSERVAÇÕES:

1 - Muitos poros pequenos e poucos médios no Ap Bt1 e Bt2, e poucos pequenos nos demais horizontes.

2 - No teste de imersão (por mais de 3 horas) o material de Bm não esboroa ou amolece em água, enquanto que o de Btx dissolve na água. O horizonte plácico separa abruptamente estes horizontes.

3 - O perfil foi descrito próximo da linha de drenagem lateral da área abaciada.

4 - A composição granulométrica do Bm, pelo método da pipeta (USP/IGc), foi a seguinte: 9% de argila, 9% de silte (4% de silte fino e 5% de silte grosso) e 82% de areias (26% de areia fina e 56% de areia grossa).

5 - Classe nova sugerida: ARGISSOLO ACINZENTADO Distrófico abrupto dúrico.

PERFIL - 14; **NÚMERO DE CAMPO - P14;** **DATA - 16/02/2001.**

CLASSIFICAÇÃO: ESPODOSSOLO FERROCÁRBICO Hidromórfico típico.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS - Fazenda Mutuns, Usina Seresta, município de Teotônio Vilela - AL. Coordenadas 09°58'05"S e 36°27'18"W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL - Topo plano de tabuleiro, com cerca de 0-2% de declive, sob cobertura de cana-de-açúcar.

ALTITUDE - Cerca de 150 m.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA - Sedimentos do Grupo Barreiras. Período Terciário.

MATERIAL ORIGINÁRIO - Sedimentos arenosos.

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE - Não pedregoso e não rochoso.

RELEVO LOCAL - Plano.

RELEVO REGIONAL - Plano e suave ondulado.

EROSÃO - Não aparente.

DRENAGEM - Imperfeitamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA - Floresta subperenifólia/cerrado subperenifólio.

USO ATUAL - Cana-de-açúcar.

CLIMA - As' de Koeppen. Clima tropical chuvoso, com verão seco. A estação chuvosa se adianta para o outono, antes do inverno. Temperatura média anual 25°C e precipitação entre 1500 e 1200 mm.

DESCRITO E COLETADO POR - José Coelho de Araújo Filho, Adilson Carvalho e Elmo Clarck Gomes.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Ap - 0-18 cm; bruno-acinzentado muito escuro (10YR 3/2, úmido) e cinzento-escuro (10YR 4/1, seco); areia; grãos simples e fraca pequena e média granular; macia com partes soltas, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição clara e plana.

E1 - 18-110 cm; cinzento-brunado-claro (10YR 6/2, úmido); areia; maciça pouco coesa e fraca pequena e média blocos subangulares; muito friável, não plástica e não pegajosa; transição clara e plana.

E2 - 110-128 cm; bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2, úmido); areia; maciça pouco coesa e fraca pequena e média blocos subangulares; macia com partes soltas; muito friável, não plástica e não pegajosa; transição abrupta e ondulada (16-20 cm).

Bhs - 128-133 cm; bruno muito escuro (10YR 2/2, úmido); areia-franca; maciça pouco coesa; friável, ligeiramente plástica e não pegajosa; transição abrupta e ondulada (3-9 cm).

Bm - 133-170 cm+; cinzento-brunado-claro (10Y 6/2, úmido) e mosqueado pouco médio distinto bruno (7,5YR 4/4); areia-franca; maciça muito coesa; extremamente firme, ligeiramente plástica e não pegajosa.

RAÍZES - Muitas finas no Ap e poucas finas em E1, E2 e Bhs.

OBSERVAÇÕES:

1 - Muitos poros pequenos e poucos médios no Ap e E1, muitos pequenos em E2 e Bhs, e poucos pequenos no Bm.

2 - Área com presença de lençol freático sobre o Bm (na época mais seca do ano) e com presença de cheiro forte similar ao de gases sulfídricos. À presença de lençol freático, mesmo sem ser área típica de suave depressão, deve-se, provavelmente, à continuidade dos horizontes cimentados.

3 - Solo úmido a partir de 50 cm de profundidade. Na parede da trincheira, depois de 24 horas, formaram-se alguns mosqueados amarelados semelhantes a jarosita.

4 - O material do Bm não esboroa e nem amolece quando imerso em água por mais de 2 horas.

5 - Classe nova sugerida: ESPODOSSOLO ALUMINILÚVICO Hidromórfico típico.

PERFIL - 15; NÚMERO DE CAMPO - P15; DATA - 16/02/2001.

CLASSIFICAÇÃO: ESPODOSSOLO FERROCÁRBICO Hidromórfico arênico.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS - Fazenda Prado, Usina Seresta, município de Teotônio Vilela - AL. Coordenadas 10°00'49"S e 36°21'59"W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL - Topo plano de tabuleiro, com cerca de 0-2% de declive, sob cobertura de cana-de-açúcar.

ALTITUDE - Cerca de 130 m.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA - Sedimentos do Grupo Barreiras. Período Terciário.

MATERIAL ORIGINÁRIO - Sedimentos arenosos.

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE - Não pedregoso e não rochoso.

RELEVO LOCAL - Plano (ligeiro abaciamento, pouco perceptível).

RELEVO REGIONAL - Plano e suave ondulado.

EROSÃO - Não aparente.

DRENAGEM - Imperfeitamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA - Floresta subperenifólia/cerrado subperenifólio.

USO ATUAL - Cana-de-açúcar.

CLIMA - As' de Koeppen. Clima tropical chuvoso, com verão seco. A estação chuvosa se adianta para o outono, antes do inverno. Temperatura média anual 25°C e precipitação entre 1500 e 1200 mm.

DESCRITO E COLETADO POR - José Coelho de Araújo Filho, Adilson Carvalho e Elmo Clarck Gomes.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Ap - 0-18 cm; bruno-acinzentado muito escuro (10YR 3/2, úmido) e bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2, seco); areia; grãos simples e fraca pequena e média granular; macia com partes soltas, muito friável, ligeiramente plástica e não pegajosa; transição clara e plana.

E - 18-80 cm; bruno (10YR 5/3, úmido) e cinzento-claro (10YR 7/2, seco); areia; fraca pequena e média blocos subangulares e grãos simples; ligeiramente dura e partes macias, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição abrupta e ondulada (60-65 cm).

Bhs - 80-83 cm; bruno-escuro (7,5YR 3/3, úmido); areia-franca; fraca pequena e média blocos subangulares e partes maciça pouco coesa; ligeiramente dura; friável, não plástica e não pegajosa; transição abrupta e ondulada (2-7 cm).

Bm - 83-120 cm+; bruno-amarelado-claro (2,5YR 6/4, úmido), amarelo-claro-acinzentado (2,5Y 7/4, seco) e mosqueado comum médio distinto bruno-amarelado (10YR 5/6); areia-franca; maciça extremamente coesa; extremamente dura, extremamente firme, ligeiramente plástica e não pegajosa.

RAÍZES - Muitas finas no Ap e poucas finas em E e Bhs.

OBSERVAÇÕES:

1 - Muitos poros pequenos e poucos médios no Ap e E, muitos pequenos em Bhs, e poucos pequenos no Bm.

2 - Na área de coleta do perfil, em topo plano de tabuleiro com abaciamento praticamente imperceptível, forma-se lagoa com lençol freático à superfície do terreno na época chuvosa. O horizonte Bm contínuo (sem domínios de sumidouros) provavelmente deve ser o fator determinante na retenção da água na época chuvosa.

3 - O material do Bm apresenta uma cimentação muito forte quando comparado com os demais observados na região. Não esboroa e nem amolece quando imerso em água por mais de 2 horas.

4 - Classe nova sugerida: ESPODOSSOLO ALUMINILÚVICO Hidromórfico arênico.

PERFIL - 16; **NÚMERO DE CAMPO** - P16 (Complementar); **DATA** - 18/02/2003.

CLASSIFICAÇÃO: ESPODOSSOLO FERROCÁRBICO Órtico típico.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS - BR 101, cerca de 1 km após Riacho Cana Brava, sentido Junqueiro, município de Junqueiro - AL. Coordenadas 09°53'42"S e 36°24'46"W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL - Superfície ligeiramente abaciada na borda do tabuleiro, com cerca de 0-3% de declive, sob cobertura de cana-de-açúcar.

ALTITUDE - Cerca de 150 m.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA - Sedimentos do Grupo Barreiras. Período Terciário.

MATERIAL ORIGINÁRIO - Sedimentos arenosos e areno-argilosos.

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE - Não pedregoso e não rochoso.

RELEVO LOCAL - Plano ligeiramente abaciado.

RELEVO REGIONAL - Plano e suave ondulado.

EROSÃO - Não aparente.

DRENAGEM - Moderadamente a imperfeitamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA - Floresta subperenifólia/cerrado subperenifólio.

USO ATUAL - Cana-de-açúcar.

CLIMA - As' de Koeppen. Clima tropical chuvoso, com verão seco. A estação chuvosa se adianta para o outono, antes do inverno. Temperatura média anual 25°C e precipitação entre 1500 e 1200 mm.

DESCRITO E COLETADO POR - José Coelho de Araújo Filho e Adilson Carvalho.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- Ap - 0-20 cm; bruno-acinzentado muito escuro (10YR 3/2, úmido) e bruno (10YR 5/3, seco); areia; grãos simples e fraca pequena e média blocos subangulares; solta, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição clara e plana.
- E1 - 20-50 cm; bruno (10YR 5/3, úmido) e cinzento-brunado-claro (10YR 6/2, seco); areia; grãos simples e partes maciça não coesa; solta e partes ligeiramente dura, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição gradual e plana.
- E2 - 50-110 cm; bruno (10YR 5/3, úmido) e cinzento-claro (10YR 7/2, seco); areia; grãos simples e partes maciça não coesa; solta e partes ligeiramente dura, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição abrupta e plana.
- Bm1 - 110-160 cm; bruno muito claro-acinzentado (10YR 7/3, úmido) e cinzento-claro (10YR 7/2, seco); areia-franca; maciça muito coesa; extremamente dura, extremamente firme, não plástica e não pegajosa; transição difusa e plana.
- Bm2 - 160-210 cm; bruno muito claro-acinzentado (10YR 7/3, úmido) e cinzento-claro (10YR 7/2, seco) e mosqueado comum médio distinto bruno-forte (7,5YR 5/8); franco-arenosa; maciça muito coesa; extremamente dura, extremamente firme, ligeiramente plástica e não pegajosa; transição difusa e plana.
- Bm3 - 210-260 cm; bruno muito claro-acinzentado (10YR 7/4, úmido) e bruno-amarelado (2,5Y 7/4, seco) e mosqueado comum médio difuso bruno-amarelado (10YR 5/8); franco-arenosa; maciça muito coesa; extremamente dura, extremamente firme, ligeiramente plástica e não pegajosa; transição difusa e plana.
- Bm4 - 260-310 cm; bruno muito claro-acinzentado (10YR 7/3, úmido) e branco (10YR 7/2, seco) e mosqueado pouco médio distinto bruno-forte (7,5YR 5/8); franco-arenosa; maciça muito coesa; extremamente dura, muito firme, ligeiramente plástica e não pegajosa; transição difusa e plana.
- Bx - 310-360 cm; bruno muito claro-acinzentado (10YR 7/3, úmido) e branco (10YR 8/2, seco) e mosqueado comum grande distinto bruno-amarelado (10YR 5/8); franco-arenosa; maciça muito coesa e partes fraca pequena e média blocos angulares; dura e extremamente dura, friável e partes firmes a muito firmes, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição difusa e plana.
- BC - 360-430 cm; bruno muito claro-acinzentado (10YR 7/3, úmido) e branco (10YR 8/2, seco) e mosqueado abundante médio e grande distinto bruno-amarelado-escuro (10YR 4/6); franco-argiloarenosa; maciça e partes fraca pequena e média blocos angulares; dura e extremamente dura, friável e partes firmes, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição abrupta e ondulada.

Cc - 310-360 cm; coloração variegada composta de vermelho (2,5YR 4/6) e bruno muito claro-acinzentado (10YR 7/3); é um horizonte composto de materiais ferruginosos com tamanho e formas irregulares entremeado com materiais tipo horizonte C com textura franco-argiloarenosa.

RAÍZES - Muitas finas no Ap e poucas finas em E1 e E2.

OBSERVAÇÕES:

- 1 - Muitos poros pequenos e poucos médios no Ap, E1 e E2, e poucos pequenos nos demais horizontes.
- 2 - Na imersão em água o material de Bm1 a Bm4 não esboroa , mas pode ser quebrado, em parte, com a mão.
- 3 - No local da descrição do perfil o horizonte Bhs/Bsm é descontínuo e a descrição foi realizada onde este não ocorre sobre o Bm. A espessura de Bhs/Bsm varia de 5 a 40 cm, sendo a cor do Bhs bruno-escuro (7,5YR 3/4) e a do Bsm variando de bruno-avermelhado (5YR 4/4) a bruno-forte (7,5YR 4/6).
- 4 - Ocorrem poucos materiais com características de fragipã no horizonte BC.
- 5 - Em algumas partes do Bm, próximo ao local da descrição, ocorrem pedaços de horizonte plácico separando cimentações fortes das fracas.
- 6 - Classe nova sugerida: ESPODOSSOLO ALUMINILÚVICO Órtico arênico.

PERFIL - 17; **NÚMERO DE CAMPO** - P17 (Complementar); **DATA** - 02/02/2002 (Nova coleta).

CLASSIFICAÇÃO: LATOSSOLO AMARELO Distrófico típico.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS - Fazenda Ferreira Lopes, Estrada Crato - Moreilândia, distando 33 km do Crato e 9 km de Moreilândia, município de Moreilândia - PE. Coordenadas 7°29' S e 39°29' W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL - Topo plano de chapada, com cerca de 0-2% de declive, sob cobertura de formação secundária de floresta subcaducifólia/cerrado (carrasco).

ALTITUDE - Cerca de 920 m.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA - Arenitos da formação Exu. Período Cretáceo.

MATERIAL ORIGINÁRIO - Sedimentos argilo-arenosos.

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE - Não pedregoso e não rochoso.

RELEVO LOCAL - Plano.

RELEVO REGIONAL - Plano e suave ondulado.

EROSÃO - Laminar ligeira.

DRENAGEM - Bem drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA - Transição floresta subcaducifólia/cerrado subcaducifólio (carrasco).

USO ATUAL - Pecuária semi-extensiva e culturas como palma, capins; cajueiro, mangueira, goiabeira, eucaliptos, etc.

CLIMA - Aw' de Koeppen e 4bTh de Gaussen.

DESCRITO E COLETADO POR - Osvaldo Ferreira Lopes. Recoletado por José Coelho de Araújo Filho e Osvaldo Ferreira Lopes.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Ap1 - 0-10 cm; bruno-escuro (10YR 3/3, úmido) e bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2, seco); franco-argiloarenosa; moderada muito pequena a média granular e fraca blocos subangulares; macia, muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara e plana.

Ap2 - 10-20 cm; bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/3, úmido) e bruno (10YR 5/3, seco); argiloarenosa; fraca pequena e média blocos subangulares; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara e plana.

BA - 20-37 cm; bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmido); franco-argiloarenosa; fraca pequena e média blocos subangulares; ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição gradual e plana.

Bw1 - 37-97 cm; bruno-amarelado (10YR 5/6, úmido); franco-argiloarenosa; moderada muito pequena e pequena granular e fraca blocos subangulares; macia, muito friável, plástica e pegajosa; transição difusa e plana.

Bw2 - 97-160 cm; bruno-amarelado (10YR 5/6, úmido); argilo-arenosa; moderada muito pequena e pequena granular com aspecto poroso "in situ"; macia, muito friável, plástica e pegajosa; transição difusa e plana.

Bw3 - 160-200 cm+; bruno-amarelado (10YR 5/6, úmido); argilo-arenosa; moderada muito pequena e pequena granular com aspecto poroso "in situ"; macia com partes ligeiramente dura, muito friável, plástica e pegajosa.

RAÍZES - Muitas finas e médias no Ap1, Ap2 e BA; comuns finas e médias no Bw1; e poucas finas e médias nos demais horizontes.

OBSERVAÇÕES:

1 - Muitos poros muito pequenos e pequenos no Ap1. Muitos poros muito pequenos e pequenos e poucos médios no Ap2 e BA. Muitos poros muito pequenos e pequenos e raros médios nos demais horizontes.

2 - O solo não apresenta coesão e foi utilizado para fins comparativos com os solos coesos.

3 - Foram recoletadas amostras em BA e Bw1 para estudos microscópicos e ultramicroscópicos e análises de amorfos, com fins comparativos em relação aos solos coesos dos tabuleiros costeiros.