UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CARACTERIZAÇÃO E GÊNESE DE SOLOS E DE DEPÓSITO DE CAULIM ASSOCIADO, SÃO GABRIEL DA CACHOEIRA - AM

Débora Ayumi Ishida

ORIENTADORA: Prof.ª Dr.ª Célia Regina Montes

TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica

São Paulo

2010

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte

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

Ishida, Débora Ayumi
Caracterização e gênese de solos e de depósito de caulim associado, São Gabriel da Cachoeira - AM / Débora Ayumi Ishida. – São Paulo, 2010.
172 p. : il.

Tese (Doutorado) : IGc/USP
Orient.: Montes, Célia Regina

1. Sistema latossolo-espodossolo 2. Caulim da Amazônia 3. Grau de ordem estrutural de caulinita 4. Mineralogia I. Título

Dedico e ofereço,

Aos meus pais Hiroshi e Sadako, pelo infinito amor e ensinamentos.

À minha irmã Adriana e ao Edson, meu irmão de coração, pelo apoio e carinho.

Ao meu querido Camolese por todo apoio, paciência e dedicação.

À minha orientadora Profa. Dra. Célia Regina Montes pela orientação e ensinamentos indispensáveis ao meu aprendizado e por ter me apoiado, auxiliado e encorajado em todos os momentos dessa caminhada, principalmente nos mais difíceis. Sem sua ajuda esse trabalho não estaria finalizado.

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho só pôde ser realizado e concluído com o apoio e colaboração de orientadores, amigos, colegas e instituições. Por isso expresso o meu sentimento de gratidão por todos.

Ao Prof. Dr. Adolpho José Melfi (ESALQ/NUPEGEL - USP) pelas colaborações, ensinamentos e sugestões nos trabalhos de campo e discussões na área de mineralogia e geoquímica.

Ao Prof. Dr. Yves Lucas (PROTEE - Université du Sud Toulon-Var) pelos ensinamentos e sugestões nos trabalhos de campo, nas hipóteses sobre a gênese do sistema e nas descrições micromorfológicas e a equipe do Laboratório PROTEE.

Ao Prof. Dr. Antônio Carlos Vieira Coelho (POLI - USP) pelas sugestões e colaborações em cristalografia feitas no exame de qualificação.

À Profa. Dra. Sonia Maria Barros de Oliveira (IGc - USP) pelas sugestões e colaborações em geoquímica realizadas no exame de qualificação.

À Profa. Dra. Nadia Regina do Nascimento (IGCE - UNESP) pelas "aulas" de campo (São Gabriel da Cachoeira) a respeito da Amazônia e do sistema Latossolo-Espodossolo.

Ao Prof. Dr. Emmanuel Fristch (IMPMC - Université de Paris-VI) pelos ensinamentos no primeiro trabalho de campo.

À Profa. Dra. Marly Babinski (IGc-USP) pela compreensão e apoio como coordenadora do Programa de Geoquímica e Geotectônica.

À Profa. Dra. Maria Cristina Motta de Toledo (EACH-USP) por sempre ter me apoiado e demonstrado compreensão e amizade.

Ao Prof. Dr. Miguel Cooper (ESALQ-USP) pela colaboração e utilização do Laboratório de Microscopia.

À Dra. Telma MacFadden, à Dra. Maria Cândida Alves Silva Chicanelli e à Dra. Cecília Guiro Pacheco pelo apoio incondicional para que eu pudesse desenvolver esse trabalho.

Ao colega e companheiro de salinha Osvaldo José Pereira pelo convívio e confecção dos mapas.

À Profa. Fabiana Cerri pela tradução do resumo.

À Dra. Tamara Gomes (NUPEGEL-USP) pelos ensinamentos e orientações nos resultados das curvas de retenção de água no solo.

Ao Dr. Magnus Deon (NUPEGEL-USP) pela contribuição nas análises estatísticas.

Às amigas Aline Silverol (IGc-USP) e Verônica Gabriel Santos (Laboratório de Análises Mineralógicas do IGc-USP) pelo apoio e participação em todos os momentos.

Aos amigos Carlos Eduardo Juhász (*in memorian*), Flávia Morales, Herdjânia Veras de Lima, Lise Cary, Lígia Silva e Nathália Brancher, que sempre estarão em meu coração, agradeço pelo convívio, apoio e incentivo.

Ao casal Márcia Tot e Serginho Tolotto pelo convívio, companheirismo e amizade.

À Aracy Domingues Fernandes, mãe do Camolese, pelo convívio, amizade e por todos os almoços e jantares.

Aos amigos da salinha Rafael Leal, Lilian P. Firme (Liloka) e Rafael Silva agradeço pelo convívio, pelas discussões e pelos inúmeros e inesquecíveis momentos de bom humor. Ao Leal agradeço também por todas as trocas filosóficas e culturais.

Aos colegas do IGCE-UNESP Bruna Arenare, Guilherme Bueno e Alisson pelo companheirismo nos trabalhos de campo na Amazônia.

A todos os funcionários do IGc-USP mas, em especial, àqueles que contribuíram de forma mais direta: Ana Paula Cabanal (sempre gentil e prestativa), Magali Poli Fernandes Rizzo, Sonia Regina Yole Guerra e Isaac Jamil Sayeg.

Aos colegas (Roberta Santin, Bruno Galli e Bianca) e funcionários do NUPEGEL-USP (Clô e Paulo) pelo convívio e apoio.

Ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGc-USP), ao Programa de Pós-graduação em Geoquímica e Geotectônica e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela oportunidade e concessão de bolsa de estudo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento por meio do projeto CAPES-COFECUB "Podzolização das lateritas da alta bacia amazônica: Estudos dos mecanismos e dos fatores controladores da dinâmica evolutiva dos podzóis, das exportações de matéria nas cabeceiras da bacia do Rio Negro e dos depósitos de caolins associados" (Processo n^{o} 483/05/07).

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento do projeto: "Processos e Mecanismos Pedogenéticos Envolvidos na Formação dos Depósitos de Caolim de São Gabriel da Cachoeira" (Processo n^{o} 07/02543-0).

Ao Núcleo de Pesquisa em Geoquímica e Geofísica da Litosfera da Universidade de São Paulo (NUPEGEL) pelo uso da estrutura física e laboratorial.

Ao INCT Estudos do Meio Ambiente (INCT-EMA) e ao CEPEMA - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pelo uso do laboratório de ATD-TG.

Sumário

Índice de Figuras iii
Índice de Tabelas viii
RESUMO 1
ABSTRACT 1
Introdução 1
Parte 1 Caracterização e gênese de sistema Latossolo-Espodossolo 4
1.1. Revisão bibliográfica 4
1.1.1. O sistema de transformação Latossolo-Espodossolo 4
1.1.2. Podzolização 6
1.1.3. Hidromorfia e oxirredução 7
1.1.4. Gênese dos caulins da Amazônia 8
1.2. Materiais e métodos 11
1.2.1. Contexto geológico, geomorfológico e pedológico da área estudada 11
1.2.2. Levantamento e coleta de solos 15
1.2.3. Análises físicas 15
1.2.4. Análises mineralógicas 17
1.2.5. Análises químicas 20
1.2.6. Análises microscópicas 21
1.3. Resultados e discussões 23
1.3.1. Estudo da topossequência 23
1.3.2. Características físicas dos perfis 32
1.3.3. Características mineralógicas e geoquímicas dos perfis 46
1.4. Considerações sobre o desenvolvimento vertical e lateral do solo e do caulim 99
1.5. Referências 102
Parte 2 Característica cristalográfica das caulinitas do caulim de São Gabriel da Cachoeira 111
2.1. Revisão bibliográfica 111
2.1.1. Grau de ordem estrutural da caulinita 111
2.1.2. Índice de Hinckley 112
2.1.3. Índice de Stoch 114
2.1.4. Índice de Aparicio-Galán-Ferrell 114
2.1.5. Índice R2 de Lièrtard 115

2.1.6. Índice de Amigó 116
2.1.7. Índice de Hughes-Brown 117
2.1.8. Índice de Plançon-Zacharie 119
2.1.9. Análise Termica - temperatura de desidroxilação da caulinita e nucleação da mulita 121
2.2. Materiais e métodos 122
2.2.1. Pré-tratamento e separação das frações granulométricas 122
2.2.2. Difração de raios X 122
2.2.3. Análise térmica diferencial e gravimétrica 124
2.3. Resultados e Discussões 125
2.4. Considerações sobre o grau de ordem estrutural de caulinitas 138
2.5. Referências 140
Conclusões gerais 144
ANEXO A 145
ANEXO B 162
ANEXO C 167

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Localização da área de estudo. Modificado de Montes (2009). 11

Figura 1.2 - Mapa geológico da região de São Gabriel da Cachoeira. 12

Figura 1.3 - Mapa geomorfológico da Região de São Gabriel da Cachoeira..... 13

Figura 1.4 - Mapa pedológico da Região de São Gabriel da Cachoeira. 14

Figura 1.5 - Organização do solo ao longo da topossequência. 24

Figura 1.6 - (a) Foto do perfil P1 mostrando a localização aproximada das fotomicrografias (b) e (c) de lâminas delgadas, respectivamente, dos horizontes A1 e A2 do perfil P1 (Espodossolo Humilúvico) obtidas ao microscópio petrográfico..... 25

Figura 1.7 - (a) Foto do perfil P1 mostrando a localização aproximada das fotomicrografias (b, c, d) de lâmina delgada do horizonte E1 do perfil P1 (Espodossolo Humilúvico) obtidas ao microscópio petrográfico..... 26

Figura 1.8 - (a) Foto do perfil P1 mostrando a localização aproximada das fotomicrografias (b, c, d, e) de lâminas delgadas obtidas ao microscópio petrográfico. 27

Figura 1.9 - Fotomicrografias de lâmina delgada do perfil P1 (Espodossolo Humilúvico) obtidas ao microscópio petrográfico.. 28

Figura 1.10 - Foto do perfil P1 mostrando canais de precipitação de ferro e de decomposição da matéria orgânica indicados pelas setas branca e verde, respectivamente. 28

Figura 1.11 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): (a) Distribuição com a profundidade das frações argila (< 0,002 mm), silte (0,002 a 0,05 mm) e areia (0,05 a 2 mm)..... 33

Figura 1.12 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): (a) Curvas de retenção de água no solo; (b) Porosidade total e faixa de macroporos (> 0,05 mm), mesoporos (entre 0,05 e 0,03 mm) e microporos do solo (< 0,03 mm); (c) Densidade do solo..... 34

Figura 1.13 - Fotomicrografias de lâminas delgadas da zona entre a transição e o caulim (K1) do perfil P1 (Espodossolo Humilúvico) obtidas ao microscópio petrográfico..... 35

Figura 1.14 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): (a) Distribuição com a profundidade das frações argila (< 0,002 mm), silte (0,002 a 0,05 mm) e areia (0,05 a 2 mm)..... 37

Figura 1.15 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): (a) Curvas de retenção de água no solo; (b) Porosidade total e faixa de macroporos (> 0,05 mm), mesoporos (entre 0,05 e 0,03 mm) e microporos do solo (< 0,03 mm); (c) Densidade do solo..... 39

Figura 1.16 - Fotomicrografias de lâminas delgadas do perfil P2 (Latossolo Amarelo) obtidas ao microscópio petrográfico. 40

Figura 1.17 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): (a) Distribuição com a profundidade das frações argila (< 0,002 mm), silte (0,002 a 0,05 mm) e areia (0,05 a 2 mm)..... 42

Figura 1.18 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): (a) Curvas de retenção com valores ajustados; (b) porosidade total e faixa de macroporos, mesoporos e microporos do solo; (c) densidade do solo. 43

Figura 1.19 - Fotomicrografias de lâminas delgadas do perfil P3 (Latossolo Amarelo) obtidas ao microscópio petrográfico.. 44

Figura 1.20 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico): (a) Distribuição com a profundidade das frações argila (< 0,002 mm), silte (0,002 a 0,05 mm) e areia (0,05 a 2 mm)..... 45

Figura 1.21 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): Distribuição do SiO_2 e do Al_2O_3 com a profundidade. 47

Figura 1.22 - Imagem de cristal de muscovita obtida ao MEV e microanálise por raios-X por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) (gráfico) em amostra da transição do perfil P1 (Espodossolo Humilúvico). 49

Figura 1.23 - Fotomicrografias delâmina delgada do perfil P1 (Espodossolo Humilúvico) obtidas ao microscópio petrográfico.. 51

Figura 1.24 - Fotomicrografias delâmina delgada do perfil P1 (Espodossolo Humilúvico) obtidas ao microscópio petrográfico. 52

Figura 1.25 - Imagem de cristal de quartzo, com setas indicando as figuras de dissolução, obtida ao MEV e microanálise, da área total observada (gráfico), por raios-X por EDS em amostra do horizonte E1 do perfil P1 (Espodossolo Humilúvico) 53

Figura 1.26 - Imagem de acordeon de caulinita, com sinais de alteração, obtida ao MEV e microanálise por raios-X por EDS (gráfico) em amostra do caulim K1 do perfil P1 (Espodossolo Humilúvico). 53

Figura 1.27 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): Distribuição do TiO_2 e do Fe_2O_3(T) com a profundidade. 56

Figura 1.28 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): Espectro da segunda derivada da função de remissão *f(R)* mostrando as bandas de absorção principais (ETP) para goethita (GO) e Hematita (H) de amostras brutas. 57

Figura 1.29 - Fotomicrografias de lâminas delgadas do perfil P1 (Espodossolo Humilúvico) obtidas ao microscópio petrográfico.. 57

Figura 1.30 - Imagens obtidas ao MEV e microanálises por raios-X por EDS (gráficos) em amostras do perfil P1 (Espodossolo Humilúvico). 58

Figura 1.31 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel para Si e Al. 59

Figura 1.32 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel para Mg, Ca, Na e K. 60

Figura 1.33 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel para Fe e Ti. 60

Figura 1.34 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Distribuição do SiO_2 e do Al_2O_3 com a profundidade. 62

Figura 1.35 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Distribuição de zircônio (Zr) com a profundidade. 64

Figura 1.36 - Imagem obtida ao MEV e microanálise por raios-X por EDS (gráfico) em amostras da camada Kn3 do perfil P2 (Latossolo Amarelo).. 64

Figura 1.37 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Distribuição de MgO, CaO, Na_2O e K_2O com a profundidade. 65

Figura 1.38 - Imagens obtidas ao MEV e microanálises por raios-X por EDS (gráficos) em amostras do perfil P2 (Latossolo Amarelo). 65

Figura 1.39 - Imagens obtidas ao MEV e microanálises por raios-X por EDS (gráficos) em amostras do perfil P2 (Latossolo Amarelo). 67

Figura 1.40 - Fotomicrografias delâmina delgada do perfil P2 (Latossolo Amarelo) obtidas ao microscópio petrográfico..... 68

Figura 1.41- Imagens obtidas ao MEV de amostra da camada Kn4 do perfil P2 (Latossolo Amarelo)..... 68

Figura 1.42 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Distribuição do TiO_2 e do Fe_2O_3(T) com a profundidade..... 69

Figura 1.43 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Espectro da segunda derivada da função de remissão *f(R)* mostrando as bandas de absorção principais (ETP) para goethita (GO) e Hematita (H) de amostras brutas. 71

Figura 1.44 - Fotomicrografias de lâminas delgadas do perfil P2 (Latossolo Amarelo) obtidas ao microscópio petrográfico.. 72

Figura 1.45 - Imagens obtidas ao MEV e microanálises por raios-X por EDS (gráficos) em amostra do perfil P2 (Latossolo Amarelo). 73

Figura 1.46 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel para Si e Al. 74

Figura 1.47 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel para Mg, Ca, Na e K. 75

Figura 1.48 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel para Fe e Ti. 75

Figura 1.49 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): Distribuição do SiO_2 e do Al_2O_3 com a profundidade..... 76

Figura 1.50 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): Distribuição de MgO, CaO, Na_2O e K_2O com a profundidade..... 78

Figura 1.51 - Imagens obtidas ao MEV e microanálises por raios-X por EDS (gráficos) em amostras do perfil P3 (Latossolo Amarelo)..... 80

Figura 1.52 - Fotomicrografias delâmina delgada do perfil P3 (Latossolo Amarelo) obtidas ao microscópio petrográfico..... 81

Figura 1.53 - Imagem obtida ao MEV e microanálise por raios-X por EDS (gráfico) em amostra do horizonte Bw1 do perfil P3 (Latossolo Amarelo)..... 82

Figura 1.54 - Imagens obtidas ao MEV e microanálises por raios-X por EDS (gráficos) em amostra do horizonte Bw base do perfil P3(Latossolo Amarelo).. 82

Figura 1.55 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): Distribuição do TiO_2 e do Fe_2O_3(T) com a profundidade..... 83

Figura 1.56 - Imagens obtidas ao MEV e microanálises por raios-X por EDS (gráficos) em amostras do perfil P3 (Latossolo Amarelo)..... 85

Figura 1.57 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): Espectro da segunda derivada da função de remissão *f(R)* mostrando as bandas de absorção principais (ETP) para goethita (GO) e Hematita (H) de amostras brutas. 85

Figura 1.58 - Fotomicrografias de lâmina delgada do perfil P3 (Latossolo Amarelo) obtidas ao microscópio petrográfico..... 86

Figura 1.59 - Perfil P3 (Espodossolo Humilúvico): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel para Si e Al. 87

Figura 1.60 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel para Mg, Ca, Na e K. 88

Figura 1.61- Perfil P3 (Latossolo Amarelo): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel para Fe e Ti. 88

Figura 1.62 - Perfil P4 (Gleissolo háplico): Distribuição do SiO_2 e do Al_2O_3 com a profundidade. 90

Figura 1.63 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico): Distribuição de MgO, CaO, Na_2O e K_2O com a profundidade. 92

Figura 1.64 - Imagens obtidas ao MEV e microanálises por raios-X por EDS (gráficos) em amostras do perfil P4 (Gleissolo Háplico).. 92

Figura 1.65 - Fotomicrografias de lâmina delgada do perfil P4 (Gleissolo Háplico) obtidas ao microscópio petrográfico. 93

Figura 1.66 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico): Distribuição do TiO_2 e do Fe_2O_3(T) com a profundidade. 95

Figura 1.67 - Imagem obtida ao MEV e microanálise por raios-X por EDS (gráfico) em amostra do perfil P4 (Gleissolo Háplico).. 95

Figura 1.68 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico): Espectro da segunda derivada da função de remissão *f(R)* mostrando as bandas de absorção principais (ETP) para goethita (GO) e Hematita (H) de amostras brutas. 96

Figura 1.69 - Fotomicrografias delâmina delgada do perfil P4 (Gleissolo Háplico) obtidas ao microscópio petrográfico. 96

Figura 1.70 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel para Si e Al. 97

Figura 1.71 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel para Fe e Ti. 97

Figura 1.72 - Imagem de lâmina delgada do perfil P4 (Gleissolo Háplico) obtida ao microscópio petrográfico. 98

Figura 1.73- Perfil P4 (Gleissolo Háplico): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel para Mg, Ca, Na e K. 98

Figura 2.1 - Difratograma de raios-X ilustrando os parâmetros a serem medidos para o cálculo do índice de Hinckley. 113

Figura 2.2 - Difratograma de raios-X ilustrando os parâmetros a serem medidos para o cálculo do índice de Stoch. 114

Figura 2.3 - Difratograma de raios-X ilustrando os parâmetros a serem medidos para o cálculo do índice de Aparicio-Galán-Ferrell. 115

Figura 2.4 - Difratograma de raios-X ilustrando os parâmetros a serem medidos para o cálculo do índice R2 de Lièтard. 116

Figura 2.5 - Difratogramas de raios-X ilustrando os parâmetros a serem medidos para o cálculo dos índices de Amigó (L001 e L002) 117

Figura 2.6 - Difratograma de raios-X ilustrando os parâmetros a serem medidos para o cálculo do índice de Hughes-Brown para o intervalo 19 a 26 º 2θ. 118

Figura 2.7 - Difratograma de raios-X ilustrando os parâmetros a serem medidos para o cálculo

do índice de Hughes-Brown para o intervalo 37 a 40 º 2θ. 118

Figura 2.8 - Difratograma de raios-X ilustrando os parâmetros a serem medidos para o cálculo do índice de Plançon-Zacharie para o intervalo 19 a 26 º 2θ. 119

Figura 2.9 - Difratograma de raios-X ilustrando os parâmetros a serem medidos para o cálculo do índice de Plançon-Zacharie para o intervalo 37 a 40 º 2θ. 120

Figura 2.10 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): a) Índice de Hinckley (IH), b) Índice de Aparicio-Galán-Ferrell (IAGF), c) Índice de Stoch (IK), d) Índice de Hughes-Brown (IHB), e) Índice R2 de Lièrtard (R2), f) Índice de Amigó 001 (L001), g) Índice de Amigó 002 (L002), h) Temperatura (º C) de desidroxilação da caulinita obtida por ATD (ATD Caulinita), i) Temperatura (º C) de nucleação da mulita obtida por ATD (ATD Mulita).. 127

Figura 2.11 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): a) Índice de Hinckley (IH), b) Índice de Aparicio-Galán-Ferrell (IAGF), c) Índice de Stoch (IK), d) Índice de Hughes-Brown (IHB), e) Índice R2 de Lièrtard (R2), f) Índice de Amigó 001 (L001), g) Índice de Amigó 002 (L002), h) Temperatura (º C) de desidroxilação da caulinita obtida por ATD (ATD Caulinita), i) Temperatura (º C) de nucleação da mulita obtida por ATD (ATD Mulita). 128

Figura 2.12 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): a) Índice de Hinckley (IH), b) Índice de Aparicio-Galán-Ferrell (IAGF), c) Índice de Stoch (IK), d) Índice de Hughes-Brown (IHB), e) Índice R2 de Lièrtard (R2), f) Índice de Amigó 001 (L001), g) Índice de Amigó 002 (L002), h) Temperatura (º C) de desidroxilação da caulinita obtida por ATD (ATD Caulinita), i) Temperatura (º C) de nucleação da mulita obtida por ATD (ATD Mulita).. 129

Figura 2.13 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico): a) Índice de Hinckley (IH), b) Índice de Aparicio-Galán-Ferrell (IAGF), c) Índice de Stoch (IK), d) Índice de Hughes-Brown (IHB), e) Índice R2 de Lièrtard (R2), f) Índice de Amigó 001 (L001), g) Índice de Amigó 002 (L002), h) Temperatura (º C) de desidroxilação da caulinita obtida por ATD (ATD Caulinita), i) Temperatura (º C) de nucleação da mulita obtida por ATD (ATD Mulita). 130

Índice de Tabelas

Tabela 1.1 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): Análise granulométrica. 33

Tabela 1.2 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): Densidade do solo, densidade de partículas e porosidade total do solo. 36

Tabela 1.3 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Análise granulométrica. 38

Tabela 1.4 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Densidade do solo e densidade de partículas..... 41

Tabela 1.5 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): Análise granulométrica. 42

Tabela 1.6 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): Densidade do solo, densidade de partículas e porosidade total do solo..... 45

Tabela 1.7 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico): Análise granulométrica. 46

Tabela 1.8 - Composição química média de três rochas aflorantes nos arredores da área de estudo. 46

Tabela 1.9 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): Difração de raios-X da amostra bruta. 48

Tabela 1.10 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): pH e composição química total da amostra bruta..... 48

Tabela 1.11 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): Análise normativa da amostra bruta. 50

Tabela 1.12 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): Difração de raios-X das frações granulométricas areia, silte e argila..... 55

Tabela 1.13 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): Análise térmica diferencial e gravimétrica das frações granulométricas areia e argila. 55

Tabela 1.14 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel. 59

Tabela 1.15 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Difração de raios-X da amostra bruta. 61

Tabela 1.16 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): pH e composição química total da amostra bruta.63

Tabela 1.17 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Análise normativa da amostra bruta. 63

Tabela 1.18 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Difração de raios-X das frações granulométricas areia, silte e argila. 70

Tabela 1.19 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Análise térmica diferencial e gravimétrica das frações granulométricas argila e areia. 70

Tabela 1.20 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel. 74

Tabela 1.21 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): Difração de raios-X da amostra bruta. 76

Tabela 1.22 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): pH e composição química total da amostra bruta.77

Tabela 1.23 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): Análise normativa da amostra bruta. 79

Tabela 1.24 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): Difração de raios-X das frações granulométricas areia, silte e argila. 84

Tabela 1.25 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): Análise térmica diferencial e gravimétrica das frações granulométricas argila e areia. 84

Tabela 1.26 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel. 87

Tabela 1.27 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico): Difração de raios-X da amostra bruta. 89

Tabela 1.28 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico): pH e composição química total da amostra bruta. 89

Tabela 1.29 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico): Análise normativa da amostra bruta. 91

Tabela 1.30 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico): Difração de raios-X das frações granulométricas areia, silte e argila. 94

Tabela 1.31 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico): Análise térmica diferencial e gravimétrica das frações granulométricas argila e areia. 94

Tabela 1.32 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel. 97

Tabela 2.1 - Classes de grau de ordem estrutural da caulinita para os seguintes métodos: Hinckley, R2-Lièrtard, Stoch, Hughes-Brown, Aparicio-Galán-Ferrell e Amigó. 123

Tabela 2.2 – Indicações para aplicação dos métodos de avaliação do grau de ordem estrutural de caulinita na presença de outras fases minerais e amorfas. Modificada de Aparicio e Galán (1999). 126

Tabela 2.3 - Resultados experimentais da aplicação do método de Plançon-Zacharie para estimar o grau de ordem estrutural da caulinita na fração argila. 131

Tabela 2.4 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico). Correlação linear entre os índices de Plançon-Zacharie (% ldp), Hinckley (IH), Aparicio-Galán-Ferrell (IAGF), Stoch (IK), Lièrtard (R2), Hughes-Brown (IHB), Amigó (L001), Amigó (L002), profundidade das amostras no perfil de solo (Prof.), porcentagem de caulinita na amostra (% K am.) e temperatura de desidroxilação da caulinita (TD). 132

Tabela 2.5 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo). Correlação linear entre os índices de Plançon-Zacharie (% ldp), Hinckley (IH), Aparicio-Galán-Ferrell (IAGF), Stoch (IK), Lièrtard (R2), Hughes-Brown (IHB), Amigó (L001), Amigó (L002), profundidade das amostras no perfil de solo (Prof.), porcentagem de caulinita na amostra (% K am.) e temperatura de desidroxilação da caulinita (TD). 133

Tabela 2.6 - Perfil P3(Latossolo Amarelo). Correlação linear entre os índices de Plançon-Zacharie (% ldp), Hinckley (IH), Aparicio-Galán-Ferrell (IAGF), Stoch (IK), Lièrtard (R2), Hughes-Brown (IHB), Amigó (L001), Amigó (L002), profundidade das amostras no perfil de solo (Prof.), porcentagem de caulinita na amostra (% K am.) e temperatura de desidroxilação da caulinita (TD). 133

Tabela 2.7 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico). Correlação linear entre os índices de Plançon-Zacharie (% ldp), Hinckley (IH), Aparicio-Galán-Ferrell (IAGF), Stoch (IK), Lièrtard (R2), Hughes-Brown (IHB), Amigó (L001), Amigó (L002), profundidade das amostras no perfil de solo (Prof.), porcentagem de caulinita na amostra (% K am.) e temperatura de desidroxilação da caulinita (TD). 134

Tabela 2.8 – Todas as camadas de caulim dos perfis P1 (Espodossolo Humilúvico), P2 (Latossolo Amarelo) e P3 (Latossolo Amarelo). Correlação linear entre os índices de Plançon-Zacharie (% ldp), Hinckley (IH), Aparicio-Galán-Ferrell (IAGF), Stoch (IK), Lièrtard (R2), Hughes-Brown (IHB), Amigó (L001), Amigó (L002), porcentagem de caulinita na amostra (% K am.) e temperatura de desidroxilação da caulinita (TD). 137

RESUMO

ISHIDA, D. A. *Caracterização e gênese de solos e de depósito de caulim associado, São Gabriel da Cachoeira - AM*. 2010. 192 p. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2010.

Em São Gabriel da Cachoeira, estado do Amazonas, foi estudado, por meio de uma topossequência, um sistema Latossolo-Espodossolo com caulim associado, desenvolvido a partir de rochas granito gnáissicas do embasamento cristalino. Na topossequência, de montante para jusante, foram descritos e amostrados quatro perfis de solo: Espodossolo Humilúvico (P1) no topo, dois Latossolos Amarelos (P2 e P3) na meia encosta e Gleissolo Háplico (P4) na base. Os objetivos principais foram estudar o funcionamento desse sistema de transformação a partir de sua caracterização morfológica, química, física e mineralógica e obter informações sobre as características cristalográficas das caulinitas a partir do estudo do grau de ordem estrutural. A caracterização e gênese dos solos e do caulim foram estudadas por curva de retenção de água no solo, difração de raios-X, análise térmica diferencial e gravimétrica, espectroscopia por reflectância difusa, análise química total e análises microscópicas. A ordem estrutural das caulinitas foi avaliada a partir dos cálculos dos índices de Hinckley (IH), Stoch (IK), Aparicio-Galán-Ferrell (IAGF), Lièтard (R2), Amigó (001 e 002), Hughes-Brown (IHB) e Plançon-Zacharie (IPZ) e das temperaturas de desidroxilação da caulinita e nucleação da mulita. Esses estudos permitiram concluir que: (i) o sistema de solos na topossequência está em funcionamento e levando à formação dos Espodossolos em detrimento da cobertura laterítica, provocando modificações na cobertura vegetal com a campinarana substituindo a floresta; (ii) o sistema Latossolo-Espodossolo, influenciado pela elevada acidez das soluções e hidromorfia, é caracterizado, no P1, pela decomposição da matéria orgânica, dissolução dos minerais mais alteráveis (ação dos ácidos orgânicos), acúmulo residual do quartzo nos horizontes superficiais, álbicos e espódicos e pela translocação do alumínio e do ferro na forma de complexos orgânicos para os horizontes espódicos, onde se acumulam, influenciados pela elevação e rebaixamento do nível dos aquíferos suspensos, formando os horizontes espódicos Bh e Bhs. Nos perfis P2 e P3, apesar de pertencerem à mesma classe de solos (Latossolo Amarelo), o P2 sofre maior influência das soluções ácidas do que o P3, a exemplo do P1. Nestes perfis (P1, P2 e P3) a alternância de ambientes (redutor e oxidante) levou ao esbranquecimento do caulim desenvolvido na base. A gênese do P4 tem relação com a hidromorfia atuante na maior parte do ano, que promove a redução do ferro, além de não ser propício à formação de caulinita; (iii) os resultados da aplicação dos índices mostraram-se inconsistentes nos perfis P1, P2 e

P4, provavelmente, em razão das condições mais agressivas do P1 e P2 e da hidromorfia do P4. O P3, o menos influenciado pela acidez das soluções, apresentou resultados consistentes; (iv) o índice de Plançon-Zacharie, em razão do maior número de parâmetros cristalográficos que utiliza, apresentou resultados que foram considerados consistentes em todos os perfis. Foram identificadas duas fases de caulinitas na maior parte dos horizontes estudados. Quando as condições de acidez são elevadas (P1 e P2), predominou a fase com caulinita de baixo ordenamento estrutural. Aonde o pH é mais elevado (perfil P3) a fase bem ordenada predominou. Os resultados obtidos sugerem que os processos pedogenéticos atuantes na transformação Latossolo-Espodossolo limitam a aplicação dos métodos de avaliação da ordem estrutural aqui empregados.

ABSTRACT

ISHIDA, D. A. *Characterization and Genesis of soils and kaolin deposits associated, São Gabriel da Cachoeira - AM*. 2010. 192 p. Doctoral Thesis, Institute of Geosciences, University of São Paulo, 2010.

In São Gabriel da Cachoeira, Amazonas state, was studied by a topsequence, a system Oxisols to Spodosols with kaolin associated, developed from granitic-gneiss rocks of the crystalline basement. In the topsequence, from upstream to downstream, were described and sampled four soil profiles: Spodosols (P1) at the top, two Oxisols Yellow (P2 e P3) on the hillside e Gleysols (P4) at the base. The main aims were to study the operation of this transforming system from their morphology characterization, chemical, physical and mineralogical and get information about the crystallographic characteristics of kaolinites from the study of degree of structural order. Characterization and genesis of soils and kaolin were studied by retention curve of water in the soil, x-ray diffraction, differential thermal and gravimetric analysis, diffuse reflectance spectroscopy, total chemical analysis and microscopic analysis. The structural order of kaolinite was evaluated from calculations of the Hinckley index (HI), Stoch (IK), Aparicio-Galán-Ferrell (IAGF) Lièтard (R2), Amigó (001 and 002), Hughes-Brown (IHB) and Plançon-Zacharie (IPZ) and the temperatures of dehydroxylation of kaolinite and mullite nucleation. These study conclude that: (i) the soil system in topsequence is operating and leading to formation of Spodosols over lateritic coverage, causing changes in vegetation coverage with campinarana replacing the forest; (ii) the system Oxisols-Spodosols, influenced by the high acidity of the solutions and waterlogging, is characterized in P1, by decomposing organic matter, dissolution of minerals more changeable (action of organic acids), residual accumulation of quartz in surfaces horizons, albic and spodic and translocation of aluminum and iron in the form of organic complexes for the spodic horizons, where they accumulate, influenced by lifting and lowering of levels of the aquifer suspended, forming the spodic horizons Bh and Bhs. In the profiles P2 and P3, despite belonging to the same soil class (Oxisols Yellow), P2 is more influence by acid solutions than the P3, for exemple the P1. These profiles (P1, P2 and P3) interchange of environments (reducing and oxidizing) led to whitenning of kaolin developed at the base. The genesis of P4 is related to waterlogging active in the most part of the year, which promotes the reduction of iron, beyond not be conducive to the formation of kaolinite, (iii) the results of application of the indexes shown inconsistent in profiles P1, P2 and P4, probably because of more aggressive conditions of P1 and P2 and waterlogging of P4. P3, the least influenced by the solutions acidity, showed consistent results, (iv) the Plançon-

Zacharie index, because of its calculation to be done detaileded, presented results to be considered consistent in all profiles. We identified two kaolinites phases in most of horizons studied, where acidic conditions are high (P1 and P2) dominated the phase with low kaolinite structural order. Where the pH is slightly higher (profile P3), the orderly phase predominated. The results suggest that pedogenetic process active in transformation Oxisols-Spodosol limit the application of methods for structural order used here.

Introdução

A importância geoambiental da bacia amazônica, uma das maiores bacias hidrográficas do planeta, está relacionada à floresta tropical que, em grande parte, encontra-se livre de processos antrópicos, ainda que a política adotada pelo governo brasileiro, a partir da década de 1960, estimulasse a integração da Amazônia por meio de incentivos fiscais e da instalação de meios de comunicação e transporte, os quais atraíram o capital internacional através das grandes corporações mineradoras e, como consequência, intensificaram os fluxos migratórios. Desde a década de 1970, devido às marcantes mudanças climáticas no planeta, a bacia amazônica tornou-se importante área de controle em pesquisas relacionadas aos impactos ambientais provocados pela atividade antrópica e relacionadas à dinâmica do carbono (ciclo do carbono) e à remobilização de matéria na interface atmosfera, hidrosfera e pedosfera.

Do ponto de vista geológico a região Amazônica é reputada internacionalmente pelas suas importantes e variadas reservas minerais. Grande parte das jazidas que ali ocorrem tem sua gênese ligada, direta ou indiretamente, a processos supérgenos de alteração de rochas, como por exemplo, as jazidas de ferro, manganês, níquel, alumínio (bauxita) e caulim, as quais são formadas a partir da ação do intemperismo tropical úmido de diferentes tipos de rochas ígneas, metamórficas e sedimentares.

Dentre estas reservas minerais, o caulim destaca-se devido ao caráter competitivo e concentrado de seu mercado produtor. Nos três últimos anos, os principais produtores mundiais de caulim, Alemanha, Brasil, Coreia, Estados Unidos, Reino Unido, República Tcheca, Uzbequistão e Ucrânia, foram responsáveis por 71,33 %; 72,20 %; e 72,32 % do mercado mundial (USGS, 2008; USGS, 2009; USGS, 2010). O Brasil entre 2005 e 2008 produziu de 2.410.000 a 2.580.000 t de caulim beneficiado (DNPM, 2009), sendo a região norte, onde se localizam as maiores reservas, responsável por 94 % (2005 e 2006) e 96 % (2007) da produção nacional (DNPM, 2007; DNPM, 2008).

Este interesse econômico reflete sobre as pesquisas relacionadas aos depósitos de caulim atualmente em exploração na Amazônia, os quais possuem uma gênese associada à alteração laterítica de rochas sedimentares pertencentes a diferentes formações geológicas Alter do Chão, na região do rio Jari (KOTSCHOUBEY; DUARTE; TRUCKENBRODT, 1999; MONTES et al., 2002; MURAD, 2003; WILSON; SOUZA SANTOS; SOUZA SANTOS, 2006) e na região norte de Manaus (COSTA; MORAES, 1998; LUCAS, 1989; VIEIRA-COELHO; SOUZA SANTOS, 2001; WILSON; SOUZA SANTOS; SOUZA SANTOS, 2006; BALAN et al., 2007), e Ipixuna e Barreiras, na região do rio Capim (KOTSCHOUBEY; TRUCKENBRODT; HYERONIMUS, 1996; CARNEIRO et al., 2003; SANTOS JUNIOR; ROSSETI, 2003; NASCIMENTO; GÓES, 2005; SANTOS JUNIOR; ROSSETI, 2006; WILSON; SOUZA SANTOS; SOUZA SANTOS, 2006; MURRAY; ALVES; BASTOS, 2007; SANTOS JUNIOR; ROSSETI, 2008; COSTA; SOUSA; ANGÉLICA., 2009).

Uma exceção a esse tipo de gênese ligado a rochas sedimentares é encontrada na região do alto rio Negro, onde importantes ocorrências de caulins se associam à alteração supérgena de rochas do embasamento cristalino, do tipo granito e granito gnaisse.

Enquanto os depósitos de caulins formados a partir das rochas sedimentares aparecem associados a solos lateríticos do tipo Latossolos, as ocorrências do alto rio Negro se associam a um sistema Latossolo-Espodossolo. Este sistema é bem representado nesta região e foi estudado por diferentes autores (LUCAS et al., 1984; BRAVARD; RIGHI, 1988; RIGHI et al., 1990; LUCAS et al., 1996; DUBROECK; VOLKOFF, 1998; MAFRA et al., 2002).

Os trabalhos pioneiros realizados sobre a gênese dos caulins do alto rio Negro (MORAES, 1994; COSTA; MORAES, 1998) não atentaram para importância deste sistema pedológico de transformação Latossolo-Espodossolo na formação dessas ocorrências de caulins. Somente o recente trabalho de Montes et al. (2007) levantou a hipótese de que a gênese de caulins estaria relacionadas ao processo de podzolização e à dinâmica da matéria orgânica.

Considerando que a hipótese levantada por estes últimos autores basearam-se, sobretudo, em observações de campo e dados de literatura, carecendo, portanto, de análises diretas, foi objetivo do presente trabalho realizar um estudo buscando evidências que pudessem comprovar ou não a hipótese levantada. Para tal uma área situada no Município de São Gabriel da Cachoeira (AM), onde um extenso afloramento de caulim esbranquecido, formado a partir do intemperismo de rochas granito gnaíssicas do embasamento cristalino, ocorre associado a um sistema Latossolo-Espodossolo foi selecionada para o desenvolvimento da presente pesquisa. Desta forma, este estudo visa caracterizar este sistema de transformação, a partir da análise de uma topossequência sob o ponto de vista físico, químico e mineralógico e, por meio da utili-

zação de técnicas específicas, obter informações cristalográficas (grau de ordem estrutural) das caulinitas, importantes para a compreensão dos processos envolvidos em sua gênese e para uma possível valorização econômica das ocorrências de caulim.

O presente trabalho foi organizado em duas partes. A primeira será dedicada ao estudo do sistema de transformação Latossolo-Espodossolo e a segunda à caracterização das caulinitas dos solos ao longo da topossequência a partir da avaliação de sua ordem estrutural. Em cada parte será apresentada a revisão bibliográfica e materiais e métodos pertinentes a cada assunto, bem como a discussão dos resultados e considerações específicas. Ao final deste documento encontra-se a conclusão geral da presente pesquisa.

Parte 1 Caracterização e gênese de sistema Latossolo-Espodossolo

1.1. Revisão bibliográfica

1.1.1. O sistema de transformação Latossolo-Espodossolo

Analisando os solos sob o ponto de vista da zonalidade climática, Latossolos e Espodossolos são típicos de regiões climáticas completamente distintas, pois enquanto os primeiros são característicos de regiões tropicais úmidas, os segundos têm sua distribuição zonal nas regiões frias do globo, onde o baixo pH das soluções de percolação desempenha um papel fundamental na sua gênese.

Entretanto, estes dois tipos de solos formam nas zonas intertropicais um importante sistema pedológico que tem sido estudado em várias regiões: Indonésia (BRABANT, 1987; THOMAS; THORP; McALISTER, 1999), Polinésia Francesa (JAMET et al., 1996), Guiana Francesa (BOULET et al., 1982; LUCAS et al.,1986; VEILLON, 1990), Congo (SCHWARTZ, 1988) e Peru (VEILLON; SORIA-SOLANO, 1988).

A presença do sistema Latossolo-Espodossolo, dominante em grande parte da região do alto rio Negro, já havia sido observada pelos trabalhos pioneiros de levantamento de solo da Amazônia (COSTA et al., 1977).

Há duas linhas de pesquisa a respeito da origem desta associação Latossolo-Espodossolo na paisagem tropical úmida. Uma está relacionada aos processos erosivos superficiais (erosão física) e ao transporte de matéria em superfície, estando a outra associada à transformação lateral resultante de processos erosivos químicos relacionados à mecanismos de queluviação e lixiviação.

Seguindo a primeira linha, Klinge (1965) atribui à origem desse sistema pedológico na região próxima a Manaus, ao contato entre os sedimentos arenosos aluviais do Terciário com os depósitos argilosos fluvio-lacustres (Formação Barreiras). Ainda considerando a origem sedimentar, de acordo com Sombroek (2000), as associações Latossolo-Espodossolo das planícies arenosas dos rios Negro e médio Branco resultam de um grande evento denudacional, ocorrido após a captura de parte dos tributários dos rios Orinoco e Esequibo, na Venezuela, pelo sistema do rio Amazonas. Este fato ocasionou aumento na vazão dos tributários desse rio, causando a remoção seletiva das frações mais finas dos sedimentos do Pleistoceno e o acúmulo residual de quartzo.

A outra linha de pesquisa está fundamentada na transformação lateral dos Latossolos em Espodossolos, que se desenvolvem a partir do mesmo material de origem, apresentam estreitas ligações genéticas entre si e nenhuma descontinuidade litogenética (LUCAS et al., 1984; FRITSCH et al., 1986; CHAUVEL; LUCAS; BOULET, 1987; BRAVARD; RIGHI, 1988; LUCAS, 1989; RIGHI et al., 1990; LUCAS et al., 1996; DUBROEUCQ; VOLKOFF, 1998, 1999; MAFRA et al., 2002; NASCIMENTO et al., 2004, 2008).

Atribuiu-se à dinâmica das soluções e ao intemperismo geoquímico a gênese das sequências Latossolo-Espodossolo desenvolvidas sobre sedimentos da Formação Barreiras (LUCAS et al., 1984, 1987; BRAVARD; RIGHI, 1988, 1989; RIGHI et al., 1990; LUCAS et al., 1996), na região próxima a Manaus. Essas sequências apresentaram várias similaridades com aquelas estudadas por Klinge (1965), diferindo apenas com relação à interpretação. Nas zonas lateríticas dos platôs desenvolve-se um sistema vertical de acúmulo relativo de caulinita, no qual as soluções constituídas por compostos orgânicos complexantes percolam lentamente o material argiloso e são retidos nas superfícies de troca dos argilominerais. O alumínio e o ferro permanecem no perfil e parte do silício, produto da dissolução do quartzo, é exportado. Na transição com os solos da base da vertente, desenvolvem-se solos lateríticos afetados por hidromorfia. Essas condições redutoras promovem o amarelecimento, embranquecimento e perda progressiva de argila das lateritas. Nos Espodossolos da base das vertentes desenvolve-se um sistema vertical de déficit em alumínio e de acúmulo relativo de quartzo, do qual a água e os compostos organometálicos de ferro e alumínio são rapidamente exportados através

da circulação lateral dos fluxos hídricos devido à alta permeabilidade e às poucas superfícies de troca do material arenoso.

Em sequências Latossolo-Espodossolo desenvolvidas sobre rochas do embasamento cristalino (DUBROEUCQ; VOLKOFF, 1991, 1998, 1999; MAFRA et al., 2002) e arenitos da formação Prosperança (NASCIMENTO et al., 2004), no alto rio Negro e na região do rio Jaú, respectivamente, foram identificados processos pedológicos de transformação lateral e vertical similares àqueles descritos na região próxima a Manaus, com a instalação de condições hidromórficas no perfil laterítico, perda progressiva de argila, ação das soluções carregadas de complexos organometálicos, acúmulo residual de quartzo e formação de horizontes álbicos e espódicos.

Dubroeucq e Volkoff (1998), Bravard e Righi (1990) e Nascimento et al. (2004) afirmaram que a podzolização ocorre somente a partir de material laterítico sob condições redutoras e previamente intemperizado. Isto sugere que para a ocorrência da podzolização, a instalação de condições de hidromorfia são necessárias para promover o amarelecimento prévio das lateritas e o empobrecimento das argilas.

1.1.2. Podzolização

Trata-se do processo de formação de solo caracterizado pelo transporte de matéria orgânica, Fe e Al dos horizontes superficiais (O, A) para os horizontes espódicos (iluviação), onde precipitam (CONINCK, 1980). Esse processo envolve o intemperismo dos minerais primários pela ação dos ácidos orgânicos e a translocação do alumínio e ferro na forma de complexos orgânicos dos horizontes superficiais para os horizontes espódicos (ANDERSON et al., 1982; BRAVARD; RIGHI, 1990; LUNDSTRÖM, 1993; LUCAS et al., 1996; PATEL-SORRENTINO et al., 2007).

Vários modelos têm sido propostos para explicar como ocorre a mobilização e imobilização da matéria orgânica, Fe e Al no perfil de solo. As teorias do fulvato e da proto-imogolita são as mais difundidas no meio científico.

A teoria do fulvato é a mais tradicional e admite a ligação do Fe e Al a compostos orgânicos formando complexos organometálicos solúveis, especialmente com ácidos fúlvicos, constituídos por ácidos fenólicos de baixo peso molecular, que migram em profundidade favorecidos pelo movimento da água e precipitam ao atingirem a capacidade de saturação em metais desses compostos orgânicos (McKEAGUE et al., 1968; LUNDSTRÖM, 1993; PATEL-SORRENTINO et al., 2007). Com relação a imobilização desses complexos organometálicos, McKeague et al. (1971) verificaram a precipitação de complexos de ferro sob relação

molar C / Fe igual a cinco e precipitação de complexos de alumínio sob relação molar mais elevada. Coninck (1980) verificou que esses complexos tornam-se insolúveis na medida em que a concentração do íon metálico aumenta.

Por outro lado, alguns pesquisadores não concordam com a teoria da formação dos horizontes espódicos apenas a partir do transporte de Fe e Al na forma de complexos organometálicos, visto que foram encontradas formas inorgânicas (imogolita, alofana) de Al e Si nesses horizontes (FARMER; RUSSELL; BERROW, 1980). Assim, a teoria da proto-imogolita (FARMER; RUSSELL; BERROW, 1980; ANDERSON et al., 1982; FARMER; FRASER, 1982) propõe a formação de alumino-silicato de alto peso molecular (proto-imogolita) a partir dos cátions de Al liberados em superfície pela alteração das fases argilosas; a proto-imogolita é transportada no perfil, precipitando no horizonte espódico, ao qual, posteriormente, adsorvem os compostos orgânicos que foram mobilizados a partir dos horizontes superficiais. Farmer, Russell e Berrow (1980) explicaram como um fulvato de alumínio solúvel poderia ser convertido em imogolita e proto-imogolita nos horizontes espódicos. Um mecanismo ocorreria em solos ácidos, nos quais o alumínio liberado dos minerais primários pela ação dos ácidos orgânicos e inorgânicos não complexados poderia ser imediatamente convertido em proto-imogolita na presença de baixas concentrações de sílica (> 1 ppm). Complexos de alumínio com ácidos complexantes simples (oxálicos, cítricos e tartáricos) sofreriam degradação biológica de seu componente orgânico para liberar alumínio na forma reativa, que poderia se combinar com a sílica para formar proto-imogolita.

Mais recentemente, alguns estudos têm apontado para a existência de outra teoria, que considera aspectos de ambos os modelos (FARMER; LUMSDON, 2001; BUURMAN; JONGMANS, 2005).

As diferentes teorias que tentam explicar o mecanismo de podzolização concordam em propor uma sequência de processos que incluem a mobilização, transporte e precipitação de diferentes componentes orgânicos e minerais, que atribuem a esses solos características singulares como uma acentuada diferenciação de horizontes e o acúmulo de complexos organometálicos e / ou de alumino-silicatos não cristalinos (BRAVARD; RIGHI, 1990; LUNDSTRÖM; BREEMEN; BAIN, 2000).

1.1.3. Hidromorfia e oxirredução

O mecanismo de oxirredução está associado aos sistemas de aquíferos, onde as condições de hidromorfia (temporária ou permanente) ocasionam aeração deficiente. Em meio aquoso, a difusão de gases é aproximadamente 10^4 vezes mais lenta do que em meio gasoso.

Por isso, solos com matéria orgânica quando saturados em água, propiciam o desenvolvimento de condições redutoras (BREEMEN; BUURMAN, 1998).

Nesses solos, sob condições redutoras, a ação de bactérias consumidoras de oxigênio inicialmente esgotará o oxigênio dissolvido disponível e depois utilizará sucessivamente os íons nitrato, manganês e ferro (MONTES et al., 2007).

Nas regiões tropicais, onde há predomínio de oxidróxidos de ferro, cuja dissolução seletiva, guiada pelo tamanho e taxa de substituição do Al nos sítios octaédricos, leva ao progressivo amarelecimento, seguido de branqueamento e, também, à transformação progressiva da estrutura em agregados para maciça, menos porosa e permeável, mais susceptível ao encharcamento (FRITSCH et al., 1989; MAFRA et al., 2002). Essa transformação no matiz está associada à dissolução dos óxidos de ferro, sendo a hematita preferencialmente atacada em relação à goethita, por apresentar menor substituição por Al (JEANROY et al., 1991; MAFRA et al., 2002).

Os valores de pH e Eh da solução do solo determinarão a solubilidade do ferro, que permanecerá nesse estado solúvel mesmo com a melhora das condições de aeração, se a acidez permanecer elevada.

Sob condição de encharcamento permanente, os elementos dissolvidos podem ser removidos do sistema, conferindo ao solo matiz acinzentado, ou serem deslocados para zonas mais aeradas, sob oxigenação temporária, onde esses elementos reprecipitarão sob formas "mal cristalizada" (ferridrita) ou "melhor cristalizadas" (goethita, hematita, lepidocrocita). A reprecipitação pode levar a formação de manchas (alaranjadas), pontuações, nódulos, raias ou plintita (BUOL et al., 1997; BREEMEN; BUURMAN, 1998; FRITSCH et al., 2002).

1.1.4. Gênese dos caulins da Amazônia

A maior parte das informações sobre os caulins da Amazônia vem dos estudos realizados nas ocorrências desenvolvidas sobre rochas sedimentares das Formações Alter do Chão, Barreiras e Itapicuru (SUSZCYNSKI, 1975; COURA et al., 1986; LUCAS et al., 1993; DUARTE; KOTSCHOUBEY, 1994; FRITSCH et al., 2002; MONTES et al., 2002). Apesar dos inúmeros trabalhos realizados, ainda existem sérias controvérsias sobre a origem desses depósitos - sedimentar ou de alteração intempérica "in situ".

Os estudos relacionados à gênese dos depósitos de caulim do rio Jari apontam para processos poligenéticos, que variam entre sedimentação, alteração intempérica "in situ" e ação conjunta de ambos. Inicialmente Klammer (1971 apud KOTSCHOUBEY; DUARTE; TRUCKENBRODT, 1999) considerou estes depósitos sedimentares que constituem a base da

argila de Belterra, como a porção superior da Formação Barreiras. Pandolfo (1979) e Coura et al. (1986) não descartam a origem sedimentar do caulim, porém creditam à ação do intemperismo sobre esse material, a contribuição no aumento da qualidade desses depósitos. Para Suszczynski (1975) o caulim teria duas gêneses distintas: a parte inferior teria origem sedimentar, enquanto a superior seria produto de ação intempérica. Duarte e Kotschoubey (1994) e Kotschoubey, Duarte e Truckenbrodt (1999) sugeriram uma origem supérgena, resultante de alteração polifásica controlada por variações climáticas e alterações tectônicas, dos sedimentos da Formação Alter do Chão.

Montes et al. (2002) mostraram a partir de observações de campo e de análises morfológicas, a existência de feições de sedimentação em todo o perfil, exceto na parte superior (argila Belterra). A intercalação de camadas arenosas e argilosas da Formação Alter do Chão mostra grande variação textural e estrutural, resultante de um processo de sedimentação com importante variação de energia deposicional, onde camadas formadas na fase de baixa energia permitiram a acumulação de espessas camadas argilosas, ricas em caulinita e associadas à quantidades significativas de quartzo e de óxidos e oxidróxidos de Fe. Enquanto nas fases de alta energia, o processo de deposição levou à acumulação de materiais arenosos, constituídos essencialmente de quartzo. Os caulins teriam sido formados a partir da ocorrência de dois processos: (i) a hidromorfia, provavelmente causada por eventos tectônicos que afetaram a região amazônica durante o Terciário e Quaternário, responsável pela remoção do Fe e, consequente, branqueamento da Formação Alter do Chão; e (ii) laterização, responsável pelo enriquecimento de caulinita, residual e neoformada, e pela dissolução parcial do quartzo.

Os trabalhos de Krebs e Arantes (1973 apud KOTSCHOUBEY; TRUCKENBRODT; HYERONIMUS, 1996) indicaram que os caulins do rio Capim teriam origem alóctone a partir dos sedimentos mesozoicos fortemente intemperizados. Hurst e Bosio (1975) mostraram que esses caulins são produtos da alteração supérgena dos sedimentos da Formação Barreiras. Para Monteiro (1977 apud KOTSCHOUBEY; TRUCKENBRODT; HYERONIMUS, 1996) os caulins seriam produto do intemperismo de rochas graníticas. Posteriormente, outros trabalhos apontaram que os caulins do tipo macio e duro seriam produtos de intemperismo diferencial que teria afetado uma única unidade estratigráfica, ou seja, a transformação dos sedimentos da Formação Ipixuna em caulins do tipo macio e do tipo duro teria ocorrido de forma mais marcada do que progressiva, como tradicionalmente se pensava (KOTSCHOUBEY; TRUCKENBRODT; HYERONIMUS, 1996; COSTA; MORAES, 1998; SOUSA; VARAJÃO; YVON, 2006). Os trabalhos de Santos e Rosseti (2003), Rossetti e Santos (2006) e Santos e Rosseti (2006) mostraram que há uma descontinuidade que separa os caulins da Formação

Ipixuna em dois pacotes (macio e duro), cuja origem está relacionada ao mesmo ambiente de deposição, que se diferenciaram em função do gradiente do nível do mar.

Nos arredores de São Gabriel da Cachoeira, no alto rio Negro, foram identificados depósitos de caulins desenvolvidos a partir de rochas do embasamento cristalino, enquanto nas demais áreas da Amazônia estas ocorrências estão associadas a rochas de origem sedimentar. Apesar dessa diferença com relação ao material de origem, as informações a respeito da gênese e caracterização desses caulins resumem-se aos trabalhos preliminares de Costa e Moraes (1992), Moraes (1994), Costa e Moraes (1998) e, mais recentemente, aos estudos de Montes et al. (2007).

Costa e Moraes (1998) apresentaram um modelo geral de evolução geológica dos depósitos de caulins da região Amazônica, independente do material de origem, sejam rochas sedimentares (Jari, Capim, Manaus) ou cristalinas (São Gabriel da Cachoeira), partindo do início da laterização durante o Eoceno chegando ao Holoceno. Neste modelo, de maneira geral, as diferentes fases de lateritização associadas à neotectônica (soerguimento), que favoreceu forte erosão com muitas áreas tornando-se lagos ou ambientes alagados e promoveu a deferrificação das partes mais baixas dos perfis lateríticos, levaram a formação dos depósitos de caulins. Esses autores concluem, portanto, que os depósitos de caulins são de origem laterítica, modificados por subsequente ambiente redutor lacustre ou pantanoso.

Montes et al. (2007) sugerem, a partir de estudos preliminares em uma topossequência, que a gênese dos caulins do alto rio Negro dependem de dois processos principais: (i) uma alteração monossialítica clássica, atuando por um tempo suficientemente longo para permitir a dissolução do quartzo e suficientemente confinado para não permitir a formação de uma alteração gibbsítica. Uma consequência de tal evolução é a extrema lixiviação dos cátions dos horizontes de superfície, formação de soluções hiperácidas, empobrecimento progressivo em argila e a instalação da podzolização; (ii) a transferência de matéria orgânica em profundidade e depois sua oxidação em meio confinado permitiria o abaixamento do potencial de oxirredução suficiente para provocar a redução do Fe^{3+} e consequente dissolução dos óxidos de ferro. Estes dois processos resultam na gênese de um caulim deferrificado e sem gibbsita sob os Espodossolos, enquanto em direção a jusante, os óxidos de ferro e gibbsita estão presentes nas camadas de caulim.

1.2. Materiais e métodos

1.2.1. Contexto geológico, geomorfológico e pedológico da área estudada

A escolha do local de estudo baseou-se tanto na observação de imagens de satélite com a finalidade de detectar a ocorrência de variações texturais na cobertura vegetal e indícios de mudança de solo quanto no trabalho de campo com objetivo de encontrar áreas onde a ocorrência de caulim se encontrava associada ao sistema Latossolo-Espodossolo.

A área selecionada para este estudo encontra-se em propriedade do Ministério da Aeronáutica, à margem esquerda do rio Negro, à 26 km do centro da cidade de São Gabriel da Cachoeira, entre as coordenadas geográficas 0°6’24,5” S e 66°54’19,3” W (Figura 1.1).

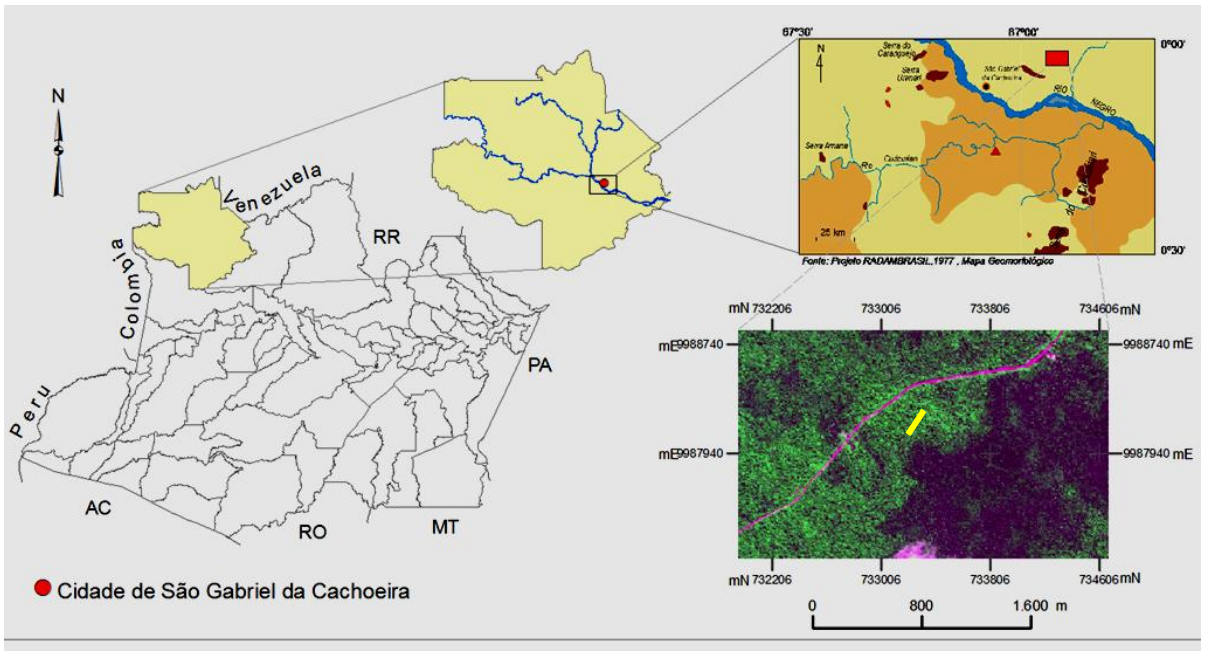

Figura 1.1 - Localização da área de estudo: A topossequência está representada pela linha amarela na figura inferior direita.

Localizada em uma zona de transição, entre o planalto rebaixado da Amazônia e as colinas residuais do escudo das Guianas, a região de estudo denominada Complexo Guianense

nos primeiros trabalhos geológicos sistemáticos desenvolvidos na região norte por Fernandes et al. (1977), teve suas rochas caracterizadas como granitoides metassomáticos, genericamente designados biotita granitoides a titanita. Essa rochas foram estudadas em detalhe por Dall'Agnol e Abreu (1976). Anos depois, com o uso dos dados coletados no âmbito do projeto RadamBrasil, auxílio de imagens de radar e de resultados de estudos fotogeológicos, Lima e Pires (1985) individualizaram essa área em Complexo Rio Negro, constituída por gnaisses e granitoides. Na década de 1990, os trabalhos desenvolvidos por Mello e Vilas Boas (1993) no âmbito do projeto Alto Rio Negro, da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), consideraram as rochas graníticas miloníticas a protomiloníticas pertencentes ao Complexo Cauaburi.

Posteriormente, a região de estudo foi definida como Província Rio Negro-Juruena (TASSINARI et al., 1996; TASSINARI; MACAMBIRA 1999) e redefinida por Santos et al. (2000) como Província Rio Negro, onde são abundantes os afloramentos de rochas graníticas relacionados à Suíte Rio Uaupés (DALL' AGNOL; MACAMBIRA, 1992; CPRM, 2006) e ao Granito Curicuriari (LIMA; PIRES, 1985) (Figura 1.2). Os quartzo-monzonitos e feldspatos graníticos alcalinos das suítes, respectivamente, Uaupés e Curicuriari são constituídos por: quartzo, alcalifeldspato, plagioclásio e minerais máficos.

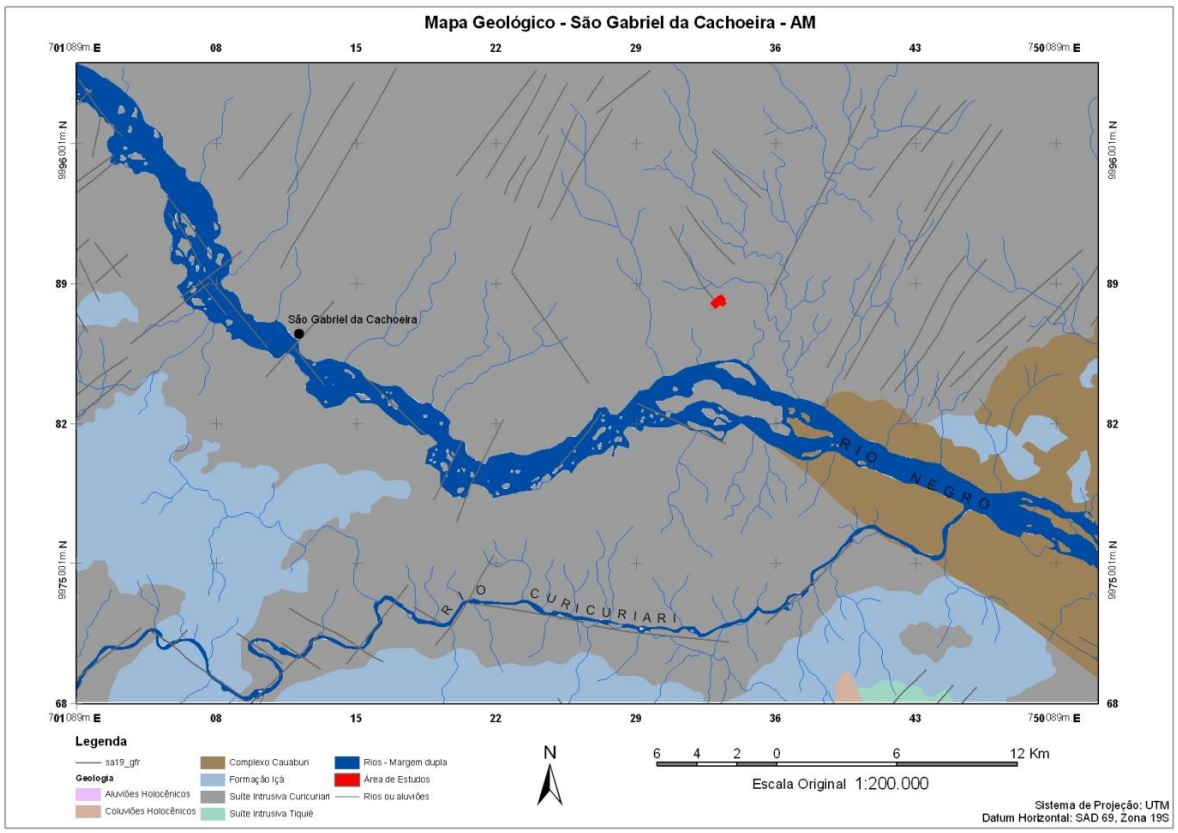

Figura 1.2 - Mapa geológico da região de São Gabriel da Cachoeira. Adaptado de Fernandes et al. (1977).

A geomorfologia da região de São Gabriel da Cachoeira (Figura 1.3) foi definida por Franco e Moreira (1977). Na margem direita do rio Negro, da serra do Uaupés até a serra do Curicuriari há uma superfície pediplanada com ocorrência de inselbergs isolados, resultantes dos processos de pediplanação. Da serra do Curicuriari até a serra do Caranguejo, no extremo norte da área, esta superfície pediplanada é isolada da fissura do rio Negro por uma área de relevo dissecado em colinas de topo convexo separadas por vales em "V", com aprofundamento da drenagem muito fraco. Da margem esquerda do rio Negro até o extremo norte da área mapeada, volta a ocorrer a superfície de aplainamento cortada por relevos residuais de topo convexo separados por vales em "V", com intensidade fraca de aprofundamento da drenagem.

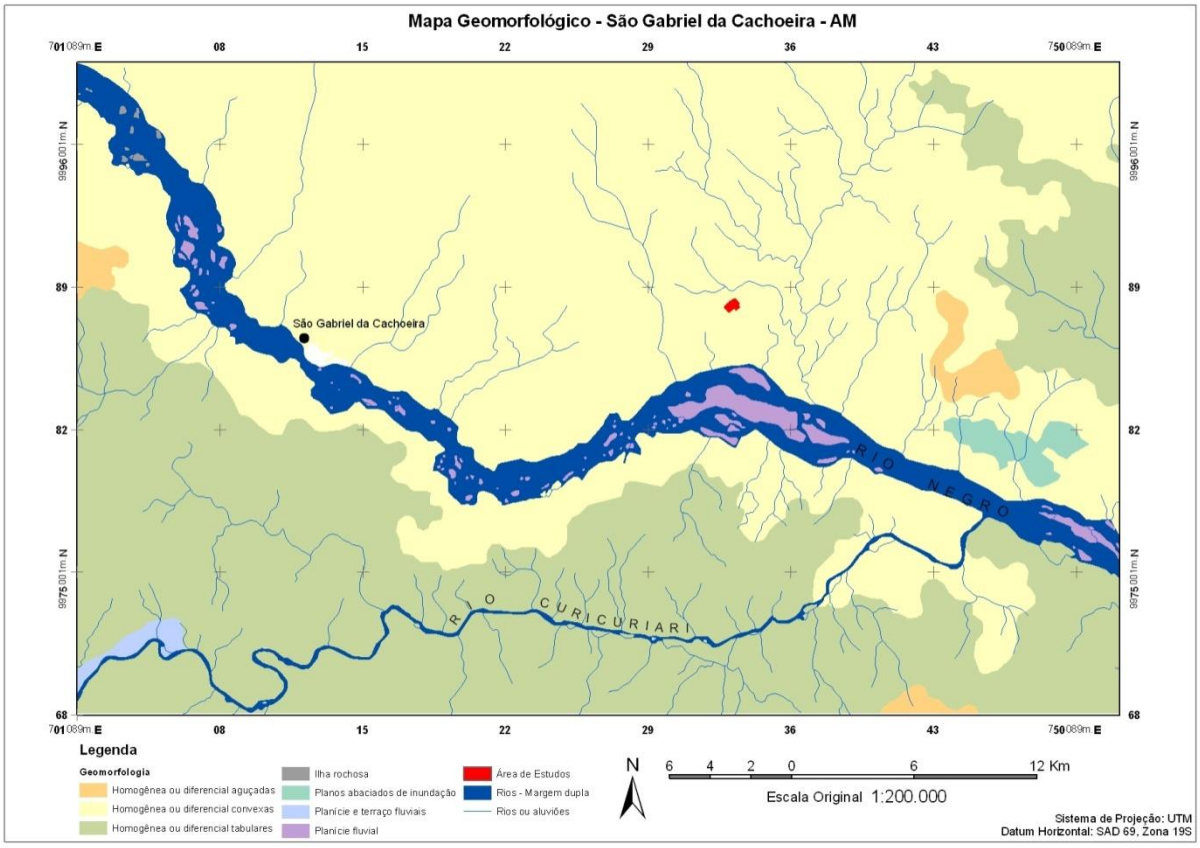

Figura 1.3 - Mapa geomorfológico da Região de São Gabriel da Cachoeira. Adaptado de Franco e Moreira (1977).

Os primeiros estudos pedológicos da região ocorreram a partir da década de 1970 através dos levantamentos exploratórios multidisciplinares realizados pelo Projeto RadamBrasil, desenvolvidos pelo governo brasileiro. Com este projeto foi possível analisar a diversidade da área nos aspectos geológico, pedológico, geomorfológico, hidrológico e botânico.

As cartas pedológicas do Projeto RadamBrasil fornecem informações relativas as principais associações de solos (Figura 1.4). A borda da bacia amazônica é constituída por

solos bem desenvolvidos (Latossolos Vermelhos) associados a solos hidromórficos (Gleissolos) nas áreas ao longo dos principais rios e em suas planícies de sedimentação. Nas colinas mais elevadas da região do alto rio Negro, Latossolos Vermelho-Amarelos predominam. As colinas mais baixas são ocupadas por Latossolos Amarelos que frequentemente apresentam nódulos gibbsíticos, e nas superfícies aplainadas (peneplanos) em condições de hidromorfia ocorrem os Espodossolos. Na região de Manaus, no baixo rio Negro, os Espodossolo não estão associados aos peneplanos ocupando as porções médias e baixas das vertentes.

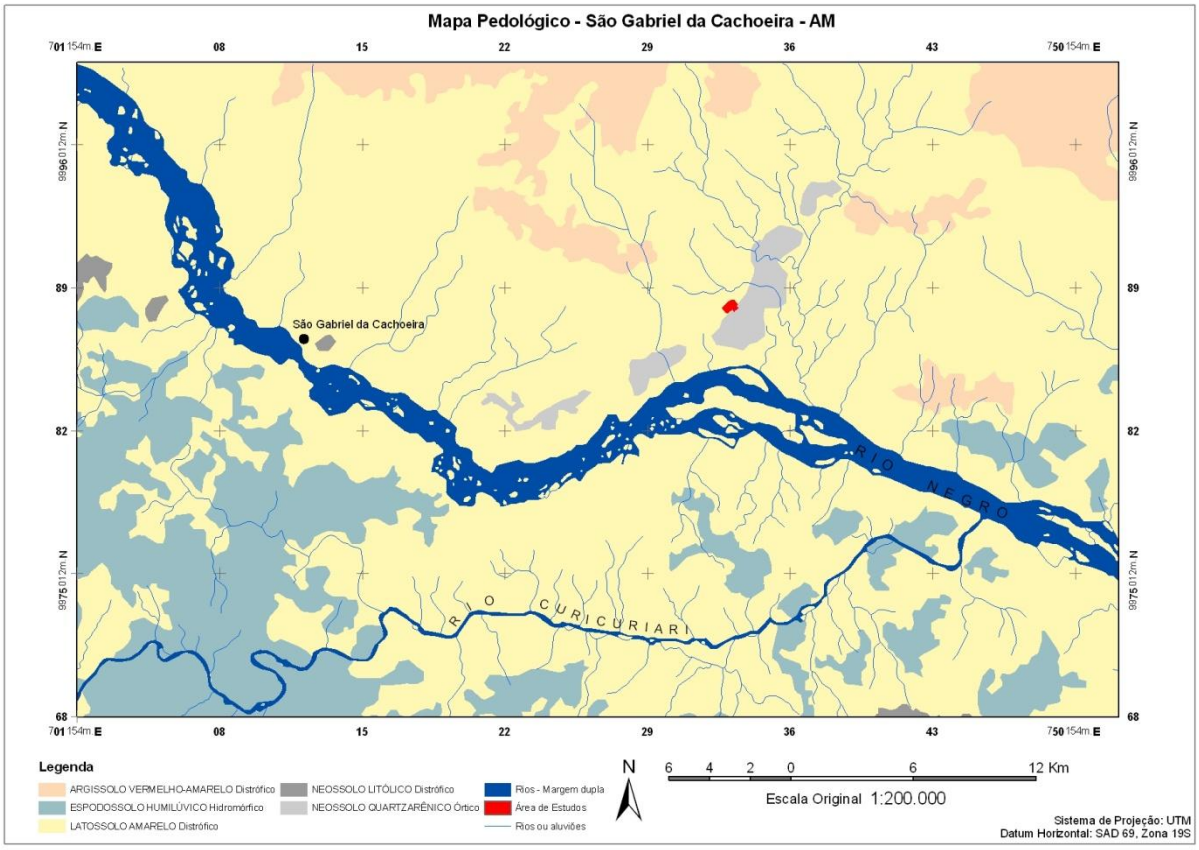

Figura 1.4 - Mapa pedológico da Região de São Gabriel da Cachoeira. Adaptado de Costa et al. (1977)

O clima da região, de acordo com a classificação de Köeppen, é do tipo (Af) equatorial úmido. Em São Gabriel da Cachoeira observa-se temperaturas médias de 25 ºC, sendo as médias mensais máxima de 30 ºC e mínima de 22 ºC, pluviosidade média anual próxima de 3000 mm, com menor e maior precipitação nos meses de agosto a outubro e dezembro a maio, respectivamente, e médias mensais de umidade relativa do ar entre 85 e 90 %, (SILVA; JESUS; RIBEIRO, 1977).

1.2.2. Levantamento e coleta de solos

O estudo detalhado dos solos foi realizado em uma topossequência definida a partir de pontos de sondagens e de trincheiras, de acordo com procedimento proposto por Boulet et al. (1982). Os trabalhos foram divididos em etapas: (i) realização de vinte e seis pontos de sondagem para estabelecer a locação das trincheiras. As amostras coletadas ao longo dos furos de sondagem foram organizadas em um pedocomparador com o objetivo, a partir da determinação de cor e textura de solo representar sua distribuição ao longo da topossequência; (ii) a partir da análise das sondagens estabeleceram-se os locais para abertura de trincheiras; (iii) abertura de quatro trincheiras nos pontos que apresentaram as sequências mais representativas; (iv) descrição morfológica dos perfis de solo nas trincheiras seguindo os critérios de cor, estrutura e textura propostos por Santos et al. (2005) e a denominação dos solos obedecendo a classificação brasileira (EMBRAPA, 2006); (v) coleta de amostras indeformadas e orientadas, em caixas do tipo Kubiena (12 x 7 x 6 cm), dos horizontes dos perfis de solo da topossequência (P1, P2, P3 e P4) e do afloramento de rocha alterada da estrada para confecção de lâmina delgada; (vi) coleta de amostras brutas dos horizontes dos perfis de solos da topossequência para análises físicas (granulometria e densidade de partículas), químicas e mineralógicas; (vii) coleta de torrões de solo dos horizontes para estudos micromorfológicos; (viii) coleta de amostras de solo em anéis volumétricos (4,88 x 2,65 cm) dos horizontes dos perfis (P1, P2 e P3) para determinação da curva de retenção de água no solo e da densidade do solo. A presença de fragmentos de quartzo centimétricos impediu a coleta de amostras em anéis volumétricos no perfil P4.

Nos perfis P1, P2 e P3 são encontradas camadas com expressivo acúmulo de caulinita que não se enquadram nos critérios de classificação dos horizontes pedológicos propostos na classificação brasileira de solos (EMBRAPA, 2006). Face a esta dificuldade será utilizado o termo caulim e a letra K para designar estas camadas. A letra n será utilizada associada a letra K para designar a presença de nódulos gibbsíticos nesses caulins.

1.2.3. Análises físicas

A análise granulométrica dos solos foi realizada na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) Meio Ambiente, Jaguariuna, São Paulo. A determinação da curva de retenção de água no solo e da densidade do solo foi realizada no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Engenharia Rural, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP). A determinação da densidade de partículas foi

realizada no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Ciência do Solo, ESALQ, USP.

1.2.3.1. Granulometria

O método utilizado para a determinação das frações granulométricas dos solos de todos os perfis foi o da pipeta, de acordo com Camargo et al. (1986). Utilizaram-se os diâmetros das frações granulométricas definidos por United States (1999).

1.2.3.2. Curva de retenção de água no solo e porosidade do solo

A determinação da curva de retenção de água no solo foi realizada a partir de amostras de solo indeformadas coletadas em anéis volumétricos (4,88 x 2,65 cm) com três repetições em cada horizonte. Foram coletadas amostras nas seguintes profundidades: (i) perfil P1: 130 227, 252 e 313 cm; (ii) perfil P2: 45, 105, 160, 230, 290, 334 e 392 cm; (iii) perfil P3: 35, 75 e 113 cm.

Essas amostras foram secas em estufa com circulação de ar a 40 ºC por 3 dias e, posteriormente, saturadas com água e submetidas aos diferentes potenciais mátricos (ψ), em mesa de tensão e câmaras de pressão (Klute, 1986). Os potenciais aplicados nas amostras foram: -1, -2, -4, -10, -33, -50, -100, -500 e -1.500 kPa. Os dados da relação entre potencial mátrico e umidade volumétrica foram ajustados à equação de van Genuchten para obtenção dos parâmetros θs, θr, α, *m* e *n*, utilizando-se o programa computacional denominado Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils (RETC - versão 6.0). Esses parâmetros foram inseridos no modelo de van Genuchten (1980) (Equação 1.1).

$$\theta_\alpha = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha . |\psi_m|)^n]^m} \qquad \text{Equação 1.1}$$

Onde θ_α = umidade volumétrica do solo ($cm^3\ cm^{-3}$), θ_s = umidade volumétrica residual ($cm^3\ cm^{-3}$), θ_r = umidade volumétrica de saturação ($cm^3\ cm^{-3}$), ψ = potencial matricial (cm) e adotando-se a restrição: [**m** = 1-(1/n); α (hPa-1)] e **n** são parâmetros empíricos do modelo.

A distribuição da porosidade foi classificada de acordo com o diâmetro dos poros, obtido a partir da curva de retenção de água no solo. Foram considerados macroporos aqueles com diâmetro maior que 0,05 mm (ψ > -4 kPa), mesoporos aqueles com diâmetros entre 0,05 mm e 0,03 mm (-4 > ψ > -10 kPa) e microporos aqueles com diâmetros inferiores a 0,03 mm (ψ < -10 kPa), de acordo com Brewer (1976) e Luxmoore (1981).

Os resultados de porosidade total (no ponto de saturação), macroporos, mesoporos e microporos foram individualmente submetidos ao teste de Scott-Knott (5 % de probabilidade) (SCOTT; KNOTT, 1974).

1.2.3.3. Densidade do solo, densidade de partículas e porosidade total

Ao final da leitura das curvas de retenção de água no solo, as amostras de solo das três repetições foram colocadas em estufa a 105 ºC por 24 horas, para a determinação da massa de solo seco e dessa forma obter a densidade do solo (BLAKE; HARTGE, 1986a), a partir da Equação 1.2.

$$Ds = \frac{mss}{v} \qquad \text{Equação 1.2}$$

Onde Ds = densidade do solo (g cm^{-3}), mss = massa de solo seco (g) e v = volume interno do anel (cm^3) preenchido pela massa do solo correspondente.

A densidade de partículas do solo dos perfis foi determinada com a utilização de um picnômetro a gás (Micromeritics AccuPyc 1330) (BLAKE; HARTGE, 1986b). As amostras de solo foram secas ao ar e peneiradas em malha de 2 mm, obtendo-se a fração terra fina seca ao ar (TFSA). A TFSA foi seca em estufa a 45 ºC por 24 horas e aproximadamente 8 g de solo seco foi utilizado para processamento ao picnômetro.

Com a finalidade de confirmar os resultados de porosidade total estimados no ponto de saturação (Equação 1.1), a porosidade total foi calculada também a partir da Equação 1.3, considerando a densidade do solo e a densidade de partículas (McBRIDE; JOOSSE, 1996).

$$PT = 1 - \frac{Ds}{Dp} \qquad \text{Equação 1.3}$$

Onde PT = porosidade total (cm^3 cm^{-3}), Ds = densidade do solo (g cm^{-3}) e Dp = densidade de partículas (g cm^{-3}).

Os resultados de densidade do solo foram submetidos ao teste de Scott-Knott (5 % de probabilidade) (SCOTT; KNOTT, 1974).

1.2.4. Análises mineralógicas

Os ensaios mineralógicos foram realizados mediante emprego de métodos instrumentais de difração de raios X (DRX), de análise térmica diferencial e gravimétrica (ATD-TG) e de espectroscopia por reflectância difusa (ERD). As análises por reflectância difusa foram

realizadas nos Laboratórios de Mineralogia do Núcleo de Pesquisa em Geoquímica e Geofísica da Litosfera (Nupegel), USP e do Instituto de Mineralogia e Física dos Meios Condensados (IMPMC), Universidade de Paris VI. As análises por ATD-TG foram realizadas nos Laboratórios de Mineralogia do Nupegel, USP e do Centro de Capacitação e Pesquisa em Meio Ambiente (CEPEMA), Escola Politécnica (Poli), USP. Os ensaios por DRX foram realizados no Laboratório de Mineralogia do Nupegel, USP.

1.2.4.1. Preparação das amostras para os ensaios mineralógicos

As análises mineralógicas por DRX, ATD-TG e ERD foram realizadas em amostras brutas (TFSA). As frações granulométricas areia, silte e argila foram analisadas por DRX. As frações areia e argila de todos os perfis foram submetidas às análises por ATD-TG. Para o perfil P2 também a fração silte foi analisada.

A amostra de TFSA recebeu um tratamento prévio com peróxido de hidrogênio (H_2O_2) para a remoção de matéria orgânica. Livre de matéria orgânica, a TFSA foi dividida em duas partes, sendo uma submetida ao tratamento com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (CBD) para remoção dos óxidos e oxidróxidos de ferro (MEHRA; JACKSON, 1958). Essas amostras separadas foram passadas por peneira de malha 0,053 mm para a separação da fração areia, tendo como resultado amostras constituídas pelas frações silte e argila. Em seguida, adicionou-se às amostras NaOH 0,02 mol L^{-1}, como agente dispersante, a fim de separar a fração inferior a 0,002 mm. A partir dessa separação feita por centrifugação a 700 rpm, controlada por tacômetro, obtiveram-se as frações argila e silte.

As amostras das frações areia e silte, livres de matéria orgânica, as amostras brutas dos perfis (TFSA) e os nódulos gibbsíticos (descritos no item 1.3.3 abaixo) foram moídas em almofariz de ágata e passadas por peneira com malha de 0,106 mm, para a realização das diferentes análises.

Para as análises por DRX procedimentos adicionais foram realizados, considerando que certos minerais quando submetidos a determinados tratamentos podem apresentar variação na distância interplanar 001, o que facilita o processo de identificação. Dessa forma, a fração argila livre de matéria orgânica e deferrificada foi separada em três partes: (i) argila (CDB), (ii) argila (CDB) saturada com K^+ (KCl) para posterior tratamento térmico (110, 350 e 550º C) e (iii) argila (CDB) saturada com Mg^{2+} (MgCl) para posterior solvatação com etileno-glicol (JACKSON, 1969).

1.2.4.2. Difração de raios X

Essas análises foram realizadas em difratômetro Philips PW 1877 operado em potencial de 40 kV, corrente de 40 mA, fonte de Cu (radiação Kα, λ=1,54186 Å), com monocromador para eliminação da radiação Kβ, com varredura de passo de 0,02° (2θ) e tempo de acumulação de 1 segundo por passo.

Tanto as amostras brutas dos solos e dos nódulos como as frações areia e silte pulverizadas foram depositadas em porta-amostra e analisadas em amplitude de varredura de 3° a 90° (2θ).

As amostras das frações argila livre de matéria orgânica, argila livre de matéria orgânica e de óxidos de ferro e argila tratada com Mg^{2+} e K^{+} foram depositadas sobre lâminas de vidro e analisadas em amplitude de varredura de 3° a 65° (2θ).

1.2.4.3. Análise térmica diferencial e gravimétrica

A identificação de caulinita, gibbsita e quartzo, também realizadas por DRX, e a semiquantificação de caulinita e gibbsita foram realizadas por análise térmica diferencial e gravimétrica. As amostras brutas (TFSA) e as frações argila e areia pulverizadas foram depositadas em porta-amostra de alumina e levadas ao analisador Shimadzu DTG-60H-Simultaneous DTA-TG, operado em ciclo de aquecimento e resfriamento a partir da temperatura ambiente até 1 200 ºC, com razão de aquecimento de 10 ºC min^{-1} e uso de atmosfera de N_2.

A identificação do quartzo ocorreu por meio de picos endotérmicos (571 a 583 ºC), relacionados à transformação de quartzo α em β. A gibbsita foi identificada pela ocorrência de picos endotérmicos de 240 a 256 ºC, característicos de sua desidroxilação. A ocorrência de picos endotérmicos de 503 a 517 ºC e exotérmicos de 980 a 992 ºC está relacionada, respectivamente, à desidroxilação da caulinita e à formação da metacaulinita.

A semiquantificação da caulinita e gibbsita na fração silte foi estimada pela diferença entre os resultados obtidos na amostra bruta e a soma dos resultados obtidos nas frações areia e argila.

1.2.4.4. Espectroscopia por reflectância difusa

A identificação de óxidos e oxidróxidos de ferro por reflectância difusa foi realizada em amostras brutas pulverizadas dos solos e dos nódulos. Às amostras pulverizadas foi adicionado óleo de parafina para espectrofotometria PHOTREX® com a finalidade de ressaltar as bandas de absorção. Essas amostras foram colocadas em porta-amostra com janela de

quartzo, evitando-se compactar a fim de minimizar a orientação preferencial e a reflexão especular.

As medidas foram realizadas em dois espectrômetros Varian, um Cary 5 (UV-VIS-NIR) e outro Cary 5G (UV-VIS-NIR), o primeiro equipado com esfera integradora de 110 mm de diâmetro e o segundo com esfera integradora de 100 mm de diâmetro, cobertas com Halon (Labsphere, Inc., USA), pertencentes, respectivamente, ao Nupegel e IMPMC.

A reflectância R das amostras foi medida em relação a um padrão de Halon. Os espectros foram obtidos no intervalo de 350 a 840 nm, com incrementos de 0,1 nm.

A reflectância foi transformada na função de reemissão de Kubelka Munk [$f(R) = (1 - R)^2 / 2 R$], a qual é proporcional a concentração do absorvedor. Das curvas obtidas foi calculada a segunda derivada (Malengreau et al., 1996), que foi a seguir suavizada usando o ajuste *cubic spline*. Os óxidos e oxidróxidos de ferro foram identificados a partir da posição das bandas de absorção mais intensas (Kosmas et al., 1984; Scheinost et al., 1998) determinadas nas curvas da segunda derivada após suavização.

A identificação da goethita ocorreu por meio de bandas de absorção entre 475 e 481 nm (transição eletrônica ETP). A hematita foi identificada em bandas de absorção entre 526 e 553 nm (transição eletrônica ETP).

1.2.5. Análises químicas

As análises químicas totais e a determinação do pH dos solos foram realizadas, respectivamente, nos laboratórios do Actlabs, Canadá e no Departamento de Ciência do Solo, ESALQ, USP.

A composição química total foi realizada por análise por ativação neutrônica (NAA) para os elementos em traço e por Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS), em amostras de TFSA moídas em almofariz de ágata e passadas por peneira com malha de 0,106 mm,

As análises de pH em água e KCl realizadas em amostras de TFSA, seguiram os procedimentos analíticos contidos no manual de métodos de análise de solo (EMBRAPA, 1997).

A análise normativa das fases minerais presentes nas amostras brutas foi efetuada a partir dos resultados das análises químicas totais e dos resultados semiquantitativos da gibbsita (ATD-TG).

O cálculo do fator balanço de massa foi efetuado nas amostras dos quatro perfis de acordo com a aproximação do iso-elemento de Brimhall et al. (1991) para acessar as perdas

ou ganhos relativos de elementos maiores e em traço. O cálculo foi efetuado a partir da Equação 1.4 (CHADWICK; BRIMHALL; HENDRICKS, 1990).

$$\tau_{j,w} = \frac{C_{j,w} \ / \ C_{i,w}}{C_{j,p} \ / \ C_{i,p}} - 1 \qquad \text{Equação 1.4}$$

Onde $C_{j,w}$ e $C_{i,w}$ são, respectivamente, as concentrações do elemento móvel (j) e do elemento imóvel (i) no material alterado (w); $C_{j,p}$ e $C_{i,p}$ são as concentrações dos mesmos elementos (j) e (i) na rocha original (p).

Como elemento invariante foi utilizado o Zr, que na rocha total ocorre quase que exclusivamente na forma de zircão (Bueno, 2009).

1.2.6. Análises microscópicas

A impregnação das amostras foi realizada no Laboratório de Impregnação dos Departamentos de Ciência do Solo, ESALQ, USP e a confecção das lâminas delgadas foi feita Seção de Laminação, IGc, USP.

As descrições micromorfológicas das lâminas delgadas foram efetuadas nos Laboratórios de Microscopia dos Departamentos de Ciência do Solo, ESALQ, USP e de Geologia Sedimentar e Ambiental, IGc, USP.

As observações ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) e as microanálises químicas por raios-X por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) foram realizados no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Nupegel, USP.

1.2.6.1. Preparação das lâminas delgadas para observação ao microscópio óptico

As amostras indeformadas e orientadas dos horizontes, coletadas em caixas do tipo Kubiena (12 x 7 x 6 cm), foram secas ao ar por um período de 15 dias e, posteriormente, colocadas em estufa a 40 ºC com circulação de ar por mais 5 dias.

A impregnação das amostras indeformadas dos solos dos perfis para a confecção de lâminas de seção delgadas foi realizada com a utilização de resina poliéster crystal (ESALQ).

As lâminas delgadas foram confeccionadas a partir da seleção das áreas mais representativas dos blocos (amostra impregnada). Essas áreas foram recortadas por meio de serra diamantada até o tamanho das lâminas de vidro (46 x 27 mm), coladas às lâminas e polidas até a espessura de 0,03 mm.

1.2.6.2. Descrição micromorfológica

A descrição das lâminas delgadas seguiu os critérios propostos por Bullock et al. (1985) e Stoops e Jongerius (1975) para descrever, respectivamente, a microestrutura e a distribuição relativa g/f2µm (grossos/finos cuja dimensão que os separa é de 2µm). As descrições foram realizadas ao microscópio Zeiss Axioplan e as microfotografias foram obtidas com o auxílio de câmera CCD Sony Color Vídeo acoplada ao microscópio petrográfico Zeiss Axioplan 2.

1.2.6.3. Preparação das amostras para observação ao MEV

Torrões e nódulos, coletados nos horizontes dos perfis, foram secos em estufa a 50 ºC com circulação de ar por 2 dias. Fragmentos milimétricos, obtidos dos torrões e dos nódulos secos, foram fixados, com uso de cola à base de carbono, em suportes apropriados para observações ao MEV. As amostras foram recobertas com filme de ouro de espessura média de $2\ 10^{-5}$ mm, em equipamento Denton Vaccum - Desk II para posterior observação ao MEV.

1.2.6.4. Morfologia e microanálise

As análises ao MEV foram realizadas em equipamento Jeol, modelo JSN 5600 LV, acoplado a um sistema de microanálise por raios-X por espectroscopia de energia dispersiva (NORAN).

Para a aquisição ao MEV de informações morfológicas (topográficas), utilizou-se elétrons secundários acelerados com tensão de 15 kV.

1.3. Resultados e discussões

1.3.1. Estudo da topossequência

1.3.1.1. Descrição simplificada dos perfis de solo

Na topossequência estudada, caracterizada por 4 perfis de solos (Figura 1.5), foram identificados, de montante para jusante, três domínios: o domínio podzolizado-hidromórfico (zona de podzolização), o laterítico-hidromórfico (zona de lateritização) e o hidromórfico (zona de gleização), ocupando respectivamente os segmentos superior, médio e inferior da paisagem local.

Para obter informações detalhadas das descrições dos perfis, consultar o ANEXO A.

Segmento superior - Zona de podzolização

A zona de podzolização desenvolve-se na porção central do interfluvio, em terreno levemente côncavo, numa zona de transição entre vegetação do tipo floresta e campinarana caracterizadas, respectivamente, por árvores altas e com troncos grossos e por árvores altas com troncos finos. Nesta zona desenvolve-se um Espodossolo Humilúvico (perfil P1) com uma espessa camada de acúmulo expressivo de caulinita imediatamente abaixo dos horizontes espódicos.

Este perfil apresenta a seguinte sequência de horizontes: O (superficial orgânico), A (superficial organo-mineral), E (álbicos), Bh e Bhs (espódicos) e, na base, camadas de caulim embranquecido (K1 e K2) (Figura 1.5 A).

Perfil P1 - Espodossolo Humilúvico

Os horizontes da parte superior do perfil (O, A1 e A2; ANEXO A e Figura 1.5 A) apresentam matizes com valores mais baixos pelo fato de serem mais ricos em matéria orgânica, decomposta ou não (Figura 1.6 a, b, c).

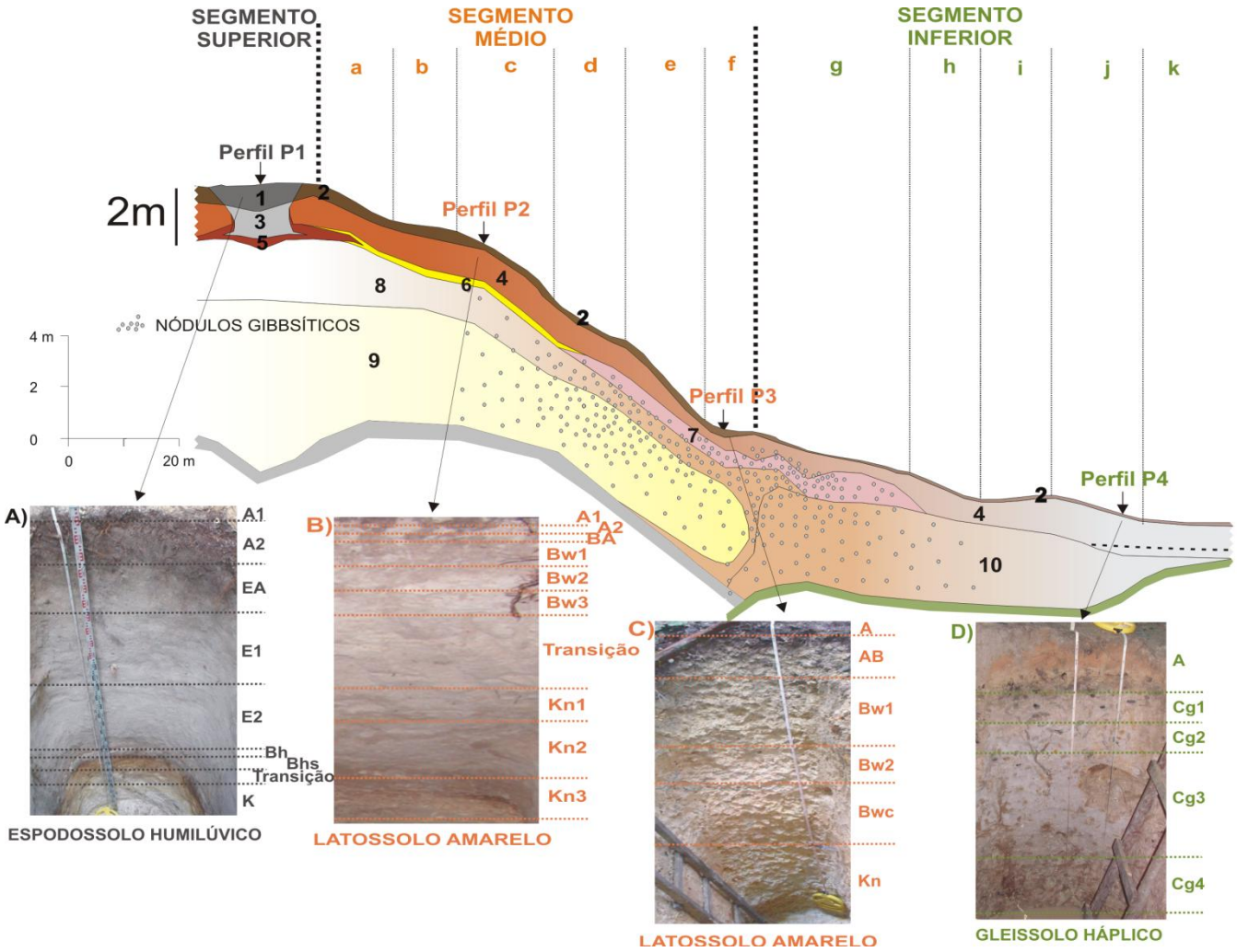

Figura 1.5 - Organização do solo ao longo da topossequência. As letras a até k compreendem os segmentos formados a partir da delimitação visual das rupturas (côncavas e convexas) de declive, os números de 1 até 10 compreendem os horizontes e camadas de solo. Modificada de Montes et al. (2007).

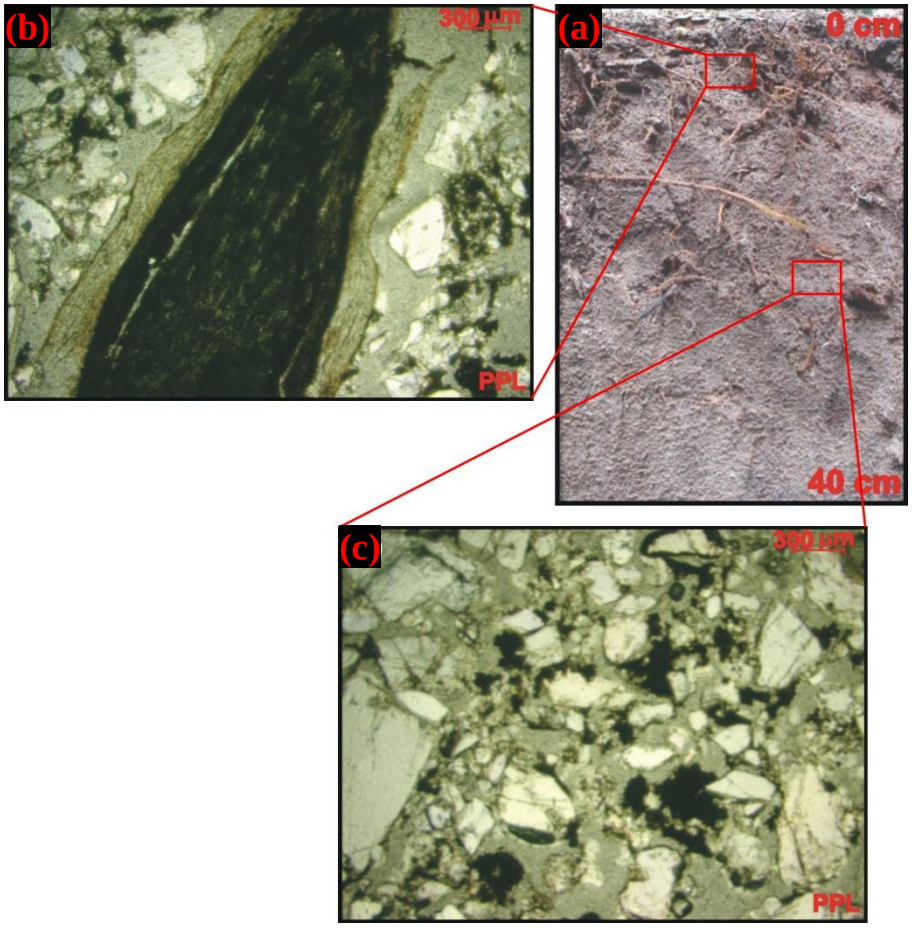

Figura 1.6 - (a) Foto do perfil P1 mostrando a localização aproximada das fotomicrografias (b) e (c) de lâminas delgadas, respectivamente, dos horizontes A1 e A2 do perfil P1 (Espodossolo Humilúvico) obtidas ao microscópio petrográfico. (b) Resíduo vegetal menos decomposto sendo possível ainda observar remanescentes de células vegetais no seu perímetro, (c) concentração de resíduos finos orgânicos ao redor dos cristais de quartzo e entre a porosidade. As fotomicrografias obtidas com a luz polarizada em um só plano (polarizador inserido) receberam a sigla PPL.

Abaixo desses horizontes orgânicos superficiais desenvolvem-se horizontes álbicos acinzentados e quartzosos (E1 e E2, ANEXO A, Figura 1.5 A), indicando a ocorrência de uma frente de intemperismo que provoca a decomposição da matéria orgânica, a dissolução dos minerais mais alteráveis, o acúmulo residual do quartzo e a mobilização do ferro e alumínio, extraídos dos óxidos e oxidróxidos, provavelmente como complexos organometálicos quando reagem com os ácidos orgânicos (ANDERSON et al., 1982) (Figura 1.7 a, b, c, d). Essas características indicam que a podzolização neste perfil ocorre de forma intensa transformando o Latossolo em Espodossolo (LUCAS et al., 1984). A superfície do Espodossolo Humilúvico possui morfologia levemente côncava devido à perda de argila nos horizontes álbicos.

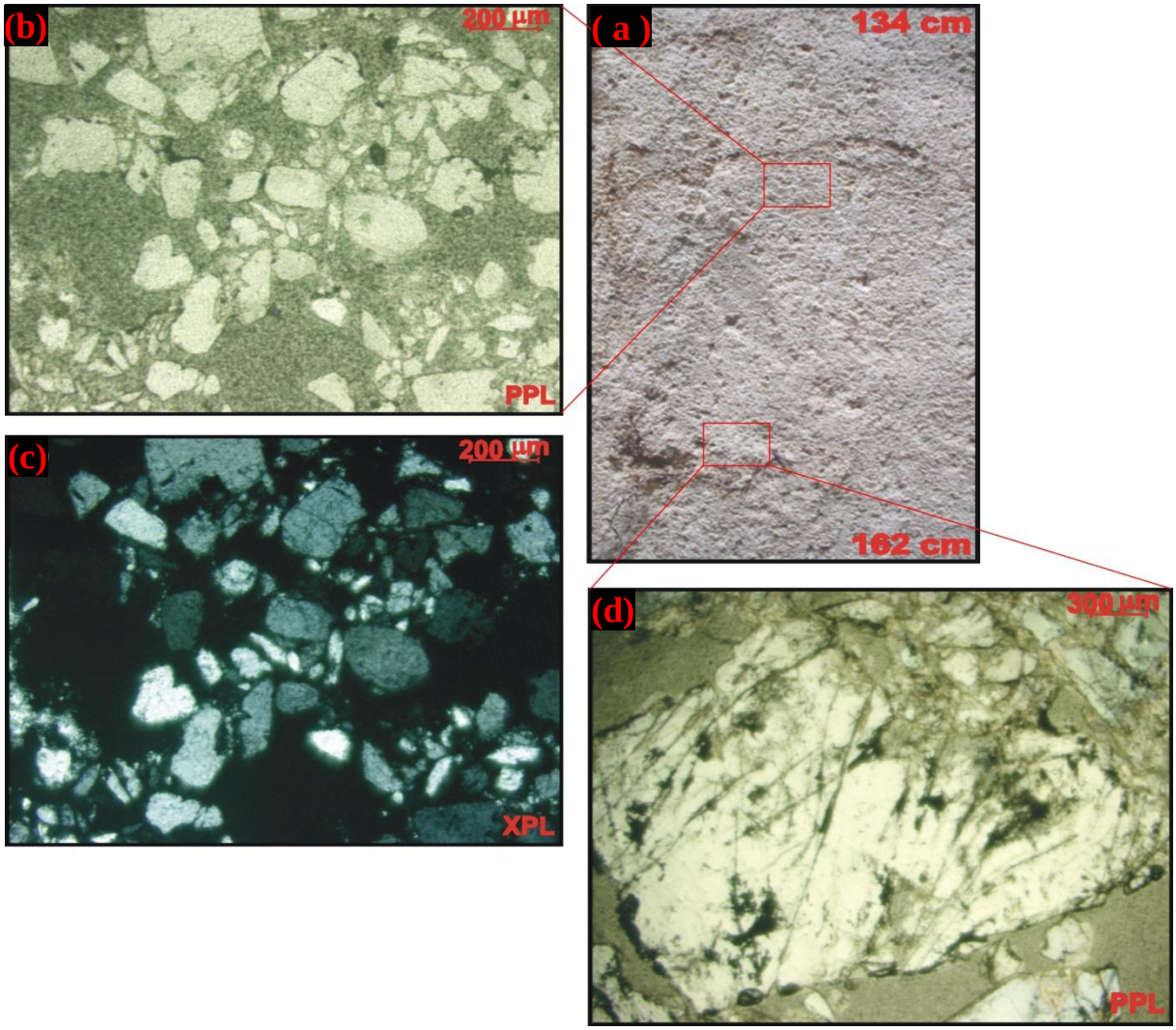

Figura 1.7 - (a) Foto do perfil P1 mostrando a localização aproximada das fotomicrografias (b, c, d) de lâmina delgada do horizonte E1 do perfil P1 (Espodossolo Humilúvico) obtidas ao microscópio petrográfico. (b, c) Acúmulo residual de cristais de quartzo mal selecionados, (d) cristal de quartzo marcado por figuras de dissolução devido à acidez das soluções. A fotomicrografia obtida com nicóis cruzados (polarizador e analisador inseridos) foi indicada com a sigla XPL e aquelas obtidas com a luz polarizada em um só plano (polarizador inserido) receberam a sigla PPL.

Na parte intermediária do perfil ocorre formam-se horizontes espódicos: Bh e Bhs. O Bh é pouco espesso e contínuo, bruno-acinzentado devido ao depósito de matéria orgânica (tipo monomórfica) (CONINCK et al., 1974), caracterizada por uma massa contínua e uniforme na cor e densidade, entre os grãos de quartzo (Figura 1.8 a) e à presença de raízes em diferentes estádios de decomposição (Figura 1.9 a, b), observados ao microscópio petrográfico.

O horizonte Bhs é bruno acinzentado em razão da iluviação da matéria orgânica polimórfica (CONINCK et al., 1974) no topo (Figura 1.8 b) e é avermelhado, argiloso e endurecido devido à precipitação dos óxidos e oxidróxidos de ferro na base (Figura 1.8 c). No topo do

horizonte de transição foram observados canais constituídos por restos de raízes decompostas (Figura 1.8 e) cortados por raízes finas aparentemente ainda frescas. As observações ao microscópio petrográfico evidenciam a ocorrência de intensa atividade biológica (Figura 1.8 d). A presença desses horizontes indica a ocorrência de uma frente de podzolização com mobilidade e acumulação tanto de ferro e alumínio como de compostos orgânicos.

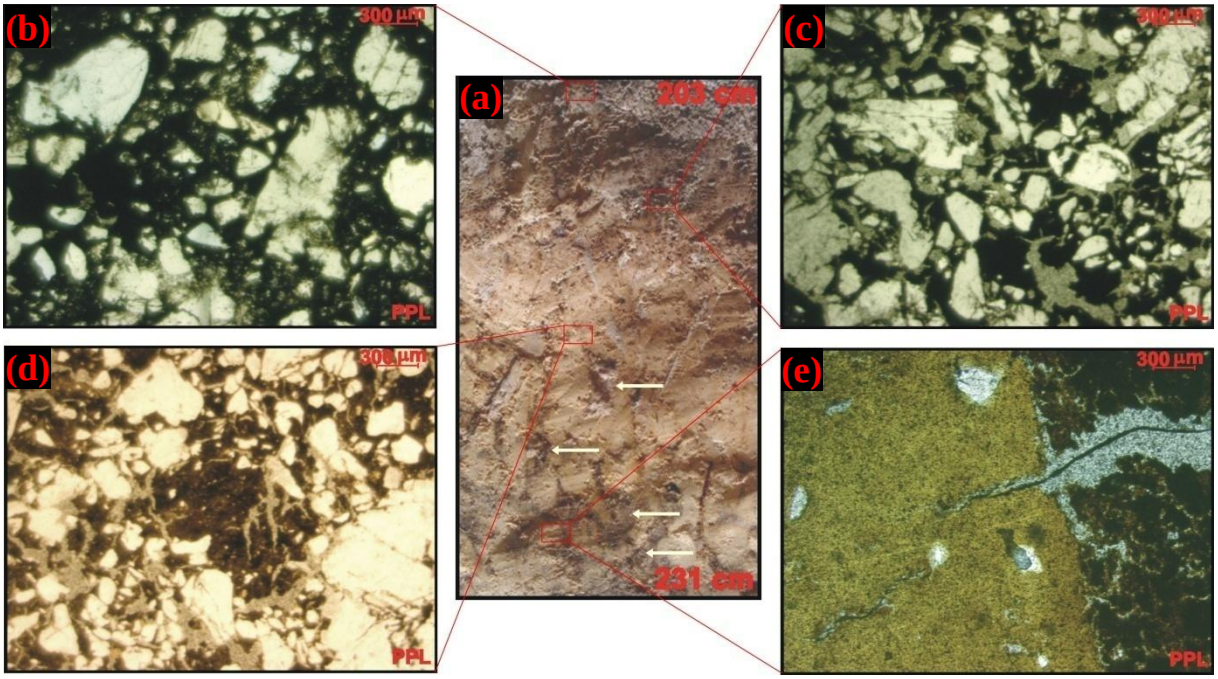

Figura 1.8 - (a) Foto do perfil P1 mostrando a localização aproximada das fotomicrografias (b, c, d, e) de lâminas delgadas obtidas ao microscópio petrográfico. As setas brancas em (a) indicam os canais constituídos por restos de raízes decompostas. (b) Horizonte Bh (espódico) com iluviação de matéria orgânica amorfa (monomórfica) depositada na porosidade entre os cristais de quartzo; (c) o topo do horizonte Bhs apresenta matéria orgânica polimórfica depositada na porosidade, porém em menor quantidade do que em Bh; (d) na base do horizonte Bhs foi observado plasma ferruginoso; (e) imagem obtida na transição entre os horizontes Bhs e de transição mostra no lado esquerdo plasma ferruginoso e do lado direito um pedotúbulo preenchido por raiz em avançado estádio de decomposição cortado por uma raiz fresca e fina. As fotomicrografias obtidas com a luz polarizada em um só plano (polarizador inserido) receberam a sigla PPL.

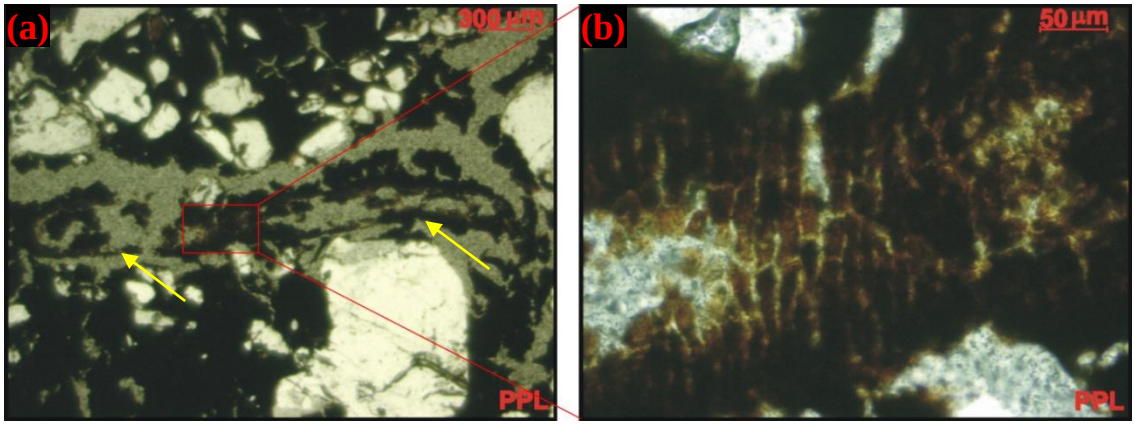

Figura 1.9 - Fotomicrografias de lâmina delgada do perfil P1 (Espodossolo Humilúvico) obtidas ao microscópio petrográfico. (a) Horizonte Bh com iluviação de matéria orgânica depositada na porosidade entre os cristais de quartzo e raiz totalmente decomposta (indicada por setas amarelas) com alguns cristais de quartzo em meio ao material fino tendo pequena área menos decomposta mostrando remanescentes de celulas vegetais, (b) mostra a raiz menos decomposta em detalhe. As fotomicrografias obtidas com a luz polarizada em um só plano (polarizador inserido) receberam a sigla PPL.

A parte inferior do perfil apresenta camadas de caulim (K1 e K2), tendo o K1 maior quantidade de manchas amareladas e avermelhadas (mosqueados) do que o K2. Isso indica que as soluções que percolam o caulim K1, ricas em ferro na sua forma reduzida (Fe^{2+}), encontram ambientes mais oxidantes, sobretudo em antigas galerias de raízes, que permitiram a precipitação do Fe^{3+} na forma, preferencialmente, de goethita (Figura 1.10). Além da precipitação dos óxidos e oxidróxidos de ferro na porosidade, também foram observados canais com raízes em elevado estádio de decomposição (Figura 1.10).

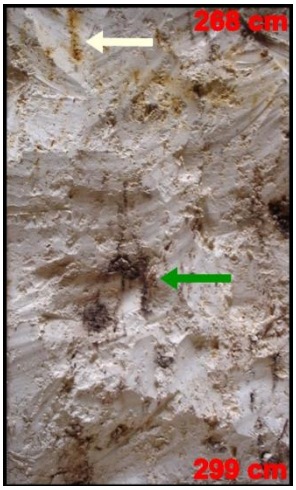

Figura 1.10 - Foto do perfil P1 mostrando canais de precipitação de ferro e de decomposição da matéria orgânica indicados pelas setas branca e verde, respectivamente.

Assim, as ocorrências dos horizontes espódicos e dos mosqueados, especialmente nos caulins (K1 e K2), indicam que tanto a mobilização como a precipitação dos complexos organometálicos (ferro e alumínio) e dos óxidos e oxidróxidos de ferro (goethita e hematita) são controladas pela oscilação do nível dos aquiferos suspensos. Os períodos mais chuvosos propiciam a mobilização dos complexos organometálicos e do ferro reduzido, enquanto nos períodos menos chuvosos, o nível dos aquíferos baixa e as condições oxidantes permitem a precipitação do ferro na porosidade e a menor mobilização dos complexos organometálicos.

Segmento médio - Zona de laterização

Os solos da zona de laterização desenvolvem-se no segmento médio da topossequência (Figura 1.5). Nesta zona foram estudados dois Latossolos Amarelos, perfis P2 e P3, localizados, respectivamente, na parte superior e inferior do segmento médio. Esse domínio é caracterizado por solos argilosos imperfeitamente drenados que transicionam com o Gleissolo Háplico (perfil P4) da zona de hidromorfia (gleização) do segmento inferior da topossequência (Figura 1.5 D). Na base desses Latossolos Amarelos desenvolvem-se camadas espessas de caulim.

Perfil P2 - Latossolo Amarelo

Esse solo é caracterizado pela ocorrência de conjunto superior de horizontes manchados pela matéria orgânica O (superficial orgânico), A1 e A2 (superficiais organo-minerais) e BA (transição) (ANEXO A e Figura 1.5 B), por um conjunto intermediário de horizontes latossólicos (Bw1, Bw2 e Bw3) franco-argilo-arenosos a franco-argilo-siltosos e, finalmente, por um conjunto inferior de camadas de caulim com nódulos de gibbsita (Kn1, Kn2, Kn3 e Kn4). Os conjuntos intermediário e inferior são marcados por feições hidromórficas.

Na parte superior o perfil apresenta horizontes (O, A1, A2 e BA) constantemente influenciados pela matéria orgânica, por isso apresenta matizes brunados mais escuros quanto mais próximos da serrapilheira (ANEXO A e Figura 1.5 B).

Na parte intermediária desenvolvem-se horizontes latossólicos (Bw1, Bw2 e Bw3) e inicia-se a ocorrência de feições de hidromorfia (mosqueados) decorrentes da alternância de ambientes oxidantes e redutores, provavelmente relacionada à flutuação do nível do aquífero suspenso (detalhado no perfil P1). As galerias de origem biológica, raízes ou mesofauna, preenchidas por material fino bruno-claro-acinzentado com alguns fragmentos de quartzo parecem indicar ocorrência de mobilização, através de fluxos de água, desses materiais em suspensão.

A transição entre o horizonte latossólico Bw3 e a camada de caulim Kn1 se faz por meio de uma transição com progressivo aumento das frações silte e argila, indicando o início de uma zona de acumulação de material fino amarelo-claro-acinzentado. O topo da camada de caulim (Kn1) é constituído por material amarelo-claro-acinzentado predominantemente franco-argilo-siltoso que, progressivamente, transforma-se em branco franco-siltoso (Kn4). A presença de uma faixa de acumulação de material avermelhado-claro indica que o Fe^{2+} solubilizado encontrou um ambiente mais oxidante que propiciou a precipitação do óxido de ferro. Nódulos gibbsíticos de tamanhos desde 1,5 a 5,0 cm de comprimento e de 0,4 a 4,0 cm de largura foram observados no caulim.

Perfil P3 - Latossolo Amarelo

Este Latossolo Amarelo apresenta hidromorfia incipiente sendo caracterizado em sua parte superior por um conjunto de horizontes franco-argilo-arenosos escurecidos pela matéria orgânica (O, A e AB; ANEXO A e Figura 1.5 C), seguido por um conjunto intermediário de horizontes latossólicos (Bw1, Bw2) e latossólicos com nódulos gibbsíticos (Bwc) com texturas argilo-arenosa a argilosa. Foram observadas, a exemplo do P2, nos conjuntos intermediário e inferior, feições decorrentes das restrições de permeabilidade. Na parte inferior, o perfil é constituído por uma camada de caulim com nódulos de gibbsita (Kn).

Os horizontes superiores, O, A e AB (ANEXO A e Figura 1.5 C) possuem matizes bruno e bruno-escuros resultantes da grande quantidade de matéria orgânica existente. Na base desse conjunto é possível notar maior influência dos processos hidromórficos.

Na parte intermediária do perfil, os horizontes Bw1, Bw2 e Bwc são marcados pelo acúmulo progressivo de material fino formando horizontes com texturas argilo-arenosas e argilosas. O matiz varia gradualmente de bruno muito claro acinzentado a amarelo-avermelhado com mosqueamento resultante da flutuação do aquífero suspenso. A coloração do mosqueamento indica a alternância entre melhores e piores condições de drenagem interna no solo.

O caulim (Kn) da parte inferior do perfil é marcado pelo progressivo aumento das frações silte e argila, indicado pela textura argilo-siltosa (item 1.3.2.3 abaixo) e pelo progressivo clareamento do matiz. O aumento do mosqueamento, muito provavelmente, está relacionado à diminuição da permeabilidade do solo e à estrutura maciça.

Os nódulos gibbsíticos de tamanhos variados observados somente a partir da camada de caulim no P2, aqui foram observados nos horizontes latossólicos (Bwc).

Segmento inferior - Zona de hidromorfia

A zona de hidromorfia desenvolve-se na parte inferior da topossequência. Os solos desta zona pertencem à classe dos Gleissolos, caracterizados por apresentarem matizes cinzentos com cromas baixos e mosqueados de colorações vivas devido à precipitação do ferro, resultante da alternância de ambientes redutores e oxidantes durante parte ou boa parte do ano. Neste perfil desenvolve-se um Gleissolo Háplico com sequência de horizontes: O (superficial orgânico), A (superficial argilo-mineral) e Cg (glei) (Figura 1.5 D).

Perfil P4 - Gleissolo Háplico

Os horizontes superiores O e A são marcados pela influência da matéria orgânica. Já na base do horizonte A a hidromorfia se manifesta, tornando-se o processo dominante nos horizontes inferiores Cg1 a Cg5 (Figura 1.5 D, ANEXO A).

1.3.1.2. Organização lateral do solo na topossequência

De montante para jusante na topossequência podem ser descritos 8 horizontes pedológicos e 2 camadas, cuja articulação encontra-se na Figura 1.5:

Horizonte 1: No segmento superior desenvolve-se um horizonte superficial bruno-escuro do tipo MOR de espessura entre 20 e 30 cm com textura arenosa.

Horizonte 2: Este horizonte substitui o 1 a partir da primeira ruptura de declive convexa, quandosurgem os primeiros indícios de hidromorfia e o horizonte torna-se gradativamente bruno e franco-argilo-arenoso. A partir do segmento inferior g até final da topossequência, o solo torna-se franco-arenoso e amarelo-avermelhado.

Horizonte 3: Horizonte álbico ocorre no segmento superior da vertente e caracteriza-se pela estrutura maciça, textura arenosa e matiz cinzento-claro.

Horizonte 4: Este horizonte substitui lateralmente o horizonte 3 e estende-se ao longo dos segmentos médio e inferior. Possui espessura entre 80 e 100 cm nos segmentos médios *a*, *b* e *c*. Caracteriza-se por matizes entre bruno-claro-acinzentado e bruno muito claro-acinzentado no topo e amarelo-claro-acizentado na base e por mosqueados, relacionados a ambientes oxi-redutores. Lateralmente, nos segmentos médios *d*, *e* e *f*, há redução da espessura para 50 cm e aumento da hidromorfia, o mosqueado torna-se predominante e a textura argilo-arenosa. A espessura no segmento inferior reduz-se para cerca de 30 cm. No segmento *g* apresenta textura argilosa, nódulos gibbsíticos e cores amareladas no topo e amarelo-avermelhadas na base, além dos mosqueados. Até o terço inferior *h*, o solo permanece argilo-

so com muitos nódulos gibbsíticos e predominam as cores gleizadas. A partir do segmento inferior *i* até o final da vertente, desaparecem os nódulos gibbsíticos e a textura torna-se franco-arenosa.

Horizonte 5: Compreende os espódicos incipientes, com espessura de 40 cm, onde no Bh e no Bhs as texturas e cores são areia-franca e argilosa e bruno-acinzentada e bruno-forte, respectivamente. Lateralmente, estende-se até a metade do segmento médio *a*, onde é substituído pelo horizonte 6.

Horizonte 6: Arenoso bruno-amarelado-claro constituído por areia muito grossa e se estende lateralmente até o meio do segmento médio *d*. Este horizonte, cuja espessura varia entre 20 e 60 cm, é caracterizado pela ocorrência de aquífero suspenso associado a micro vales internos.

Horizonte 7: Constituído por caulinita, substitui lateralmente o horizonte 6, apresenta espessura de 40 cm e estende-se até o segmento inferior *h*. Caracteriza-se por matizes bruno muito claro-acinzentado e amarelo-claro, textura argilosa e ocorrência de nódulos gibbsíticos.

Camada 8: Estende-se do segmento superior, onde apresenta espessura de 240 cm, até o início da porção inferior *g*, onde tem 40 cm de espessura. Os nódulos gibbsíticos surgem a partir do segmento médio *c*. Essa camada de caulim caracteriza-se por apresentar matizes branco-rosado, amarelo-claro e amarelo-claro-acinzentado que se tornam progressivamente mais brancos com a profundidade, onde transicionam verticalmente com a camada 9.

Camada 9: Trata-se do caulim branco com alguns mosqueados amarelo e bruno-avermelho-escuro, argilo-siltoso, muito espesso que se estende lateralmente até o perfil P3 (Latossolo Amarelo) no segmento *f*. Assim como na camada 8, os nódulos gibbsíticos são observados a partir do segmento médio *c*.

Horizonte 10: Esse horizonte substitui lateralmente as camadas 8 e 9 e se estende lateralmente até o final da topossequência. Apresenta cor branca a cinzento-clara com feições de hidromorfia como mosqueados vermelho, amarelo-brunado e branco-acinzentado. A textura é argilosa e os nódulos gibbsíticos ocorrem até o segmento inferior *h*.

1.3.2. Características físicas dos perfis

1.3.2.1. Perfil P1 - Espodossolo Humilúvico

Análise granulométrica

A Tabela 1.1 exibe teores elevados da fração areia nos horizontes superficiais (A1 e A2) e álbicos (E1 e E2), que atingem valores superiores a 87 %. Nos horizontes espódicos

(Bh e Bhs) seus teores continuam elevados, baixando bruscamente no horizonte de transição e nas camadas de caulim (K1 e K2).

Tabela 1.1 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): Análise granulométrica.

Horizonte/ Camada	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	Areia (1)	Silte (2)	Argila (3)	Relação silte / argila
			----------%----------			
A1	0-5	5	87,99	5,11	5,14	0,99
A2	5-30	15	90,51	6,98	2,51	2,78
E1	30-180	130	87,03	11,87	1,10	10,79
E2	180-202,5	182	88,93	9,12	1,95	4,68
Bh	202,5-204	204	78,70	15,19	6,11	2,49
Bhs	204-214	214	70,30	15,51	14,19	1,09
Transição	214-245	227	11,16	37,89	50,95	0,74
K1	245-290	252	8,26	64,79	26,95	2,40
K2	290+	313	2,90	67,78	29,32	2,31

(1) Fração areia = de 0,05 a 2 mm, (2) Fração silte = de 0,002 a 0,05 mm, (3) Fração argila = inferior a 0,002 mm.

As Figuras 1.11 a, b mostram, respectivamente, a distribuição das frações granulométricas ao longo do perfil e a classificação textural dos horizontes e camadas, arenosa nos horizontes A1, A2, E1 e E2; areia franca e franco-arenosa nos horizontes Bh e Bhs; argilosa na transição e franco-argilo-siltosa nas camadas de caulim K1 e K2.

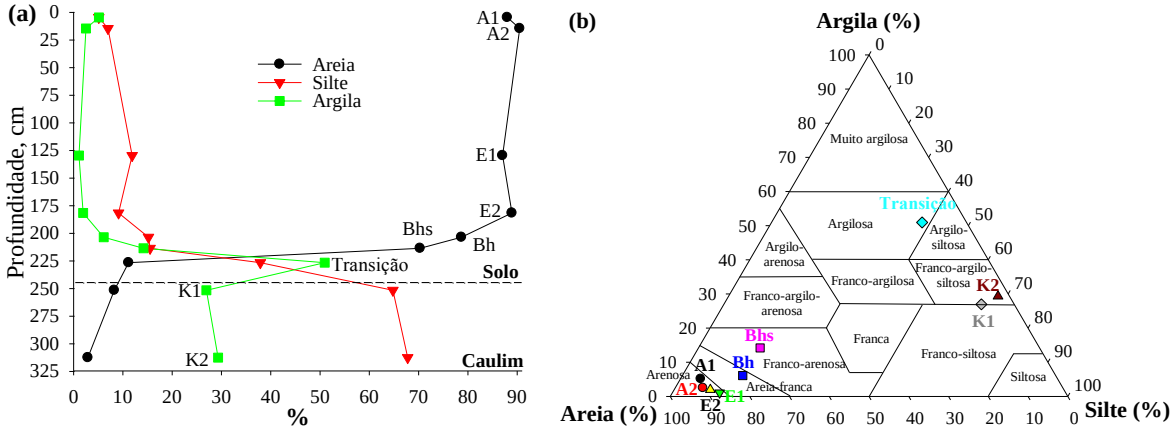

Figura 1.11 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): (a) Distribuição com a profundidade das frações argila (< 0,002 mm), silte (0,002 a 0,05 mm) e areia (0,05 a 2 mm); (b) Classificação textural das amostras de solo ao longo do perfil (UNITED STATES, 1999).

Os dados da Tabela 1.1 e Figura 1.11 (a, b) evidenciam a atuação de importantes processos de translocação das frações finas (argila e silte) dos horizontes superiores para os inferiores, onde sua acumulação confere ao material da base, sobretudo as camadas K1 e K2, o aspecto de uma argila esbranquiçada, sem estrutura visível e que poderia ser considerada uma

espessa camada de caulim (os estudos mineralógicos e químicos, que serão vistos mais adiante, poderão esclarecer sua gênese e composição).

Curva de retenção de água no solo, densidade do solo, densidade de partículas e porosidade total do solo

As curvas retenção de água no solo do horizonte de transição e das camadas de caulim (K1 e K2) mostraram comportamento muito similar nos potenciais menores (ψ = -2 kPa a ψ = -10 kPa), exibindo pequenas perdas de umidade (Figura 1.12 a).

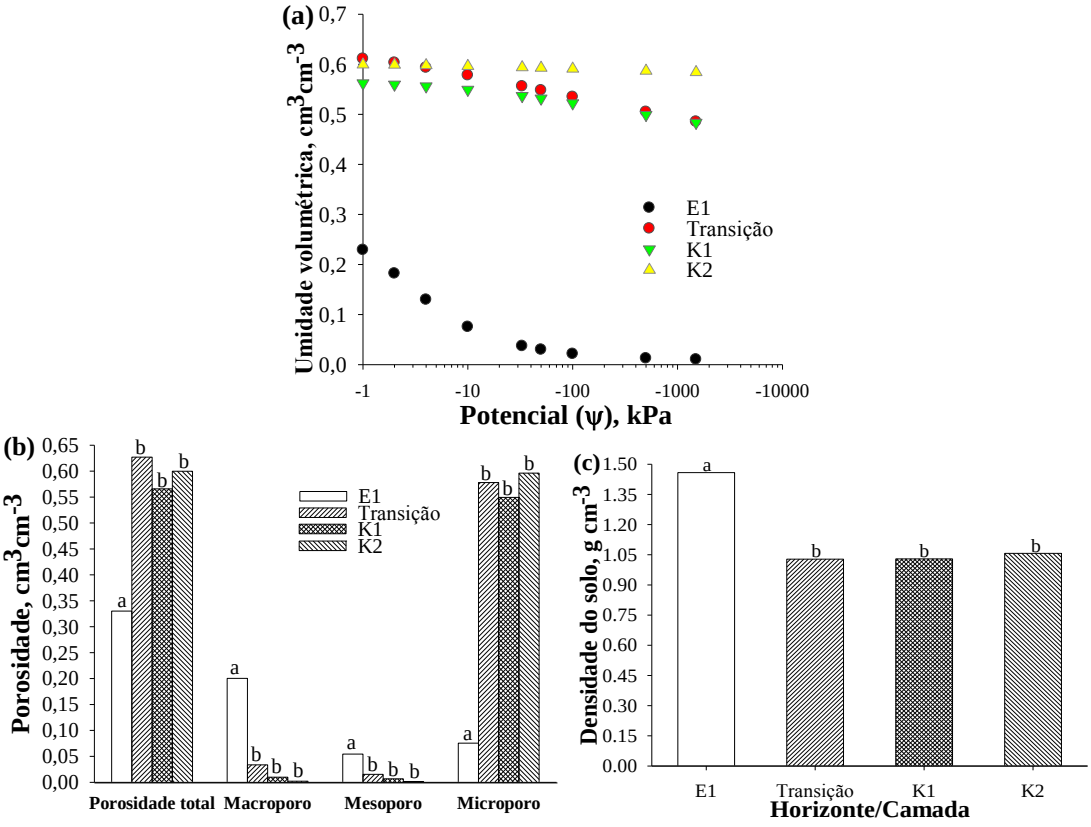

Figura 1.12 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): (a) Curvas de retenção de água no solo; (b) Porosidade total e faixa de macroporos (> 0,05 mm), mesoporos (entre 0,05 e 0,03 mm) e microporos do solo (< 0,03 mm); (c) Densidade do solo. Médias seguidas da mesma letra, nas colunas de cada conjunto, não diferem entre si a 5 % pelo teste de Scott-Knott.

A partir do potencial de -10 kPa, a transição, devido ao incremento na fração argila, perdeu mais umidade em relação as camadas de caulim K1 e K2. De forma geral, a menor inclinação das curvas da transição e das camadas de caulim com relação ao eixo do potencial matricial indica que a drenagem nessas camadas é lenta, muito provavelemente devido a menor quantidade de poros de circulação. Raros poros de circulação foram observados nestes

horizontes (Figura 1.13 a). Além disso, os teores de umidade entre 0,48 e 0,58 cm^3 cm^{-3} no ponto de murcha permanente (ψ = -1500 kPa) indicam que nesses horizontes houve uma elevada retenção de água provocada pelo incremento das frações inferiores a 0,05 mm (silte + argila) e pela microestrutura maciça (Figura 1.13 b), mais susceptível ao acúmulo de água (FRITSCH et al., 1989; MAFRA et al., 2002).

O comportamento da curva de retenção de água do horizonte álbico (E1) mostrou que o solo drenou até atingir o ponto de murcha permanente (ψ = -1500 kPa) e que a inclinação da curva em relação ao eixo do potencial matricial foi maior, devido à elevada macroporosidade (Figura 1.12 b) resultante da microestrutura de empilhamento de grãos peliculares (Figura 1.13 c).

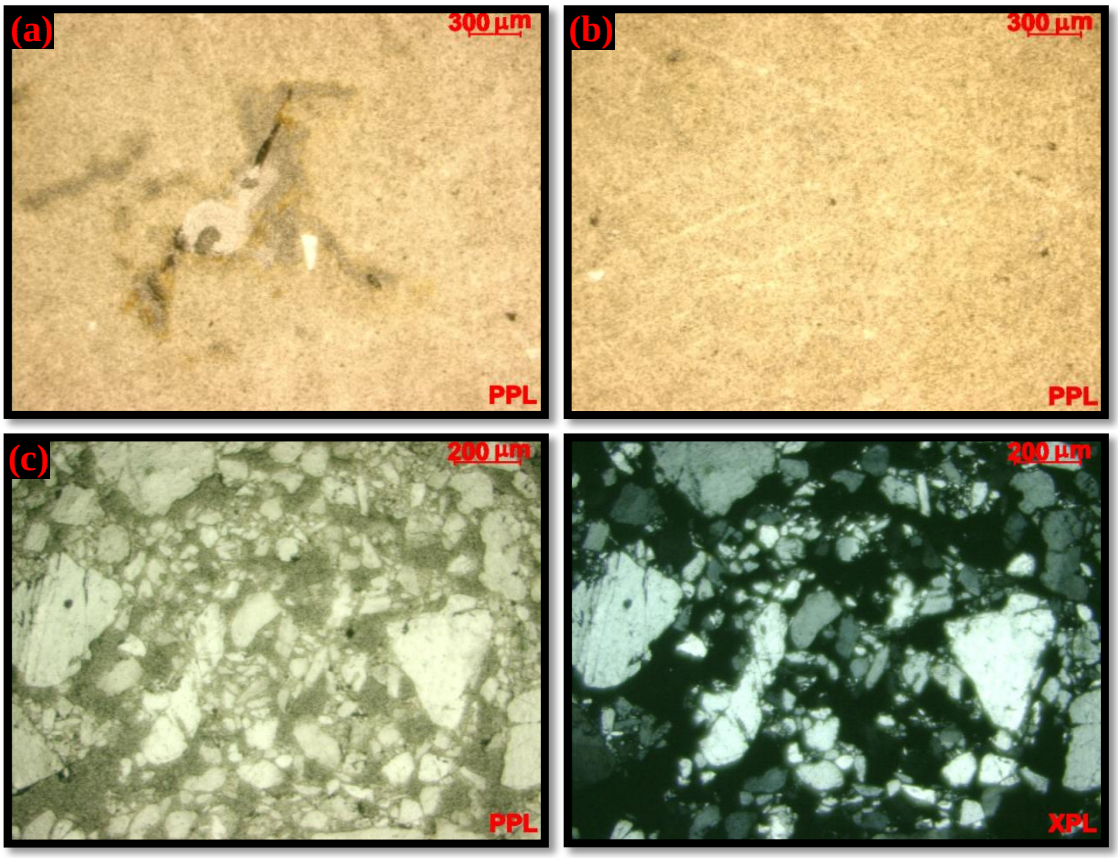

Figura 1.13 - Fotomicrografias de lâminas delgadas da zona entre a transição e o caulim (K1) do perfil P1 (Espodossolo Humilúvico) obtidas ao microscópio petrográfico. (a) Cavidade com precipitação de ferro, (b) microestrutura maciça, (c) microestrutura do tipo grãos peliculares. As fotomicrografias obtidas com a luz polarizada em um só plano (polarizador inserido) receberam a sigla PPL e aquelas obtidas com nicóis cruzados (polarizador e analisador inseridos) foram indicadas com a sigla XPL.

Os valores da porosidade total do solo no horizonte de transição e nas camadas de caulim (K1 e K2), com média de 0,60 cm^3 cm^{-3}, foram significativamente maiores que no

horizonte álbico (E1) com 0,33 cm^3 cm^{-3}. O predomínio de macro e mesoporos no horizonte álbico (E1), resultante da distribuição relativa g/f2µm do tipo quitônica, confirma sua menor capacidade de reter água (Figura 1.13 c). Na transição e nas camadas de caulim (K1 e K2), a porosidade se concentra nos microporos e, por isso, o solo dessas amostras possui muitos poucos poros de circulação de água e elevada capacidade de retenção de umidade.

O menor volume de poros e a granulometria arenosa do horizonte álbico contribuíram de forma marcante no aumento da densidade do solo (Figura 1.12 c). Pode-se ainda afirmar que no horizonte álbico (E1) quanto maior for a densidade do solo (Figura 1.12 c) menor será o volume de poros no horizonte (Figura 1.12 b), enquanto a situação é inversa na transição e nas camadas de caulim (K1 e K2). Os menores valores de densidade do solo dessas camadas são atribuídos à microestrutura maciça que determina maior quantidade de microporos. A densidade de partículas apresentou valores semelhantes em todo o perfil (Tabela 1.2).

Os resultados da porosidade total do solo (Tabela 1.2), calculados a partir da Equação 1.3, apresentaram similaridade com relação àqueles calculados a partir da curva de retenção de água no solo na condição de saturação ($\psi = 0$). Desta forma, serão utilizados para as demais comparações os valores de porosidade total obtidos da curva de retenção (Figura 1.12 b).

Tabela 1.2 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): Densidade do solo, densidade de partículas e porosidade total do solo.

Horizonte/ Camada	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	Densidade do solo	Densidade de partículas	Porosidade total
			---------- g cm^{-3} ----------		
A1	0-5	5	NA[(1)]	2,57	NA
A2	5-30	15	NA	2,64	NA
E1	30-180	130	1,46	2,67	0,45
E2	180-202,5	182	NA	2,68	NA
Bh	202,5-204	204	NA	2,70	NA
Bhs	204-214	214	NA	2,73	NA
Transição	214-245	227	1,01	2,52	0,60
K1	245-290	252	1,03	2,59	0,60
K2	290+	313	1,06	2,62	0,60

NA = não analisado.

1.3.2.2. Perfil P2 - Latossolo Amarelo

Análise granulométrica

Nos horizontes latossólicos (Bw1, Bw2 e Bw3), as texturas franco-argilo-arenosa e franco-argilosa (Figura 1.14 b) com baixos teores da fração silte e teores da fração argila nunca superiores a 31,09 % resultaram em valores da relação silte/argila iguais ou inferiores a 0,5, na maior parte dos horizontes latossólicos, exceto no horizonte Bw3 com 1,07 (Tabela 1.3). Essas características granulométricas são consideradas parâmetros diagnósticos de Latossolo (EMBRAPA, 2006).

Os elevados teores da fração areia (Figura 1.14 a) nos horizontes superficial (A2), de transição (BA) e latossólicos (Bw1, Bw2 e Bw3) indicariam que nestes horizontes estaria havendo perda das frações finas (silte e argila) por dissolução e erosão física.

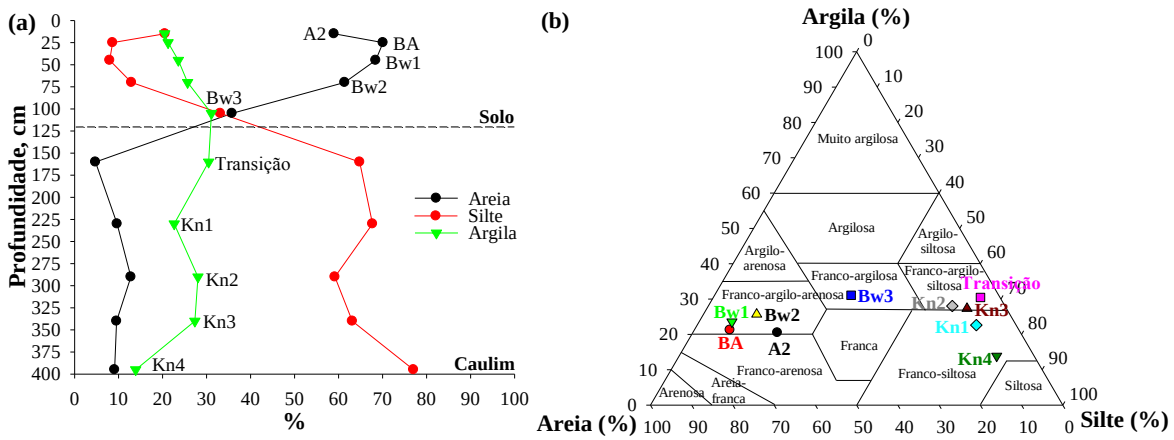

Figura 1.14 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): (a) Distribuição com a profundidade das frações argila (< 0,002 mm), silte (0,002 a 0,05 mm) e areia (0,05 a 2 mm); (b) Classificação textural das amostras de solo ao longo do perfil (UNITED STATES, 1999).

Nas camadas de caulim (Kn1, Kn2, Kn3 e Kn4) e na transição, os teores da fração argila pouco variaram em relação aos demais horizontes do perfil, entretanto, os teores da fração silte foram superiores a 59,17 %, qualificando-os nas classes texturais franco-argilo-siltosa e franco-siltosa (Figura 1.14 b).

Tabela 1.3 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Análise granulométrica.

Horizonte/ Camada	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	Areia (1)	Silte (2)	Argila (3)	Relação silte/argila
			----------%----------			
A2	10-20	15	58,96	20,55	20,49	1,00
BA	20-30	25	70,11	8,65	21,24	0,41
Bw1	30-60	45	68,44	7,97	23,58	0,34
Bw2	60-90	70	61,39	12,92	25,69	0,50
Bw3	90-120	105	35,78	33,13	31,09	1,07
Transição	120-210	160	4,75	64,79	30,46	2,13
Kn1	210-250	230	9,65	67,72	22,63	2,99
Kn2	250-320	290	12,79	59,17	28,04	2,11
Kn3	320-380	340	9,55	63,11	27,34	2,31
Kn4	380+	395	9,10	77,03	13,88	5,55

(1) Fração areia = de 0,05 a 2 mm, (2) Fração silte = de 0,002 a 0,05 mm, (3) Fração argila = inferior a 0,002 mm.

Curva de retenção de água no solo, densidade do solo, densidade de partículas e porosidade total do solo

As curvas de retenção de água no solo do horizonte Bw3 (latossólico) e das camadas de caulim (Kn1, Kn2 e Kn3) apresentaram perda de umidade muito pequena nos potenciais menores (ψ = -2 kPa a ψ = -10 kPa), entretanto, a partir da capacidade de campo (ψ = -10 kPa), esses horizontes e camadas passaram a perder água e chegaram ao ponto de murcha permanente (ψ = -1,500 kPa) com teores médios de umidade entre 0,48 e 0,57 cm^3 cm^{-3} (Figura 1.15 a). Esses resultados indicam que os solos desses horizontes e camadas possuem maior quantidade de microporos, confirmados pelas distribuição da porosidade (Figura 1.15 b), pela maior capacidade de retenção de água e pela estrutura maciça (Figura 1.16 a). Essas características resultam da distribuição relativa g/f2µm do tipo porfírica aberta (STOOPS; JONGERIUS, 1975) (Figura 1.16 b).

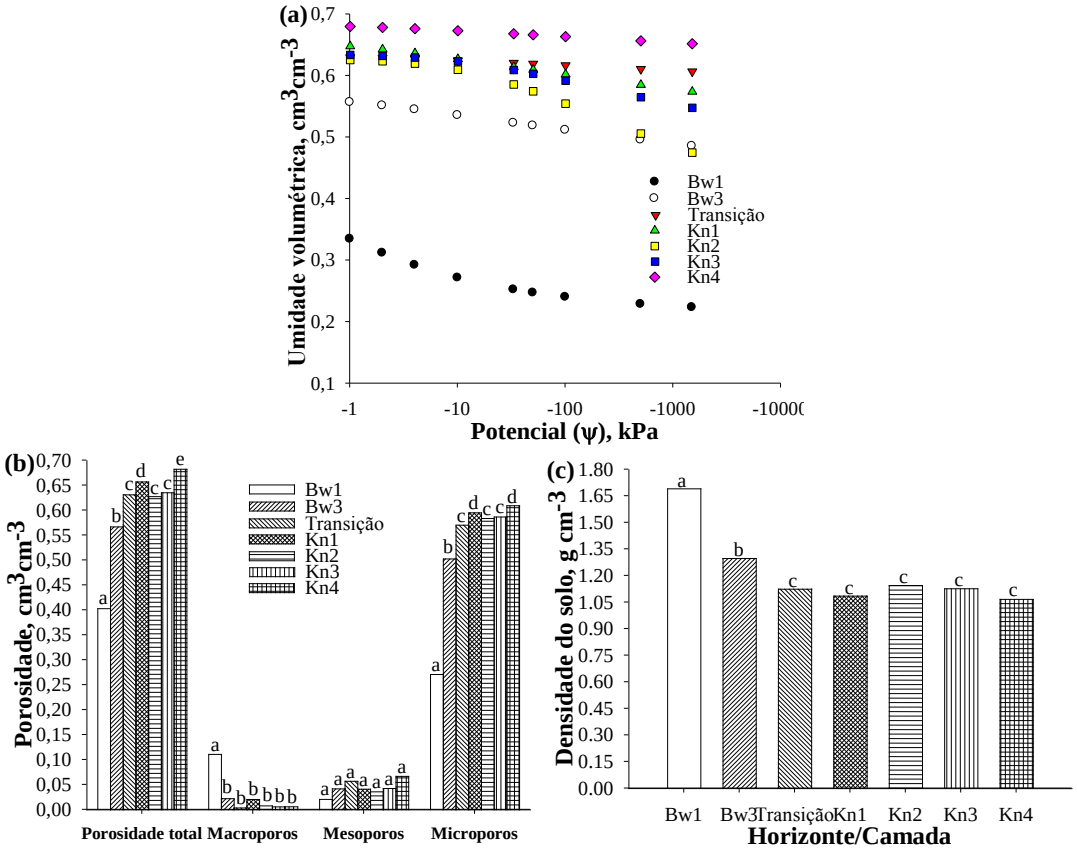

Figura 1.15 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): (a) Curvas de retenção de água no solo; (b) Porosidade total e faixa de macroporos (> 0,05 mm), mesoporos (entre 0,05 e 0,03 mm) e microporos do solo (< 0,03 mm); (c) Densidade do solo. Médias seguidas da mesma letra, nas colunas de cada conjunto, não diferem entre si a 5 % pelo teste de Scott-Knott.

A menor inclinação das curvas de retenção de água no solo na transição e na camada de caulim (Kn4) com relação ao eixo do potencial matricial indica que nesses horizontes a drenagem se faz de forma muito lenta.

O comportamento da curva de retenção de água no solo do horizonte latossólico (Bw1) mostrou que a maior perda de umidade ocorreu até a capacidade de campo (ψ = -10 kPa) devido ao incremento na macroporosidade, resultante dos elevados teores na fração areia (68,44 %) (Tabela 1.3), que imprime ao solo distribuição relativa g/f2µm do tipo quito-gefúrica (Figura 1.16 c). Até o ponto de murcha permanente a perda de umidade manteve-se por volta de 0,220 $cm^3\ cm^{-3}$, mostrando que nesse horizonte a umidade foi pouco retida e que a água foi drenada mais rapidamente que nas camadas inferiores, como indicado pela maior inclinação da curva em relação ao eixo do potencial matricial (Figura 1.15 a).

A porosidade total do solo foi significativamente maior no horizonte Bw3 (latossólico), na transição e nas camadas de caulim (Kn1, Kn2, Kn3 e Kn4), com valores médios superiores a 0,57 $cm^3\ cm^{-3}$, quando comparados ao horizonte latossólico (Bw1), com valor médio

de 0,40 cm^3 cm^{-3} (Figura 1.15 b). Naqueles horizontes e camadas, a exemplo do P2, a predominância de microporos decorrentes da microestrutura maciça confirmou a maior capacidade de retenção de água no solo. A porosidade no horizonte Bw1 (latossólico) concentrou-se na faixa dos microporos. Esse horizonte também apresentou valores médios de macroporosidade significativamente maiores do que nos demais horizontes e camadas (Figura 1.15 b), relacionados aos elevados teores da fração areia (Tabela 1.4) e a porosidade do tipo cavidades (Figura 1.16 c).

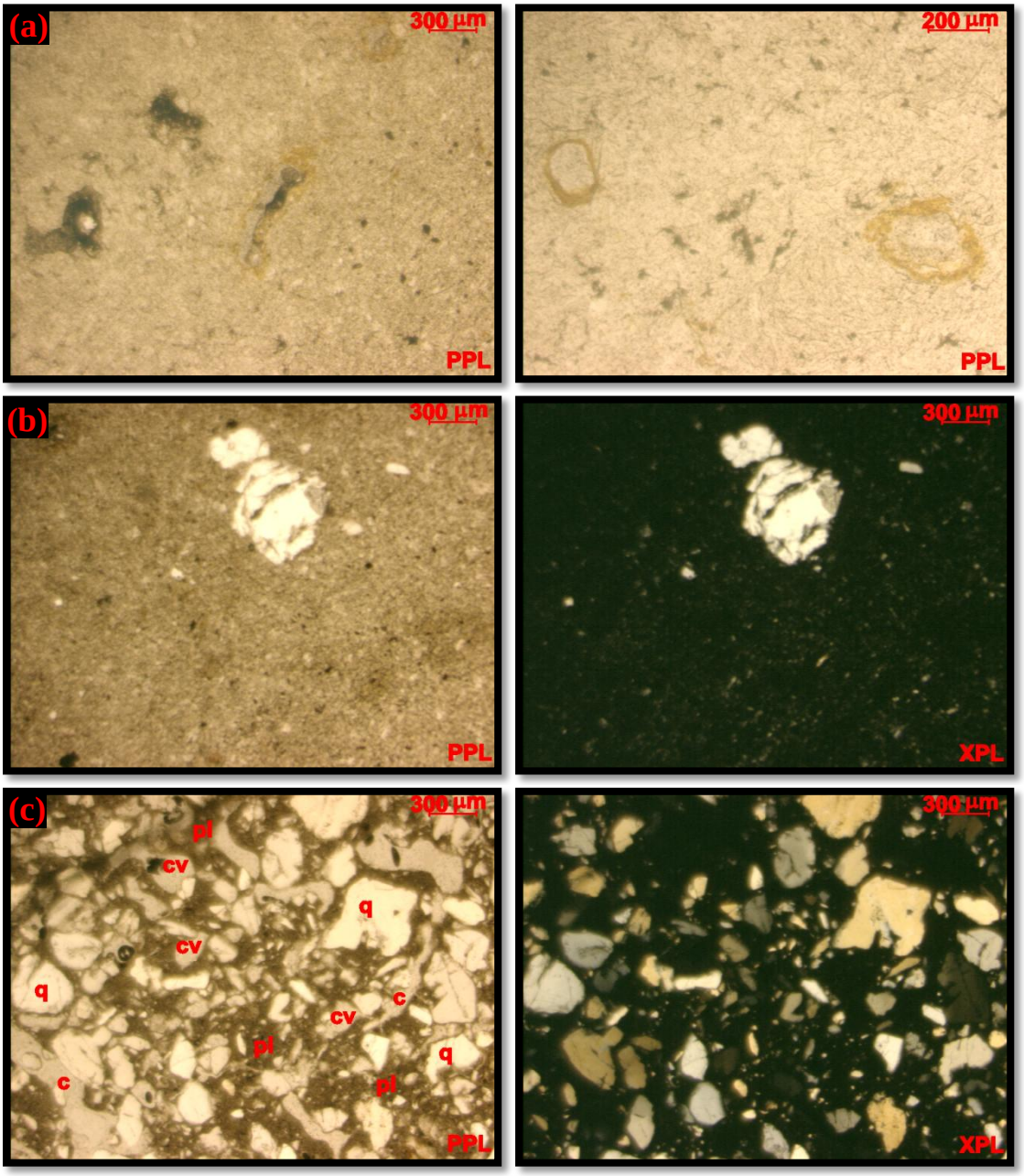

Figura 1.16 - Fotomicrografias de lâminas delgadas do perfil P2 (Latossolo Amarelo) obtidas ao microscópio petrográfico. a) Microestrutura maciça das camadas Kn1 (esquerda) e Kn2 (direita), b) distribuição relativa g/f2µm do tipo porfírica aberta na transição, c) distribuição relativa g/f2µm do tipo quito-gefúrica do horizonte

Bw1. As fotomicrografias obtidas com a luz polarizada em um só plano (polarizador inserido) receberam a sigla PPL e aquelas obtidas com nicóis cruzados (polarizador e analisador inseridos) foram indicadas com a sigla XPL. c = canal, cv = cavidade, pl = plasma e q = quartzo.

Os menores valores de densidade do solo (Figura 1.15 c) obtidos na transição e nas camadas de caulim (Kn1, Kn2, Kn3 e Kn4) resultam da maior quantidade de microporos presentes na microestrutura maciça (Figura 1.15 b). Entretanto, na medida em que houve incremento no teor da fração areia, diminuição na porosidade total em direção ao topo do perfil e a porosidade passou a concentrar-se nas cavidades e canais, poros de circulação de água e ar, houve aumento da densidade do solo (Tabela 1.4). A densidade de partículas apresentou valores semelhantes em todo o perfil (Tabela 1.4).

Tabela 1.4 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Densidade do solo e densidade de partículas.

Horizonte/ Camada	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	Densidade do solo	Densidade de partículas
			----------g cm^{-3} ----------	
A2	10-20	15	NA(1)	2,66
BA	20-30	25	NA	2,65
Bw1	30-60	45	1,69	2,66
Bw2	60-90	70	NA	2,66
Bw3	90-120	105	1,30	2,64
Transição	120-210	160	1,13	2,63
Kn1	210-250	230	1,09	2,64
Kn2	250-320	290	1,15	2,65
Kn3	320-380	340	1,13	2,67
Kn4	380+	395	1,07	2,66

(1) NA = não analisado.

1.3.2.3. Perfil P3 - Latossolo Amarelo

Análise granulométrica

Apesar do gradual incremento na fração argila dos horizontes de transição (AB) e latossólicos (Bw1, Bw2 e Bw3) com a profundidade (Figura 1.17 a, Tabela 1.5), a relação textural B/A foi de 1,54, sendo, portanto, inferior ao mínimo necessário para caracterizar horizonte B textural (1,7) quando o horizonte A apresentar de 15 a 40 % de argila. Além disso, a relação silte/argila inferior a 0,6 na maior parte do B (Tabela 1.5), o qualifica em B latossólico (EMBRAPA, 2006).

Nas camadas de caulim (Kn topo, Kn centro, Kn base), notou-se um pequeno incremento na fração silte com diminuição da areia. Não houve alteração importante nos valores da fração argila em relação aos horizontes latossólicos (Bw) (Tabela 1.5).

Notou-se um aumento gradual nos conteúdos de silte e argila do horizonte Bw1 (latossólico) à camada Kn base (caulim), conferindo a esses horizontes texturas argilo-arenosa, argilosa e argilo-siltosa (Figura 1.17 b).

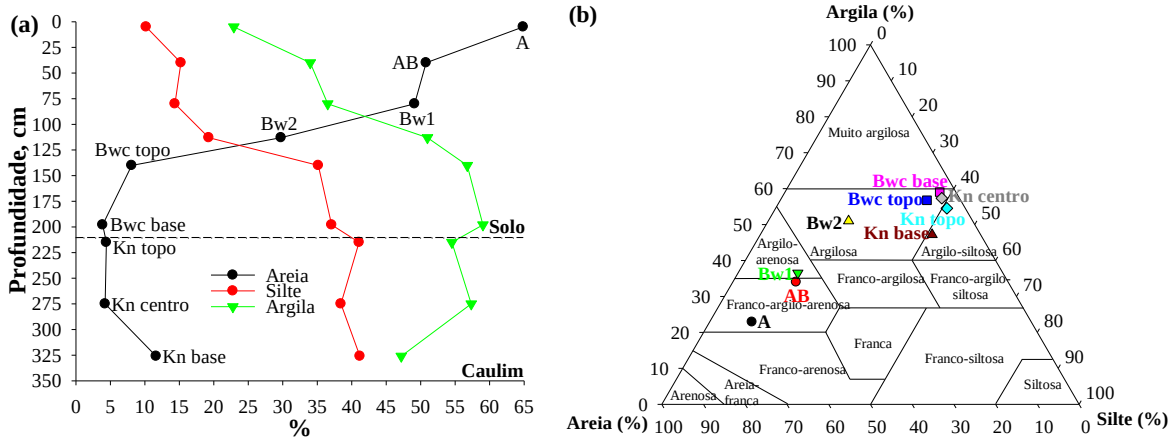

Figura 1.17 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): (a) Distribuição com a profundidade das frações argila (< 0,002 mm), silte (0,002 a 0,05 mm) e areia (0,05 a 2 mm); (b) Classificação textural das amostras de solo ao longo do perfil (UNITED STATES, 1999).

Tabela 1.5 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): Análise granulométrica.

Horizonte/ Camada	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	Areia (1)	Silte (2)	Argila (3)	Relação silte/argila
			----------%----------			
A	c	5	64,86	10,18	22,90	0,44
AB	10-40	40	50,79	15,23	33,99	0,45
Bw1	40-95	80	49,12	14,36	36,52	0,39
Bw2	95-130	113	29,75	19,27	50,98	0,38
Bwc topo	130-210	140	8,09	35,16	56,76	0,62
Bwc base		198	3,88	37,08	59,03	0,63
Kn topo		215	4,42	41,06	54,52	0,75
Kn centro	210+	275	4,24	38,43	57,33	0,67
Kn base		326	11,63	41,19	47,18	0,87

(1) Fração areia = de 0,05 a 2 mm, (2) Fração silte = de 0,002 a 0,05 mm, (3) Fração argila = inferior a 0,002 mm.

Curva de retenção de água no solo, densidade do solo, densidade de partículas e porosidade total do solo

As curvas de retenção de água no solo dos horizontes AB (transição) e Bw1 (latossólico) apresentaram características muito similares como maior inclinação em relação ao eixo do potencial matricial, que indica drenagem mais eficiente nesses horizontes do que no horizonte

Bw2 (latossólico) (Figura 1.18 a), decorrente da distribuição relativa g/f2µm do tipo quito-gefúrica (Figura 1.19 a). Drenagem menos eficiente e maior quantidade de umidade no ponto de murcha permanente (ψ = - 1500kPa) no horizonte Bw2 (latossólico) sugerem a ocorrência de estrutura mais compacta e maior capacidade de retenção de umidade. Essas características resultam da microestrutura maciça e da distribuição relativa g/f2µm do tipo porfírica dupla (Figura 1.19 b).

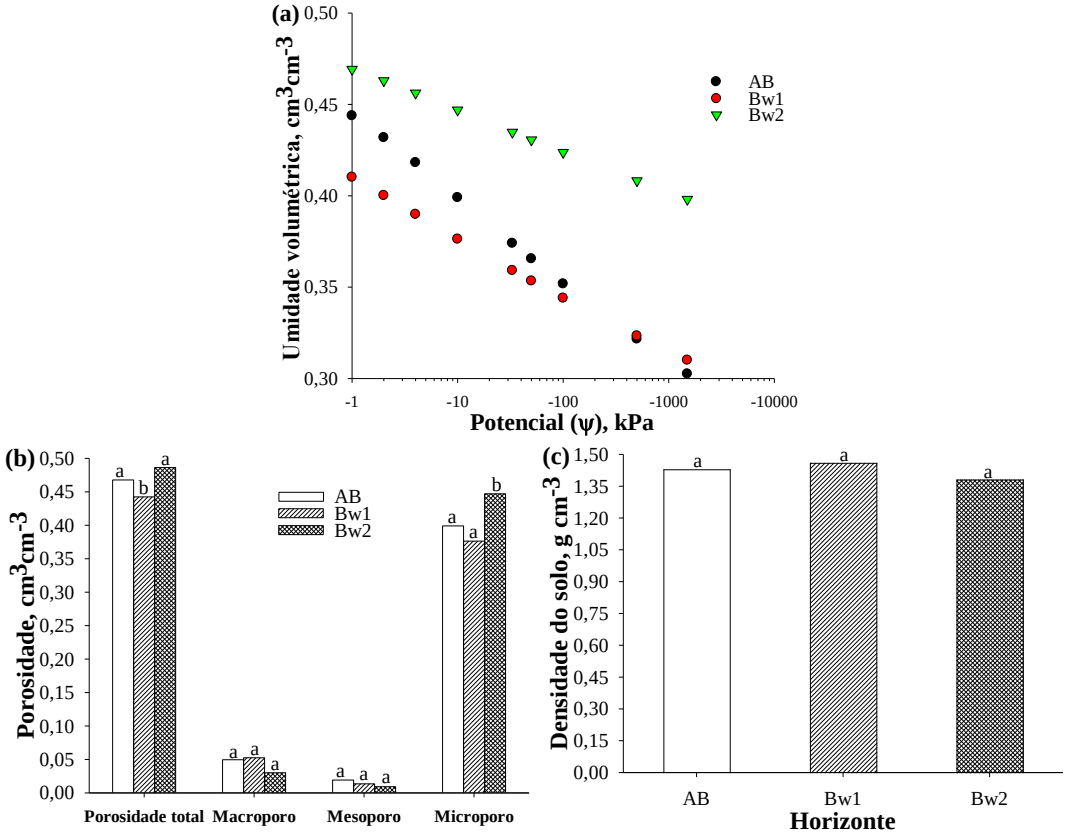

Figura 1.18 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): (a) Curvas de retenção com valores ajustados; (b) porosidade total e faixa de macroporos, mesoporos e microporos do solo; (c) densidade do solo. Médias seguidas da mesma letra, nas colunas de cada conjunto, não diferem entre si a 5 % pelo teste de Scott-Knott.

Em razão da presença de nódulos gibbsíticos, não foi possível coletar amostras de solo indeformadas em anéis volumétricos para estudos de retenção de água, porosidade e densidade dos horizontes latossólicos com nódulos gibbsíticos (Bwc topo e Bwc base) e camadas de caulim (Kn topo, Kn centro e Kn base).

Não há diferença estatística na porosidade total entre os horizontes AB (transição) e Bw2 (latossólico), apesar de suas diferenças texturais (Figura 1.18 b). Esses resultados decorrem das microestruturas grumosa (Figura 1.19 a) e maciça (Figura 1.19 b), observadas nos horizontes AB e Bw2, respectivamente. No horizonte Bw1 (latossólico), a menor porosidade

total está relacionada à textura mais arenosa e à microestrutura granular. Os maiores teores de microporos no Bw2 (Figura 1.18 b) decorrem da microestrutura maciça e distribuição relativa g/f2µm do tipo porfírica dupla, acima mencionadas, além do incremento em argila. De forma geral, a porosidade total dos horizontes analisados concentra-se nos poros de retenção (Figura 1.18 b).

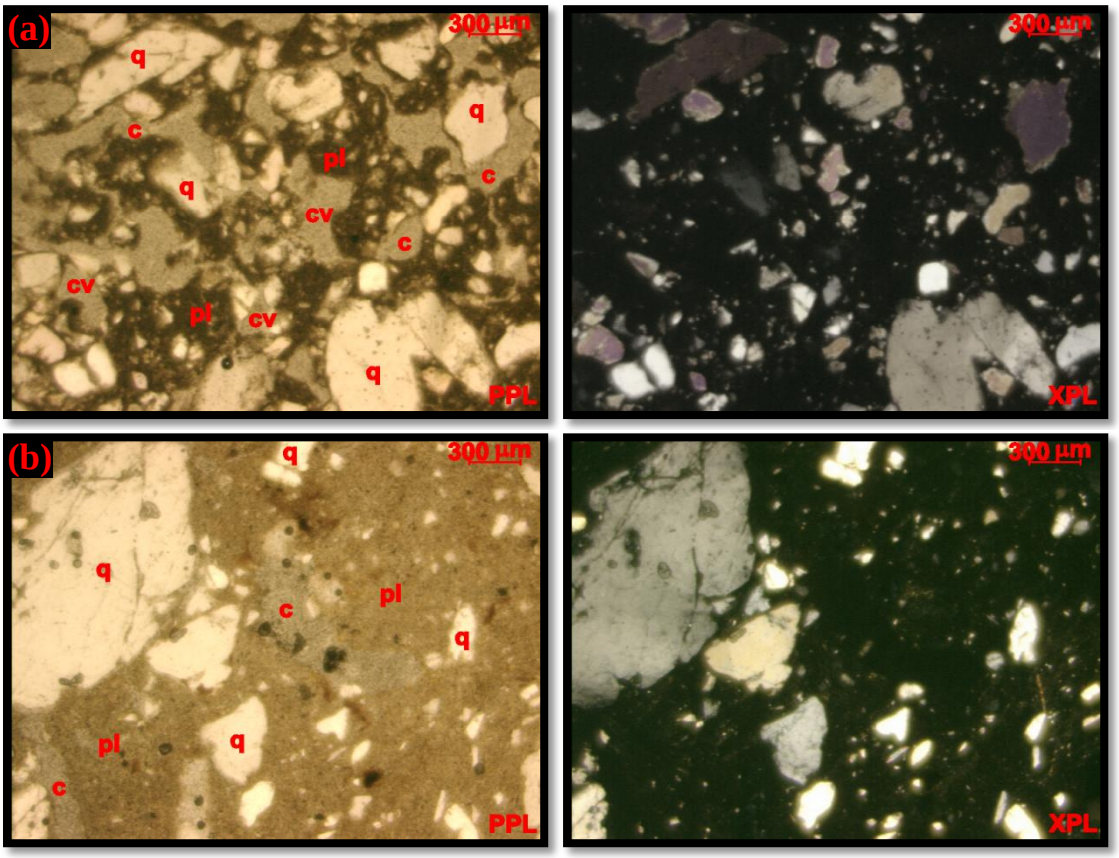

Figura 1.19 - Fotomicrografias de lâminas delgadas do perfil P3 (Latossolo Amarelo) obtidas ao microscópio petrográfico. (a) Microestrutura grumosa e distribuição relativa g/f2µm do tipo quito-gefúrica do horizonte AB, (b) Microestrutura maciça e distribuição relativa g/f2µm do tipo porfírica dupla do horizonte Bw2. As fotomicrografias obtidas com a luz polarizada em um só plano (polarizador inserido) receberam a sigla PPL e aquelas obtidas com nicóis cruzados (polarizador e analisador inseridos) foram indicadas com a sigla XPL. Onde c = canal, cv = cavidade, p = poro, pl = plasma e q = quartzo.

Apesar dos horizontes analisados apresentarem diferentes classes texturais não há diferença estatística entre os valores de densidade do solo (Figura 1.18 c). Este comportamento ocorre em razão da influência da matéria orgânica presente no horizonte AB e do incremento em argila nos B latossólicos. A densidade de partículas medida em todos os horizontes do perfil variou entre 2,55 e 2,64 g cm^{-3} (Tabela 1.6).

Tabela 1.6 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): Densidade do solo e densidade de partículas.

Horizonte/ Camada	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	Densidade do solo	Densidade de partículas
			---------- g cm^{-3} ----------	
A	0-10	5	NA(1)	2,55
AB	10-40	40	1,43	2,63
Bw1	40-95	80	1,46	2,64
Bw2	95-130	113	1,38	2,64
Bwc topo	130-210	140	NA	2,63
Bwc base		198	NA	2,62
Kn topo		215	NA	2,64
Kn centro	210+	275	NA	2,62
Kn base		326	NA	2,61

(1) NA=não analisado.

1.3.2.4. Perfil P4 - Gleissolo Háplico

Em razão de características de campo, como alta concentração de fragmentos de quartzo, apresentadas no ANEXO A, não foi possível coletar amostras indeformadas para as análises de curva de retenção de água no solo, porosidade e densidade.

A Figura 1.20 a mostra que a fração areia predomina na maior parte dos horizontes, exceto no Cg5. As texturas franca e franco-arenosas do Gleissolo Háplico, obtidas das análises granulométricas (Figura 1.20 e Tabela 1.7), refletem a origem coluvionar e a proximidade com a alteração, e as condições hidromórficas imprimem ao solo, respectivamente, tendência ao acúmulo da fração areia e ambiente impróprio à estabilidade e formação de caulinita (frações finas).

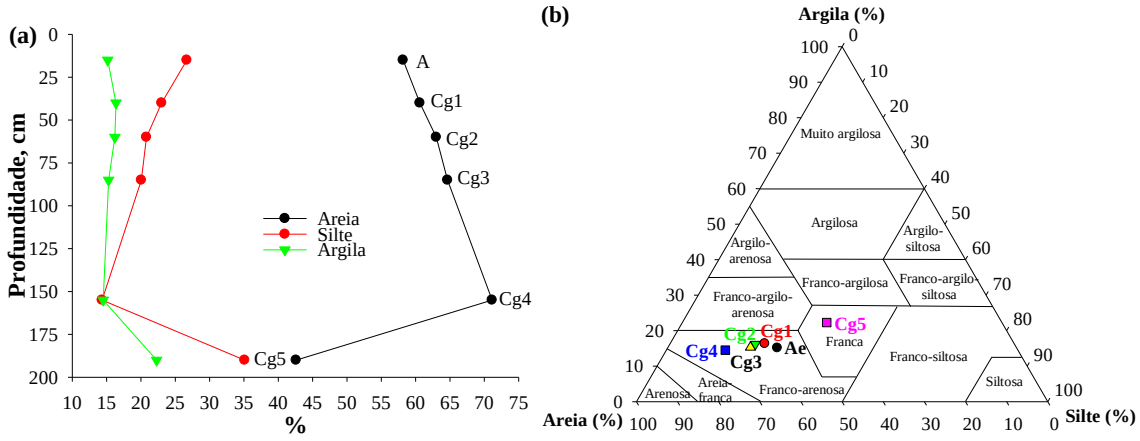

Figura 1.20 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico): (a) Distribuição com a profundidade das frações argila (< 0,002 mm), silte (0,002 a 0,05 mm) e areia (0,05 a 2 mm); (b) Classificação textural das amostras de solo ao longo do perfil (UNITED STATES, 1999).

Tabela 1.7 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico): Análise granulométrica.

Horizonte	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	Areia (1)	Silte (2)	Argila (3)	Relação silte/argila
			----------%----------			
A	0-30	15	58,17	26,68	15,16	1,76
Cg1	30-50	40	60,61	23,02	16,37	1,41
Cg2	50-70	60	63,00	20,80	16,20	1,28
Cg3	70-130	85	64,65	20,06	15,29	1,31
Cg4	130-180	155	71,14	14,35	14,51	0,99
Cg5	180+	190	42,59	35,11	22,29	1,58

(1) Fração areia = de 0,05 a 2 mm, (2) Fração silte = de 0,002 a 0,05 mm, (3) Fração argila = inferior a 0,002 mm.

1.3.3. Características mineralógicas e geoquímicas dos perfis

Neste item serão apresentadas as características mineralógicas e geoquímicas de todos os perfis da topossequência estudada. A determinação das fases minerais presentes foi realizada com base nas análises por DRX, ATD-TG e ERD e sua quantificação foi obtida a partir da análise química da amostra total e ATD-TG.

Utilizando os dados químicos foi calculado o balanço de massa, tendo o zircônio como elemento imóvel, com objetivo de analisar as perdas e ganhos dos elementos químicos em todos os perfis, por comparação com a rocha de origem.

Como na topossequência estudada não foram encontrados afloramentos de rocha "in situ", considerou-se, para efeito de comparação, a composição química média de três rochas aflorantes na região e que representariam as rochas matrizes dos solos analisados (Tabela 1.8). Desta forma, os resultados do balanço de massa devem ser considerados aproximativos.

Tabela 1.8 - Composição química média de três rochas aflorantes nos arredores da área de estudo.

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3(T)	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	Total	Zr
	---------- % ----------											ppm
Média	71,12	13,23	3,04	0,09	0,74	2,52	2,21	5,44	0,54	0,16	99,89	234,33

1.3.3.1. Perfil P1 - Espodossolo Humilúvico

As análises mineralógicas e químicas apresentadas nas Tabelas 1.9 e 1.10 permitiram verificar que, sob o ponto de vista mineralógico, o Espodossolo Humilúvico apresenta uma mineralógia relativamente simples e monótona ao longo de todo o perfil, caracterizada pela presença de caulinita, gibbsita, goethita, hematita e anatásio, acompanhadas pelos minerais residuais, proveniente das rochas granito gnaisses da região, quartzo e muscovita, além de rútilo esporadicamente.

Sob o ponto de vista químico (Tabela 1.10), o Espodossolo Humilúvico apresenta-se como um solo ácido, cujos valores de pH em H_2O variam entre 4,00 e 5,20 e em KCl entre 3,10 e 4,00. Os teores em SiO_2 apresentam-se elevados nos horizontes superficias (A1 e A2), álbicos (E1 e E2) e espódicos (Bh e Bhs) de 88,22 a 98,88 % e baixam bruscamente na transição e nas camadas de caulim (K1 e K2), exibindo valor médio de 43,57 % (Figura 1.21). Em contraposição, o Al_2O_3, quase ausente nos horizontes superficiais e álbicos, sofre um ligeiro incremento nos horizontes espódicos (valor médio de 1,90 % Al_2O_3) e um aumento importante de 32,39 a 36,93 % na transição e nas camadas de caulim (Figura 1.21). A relação SiO_2:Al_2O_3 apresenta uma grande variação, atingindo valores maiores que 700 nos horizontes álbicos e espódicos, baixando para próximo de 1 na transição e nas camadas de caulim (Tabela 1.10).

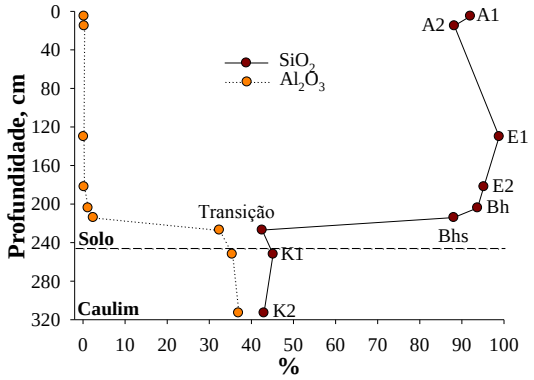

Figura 1.21 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): Distribuição do SiO_2 e do Al_2O_3 com a profundidade.

O ferro, em geral, bem representado nos solos das zonas tropicais úmidas, ocorre neste perfil com teores muito baixos, não atingindo 1% em nenhum dos horizontes e camadas. Nota-se, igualmente, baixa concentração dos elementos alcalinos (Na e K) e alcalino terrosos (Ca e Mg) ao longo de todo o perfil (Tabela 1.10).

Considerações mineralógicas

Associando os dados químicos e mineralógicos foi possível estabelecer a composição mineralógica semiquantitativa do perfil (análise normativa), cujos resultados estão apresentados na Tabela 1.11.

Tabela 1.9 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): Difração de raios-X da amostra bruta.

Horizonte/ Camada	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	Mineralogia [1]
A1	0-5	5	Q, A, C, Go [2], H [2]
A2	5-30	15	Q, A, C, Go, H
E1	30-180	130	Q, A, C, Go, H
E2	180-202,5	182	Q, A, C, Go, H
Bh	202,5-204	204	Q, A, C, R, Go, H, M
Bhs	204-214	214	Q, A, C, R, G, M, Go, H
Transição	214-245	227	Q, C, A, G, Go, H, M
K1	245-290	252	C, Q, G, A, M
K2	290+	313	C, G, Q, A, Go, H, M

(1) A = anatásio, C = caulinita, G = gibbsita, Go = Goethita, H = hematita, M = muscovita, Q = quartzo, R = rutilo; (2) Identificados por espectroscopia de reflectância difusa.

Tabela 1.10 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): pH e composição química total da amostra bruta.

Horizonte/ Camada	Profun-didade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	pH		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3(T)	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	PF	Total	Relação SiO_2:Al_2O	Zr ppm
			H_2O	KCl	---------- % ----------											
A1	0-5	5	4,00	3,80	92,03	0,28	0,02	LD [2]	0,01	LD	LD	0,26	7,95	100,40	328,68	1346
A2	5-30	15	4,20	3,10	88,22	0,28	0,75	0,01	0,01	0,06	0,02	0,24	10,42	100,00	315,07	1013
E1	30-180	130	5,20	4,00	98,88	0,13	0,42	LD	LD	0,03	0,07	0,47	0,20	100,20	760,62	1639
E2	180-202,5	182	4,50	4,00	95,22	0,23	0,80	0,02	0,03	0,07	LD	0,99	1,33	98,69	414,00	1940
Bh	202,5-204	204	4,40	3,50	93,72	1,37	0,11	0,01	LD	LD	LD	3,30	1,54	99,96	68,41	5638
Bhs	204-214	214	NA [1]	NA	88,09	2,43	0,45	0,02	0,01	0,05	0,06	6,18	1,59	98,93	36,25	5924
Transição	214-245	227	NA	NA	42,56	32,39	0,19	0,10	0,04	0,06	0,02	0,51	22,74	98,66	1,31	369
K1	245-290	252	NA	NA	45,16	35,45	0,62	0,17	0,07	0,03	0,17	0,51	16,68	98,91	1,27	292
K2	290+	313	4,10	4,00	42,99	36,93	0,20	0,09	0,02	0,03	0,06	0,42	18,10	98,90	1,16	233

(1) NA = não analisado, (2) LD = abaixo do limite de detecção.

Comportamento dos minerais primários

Quartzo e muscovita

A Tabela 1.11 mostra que os horizontes superficias (A1, A2), álbicos (E1 e E2) e espódicos (Bh e Bhs) são constituídos quase exclusivamente por quartzo, cujos teores atingem no horizonte E1 cerca de 99%. Estes teores são bruscamente reduzidos na transição (10,31 %), baixando mais ainda nas camadas de caulim (K1 e K2), onde na base representa apenas 1,15 % da amostra total.

A muscovita, mineral presente em todas as rochas da região (granitos e granito gnaisses) e resistente às alterações intempéricas, ocorre em baixas concentrações nos solos estudados, o que evidencia a intensidade dos processos de intemperismo e pedogênese que deram origem a este solo. Esse mineral foi observado em pequenas quantidades em todo o perfil (< 0,59 %), exceto na camada K1, cuja concentração é ligeiramente elevada, podendo chegar a 1,4 % (Tabela 1.11). Em muitos casos percebe-se sua alteração incipiente para caulinita. As análises ao MEV (Figura 1.22) e as observações petrográficas confirmaram a existência em traço desse mineral e a transformação da muscovita em caulinita (Figura 1.23 a, b).

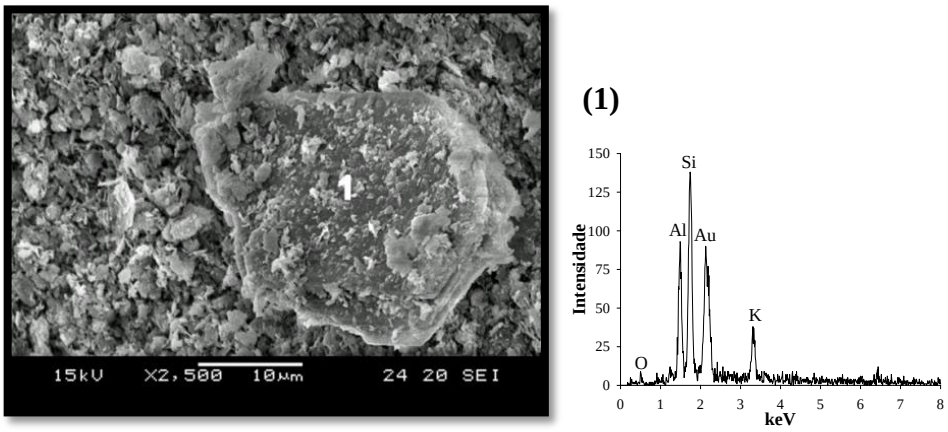

Figura 1.22 - Imagem de cristal de muscovita obtida ao MEV e microanálise por raios-X por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) (gráfico) em amostra da transição do perfil P1 (Espodossolo Humilúvico). Atribui-se ao recobrimento com ouro (Au) da amostra, o pico a 2,12 keV.

Tabela 1.11 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): Análise normativa da amostra bruta.

Horizonte/ Camada	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	Muscovita	Gibbsita [1]	Caulinita	Quartzo	Óxidos de titânio	Óxidos de ferro	Matéria orgânica	Total
			%							
A1	0-5	5	LD [2]	ND [3]	0,71	91,70	0,26	0,02	7,85	100,54
A2	5-30	15	0,17	ND	0,54	87,89	0,24	0,75	10,34	99,93
E1	30-180	130	0,59	ND	0,00	98,61	0,47	0,42	0,17	100,26
E2	180-202,5	182	LD	ND	0,58	94,95	0,99	0,80	1,25	98,56
Bh	202,5-204	204	LD	ND	3,47	92,11	3,30	0,11	1,05	100,04
Bhs	204-214	214	0,51	0,50	4,83	85,61	6,18	0,45	0,72	98,80
Transição	214-245	227	0,17	7,69	69,11	10,31	0,51	0,19	10,43	98,40
K1	245-290	252	1,44	2,99	83,40	5,69	0,51	0,62	3,94	98,59
K2	290+	313	0,51	2,18	89,38	1,15	0,42	0,20	4,84	98,69

(1) Gibbsita estimada por ATD-TG, (2) LD = abaixo do limite de detecção para o K_2O na análise química, (3) ND = não detectado na análise térmica.

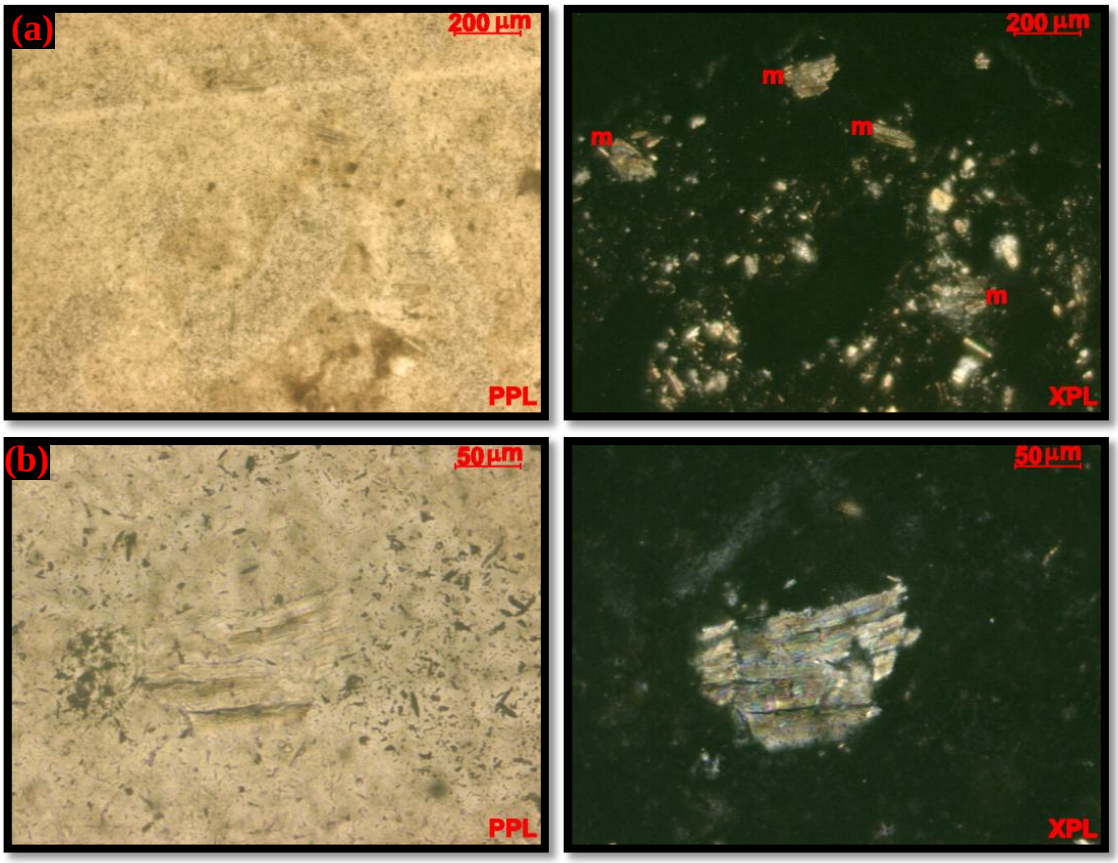

Figura 1.23 - Fotomicrografias delâmina delgada do perfil P1 (Espodossolo Humilúvico) obtidas ao microscópio petrográfico. (a) Fragmentos de muscovita (m) em alteração para caulinita da camada de caulim K2, (b) detalhe de fragmento de muscovita residual sendo transformado em caulinita sobre plasma caulinítico da camada de caulim K2. As fotomicrografias obtidas com a luz polarizada em um só plano (polarizador inserido) receberam a sigla PPL e aquelas obtidas com nicóis cruzados (polarizador e analisador inseridos) foram indicadas com a sigla XPL.

Comportamento dos minerais secundários

Caulinita e Gibbsita

Entre os minerais secundários, a caulinita pouco representada nos horizontes superficiais (A1 e A2) e álbicos (E1 e E2) onde sua concentração não chega a atingir 1 % da amostra total, exibe um pequeno aumento nos horizontes espódicos (Bh e Bhs), atingindo 4,83 % (Tabela 1.11). Na transição e nas camadas de caulim (K1 e K2) torna-se o mineral dominante, apresenta valores da ordem de 90 % (Tabela 1.11).

Sendo este solo derivado de um Latossolo, dentro de um sistema de transformação Latossolo-Espodossolo poderia ser esperada a ocorrência de uma maior concentração de caulinita, mineral de maior representatividade nos Latossolos. Entretanto, foram obtidas quantidades baixas de caulinita nos horizontes superficiais, álbicos e espódicos (0,33 a 4,83 %) (Tabela 1.11). Apenas na transição e nas camadas de caulim foram determinadas maiores

quantidades de caulinita (69,11 a 89,38 %) e relação SiO_2: Al_2O_3 entre 1,16 e 1,31 (Tabelas 1.10 e 1.11). Torna-se, portanto, evidente que a caulinita sofreu translocação e/ou dissolução. Estes dois processos podem ter ocorrido simultaneamente, pois a análise morfológica do perfil, no campo, mostra evidência de migração da caulinita (tipo cerosidade) em direção à base e estudo recente de Montes (2009) mostra que pequenas quantidades de caulinita podem ser explicadas pela ação das águas ácidas que percolam os Espodossolos da área de estudo. Essa autora encontrou concentrações molares de silício ($1,7\ 10^{-5}$ $mol.L^{-1}$) e de alumínio ($1,8\ 10^{-5}$ $mol.L^{-1}$) que indicam a existência de um ambiente propício à promoção da dissolução congruente da caulinita. No presente trabalho, nas observações ao microscópio petrográfico foram identificados fragmentos de quartzo com poros de dissolução (alguns preenchidos por material ferruginoso) e ausência de material fino (plasma), confirmando a ocorrência de destruição da caulinita (Figura 1.24). Aquela autora mostrou ainda que a alta agressividade da água (pH entre 3,6 e 3,9), que percola os horizontes álbicos seria responsável, juntamente com a capacidade complexante do carbono orgânico dissolvido (COD entre 15 e 40) pela extração dos íons de Fe e Al dos minerais.

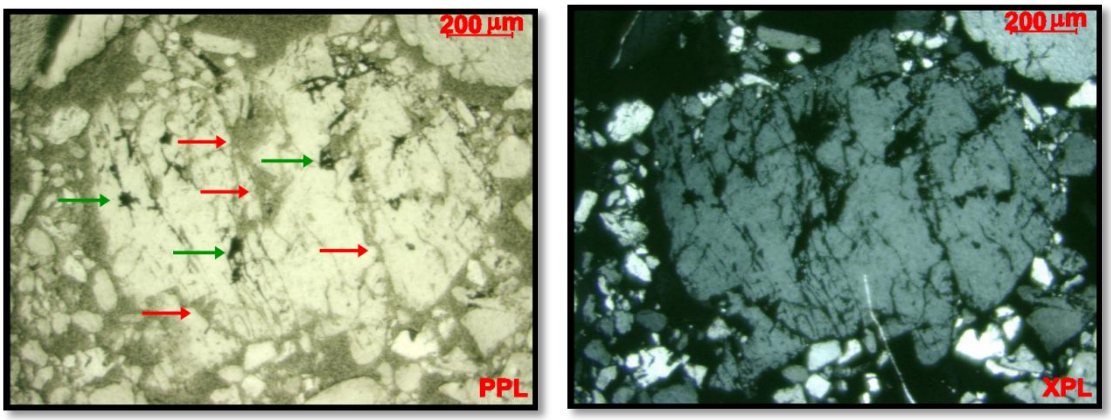

Figura 1.24 - Fotomicrografias delâmina delgada do perfil P1 (Espodossolo Humilúvico) obtidas ao microscópio petrográfico. Detalhe do horizonte álbico (E1) marcado pela ausência de plasma e pela presença de figuras de dissolução e por depósitos de material ferruginoso nas fraturas e feições de dissolução, indicadas, respectivamente, por setas vermelhas e verdes. A fotomicrografia obtida com a luz polarizada em um só plano (polarizador inserido) recebeu a sigla PPL e aquela obtida com nicóis cruzados (polarizador e analisador inseridos) foi indicada com a sigla XPL.

Cristais de quartzo com figuras de dissolução, observados especialmente nos horizontes superficiais (A1 e A2), álbicos (E1 e E2) e espódicos (Bh e Bhs) (Figura 1.25), indicam que o caráter agressivo da solução que percola o perfil é capaz de promover a liberação em solução dos íons de Si necessários à precipitação de caulinita nas camadas subjacentes.

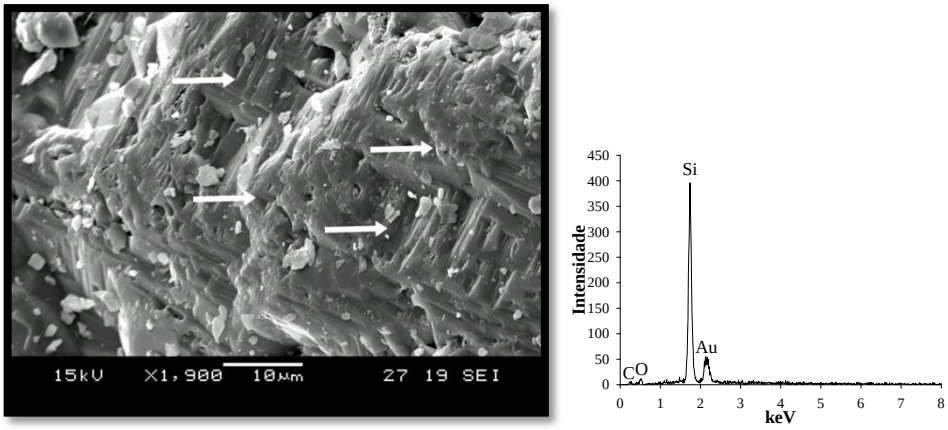

Figura 1.25 - Imagem de cristal de quartzo, com setas indicando as figuras de dissolução, obtida ao MEV e microanálise, da área total observada (gráfico), por raios-X por EDS em amostra do horizonte E1 do perfil P1 (Espodossolo Humilúvico). Atribui-se ao recobrimento com ouro (Au) da amostra, o pico a 2,12 keV.

Portanto, é de se esperar que parte da caulinita encontrada nas camadas de caulim (K1 e K2) seja proveniente do Latossolo pré-existente, após embranquecimento provocado pela eliminação do ferro e, em parte, formada durante o processo de podzolização, pelo aporte do silício e alumínio dos horizontes superiores. Acordeons de caulinita imersos em plasma caulinítico foram observados ao MEV na transição e nas camadas de caulim (K1 e K2), muitos apresentando sinais de alteração (Figura 1.26), indicando que a caulinita primária (proveniente do Latossolo) poderia estar em meio propício tanto à sua desestabilização, devido aos baixos valores de pH que contribuem na diminuição de sua ordem estrutural como à neoformação de caulinita com baixo ordenamento estrutural, como será visto na Parte 2 deste trabalho.

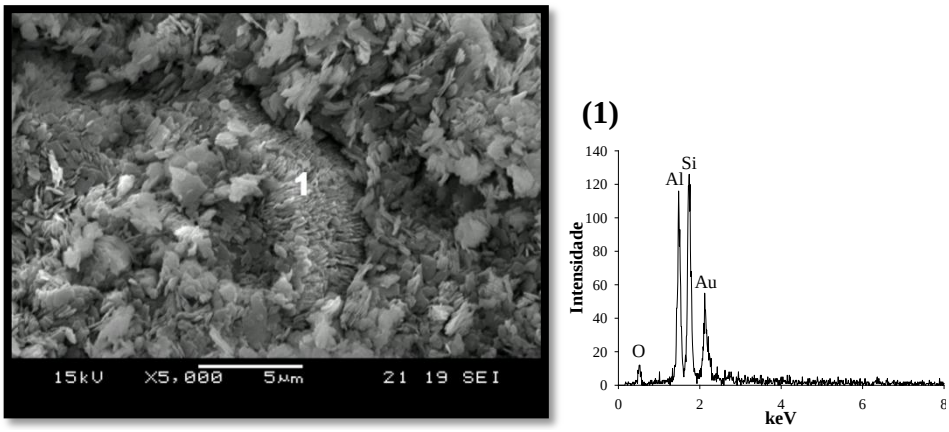

Figura 1.26 - Imagem de acordeon de caulinita, com sinais de alteração, obtida ao MEV e microanálise por raios-X por EDS (gráfico) em amostra do caulim K1 do perfil P1 (Espodossolo Humilúvico). Atribui-se ao recobrimento com ouro (Au) da amostra, o pico a 2,12 keV.

A gibbsita, ausente nos horizontes superiores, aparece em concentrações reduzidas na transição (7,69 %) e nas camadas de caulim K1 e K2, respectivamente, 2,99 % e 2,18 % (Tabela 1.11).

A fim de melhor analisar o comportamento da caulinita e da gibbsita um estudo mais pormenorizado foi conduzido a partir de suas distribuições nas diferentes frações granulométricas (Tabela 1.12 e 1.13).

A caulinita ocorre nas três frações granulométricas, argila, silte e areia, de praticamente todos os horizontes do perfil P1, com exceção à fração areia dos horizontes superficiais (A1 e A2), álbicos (E1 e E2) e espódicos (Bh e Bhs) (Tabela 1.12). Portanto, ocorre associada à fração areia na transição e nas camadas de caulim (K1 e K2) com valores de 0,23 %, 8,02 % e 21,58 % (Tabela 1.13), respectivamente, onde esta fração é pouco representativa na amostra total 11 %, 8 % e 3%, respectivamente (Tabela 1.1). Além disso, nestas três amostras a fração areia é representada por uma areia de granulometria fina a muito fina.

A concentração maior de caulinita não se dá, como seria esperado na fração argila, mas sim na fração silte, fração esta bem representada na transição (38%) e nas camadas de caulim (65% e 68%, respectivamente, nas amostras K1 e K2) (Tabela 1.1). Esta elevada concentração da fração silte confere à transição e às camadas de caulim (K1 e K2), elevados teores de caulinita (30,81 %, 49,31 % e 41,80 % respectivamente na transição, K1 e K2) (Tabela 1.13) e um aspecto sedoso ao tato.

Com relação à gibbsita na amostra bruta, a Tabela 1.13 mostra que este mineral, assim como a caulinita apresenta valores significativos apenas nas camadas de transição e de caulim. Sua presença restringe-se praticamente à fração silte, onde atinge na transição 6,87 %, sendo desprezível nas frações areia e argila.

Tabela 1.12 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): Difração de raios-X das frações granulométricas areia, silte e argila.

Horizonte/ Camada	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	Mineralogia [1]		
			Fração areia	Fração silte	Fração argila
A1	0-5	5	Q	Q, A, R, C	C, A, Q, R, G
A2	5-30	15	Q	Q, A, R, C	Q, C, A, R, G
E1	30-180	130	Q, A	Q, A, R, C	Q, C, A, R, G
E2	180-202,5	182	Q, A	Q, A, R, C	Q, A, C, R, G
Bh	202,5-204	204	Q, A	Q, A, C, R, M	C, A, Q, R, G
Bhs	204-214	214	Q, A, M	Q, C, A	C, A, Q, R, M,G
Transição	214-245	227	Q, C, A,	C, Q, A, G	C, G
K1	245-290	252	Q, C, M	C, G	C, A, G, Q
K2	290+	313	Q, C, G, M	C, G	C, A, G

(1) A = anatásio, C = caulinita, G = gibbsita, M = muscovita, Q = quartzo, R = rutilo.

Tabela 1.13 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): Análise térmica diferencial e gravimétrica das frações granulométricas areia e argila.

Horizonte/ Camada	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	Fração argila		Fração silte [1]		Fração areia		Amostra bruta	
			Gibbsita	Caulinita	Gibbsita	Caulinita	Gibbsita	Caulinita	Gibbsita	Caulinita
			----------% ----------							
A1	0-5	5	0,38	4,69	NA [2]	NA	NA	NA	0,00	0,00
A2	5-30	15	0,09	2,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E1	60-180	130	0,00	0,26	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00	0,53
E2	180-202,5	182	0,01	0,94	NA	NA	NA	NA	0,00	0,00
Bh	202,5-204	204	0,18	4,31	NA	NA	NA	NA	0,00	4,87
Bhs	204-214	214	0,05	5,65	0,46	1,47	0,00	0,00	0,50	7,13
Transição	214-245	227	0,81	45,66	6,87	30,81	0,00	0,23	7,68	76,70
K1	245-290	252	0,21	23,64	2,52	49,31	0,26	8,02	2,99	80,96
K2	290+	313	0,46	27,95	1,11	41,80	0,61	21,58	2,18	91,32

(1) Estimada pela diferença entre a amostra bruta e a soma dos teores das frações argila e areia, (2) NA = não analisado.

Óxidos de ferro e titânio

Os óxidos de ferro são pouco representativos neste perfil (Figura 1.27 e Tabela 1.10). Aparecem em quantidades bastante reduzidas ao longo de todo o perfil, sendo de difícil identificação. Estudo por espectroscopia de reflectância difusa permitiu identificar a presença de goethita e hematita, determinadas, respectivamente, pelas bandas de absorção de 480 e 553 nm (Figura 1.28). Goethita é a fase dominante sobre a hematita e a banda de absorção de 480 nm da goethita, observada nos horizontes A1, A2, E2 e Bh e nas camadas K1 e K2, indica a existência de substituição isomórfica de Fe por Al (da ordem de 33 % mole de Al) (Figura 1.28) (MALENGREAU; MULLER; CALAS, 1994).

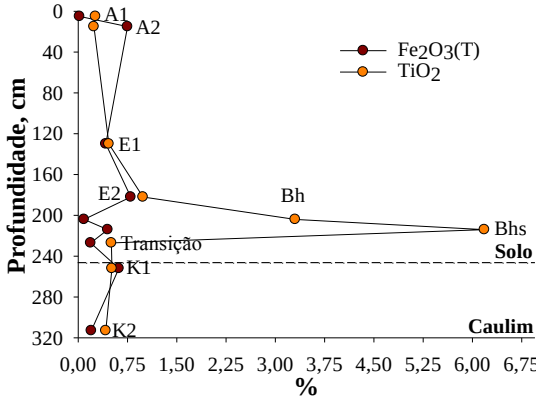

Figura 1.27 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): Distribuição do TiO_2 e do Fe_2O_3(T) com a profundidade.

Os dados químicos mostraram uma diminuição da concentração de óxidos de ferro no horizonte Bh (espódico), com relação aos horizontes A2 (superficial), E1 e E2 (álbicos), voltando a aumentar nos horizontes Bhs (espódico) e na camada de caulim (K1) (Figura 1.27 e Tabela 1.10). De acordo com Montes (2009), as águas pobres em matéria orgânica dissolvida (MOD) que percolam as camadas mais profundas (K1 e K2) apresentam maiores valores de Fe^{2+} do que de Fe^{3+}, o que significa que nesses ambientes a mobilidade do ferro depende de pequenas variações de Eh, resultando no esbranquecimento do material. Sob condições de elevada acidez, o ferro mantém-se solúvel mesmo com a melhora da oxigenação (JEANROY et al., 1991; MAFRA et al., 2002).

O ferro reduzido presente na solução do solo precipita sob a forma preferencialmente de goethita, na transição e nas camadas de caulim, sobretudo nas cavidades (Figura 1.29 a) e nos canais (Figura 1.29 b), na medida em que o ambiente torna-se mais oxidante.

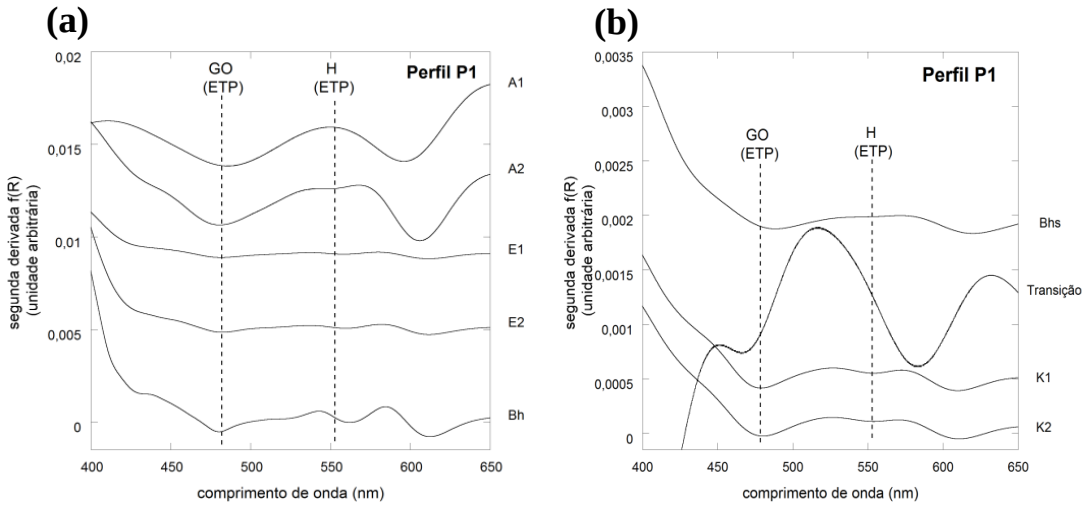

Figura 1.28 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): Espectro da segunda derivada da função de remissão *f(R)* mostrando as bandas de absorção principais (ETP) para goethita (GO) e Hematita (H) de amostras brutas.

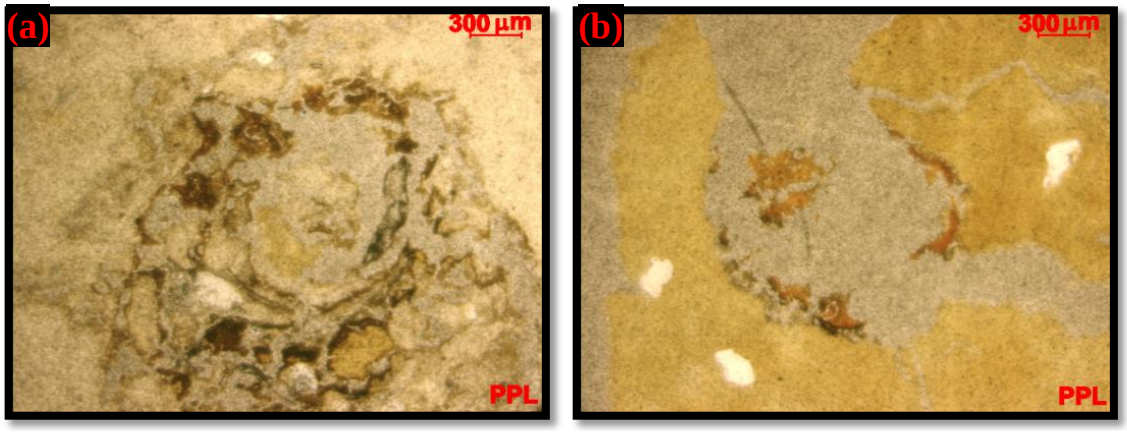

Figura 1.29 - Fotomicrografias de lâminas delgadas do perfil P1 (Espodossolo Humilúvico) obtidas ao microscópio petrográfico. (a) Detalhe de cavidade com óxido e oxidróxido ferro associado a matéria orgânica (organo-ferrã) precipitado na transição, (b) canal da camada K1 com óxido e oxidróxido de ferro precipitado (ferrã). As fotomicrografias obtidas com a luz polarizada em um só plano (polarizador inserido) receberam a sigla PPL.

Com relação aos óxidos de titânio, as análises mineralógicas permitiram a identificação do óxido primário, rutilo (TiO2) e do óxido secundário, anatásio (TiO2) (Tabelas 1.9 e 1.12). O rutilo, identificado na rocha original, é um mineral resistente ao intemperismo, de modo que parte do titânio existente no solo encontra-se sob esta forma, como pode ser visto na Figura 1.30 a, onde o rutilo aparece como cristais individualizados. Porém a maior parte do titânio do solo encontra-se como anatásio que pode ser visto disperso na matriz caulinítica (Figura 1.30 b) e recobrindo fragmentos de quartzo (Figura 1.30 c). O titânio aparece em todos os horizontes do solo, porém sua distribuição é bastante heterogênea,

concentrando-se principalmente nos horizontes espódicos Bh e Bhs (Tabela 1.10). Esta observação é concordante com o estudo efetuado por Bravard e Righi (1988) que em Espodossolos na região próxima a Manaus encontraram titânio (7,0 a 9,0 %) concentrado nos horizontes espódicos.

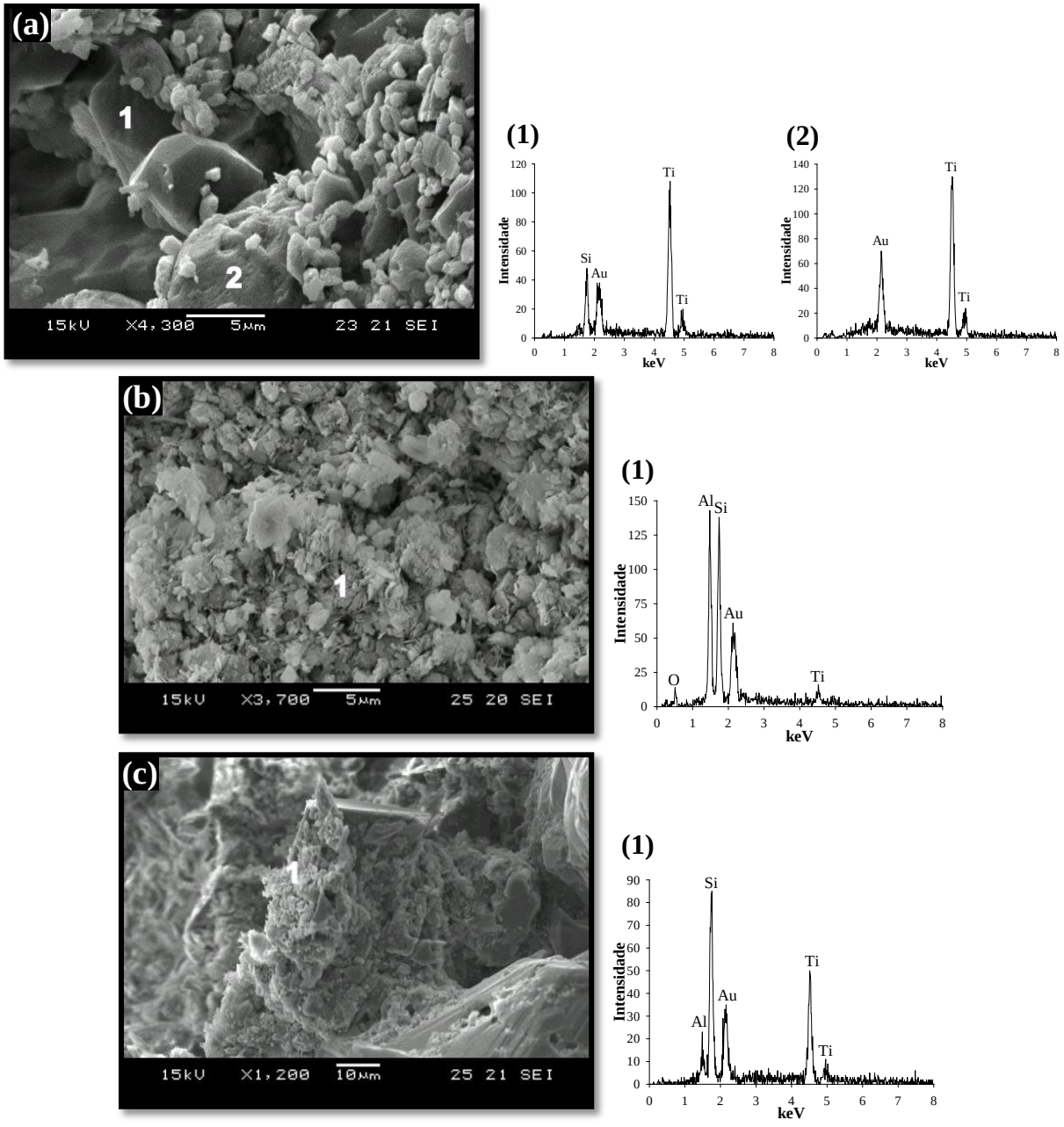

Figura 1.30 - Imagens obtidas ao MEV e microanálises por raios-X por EDS (gráficos) em amostras do perfil P1 (Espodossolo Humilúvico). (a) Horizonte E2: (1) e (2) fragmentos de rutilo, (b) camada K2: (1) caulinita e anatásio, (c) horizonte Bh: (1) caulinita e anatásio recobrindo cristal de quartzo. Atribui-se ao recobrimento com ouro (Au) da amostra, o pico a 2,12 keV.

Fator balanço de massa

Com o objetivo de obter mais informações sobre o comportamento dinâmico dos elementos neste sistema pedológico de transformação foi aplicado o fator de balanço de massa. Os resultados obtidos, assinalados na Tabela 1.14, permitem as seguintes considerações.

Tabela 1.14 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel.

Horizonte/ Camada	Profundi-dade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	$\tau_{j,w}$							
			Si	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Ti
A1	0-5	5	-0,77	-1,00	-1,00	LD (1)	-1,00	LD	LD	-0,92
A2	5-30	15	-0,71	-1,00	-0,94	-1,00	-1,00	-0,99	-1,00	-0,90
E1	30-180	130	-0,80	-1,00	-0,98	LD	LD	-1,00	-1,00	-0,88
E2	180-202,5	182	-0,84	-1,00	-0,97	-1,00	-1,00	-1,00	LD	-0,78
Bh	202,5-204	204	-0,95	-1,00	-1,00	-1,00	LD	LD	LD	-0,75
Bhs	204-214	214	-0,95	-0,99	-0,99	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-0,55
Transição	214-245	227	-0,62	+0,55	-0,96	-0,91	-0,99	-0,98	-1,00	-0,41
K1	245-290	252	-0,49	+1,15	-0,84	-0,82	-0,98	-0,99	-0,97	-0,24
K2	290+	313	-0,39	+1,81	-0,93	-0,88	-0,99	-0,99	-0,99	-0,22

(1) LD = abaixo do limite de detecção na análise química.

Os dados da tabela mostram que o Si apresenta perdas com aumento progressivo desde o horizonte superficial A1 até o horizonte espódico Bhs. A partir da transição e das camadas de caulim (K1 e K2) as perdas são menos importantes, diminuindo com a profundidade (Figura 1.31). A ausência de ganhos de Si nos horizontes superficiais (A2 e A2), álbicos (E1 e E2) e espódicos (Bh e Bhs) indica que o quartzo, dominante nestes horizontes, resulta de acumulação residual. Além disso, imagem obtida ao MEV mostra evidências de dissolução do quartzo (figuras de corrosão mostradas na Figura 1.25).

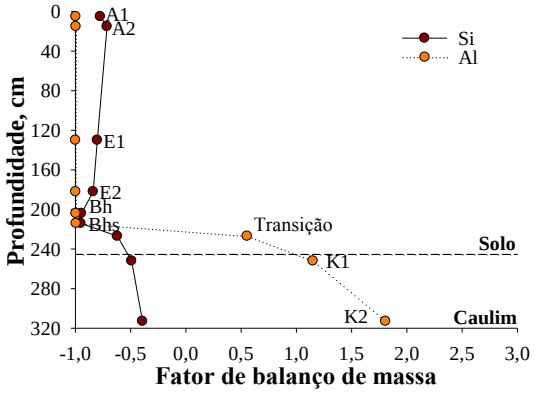

Figura 1.31 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel para Si e Al.

A figura acima mostra que o Al apresenta um comportamento inverso, sendo que as perdas são totais do horizonte superficial A1 até o espódico Bhs e a partir deste, ocorre ganho

de Al, o que significa acumulação absoluta, resultado do alumínio que migra dos horizontes superiores por dissolução ou translocação da caulinita.

Os elementos alcalinos (Na e K) e alcalinos terrosos (Mg e Ca,) (Figura 1.32), assim como o ferro (Figura 1.33) apresentam perdas importantes, quase totais, ao longo de todo o perfil, sugerindo a forte ocorrência de alteração dos minerais primários portadores destes elementos (mica, feldspato e máficos) e de condições propícias à eliminação do ferro.

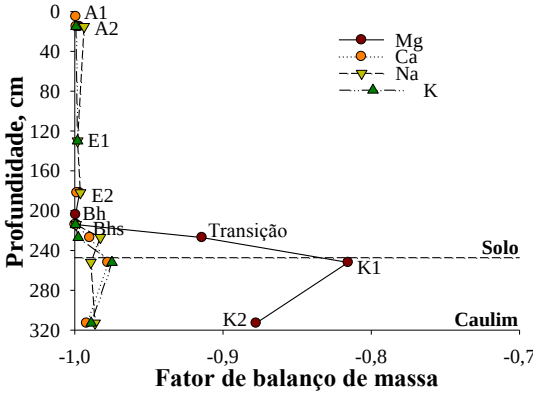

Figura 1.32 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel para Mg, Ca, Na e K.

O titânio apesar de ser considerado um elemento de baixa mobilidade, sobretudo quando incorporado na estrutura do rutilo, apresenta perdas importantes no perfil estudado (Figura 1.33). Apesar das rochas graníticas da região possuírem em sua composição rutilo, este não é o principal mineral portador de titânio, o qual se distribui pelos minerais máficos formadores das rochas, como anfibólios, piroxênios e biotita. Estes ao se alterarem liberam o elemento, que em parte é eliminado do perfil e em parte vai formar o anatásio, encontrado em todo o perfil.

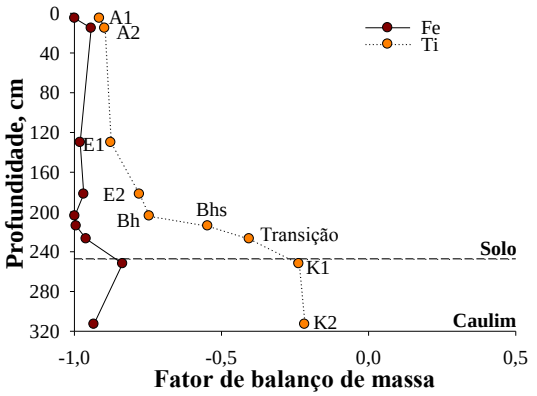

Figura 1.33 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel para Fe e Ti.

1.3.3.2. Perfil P2 - Latossolo Amarelo

Os resultados das análises mineralógicas e químicas apresentados nas Tabelas 1.15 e 1.16 mostraram, a exemplo do perfil P1, mineralogia relativamente simples e monótona.

Tabela 1.15 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Difração de raios-X da amostra bruta.

Horizonte/ Camada	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	Mineralogia [1]
A2	10-20	15	Q, C, G, A, Go [2]
BA	20-30	25	Q, C, G, A, Go
Bw1	30-60	45	Q, C, G, A, Go
Bw2	60-90	70	Q, C, G, A, Go
Bw3	90-120	105	C, G, Go, Q, M
Transição	120-210	160	C, G, Go, M, Q
Kn1	210-250	230	C, G, Go, M
Kn2	250-320	290	C, Go, M
Kn3	320-380	340	C, Go, M
Kn4	380+	395	C, Go, Q, M

(1) A = anatásio, C = caulinita, G = gibbsita, Go = Goethita, M = muscovita, Q = quartzo; (2) Identificado por ERD.

O Latossolo Amarelo, do ponto de vista químico (Tabela 1.15), é menos ácido quando comparado ao perfil anterior, com valores de pH em H_2O que variam entre 4,40 e 5,20 e em KCl entre 4,00 e 4,10. Os teores em SiO_2 do horizonte superficial A2 ao latossólico Bw2 apresentam-se elevados de 82,63 a 89,54 % e passam a diminuir do Bw3 com 63,46 % até a camada de caulim Kn4 com valores entre 44,69 e 45,85 % (Figura 1.34 e Tabela 1.16). Os teores de Al_2O_3 são marcados por um progressivo aumento do horizonte superficial A2 com 5,72 % ao latossólico Bw3 com 22,96 % e passam à média de 35,74 % na transição e nas camadas de caulim (Kn1 ao Kn4) (Figura 1.34 e Tabela 1.16). A relação SiO_2:Al_2O_3 apresenta progressiva diminuição do horizonte superficial (15,65) ao Bw3 (2,76) e média de 1,26 na transição e nas camadas de caulim (Tabela 1.16). Os depósitos de caulins estudados por Costa e Moraes (1998) em São Gabriel da Cachoeira (AM), a exemplo das camadas de caulim do perfil P2, apresentaram predomínio de caulinita e relação SiO_2: Al_2O_3 entre 1,17 e 1,20.

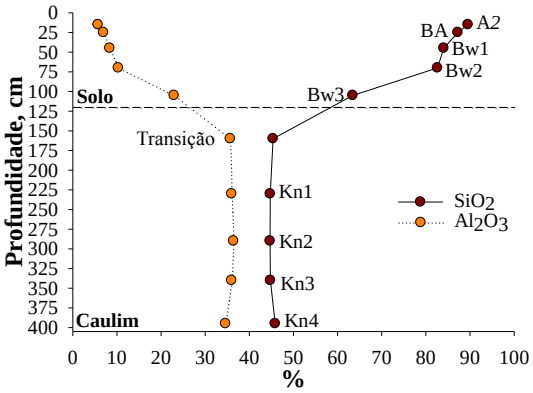

Figura 1.34 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Distribuição do SiO_2 e do Al_2O_3 com a profundidade.

O ferro, o titânio e os elementos alcalinos e alcalino terrosos apresentaram baixas concentrações, com ligeiro aumento com a profundidade, em todo o perfil (Tabela 1.16).

Considerações mineralógicas

A Tabela 1.17 apresenta os resultados da composição mineralógica semiquantitativa (análise normativa) baseada nos resultados químicos e mineralógicos associados.

Comportamento dos minerais primários

Quartzo, zircão e muscovita

O quartzo neste perfil concentra-se no horizonte superficial A2 com 84,02 % e diminui progressivamente até o horizonte latossólico Bw2 com 72,24 %, diminuindo ainda mais no Bw3, onde apresenta teor de 39,00 % (Tabela 1.17). Os teores de quartzo sofrem diminuição importante na transição e nas camadas de caulim (Kn1, Kn2, Kn3 e Kn4), exibindo média de 3,43 % (Tabela 1.17). A Figura 1.35 mostra que o zircônio concentrou-se nos horizontes com maiores teores da fração areia, significando que a destruição das frações mais finas está relacionada ao acúmulo de minerais residuais como o zircão (Figura 1.36) e o quartzo.

Tabela 1.16 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): pH e composição química total da amostra bruta.

Horizonte/ Camada	Profundi-dade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	pH		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3(T)	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	PF	Total	Relação SiO_2:Al_2O_3	Zr
			H_2O	KCl	%											ppm
A2	10-20	15	4,70	4,00	89,54	5,72	0,39	0,02	0,01	0,03	0,07	0,68	3,94	100,40	15,65	1178
BA	20-30	25	4,70	4,00	87,24	6,95	0,52	0,02	LD (1)	0,04	0,06	0,81	3,83	99,50	12,55	1390
Bw1	30-60	45	5,00	4,10	84,05	8,39	0,56	0,02	LD	0,03	0,03	0,94	4,45	98,51	10,02	1668
Bw2	60-90	70	4,80	4,10	82,63	10,32	0,86	0,05	0,05	0,04	0,04	1,02	4,70	99,73	8,01	1440
Bw3	90-120	105	5,20	4,00	63,46	22,96	1,49	0,06	LD	0,03	0,10	1,32	9,91	99,36	2,76	1141
Transição	120-210	160	5,20	4,00	45,38	35,68	1,70	0,09	LD	LD	0,16	1,00	14,55	98,59	1,27	457
Kn1	210-250	230	4,40	4,00	44,73	36,00	2,11	0,17	LD	0,03	0,42	1,29	14,51	99,30	1,24	517
Kn2	250-320	290	5,00	4,00	44,69	36,43	1,94	0,17	LD	0,03	0,41	1,32	14,51	99,51	1,23	510
Kn3	320-380	340	4,60	4,00	44,78	36,00	2,02	0,25	LD	0,04	0,76	1,42	13,90	99,22	1,24	552
Kn4	380+	395	4,70	4,00	45,85	34,61	2,86	0,24	LD	0,03	0,18	1,04	13,76	98,59	1,32	587

(1) LD = abaixo do limite de detecção.

Tabela 1.17 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Análise normativa da amostra bruta.

Horizonte/ Camada	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	Mica	Gibbsita (1)	Caulinita	Quartzo	Óxidos de titânio	Óxidos de ferro	Matéria orgânica	Total
			%							
A2	10-20	15	0,00	1,58	11,86	84,02	0,68	0,39	1,74	100,27
BA	20-30	25	0,00	1,62	14,92	80,29	0,81	0,52	1,19	99,35
Bw1	30-60	45	0,00	0,77	19,96	74,76	0,94	0,56	1,40	98,39
Bw2	60-90	70	0,00	2,30	22,32	72,24	1,02	0,86	0,79	99,52
Bw3	90-120	105	0,85	3,37	51,73	39,00	1,32	1,49	1,49	99,24
Transição	120-210	160	1,35	2,10	85,53	4,95	1,00	1,70	1,82	98,47
Kn1	210-250	230	3,55	0,45	86,95	2,65	1,29	2,11	2,07	99,06
Kn2	250-320	290	3,47	0,32	88,33	2,01	1,32	1,94	1,92	99,30
Kn3	320-380	340	6,43	0,10	84,73	2,43	1,42	2,02	1,76	98,88
Kn4	380+	395	1,52	0,07	86,03	5,12	1,04	2,86	1,66	98,30

(1) Gibbsita estimada por ATD-TG.

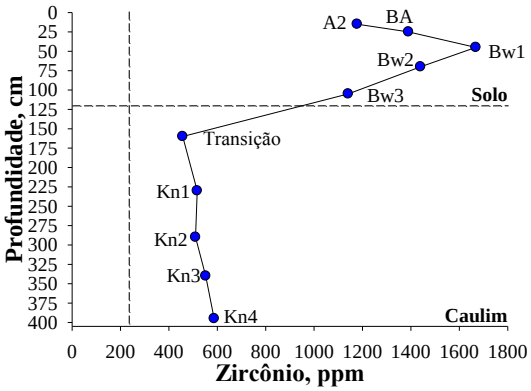

Figura 1.35 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Distribuição de zircônio (Zr) com a profundidade (linha vertical tracejada representa o conteúdo de Zr no material de origem).

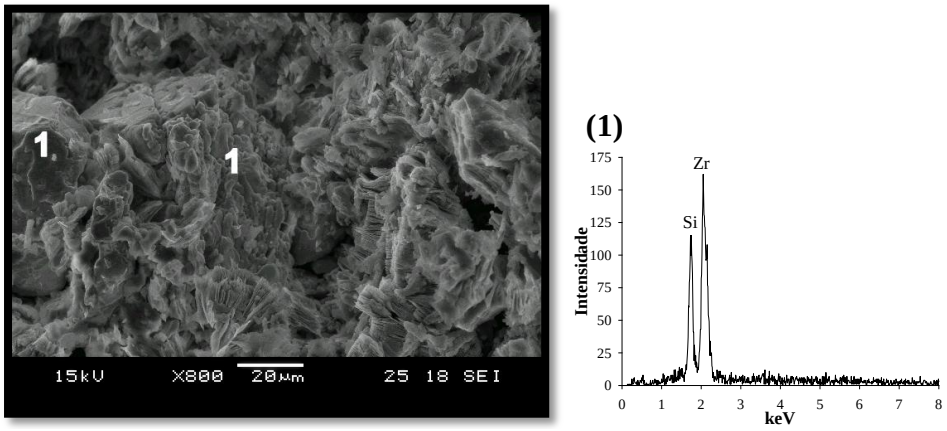

Figura 1.36 - Imagem obtida ao MEV e microanálise por raios-X por EDS (gráfico) em amostras da camada Kn3 do perfil P2 (Latossolo Amarelo). Cristais de zircão (1) em matriz caulinítica. Atribui-se ao recobrimento com ouro (Au) da amostra, o pico a 2,12 keV.

Do horizonte latossólico Bw3 à camada de caulim Kn3, o aumento progressivo nos teores de mica (Tabela 1.16) e o comportamento dos elementos alcalinos e alcalinos terrosos (Tabela 1.17), caracterizado por baixas concentrações de CaO e Na_2O e por aumento nos teores de MgO e K_2O (Figura 1.37), sugerem que parte desses minerais ainda permanece no perfil. Esses resultados foram confirmados por meio das análises obtidas ao MEV, nas quais cristais de biotita e muscovita foram observados, respectivamente, da transição à camada de caulim Kn3 (Figura 1.38 a) e da camada de caulim Kn1 à Kn3 (Figura 1.38 b). Costa e Moraes (1998), estudando depósitos de caulins localizados na BR-307 (São Gabriel da Cachoeira - Cucuí) desenvolvidos na base de Latossolos Amarelos, também observaram teores mais elevados de Mg e K com relação ao Na e Ca.

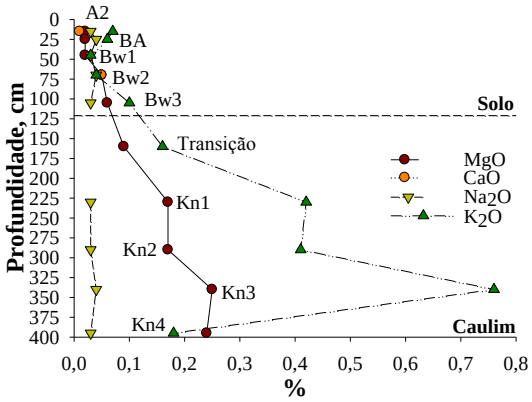

Figura 1.37 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Distribuição de MgO, CaO, Na_2O e K_2O com a profundidade.

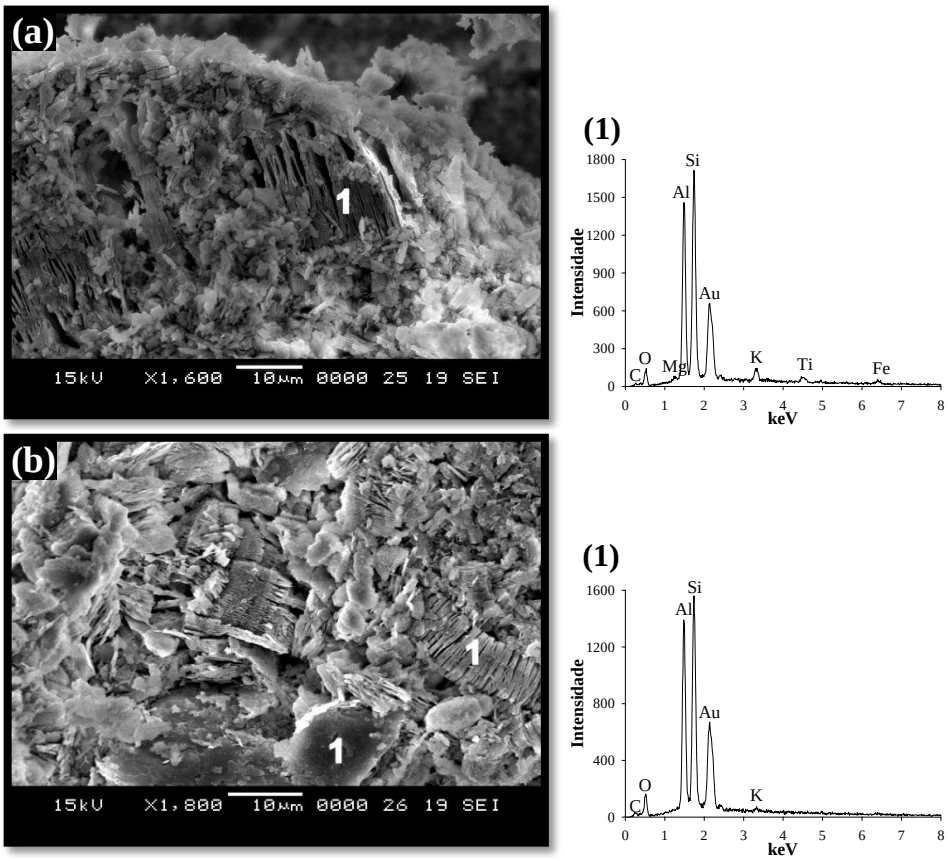

Figura 1.38 - Imagens obtidas ao MEV e microanálises por raios-X por EDS (gráficos) em amostras do perfil P2 (Latossolo Amarelo). (a) Camada Kn2: (1) biotita recoberta por caulinita, (b) camada Kn2: (1) muscovita. Atribui-se ao recobrimento com ouro (Au) da amostra, o pico a 2,12 keV.

Comportamento dos minerais secundários

Caulinita e Gibbsita

A caulinita exibe aumento progressivo do horizonte superficial A2 com 11,86 % ao latossólico Bw2 com 22,32 %, no Bw3 apresenta um aumento importante (51,73 %) e atinge média de 86,31 % na transição e nas camadas de caulim (Tabela 1.17).

As menores concentrações de caulinita e a presença de figuras de dissolução nos cristais de quartzo (Figura 1.39 a) observadas do horizonte superior A2 ao intermediário Bw2, sugerem que a água que percola esse perfil tem acidez suficiente para alterar o quartzo e promover a desestabilização da caulinita. Montes (2009) observou valores de pH em 4,40 tanto na água que percola o Latossolo Amarelo como no caulim, relacionados a menor concentração de COD (entre 4,00 e 5,00 $mol.L^{-1}$). Também observou diminuição nos valores de Si, Al^{3+}, Fe^{3+} e Fe^{2+} quando comparados aos teores encontrados em P1. Indicando condições menos agressivas aos minerais primários do que no P1. Entretanto, a diminuição com a profundidade nas concentrações de Si indica que do horizonte superficial ao latossólico Bw3 a relação formação / dissolução da caulinita é menor, o que resulta no acúmulo residual do quartzo. Enquanto da transição às camadas de caulim, a relação formação / dissolução da caulinita é maior.

A observação, nesses horizontes, de caulinita na forma de cristais individualizados e acordeons (Figura 1.40 b, c) confirmou os resultados acima mencionados.

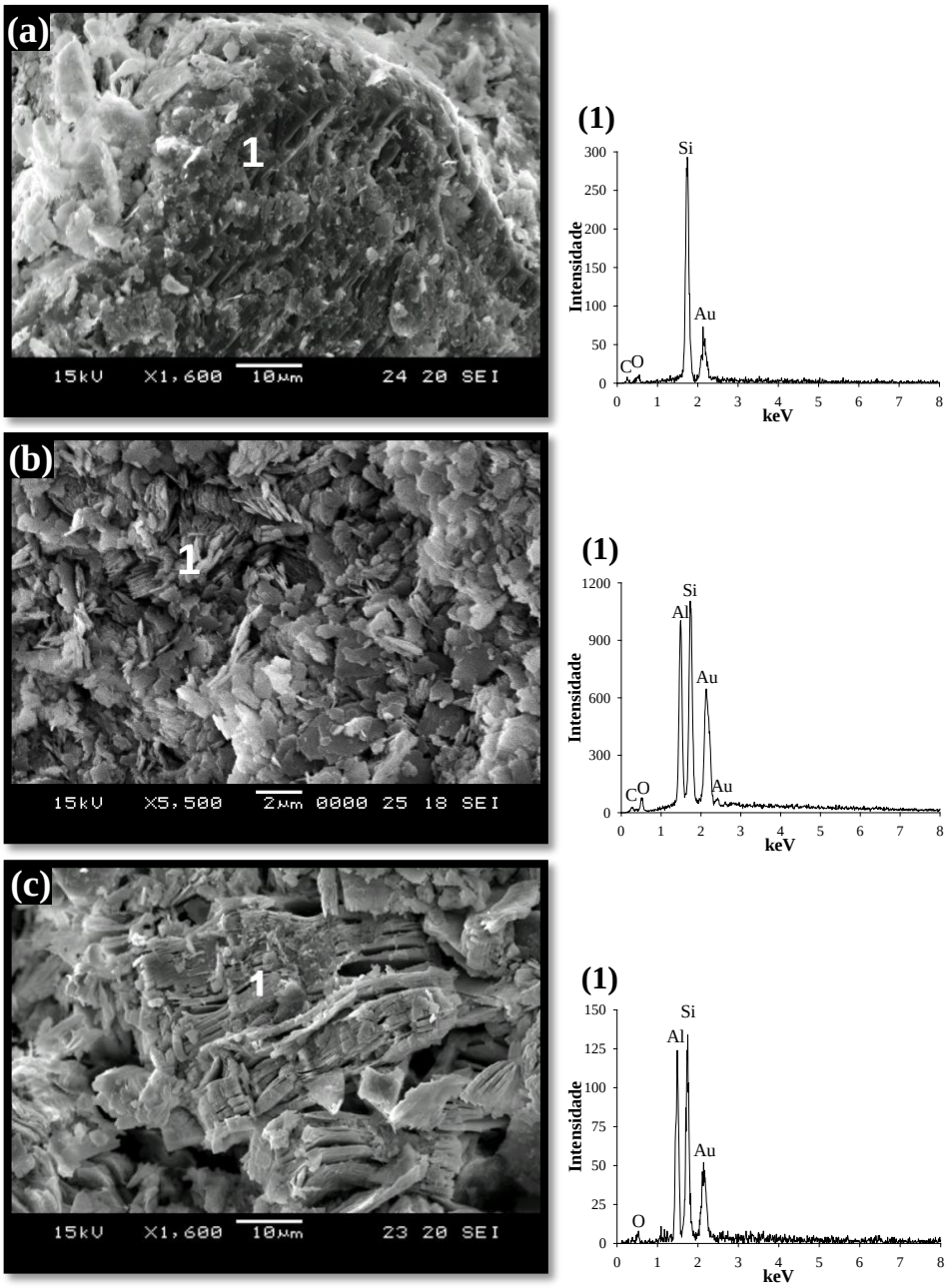

Figura 1.39 - Imagens obtidas ao MEV e microanálises por raios-X por EDS (gráficos) em amostras do perfil P2 (Latossolo Amarelo): a) Horizonte Bw3: cristal de quartzo com figuras de dissolução e recoberto por caulinita, (b) transição: caulinita em cristais individualizados, (c) camada Kn4: (1) acordeon de caulinita. Atribui-se ao recobrimento com ouro (Au) da amostra, o pico a 2,12 keV.

É provável que parte da caulinita identificada por MEV sob a forma de grandes acordeons (SANTOS Jr., A.E.A.; ROSSETTI, D.F., 2008) seja produto da transformação direta de micas e feldspatos (TARDY et al., 1973; MULLER; BOCQUIER, 1986; MUGGLER et al., 2007), uma vez que foram observados ao microscópio petrográfico pseudomorfos de feldspato (Figura 1.40).

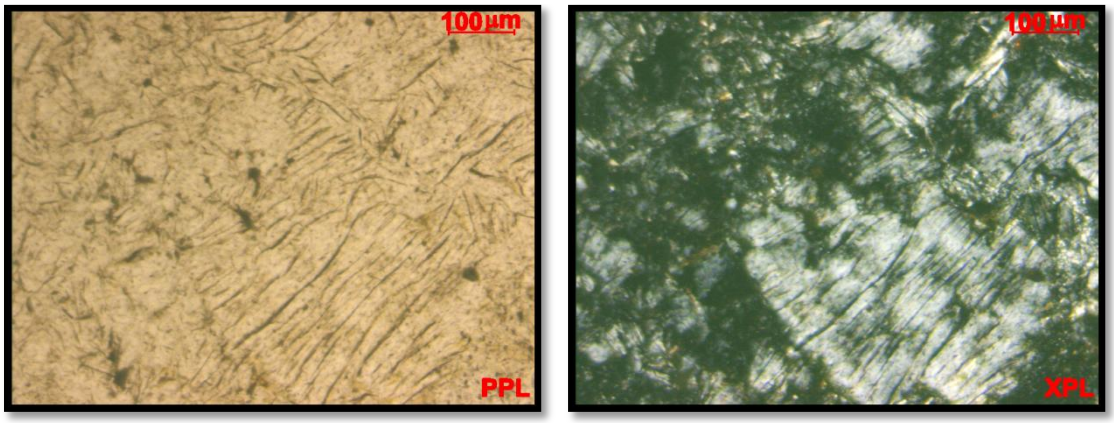

Figura 1.40 - Fotomicrografias de lâmina delgada do perfil P2 (Latossolo Amarelo) obtidas ao microscópio petrográfico. Detalhe da camada de caulim Kn2 com cristal de microclínio alterada para caulinita (pseudomorfo). A fotomicrografia obtida com a luz polarizada em um só plano (polarizador inserido) recebeu a sigla PPL e aquela obtida com nicóis cruzados (polarizador e analisador inseridos) foi indicada com a sigla XPL.

A gibbsita exibiu comportamento inverso àquele mencionado no P1, com concentrações de 0,77 a 3,37 % do horizonte A2 a transição e valor médio de 0,24 % nas camadas de caulim com nódulos gibbsíticos (Kn1 a Kn4) (Tabela 1.17). Esses resultados indicam que as baixas concentrações de gibbsita na amostra bruta das camadas de caulim constituem a fração inferior à 2mm, enquanto que, a maior parte do Al em solução precipitou nas zonas mais oxidantes dessas camadas, preferencialmente, na porosidade (zonas mais oxidantes e pH mais elevado), sob forma de nódulos (Figura 1.41).

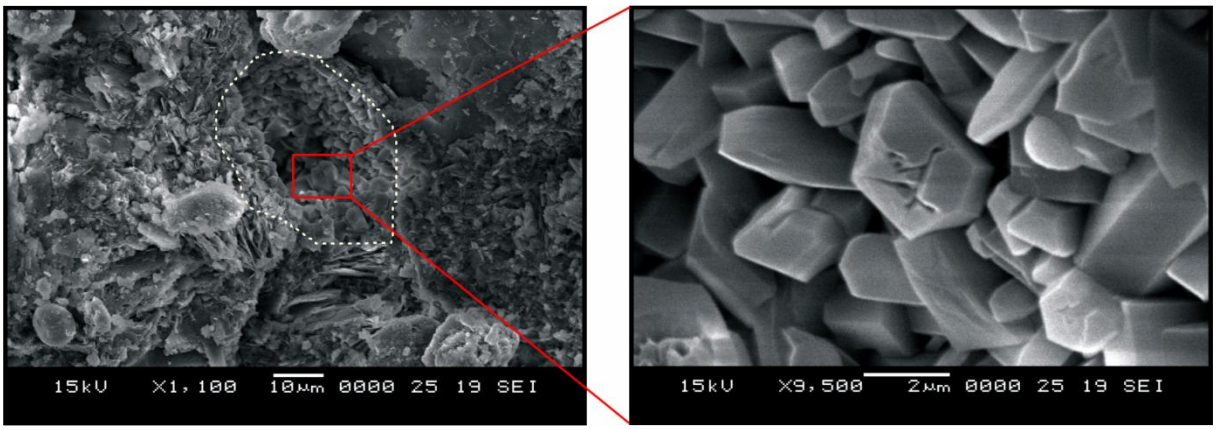

Figura 1.41- Imagens obtidas ao MEV de amostra da camada Kn4 do perfil P2 (Latossolo Amarelo). Área tracejada corresponde ao nódulo gibbsítico desenvolvido na porosidade e detalhe do nódulo (direita). Atribui-se ao recobrimento com ouro (Au) da amostra, o pico a 2,12 keV.

O estudo detalhado do comportamento da caulinita e da gibbsita no perfil P2 foi conduzido a partir de suas distribuições nas frações granulométricas argila, silte e areia (Tabelas

1.18 e 1.19).

A caulinita ocorre nas frações granulométricas argila, silte e areia, exceto na fração silte dos horizontes BA e Bw1 (Tabela 1.18), onde esta fração granulométrica é menos representativa na amostra total com 8,65 e 7,97 %, respectivamente (Tabela 1.3).

Assim como exibido no perfil P1, a concentração maior de caulinita ocorre na fração silte que possui valores de 33,13 % no horizonte Bw3, apresentando na transição e nas camadas de caulim (Kn1 ao Kn4) valor médio de 66,36 % (Tabela 1.3). Esses resultados conferem elevados teores de caulinita 58,93 %, 61,75 %, 56,83 %, 53,82 % e 71,11 %, respectivamente, às camadas de transição, Kn1, Kn2, Kn3 e Kn4 (Tabela 1.19).

A Tabela 1.19 mostra que a gibbsita apresentou comportamento inverso ao demonstrado pela caulinita, exibindo, de forma geral, maiores concentrações nos horizontes superiores (A2 e BA) e intermediários (Bw1, Bw2 e Bw3). Os baixos valores desse mineral observados na transição e nas camadas de caulim estão relacionados à precipitação dos nódulos gibbsíticos. Nessas camadas, as condições de pH e Eh do meio propiciam ao Al, proveniente dos fluxos lateral e vertical, precipitar sob forma de nódulos.

Óxidos de ferro e titânio

Da mesma forma que no P1, os óxidos de ferro aqui exibem quantidades reduzidas ao longo de todo o perfil. Entretanto, o P2 apresenta com a profundidade certa tendência de aumento (Figura 1.42 e Tabela 1.16). Estudo por ERD também identificou goethita, fase dominante, e hematita, determinadas, respectivamente, pelas bandas de absorção 481 nm e 545 nm (Figura 1.43). As goethitas neste perfil, assim como no P1 também apresentam substituição isomórfica de Fe por Al.

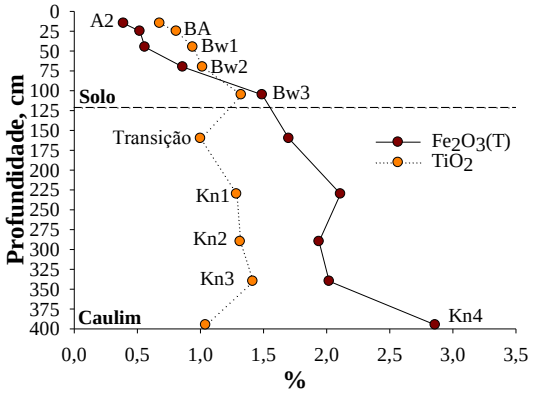

Figura 1.42 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Distribuição do TiO_2 e do Fe_2O_3(T) com a profundidade.

Tabela 1.18 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Difração de raios-X das frações granulométricas areia, silte e argila.

Horizonte/ Camada	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	Mineralogia (1)		
			Areia	Silte	Argila
A2	10-20	15	Q, C	Q, C, A, G	C, G, A, Q
BA	20-30	25	Q, C	Q, C, A, G	C, V, G, Q, A, M
Bw1	30-60	45	Q, C	Q, C, A, G	C, Q, G, A, R
Bw2	60-90	70	Q, C	Q, C, A, G	C, G, V, A, Q, R
Bw3	90-120	105	Q, C, G	C, Q, G, M	C, G, V, M, A
Transição	120-210	160	Q, C, G	C, G, Q	C, G, M, Go, A
Kn1	210-250	230	C, Q	C, M	C, M, G, Go, A
Kn2	250-320	290	C, R, M	C, M	C, M, G, Go, H, A
Kn3	320-380	340	C, Q, M	C, M	A, C, M, H
Kn4	380+	395	G, C, Q, M, R	G, C, Q	C, M, A

(1) A = anatásio, C = caulinita, G = gibbsita, Go = Goethita, H = hematita, M = muscovita, Q = quartzo, R = rutilo, V = vermiculita.

Tabela 1.19 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Análise térmica diferencial e gravimétrica das frações granulométricas argila e areia.

Horizonte/ Camada	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	Fração argila		Fração silte (1)		Fração areia		Amostra bruta	
			Gibbsita	Caulinita	Gibbsita	Caulinita	Gibbsita	Caulinita	Gibbsita	Caulinita
			%							
A2	10-20	15	0,93	16,94	0,49	7,79	0,16	1,01	1,58	25,74
BA	20-30	25	0,75	17,61	0,77	0,00	0,09	1,66	1,61	18,09
Bw1	30-60	45	0,95	19,77	0,00	0,00	0,08	1,27	0,77	14,78
Bw2	60-90	70	1,71	21,62	0,19	6,69	0,39	2,64	2,30	30,95
Bw3	90-120	105	1,48	25,34	1,46	38,57	0,42	1,89	3,37	65,81
Transição	120-210	160	1,46	26,15	0,58	58,93	0,06	3,01	2,10	88,09
Kn1	210-250	230	0,07	18,70	0,32	61,75	0,05	8,80	0,45	89,26
Kn2	250-320	290	0,20	25,04	0,00	56,83	0,25	11,74	0,32	93,61
Kn3	320-380	340	0,08	22,50	0,00	53,82	0,07	8,75	0,10	85,07
Kn4	380+	395	0,04	12,24	0,00	71,11	4,45	4,25	0,07	87,60

(1) Estimada pela diferença entre a amostra bruta e a soma dos teores das frações argila e areia.

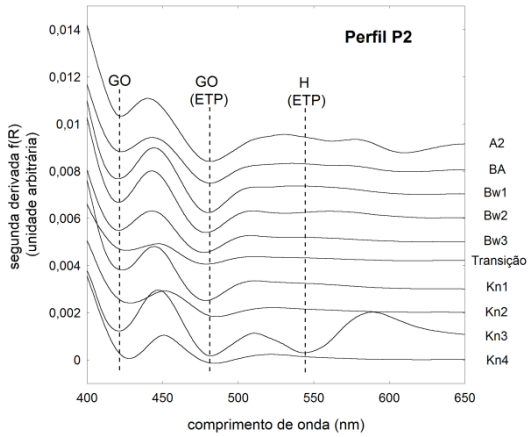

Figura 1.43 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Espectro da segunda derivada da função de remissão *f(R)* mostrando as bandas de absorção principais (ETP) para goethita (GO) e Hematita (H) de amostras brutas.

A existência desses óxidos e oxidróxidos de ferro foi confirmada por meio de observações de ferrãs e organo-ferrãs ao microscópio petrográfico. Nos horizontes do solo, os ferrãs, oriundos da segregação do ferro estão associados sobretudo aos poros, esqueleto e resto de raízes (Figura 1.44 a, b). A observação de organo-ferrãs comprova a presença de complexos organometálicos (Figura 1.44 c). Essas feições observadas ao microscópio petrográfico são evidências da ocorrências de alternância de ambiente (reduzido e oxidante).

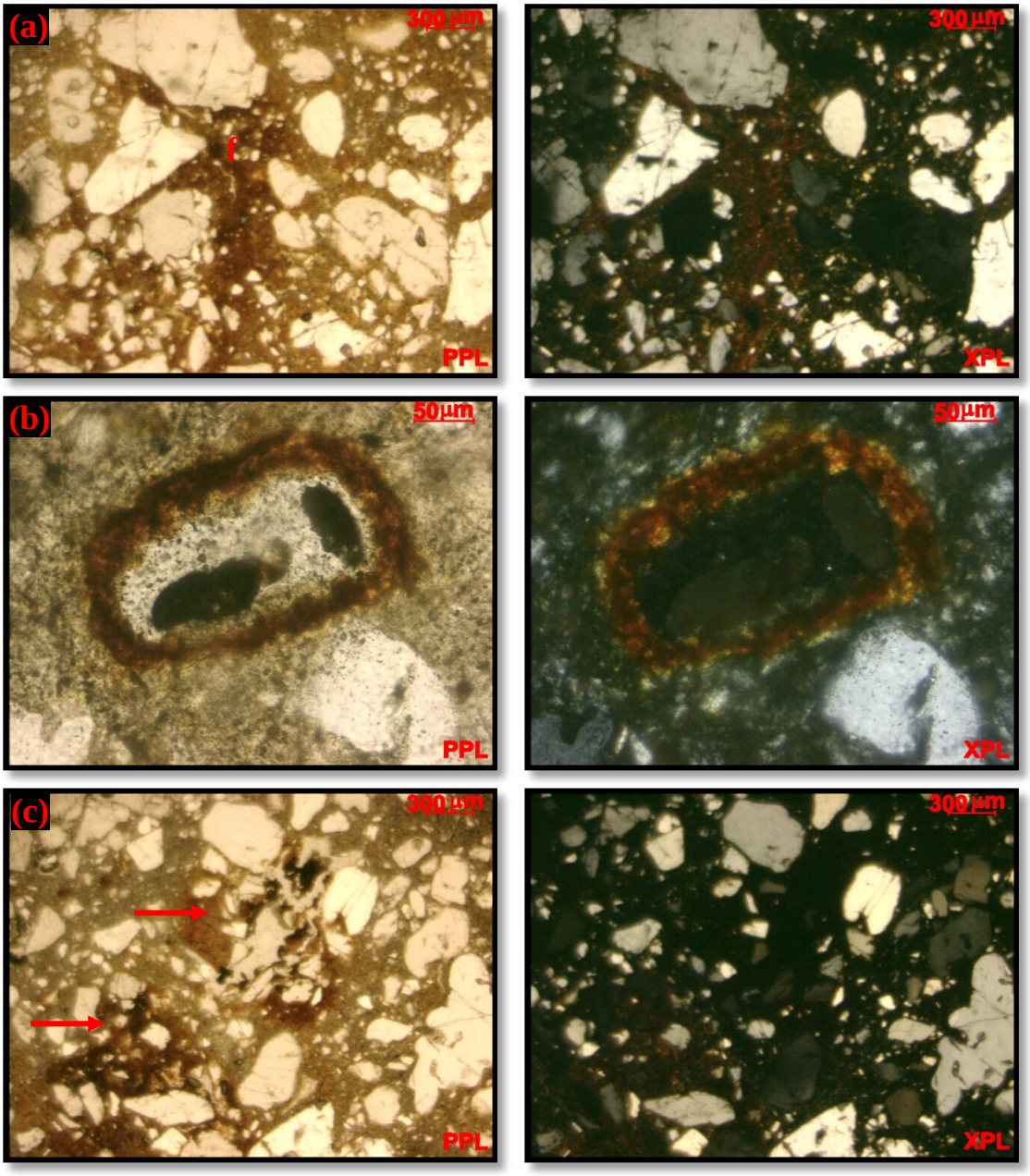

Figura 1.44 - Fotomicrografias de lâminas delgadas do perfil P2 (Latossolo Amarelo) obtidas ao microscópio petrográfico. (a) Ferrãs (indicado pela letra f) associados ao esqueleto no horizonte Bw1, b) ferrãs associados à porosidade no horizonte Bw3, c) organo-ferrãs, apontados por setas vermelhas, indicam presença de complexos organometálicos associados ao ferro no horizonte Bw1. As fotomicrografias obtidas com a luz polarizada em um só plano (polarizador inserido) receberam a sigla PPL e aquelas obtidas com nicóis cruzados (polarizador e analisador inseridos) foram indicadas com a sigla XPL.

O TiO_2 (Figura 1.42, Tabela 1.16) exibiu o mesmo comportamento visto para o Fe_2O_3(T), aumento na concentração em direção à base do perfil. O óxido secundário (anatásio) foi observado associado à matriz caulinítica, assim como os óxidos e oxidróxidos de ferro (goethita e hematita) (Figura 1.45 a, b). A exemplo do P1, as análises mineralógicas

identificaram o óxido primário, rutilo (TiO2) e o óxido secundário, anatásio (TiO2) (Tabelas 1.15 e 1.18).

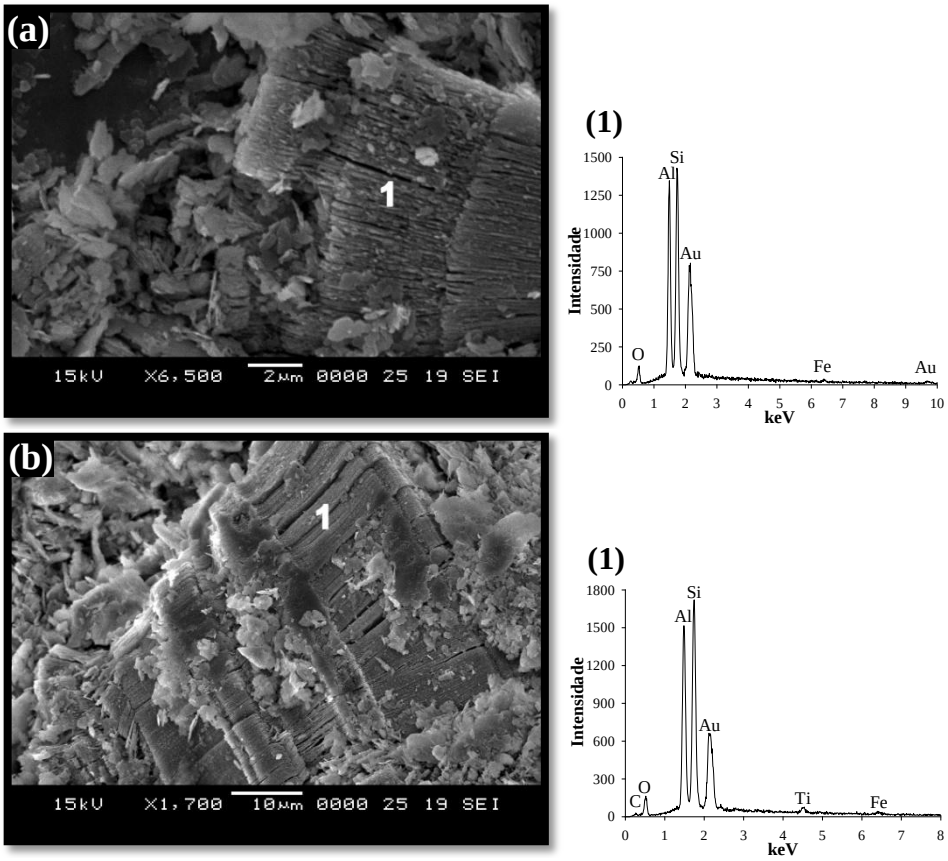

Figura 1.45 - Imagens obtidas ao MEV e microanálises por raios-X por EDS (gráficos) em amostra do perfil P2 (Latossolo Amarelo). (a) Horizonte de transição: (1) Acordeon de caulinita com goethita associada, (b) horizonte de transição: (1) acordeon de caulinita com anatásio e goethita associados. Atribui-se ao recobrimento com ouro (Au) da amostra, o pico a 2,12 keV.

Fator balanço de massa

Os resultados da aplicação do fator de balanço de massa estão na Tabela 1.20 e permitem as seguintes considerações.

O Si e o Al nos horizontes superiores e intermediários apresentaram comportamento similar ao exibido no P1, resultando em acúmulo residual do quartzo (Tabelas 1.17 e 1.20), mesmo que em menor intensidade devido ao caráter menos agressivo do meio. A perdas de Si na transição e nas camadas de caulim, diferentemente do que ocorreu no P1, continuam importantes. A exemplo do apresentado no P1, porém com menor intensidade, o Al exibiu pequenos ganhos na transição e nas camadas de caulim (Figura 1.46 e Tabela 1.20). Esses resultados teriam relação com a dissolução da caulinita e a transformação de mica e feldspato,

em razão de perdas de silício e alumínio observadas na maior parte dos horizontes superficial e latossólicos. Na transição e nas camadas de caulim a diminuição nas perdas de silício e os ganhos de alumínio confirmaram a ocorrência concomitante de neoformação de caulinita e precipitação de gibbsita sob forma de nódulos e associadas ao sistema poral (Figura 1.41 a).

Tabela 1.20 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel.

Horizonte/ Camada	Profundi-dade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	$\tau_{j,w}$							
			Si	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Ti
A2	10-20	15	-0,75	-0,91	-0,97	-0,99	-1,00	-1,00	-1,00	-0,75
BA	20-30	25	-0,79	-0,91	-0,97	-1,00	LD (1)	-1,00	-1,00	-0,75
Bw1	30-60	45	-0,83	-0,91	-0,97	-1,00	LD	-1,00	-1,00	-0,76
Bw2	60-90	70	-0,81	-0,87	-0,95	-0,99	-1,00	-1,00	-1,00	-0,69
Bw3	90-120	105	-0,82	-0,64	-0,90	-0,98	LD	-1,00	-1,00	-0,50
Transição	120-210	160	-0,67	+0,38	-0,71	-0,94	LD	LD	-0,98	-0,05
Kn1	210-250	230	-0,71	+0,23	-0,69	-0,90	LD	-0,99	-0,97	+0,08
Kn2	250-320	290	-0,71	+0,27	-0,71	-0,89	LD	-0,99	-0,97	+0,12
Kn3	320-380	340	-0,73	+0,16	-0,72	-0,86	LD	-0,99	-0,94	+0,11
Kn4	380+	395	-0,74	+0,04	-0,62	-0,87	LD	-0,99	-0,99	-0,23

(1) LD = abaixo do limite de detecção na análise química.

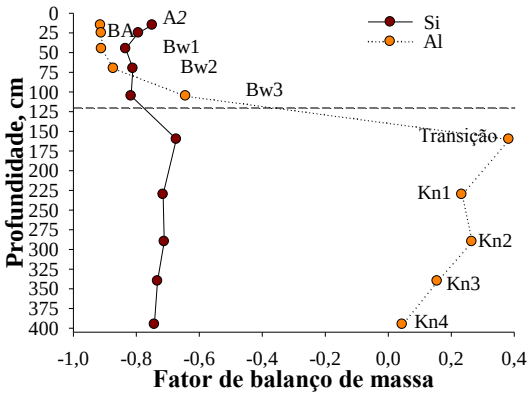

Figura 1.46 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel para Si e Al.

Os resultados do fator balanço de massa para os elementos alcalinos (Na e K) e alcalinos-terrosos (Mg, Ca) mostraram perdas importantes de cálcio e sódio, relacionadas ao intemperismo dos feldspatos, em todo o perfil, e perdas menos importantes de magnésio e potássio, relacionadas a presença de micas (muscovita e biotita), com a profundidade (Figura 1.47 e Tabela 1.20).

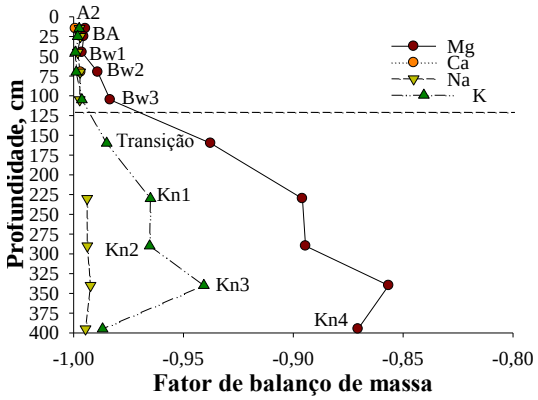

Figura 1.47 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel para Mg, Ca, Na e K.

O titânio (Figura 1.48 e Tabela 1.20) apresentou o mesmo comportamento mencionado no P1. Bueno (2006), estudando sistema Latossolo-Espodossolo na região do Curicuriari (São Gabriel da Cachoeira, AM), observou perdas de titânio nos horizonte de solo e atribuiu essas perdas ao intemperismo dos cristais de titanita. Nascimento et al. (2004) atribuíram os ganhos de titânio com a profundidade em sistema Argilosso-Espodossolo, a mecanismo de transferência vertical e mecânico do titânio através da porosidade de circulação. Assim, é possível que o titânio, no presente trabalho, seja produto do intemperismo dos minerais máficos e, também, tenha migrado para o caulim através da porosidade de circulação.

O ferro apresentou perdas em todo o perfil (Figura 1.48 e Tabela 1.20), sendo as mais importantes nos horizontes mais influenciados pela matéria orgânica (A2, BA e Bw1).

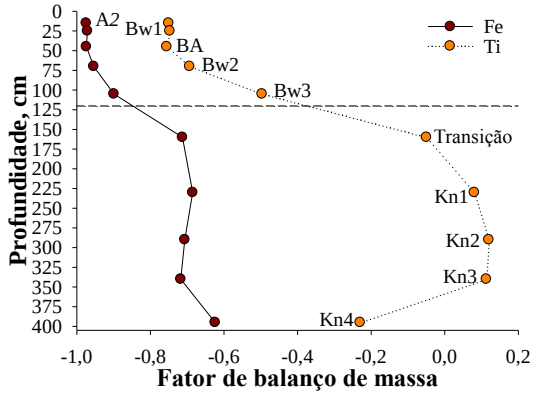

Figura 1.48 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel para Fe e Ti.

1.3.3.3. Perfil P3 - Latossolo Amarelo

Os resultados das análises mineralógicas e químicas, apresentados nas Tabelas 1.21 e 1.22, indicaram a existência de mineralogia relativamente simples e monótona, semelhante

àquelas exibidas nos perfis P1 e P2, exceto a camada Kn base, onde foram identificados microclínio e magnetita.

Tabela 1.21 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): Difração de raios-X da amostra bruta.

Horizonte/ Camada	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	Mineralogia [1]
A	0-10	5	Q, C, G, A, Go [2], H [2]
AB	10-40	40	Q, C, A, G, M, Go
Bw1	40-95	80	Q, C, G, A, Go
Bw2	95-130	113	Q, C, A, G, M, Go
Bwc topo	130-210	140	C, G, Q, A, M, Go
Bwc base		198	C, G, Q, A, M, Go
Kn topo	210+	215	C, G, Q, A, M, Go
Kn centro		275	C, G, Q, A, M, Go
Kn base		326	C, Q, A, G, M, Mc, Mg, Go

(1) A = anatásio, C = caulinita, G = gibbsita, Go = Goethita, H = hematita, M = muscovita, Mc = microclínio, Mg = magnetita, Q = quartzo; (2) Identificados por ERD.

Do ponto de vista químico, este Latossolo Amarelo apresenta o mesmo comportamento observado no P2 , com valores de pH em H_2O que variam entre 4,20 e 4,90 e em KCl entre 3,30 e 4,10. Os teores em SiO_2 diminuem com a profundidade, do horizonte superficial A com 89,54 % à camada Kn base com 45,85 % (Figura 1.49 e Tabela 1.22). Os teores de Al_2O_3 apresentam comportamento inverso ao SiO_2, com 7,87 % no horizonte A e 33,51 % na camada Kn base (Figura 1.49 e Tabela 1.22).

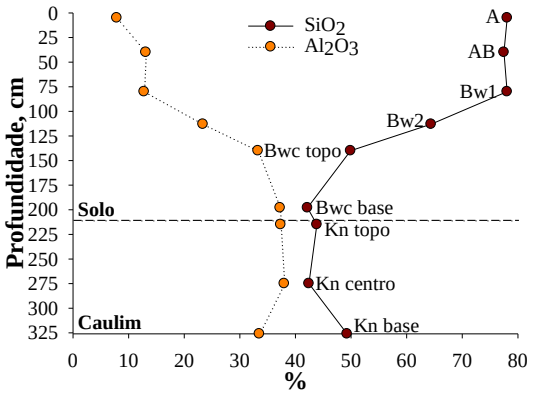

Figura 1.49 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): Distribuição do SiO_2 e do Al_2O_3 com a profundidade.

A relação SiO_2:Al_2O_3 apresenta progressiva diminuição do horizonte superficial A (16,87) ao latossólico Bw2 (4,68) e média de 2,18 nos horizontes latossólicos com nódulos gibbsíticos (Bwc topo e base) e camadas de caulim (Kn topo, centro e base) (Tabela 1.22).

O ferro, o titânio e os elementos alcalinos e alcalino terrosos apresentaram concentrações pequenas em todo o perfil (Tabela 1.22).

Tabela 1.22 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): pH e composição química total da amostra bruta.

Horizonte/ Camada	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	pH		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3(T)	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	PF	Total	Relação SiO_2:Al_2O_3	Zr ppm
			H2O	KCl	%											
A	0-10	5	4,30	3,30	78,08	7,87	0,70	0,02	LD (1)	0,05	0,06	0,71	11,10	98,63	16,87	1036
AB	10-40	40	4,40	4,00	77,49	13,10	0,86	0,03	0,02	0,04	0,02	1,13	6,71	99,42	10,06	1522
Bw1	40-95	80	4,80	4,00	78,06	12,78	0,76	0,02	LD	0,04	0,10	1,07	6,50	99,38	10,38	1352
Bw2	95-130	113	4,80	4,10	64,39	23,37	0,86	0,03	LD	0,02	0,12	1,24	9,90	99,98	4,68	1064
Bwc topo	130-210	140	4,30	4,10	49,92	33,27	1,49	0,05	LD	0,03	0,20	1,32	13,55	99,87	2,55	679
Bwc base		198	4,90	4,10	42,17	37,23	1,19	0,03	LD	0,02	0,12	0,81	17,24	98,84	1,93	428
Kn topo	210+	215	4,20	4,10	43,86	37,35	1,16	0,05	LD	0,03	0,21	1,07	15,32	99,08	2,00	610
Kn centro		275	4,90	4,10	42,42	37,99	0,80	0,05	LD	0,03	0,28	0,60	17,19	99,37	1,90	475
Kn base		326	4,20	4,10	49,28	33,51	1,13	0,05	LD	0,06	1,54	0,48	13,15	99,25	2,50	410

(1) LD = abaixo do limite de detecção.

Considerações mineralógicas

A Tabela 1.23 apresenta os resultados da composição mineralógica semiquantitativa (análise normativa) baseada nos resultados químicos e mineralógicos associados.

Comportamento dos minerais primários

Quartzo, muscovita e microclínio

O quartzo neste perfil apresentou comportamento similar ao mencionado no P2, ou seja, concentrou-se nos horizontes superficiais (A e AB) e latossólicos (Bw1 e Bw2) e sofreu forte diminuição do horizonte Bwc base à camada de caulim Kn centro com média de 1,85 % (Tabela 1.23).

A Tabela 1.23 mostra aumento progressivo nos teores de mica do horizonte latossólico em direção à base do perfil, baixas concentrações de CaO, Na_2O e MgO em todo o perfil e aumento nos teores de K_2O com a profundidade (Figura 1.50), sugerindo que nesse perfil há maiores quantidades de minerais mais facilmente alteráveis, como, por exemplo, mica e feldspato, do que nos perfis P1 e P2. Esses resultados foram confirmados por meio de análises ao MEV (Figura 1.51 a, b, c) e observação ao microscópio petrográfico (Figura 1.52 a, b).

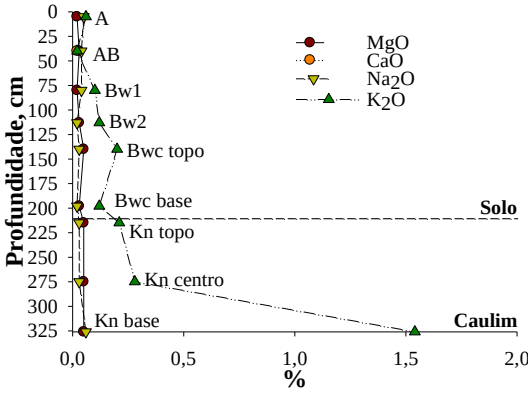

Figura 1.50 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): Distribuição de MgO, CaO, Na_2O e K_2O com a profundidade.

Tabela 1.23 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): Análise normativa da amostra bruta.

Horizonte/ Camada	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	Mica	Gibbsita (1)	Caulinita	Quartzo	Óxidos de titânio	Óxidos de ferro	Matéria orgânica	Total
			---------- % ----------							
A	0-10	5	0,51	2,71	14,95	70,89	0,71	0,70	8,05	98,52
AB	10-40	40	0,17	3,00	28,03	64,37	1,13	0,86	1,75	99,31
Bw1	40-95	80	0,00	2,05	28,96	64,58	1,07	0,76	1,75	99,16
Bw2	95-130	113	1,02	4,56	50,63	40,36	1,24	0,86	1,21	99,88
Bwc topo	130-210	140	1,69	1,97	79,32	12,23	1,32	1,49	1,72	99,75
Bwc base		198	1,02	4,77	85,38	1,97	0,81	1,19	3,63	98,76
Kn topo	210+	215	1,78	3,29	87,39	2,38	1,07	1,16	1,91	98,96
Kn centro		275	2,37	4,62	86,23	1,21	0,60	0,80	3,45	99,28
Kn base		326	13,03	3,73	65,99	12,67	0,48	1,13	2,09	99,12

(1) Gibbsita estimada por ATD-TG.

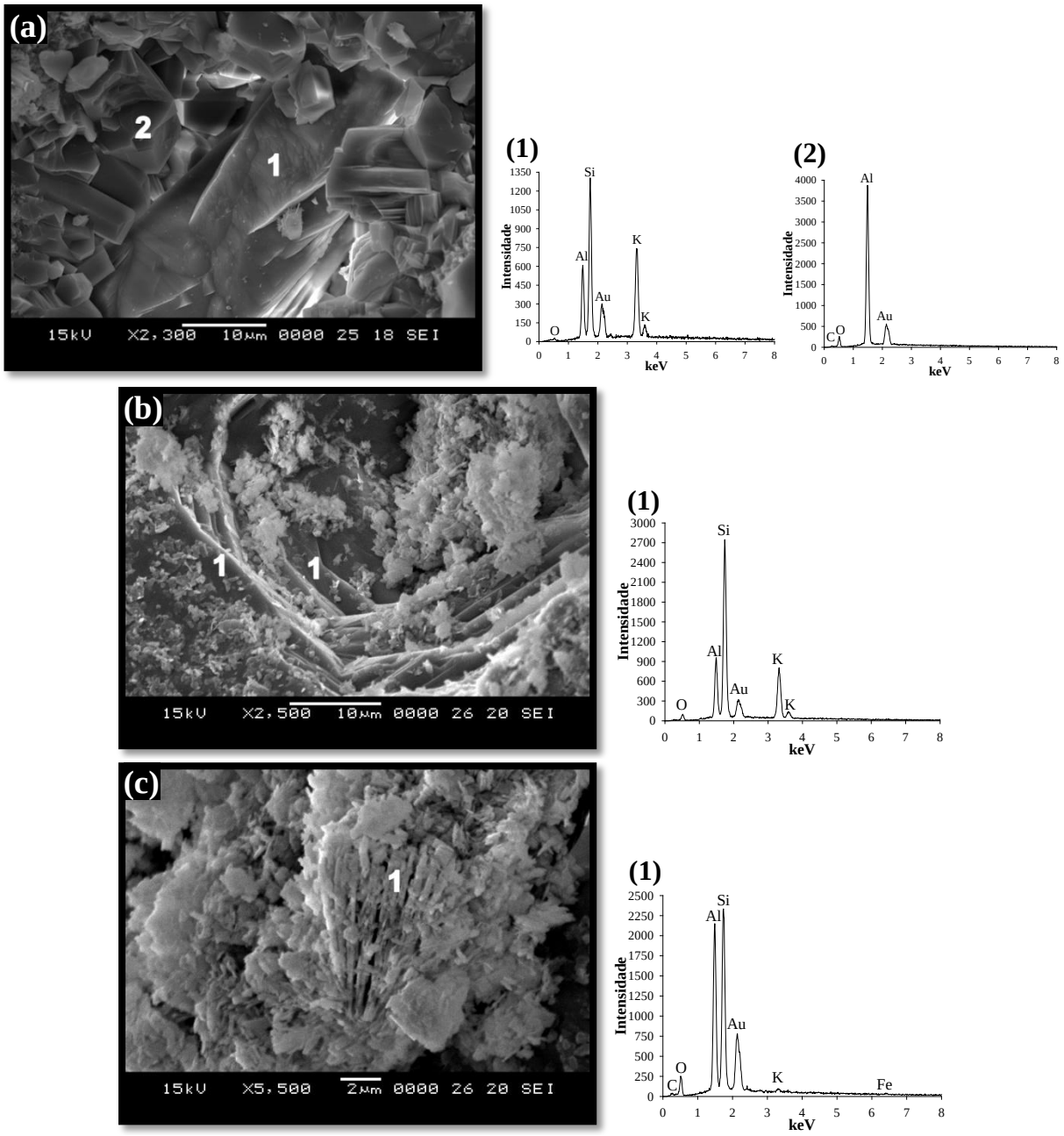

Figura 1.51 - Imagens obtidas ao MEV e microanálises por raios-X por EDS (gráficos) em amostras do perfil P3 (Latossolo Amarelo). (a) Camada Kn centro: (1) microclínio, (2) gibbsita; (b) camada Kn base: (1) muscovita; (c) camada Kn base: (1) biotita. Atribui-se ao recobrimento com ouro (Au) da amostra, o pico a 2,12 keV.

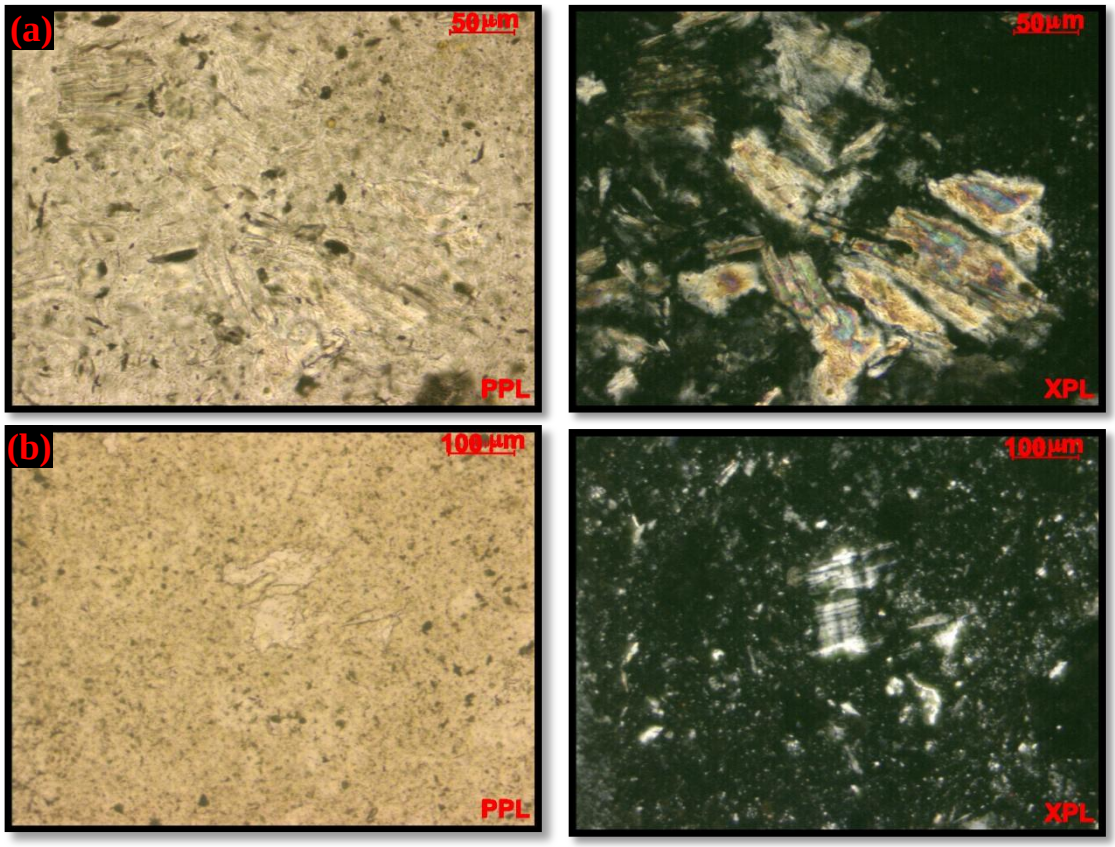

Figura 1.52 - Fotomicrografias de lâmina delgada do perfil P3 (Latossolo Amarelo) obtidas ao microscópio petrográfico. Detalhe da camada de caulim Kn base com cristais de muscovita (a) e de microclínio (b). As fotomicrografias obtidas com a luz polarizada em um só plano (polarizador inserido) receberam a sigla PPL e aquelas obtidas com nicóis cruzados (polarizador e analisador inseridos) foram indicadas com a sigla XPL.

Comportamento dos minerais secundários

Caulinita e Gibbsita

De forma semelhante ao P2, aqui a caulinita exibe aumento do horizonte superficial A com 14,95 % ao latossólico Bw2 com 50,63 % e atinge média de 80,86 % do horizonte latossólico com nódulos gibbsíticos (Bwc topo) à camadas de caulim (Kn base) (Tabela 1.23).

A predominância do quartzo do horizonte superficial A ao latossólico Bw2, muito embora, os teores de caulinita tenham aumentado quando comparados ao P2, também indicam que a acidez da água do solo neste perfil é menos agressiva do que no P2 uma vez que a caulinita persiste em quantidades importantes. Isso se deve, provavelmente, à menor influência da matéria orgânica e ao pH levemente mais elevado que promoveriam menor acidez às soluções, ainda que tenham sido observados cristais de quartzo com figuras de dissolução (Figura 1.53).

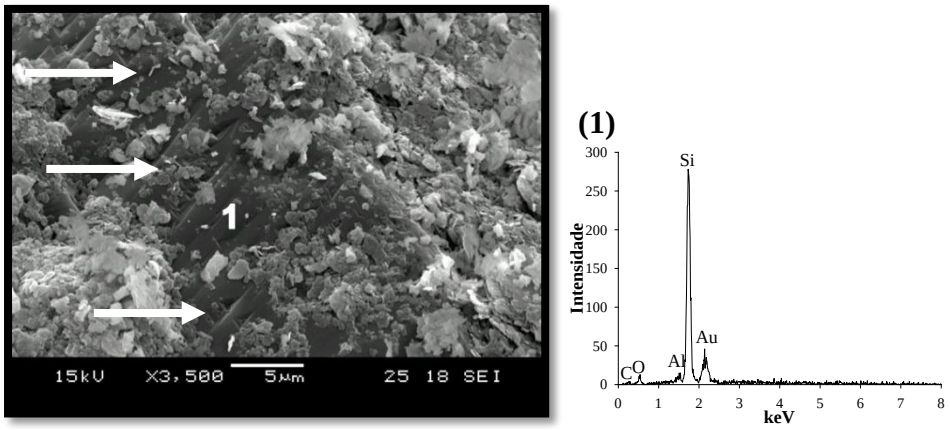

Figura 1.53 - Imagem obtida ao MEV e microanálise por raios-X por EDS (gráfico) em amostra do horizonte Bw1 do perfil P3 (Latossolo Amarelo). (1) Cristal de quartzo com figuras de dissolução, indicadas por setas, associado à caulinita. Atribui-se ao recobrimento com ouro (Au) da amostra, o pico a 2,12 keV.

A gibbsita neste perfil exibiu concentrações mais elevadas e maiores variações do que nos perfis anteriores entre 1,97 e 4,77 (Tabela 1.23). As elevadas concentrações de gibbsita na amostra bruta e a ocorrência de nódulos gibbsíticos (Figura 1.54) do horizonte Bwc à camada Kn base indicam que as condições menos ácidas e mais oxidantes do perfil permitiriam a estabilidade da gibbsita e a sua precipitação a partir do alumínio presente na solução do solo, especialmente, proveniente de fluxo lateral. As análises por DRX e ATD-TG mostraram que a mineralogia desses nódulos é constituída por gibbsita e caulinita em proporções equivalentes, resultados confirmado pelas observações ao MEV (Figura 1.54).

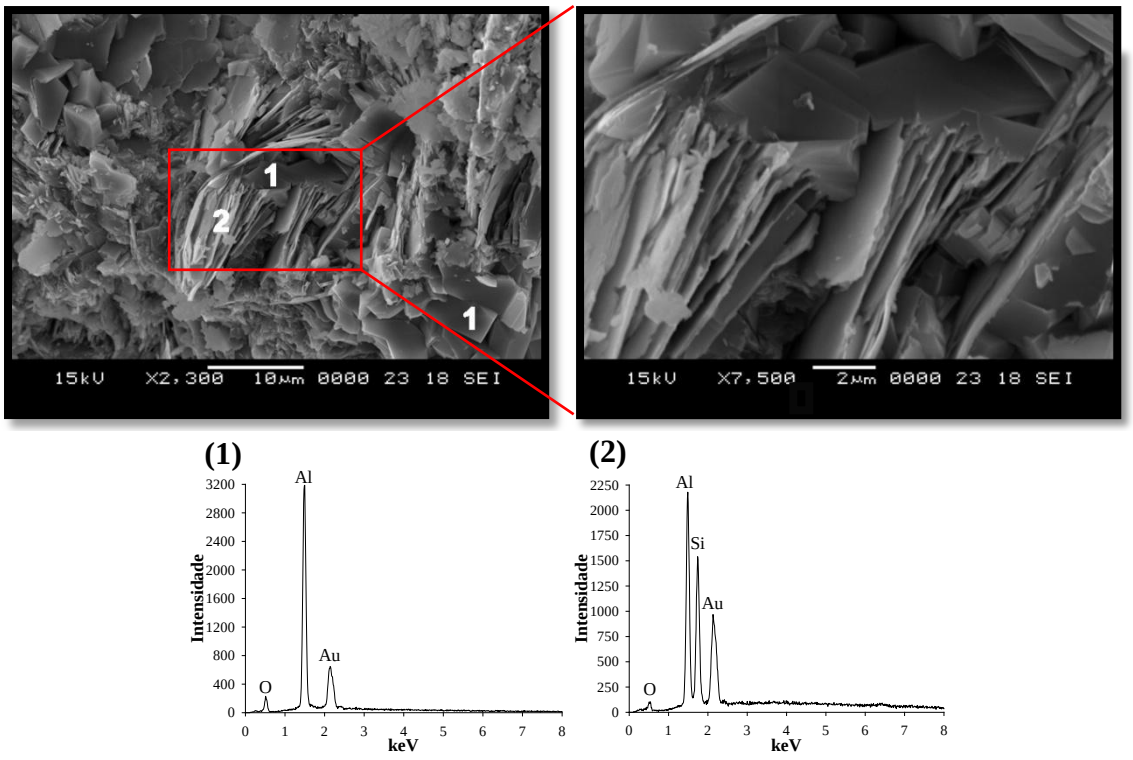

Figura 1.54 - Imagens obtidas ao MEV e microanálises por raios-X por EDS

(gráficos) em amostra do horizonte Bw base do perfil P3(Latossolo Amarelo). (1) Gibbsita e (2) caulinita. Atribui-se ao recobrimento com ouro (Au) da amostra, o pico a 2,12 keV.

O estudo detalhado do comportamento da caulinita e da gibbsita no perfil P3 foi efetuado a partir de suas distribuições nas frações granulométricas argila, silte e areia (Tabelas 1.24 e 1.25).

Foi identificada caulinita nas frações granulométricas argila, silte e areia de todo o perfil (Tabela 1.24). De acordo com o mencionado no P1, a caulinita concentrou-se na fração granulométrica mais representativa na amostra total, no presente perfil esta fração é a fração argila (Tabela 1.5).

Assim a maior concentração de caulinita ocorre na fração argila que possui valores representativos nos horizontes Bw2 (50,98 %), Bwc topo e base com média de 57,90 % e nas camadas de caulim (Kn topo, centro e base) com valor médio de 53,01 % (Tabela 1.5). Esses resultados granulométricos conferem elevados teores de caulinita no horizonte Bw2, Bwc (topo e base) e nas camadas de caulim com valores, respectivamente de 50,79 %, 55,82 % (média) e 46,62 % (média) (Tabela 1.25).

A gibbsita não apresentou um padrão em sua distribuição tanto com relação às frações granulométricas como entre os horizontes analisados (Tabela 1.25). Na amostra bruta, a gibbsita exibiu tendência ao acúmulo em profundidade (Tabela 1.25).

Óxidos de ferro e titânio

O TiO_2 e o Fe_2O_3(T) (Figura 1.55 e Tabela 1.22), presentes em todo o perfil, apresentam teores crescentes do horizonte A ao Bwc topo, onde passam a diminuir até a base do perfil, exceto com relação ao comportamento do Fe_2O_3(T) da camada Kn base. Os óxidos de titânio (anatásio) foram observados associados à matriz caulinítica, bem como os óxidos e oxidróxidos de ferro (goethita e hematita) (Figura 1.56 a, b).

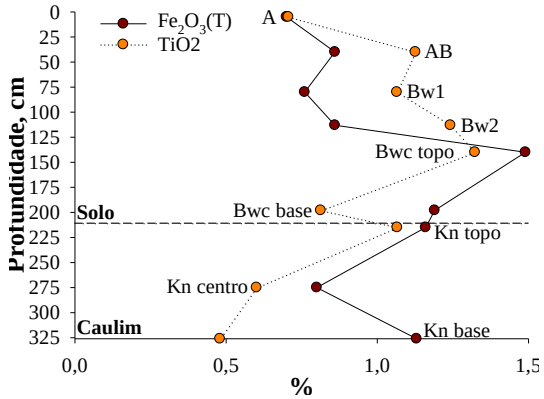

Figura 1.55 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): Distribuição do TiO_2 e do Fe_2O_3(T) com a profundidade.

Tabela 1.24 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): Difração de raios-X das frações granulométricas areia, silte e argila.

Horizonte/ Camada	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta cm)	Mineralogia (1)		
			Fração areia	Fração silte	Fração argila
A	0-10	5	Q, C	Q, C, G, A, R	C, G, M, A, Q
AB	10-40	40	Q, C	Q, C, A, R, G	C, G, M, A, Q
Bw1	40-95	80	Q, C	Q, C, G, M, A, R	C, G, M, A, R, Q
Bw2	95-130	113	Q, C	Q, C, A, G, M	C, G, A, M
Bwc topo	130-210	140	Q, C, G, A	C, Q, A, G, M	C, G, M
Bwc base		198	Q, G, C, M	C, Q, G, M	C, G, M, A
Kn topo		215	Q, C, G, R, A, M	C, A, G, M	C, G, M
Kn centro	210+	275	Q, C, G, M, R	C, Q, G, M, Mg	C, G, M
Kn base		326	Q, C, G, R, M, Mc, A, Mg	C, Q, A, R, G, M, Mg	C, G, M, A, Q, Mc

(1) A = anatásio, C = caulinita, G = gibbsita, H = hematita, Mg = magnetita, Mc = microclínio; M = muscovita; Q = quartzo; R = rutilo.

Tabela 1.25 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): Análise térmica diferencial e gravimétrica das frações granulométricas argila e areia.

Horizonte/ Camada	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	Fração argila		Fração silte (1)		Fração areia		Amostra bruta	
			Gibbsita	Caulinita	Gibbsita	Caulinita	Gibbsita	Caulinita	Gibbsita	Caulinita
			---------- % ----------							
A	0-10	5	0,56	22,80	NA (2)	NA	NA	NA	2,70	27,29
AB	10-40	40	2,07	28,85	NA	NA	NA	NA	3,00	31,66
Bw1	40-95	80	1,06	31,91	0,98	0,00	0,00	0,00	2,05	30,90
Bw2	95-130	113	1,21	50,79	3,28	17,85	0,07	0,00	4,56	68,64
Bwc topo	130-210	140	2,21	54,91	0,00	23,86	1,55	2,04	1,97	80,81
Bwc base		198	1,24	56,73	NA	NA	NA	NA	4,76	86,83
Kn topo		215	0,92	48,72	1,54	30,51	0,82	1,46	3,28	80,69
Kn centro	210+	275	1,18	50,37	NA	NA	NA	NA	4,61	82,93
Kn base		326	0,97	40,76	1,25	29,85	1,50	5,19	3,73	75,80

(1) Estimada pela diferença entre a amostra bruta e a soma dos teores das frações argila e areia, (2) NA = não analisado..

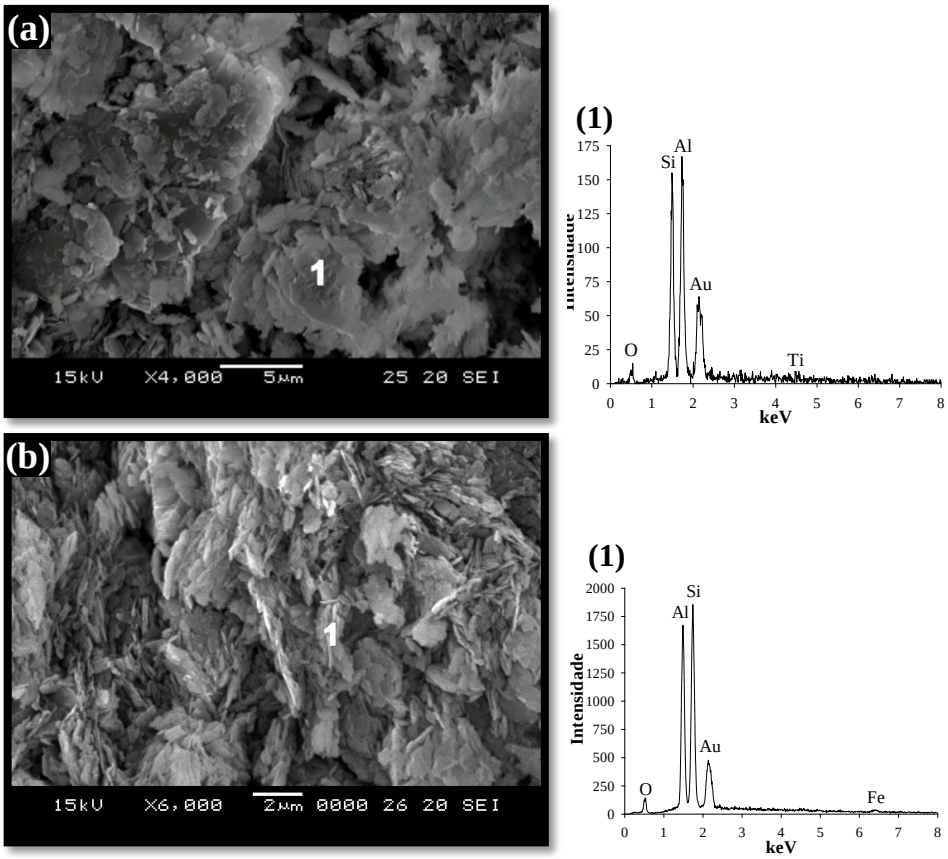

Figura 1.56 - Imagens obtidas ao MEV e microanálises por raios-X por EDS (gráficos) em amostras do perfil P3 (Latossolo Amarelo). (a) Horizonte Kn topo: (1) caulinita e anatásio associados, (b) horizonte AB: (1) caulinita e ferro associados. Atribui-se ao recobrimento com ouro (Au) da amostra, o pico a 2,12 keV.

Da mesmo forma que nos perfis P1 e P2, o estudo por ERD neste perfil também identificou goethita (como fase dominante) e hematita, determinadas, respectivamente, pelas bandas de absorção entre 475 nm e 526 nm. Tendo a banda de absorção a 475 nm indicado substituição isomórfica de Fe por Al (da ordem de 33 % mole de Al) na goethita ferro (MALENGREAU; MULLER; CALAS, 1994) (Figura 1.57).

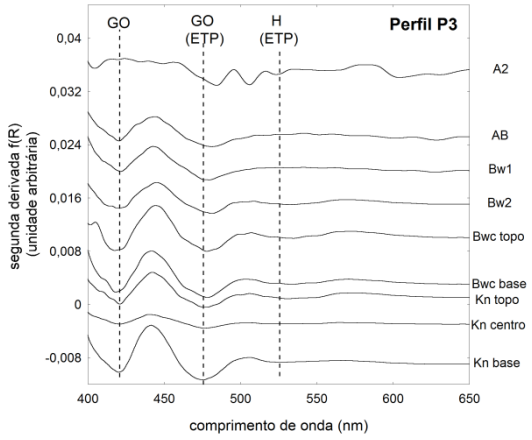

Figura 1.57 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): Espectro da segunda derivada da função de remissão *f(R)* mostrando as bandas de absorção principais (ETP) para goe-

thita (GO) e Hematita (H) de amostras brutas.

A exemplo do mencionado nos perfis P1 e P2, a ocorrência dos óxidos e oxidróxidos de ferro foi confirmada por meio de observações de ferrãs oriundos da segregação do ferro e associados sobretudo aos poros e esqueleto (Figura 1.58). Essas feições são evidências da ocorrência de alternância de ambiente (redutor e oxidante) nesse perfil.

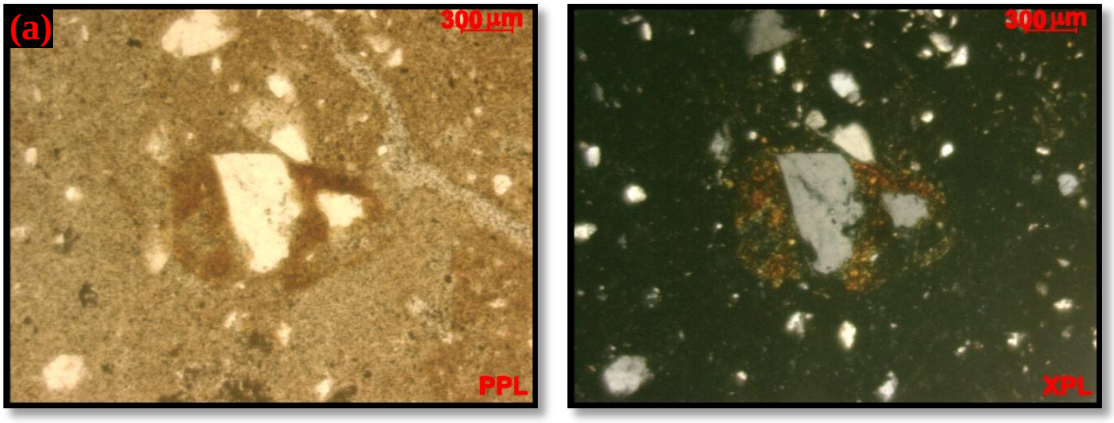

Figura 1.58 - Fotomicrografias de lâmina delgada do perfil P3 (Latossolo Amarelo) obtidas ao microscópio petrográfico. Ferrã associado ao esqueleto no horizonte Bw2. A fotomicrografia obtida com a luz polarizada em um só plano (polarizador inserido) recebeu a sigla PPL e aquela obtida com nicóis cruzados (polarizador e analisador inseridos) foi indicada com a sigla XPL.

Fator balanço de massa

Os resultados da aplicação do fator de balanço de massa no P3 estão na Tabela 1.26 e permitem algumas considerações.

A Tabela 1.26 mostra que o Si e o Al nos horizontes superficiais (A e AB) e latossólicos (Bw1 e Bw2) apresentaram comportamento semelhante àquele exibido nos perfis P1 e P2, resultando em acúmulo residual do quartzo (Tabela 1.23), ainda que em menor intensidade em razão da menor acidez do meio. Os resultados do Si exibem o mesmo comportamento visto no P2, com perdas importantes nos horizontes latossólicos com nódulos gibbsíticos (Bwc topo e Bwc base) e nas camadas de caulim (Kn topo, Kn centro e Kn base) (Figura 1.59 e Tabela 1.26). O Al exibiu comportamento semelhante ao apresentado no P2 com pequenos ganhos de Al a partir do horizonte Bwc base até a camada Kn base (Figura 1.59 e Tabela 1.26).

Tabela 1.26 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel.

Horizonte/Camada	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	$\tau_{j,w}$							
			Si	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Ti
A	0-10	5	-0,75	-0,87	-0,95	-0,99	LD(1)	-0,99	-1,00	-0,70
AB	10-40	40	-0,83	-0,85	-0,96	-0,99	-1,00	-1,00	-1,00	-0,68
Bw1	40-95	80	-0,81	-0,83	-0,96	-1,00	LD	-1,00	-1,00	-0,66
Bw2	95-130	113	-0,80	-0,61	-0,94	-0,99	LD	-1,00	-1,00	-0,49
Bwc topo	130-210	140	-0,76	-0,13	-0,83	-0,98	LD	-1,00	-0,99	-0,15
Bwc base		198	-0,68	0,54	-0,79	-0,98	LD	-1,00	-0,99	-0,18
Kn topo		215	-0,76	0,08	-0,85	-0,97	LD	-0,99	-0,99	-0,24
Kn centro	210+	275	-0,71	0,42	-0,87	-0,97	LD	-0,99	-0,97	-0,45
Kn base		326	-0,60	0,45	-0,79	-0,96	LD	-0,98	-0,84	-0,49

(1) LD = abaixo do limite de detecção na análise química.

Assim como no P2, esses resultados estariam relacionados à dissolução da caulinita e a transformação da mica e do feldspato, devido às perdas de silício e alumínio observadas na maior parte dos horizontes superficiais (A e AB) e latossólicos (Bw1 e Bw2). Também foi confirmada a ocorrência de neoformação de caulinita e precipitação importante de nódulos de gibbsita, esses associados ao sistema poral, do horizonte latossólico com nódulos gibbsíticos (Bwc topo) à camada de caulim (Kn base) (Tabela 1.26).

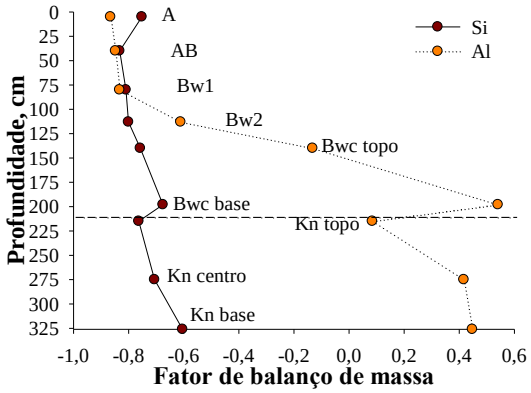

Figura 1.59 - Perfil P3 (Espodossolo Humilúvico): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel para Si e Al.

Com relação aos elementos alcalinos (Na e K) e alcalinos terrosos (Ca e Mg), as maiores perdas ocorreram do horizonte A (superficial) ao Bw1 (latossólico) de forma acentuada (Figura 1.60 e Tabela 1.26). A partir do horizonte Bw2 (latossólico) com a profundidade, houve tênue diminuição na perda de magnésio, sódio e potássio. O potássio na camada Kn base apresentou perda ainda menor (-0,84), provavelmente, em razão da maior presença de minerais primários alteráveis como muscovita e microclínio.

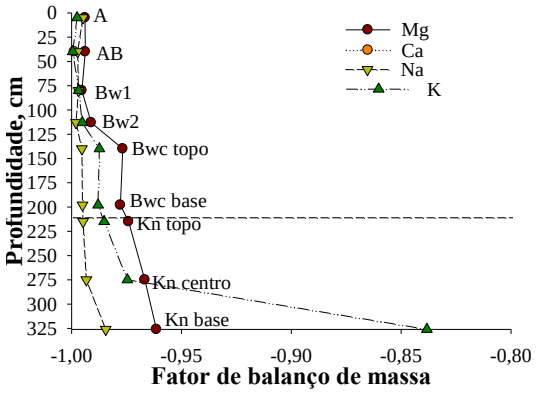

Figura 1.60 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel para Mg, Ca, Na e K.

As maiores perdas de titânio ocorreram em duas zonas no perfil: a primeira corresponde aos horizontes superficiais (A e AB) e latossólicos (Bw1 e Bw2) e a segunda às camadas de caulim (Kn centro e Kn base) (Figura 1.61 e Tabela 1.26). O ferro apresentou perdas em todo o perfil (Figura 1.61 e Tabela 1.26), tendo as maiores perdas nos horizontes mais influenciados pela matéria orgânica (A, AB, Bw1 e Bw2).

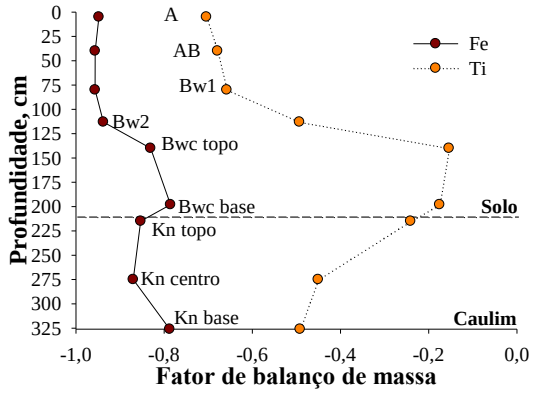

Figura 1.61- Perfil P3 (Latossolo Amarelo): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel para Fe e Ti.

1.3.3.4. Perfil P4 - Gleissolo Háplico

Neste perfil, os resultados das análises mineralógicas e químicas, apresentados nas tabelas 1.27 e 1.28, mostraram como nos demais perfis da topossequência, mineralogia relativamente simples e monótona, tendo ainda minerais alteráveis como microclínio e ilita.

Tabela 1.27 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico): Difração de raios-X da amostra bruta.

Horizonte	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	Mineralogia [1]
A	0-30	15	Q, C, A, G, M, Go [2], H [2]
Cg1	30-50	40	Q, C, A, R, G, M, Mc, Go, H
Cg2	50-70	60	Q, C, A, R, G, M, Mc, Go, H
Cg3	70-130	85	Q, C, A, R, G, M, Go, H
Cg4	130-180	155	Q, C, A, R, G, M, Mc, Go, H
Cg5	180+	190	Q, C, A, R, Mc, G, M, I, Go, H

(1) A = anatásio, C = caulinita, G = gibbsita, I = ilita, Mc = microclínio, M = muscovita, Q = quartzo, R = rutilo; (2) Identificados por ERD.

Tabela 1.28 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico): pH e composição química total da amostra bruta.

Hori-	Profundi-	Profundidade	pH		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3(T)	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	PF	Total	Relação	Zr
zonte	dade (cm)	de coleta cm)	H_2O	KCl	---------- % ----------										SiO_2:Al_2O_3	ppm
A	0-30	15	5,10	4,10	80,04	11,37	0,91	0,06	0,01	0,06	0,36	0,56	6,21	99,62	11,97	798,00
Cg1	30-50	40	4,60	4,00	85,25	7,78	0,40	0,04	0,03	0,05	0,74	0,75	4,11	99,17	18,63	1140,00
Cg2	50-70	60	5,10	4,00	90,67	5,51	0,29	0,03	0,02	0,05	0,50	0,53	2,48	100,10	27,97	714,00
Cg3	70-130	85	4,50	4,00	91,00	5,76	0,27	0,03	0,02	0,06	0,43	0,49	2,46	100,50	26,86	735,00
Cg4	130-180	155	5,20	4,10	86,75	7,79	0,32	0,04	0,02	0,06	0,86	0,63	3,59	100,10	18,93	795,00
Cg5	180+	190	4,70	3,90	79,75	11,66	0,55	0,05	0,02	0,09	1,73	0,94	5,31	100,20	11,63	629,00

Sob o ponto de vista químico, o P4 apresenta semelhanças com os perfis P2 e P3, exibindo teores de SiO_2 elevados, entre 79,75 e 91,00 %, quantidades de Al_2O_3 variando entre 5,51 e 11,37 % e relação SiO_2:Al_2O_3 entre 11,63 e 27,97 % (Figura 1.62 e Tabela 1.28).

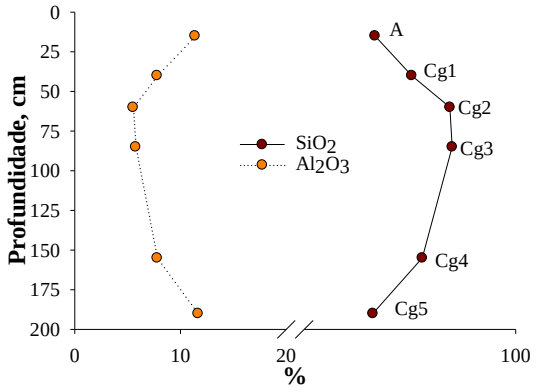

Figura 1.62 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico): Distribuição do SiO_2 e do Al_2O_3 com a profundidade.

O ferro, o titânio e os elementos alcalinos (Na e K) e alcalino terrosos (Ca e Mg) mostraram concentrações pequenas em todo o perfil (Tabela 1.28).

Considerações mineralógicas

A Tabela 1.29 apresenta os resultados da composição mineralógica semiquantitativa (análise normativa) baseada na associação dos resultados químicos e mineralógicos.

Comportamento dos minerais primários

Quartzo, muscovita e microclínio

O quartzo neste perfil exibe valores elevados em todo o perfil, entre 66,25 e 84,60 % (Tabela 1.29).

As Tabelas 1.27 e 1.29 mostram, respectivamente, importantes concentrações de micas e concentrações importantes de K_2O (Figura 1.63) em todo o perfil. As observações microscópicas (MEV e microscópio petrográfico) confirmam a existência de minerais primários alteráveis como, por exemplo, feldspato e mica (Figura 1.64 a, b e Figura 1.65).

Tabela 1.29 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico): Análise normativa da amostra bruta.

Horizonte	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	Mica	Gibbsita [1]	Caulinita	Quartzo	Óxidos de titânio	Óxidos de ferro	Matéria orgânica	Total
			---------- % ----------							
A	0-30	15	3,05	1,03	24,11	67,44	0,56	0,91	2,36	99,46
Cg1	30-50	40	6,26	0,43	12,90	76,42	0,75	0,40	1,89	99,04
Cg2	50-70	60	4,23	0,21	9,49	84,34	0,53	0,29	0,90	99,99
Cg3	70-130	85	3,64	0,50	10,2’2	84,60	0,49	0,27	0,70	100,42
Cg4	130-180	155	7,28	0,49	11,84	77,95	0,63	0,32	1,46	99,95
Cg5	180+	190	14,64	0,31	14,78	66,25	0,94	0,55	2,51	99,98

(1) Gibbsita estimada por ATD-TG.

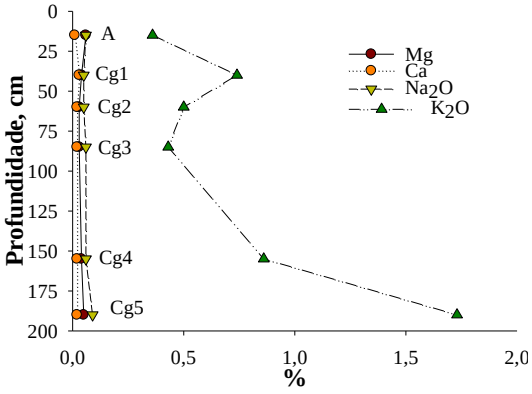

Figura 1.63 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico): Distribuição de MgO, CaO, Na_2O e K_2O com a profundidade.

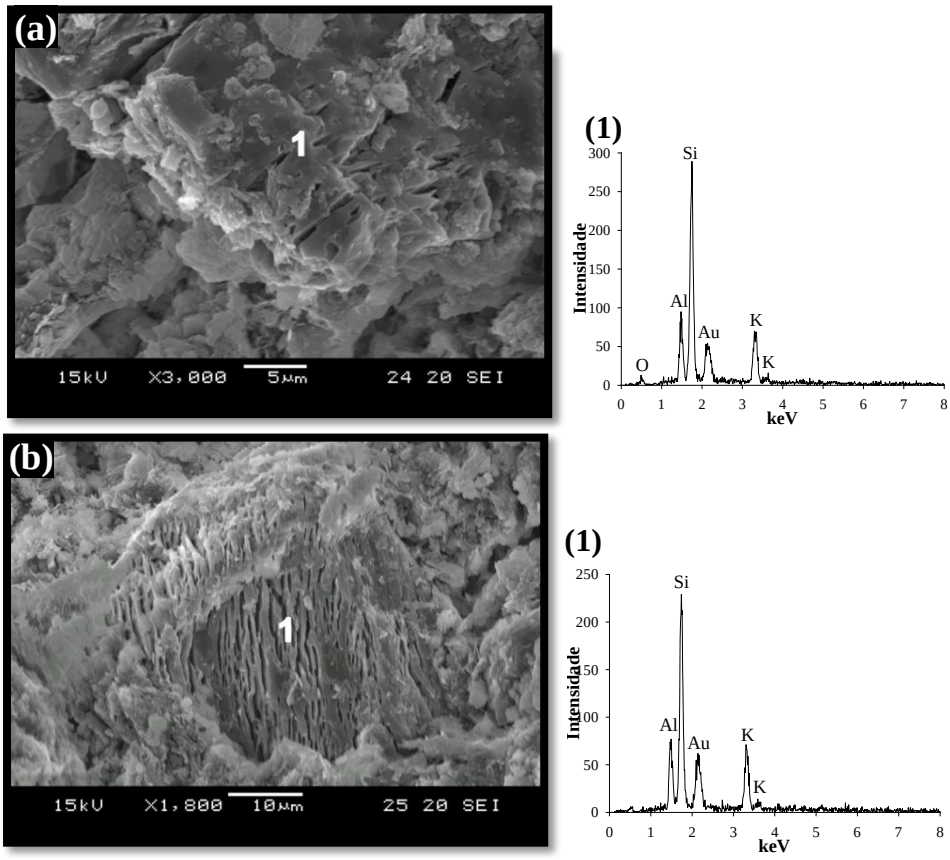

Figura 1.64 - Imagens obtidas ao MEV e microanálises por raios-X por EDS (gráficos) em amostras do perfil P4 (Gleissolo Háplico). (a) Horizonte Cg5: (1) microclínio, (b) horizonte Cg4: (1) muscovita. Atribui-se ao recobrimento com ouro (Au) da amostra, o pico a 2,12 keV.

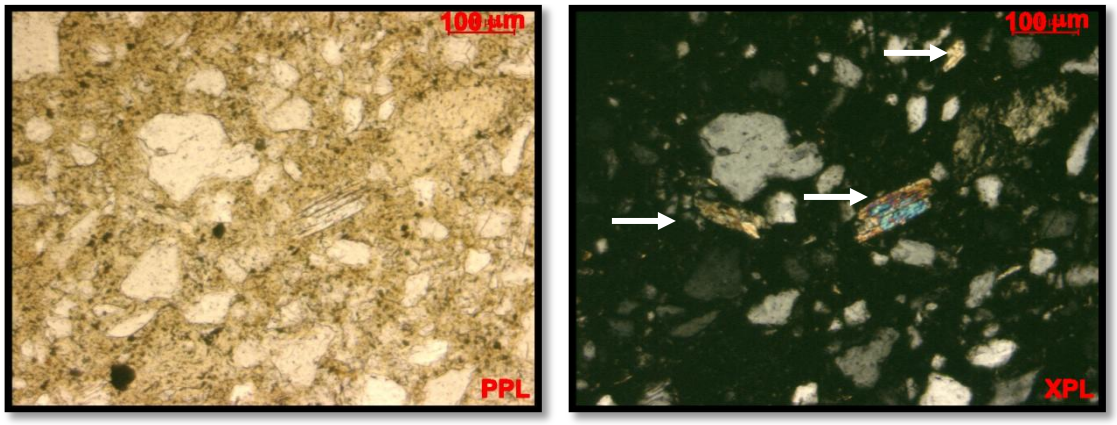

Figura 1.65 - Fotomicrografias de lâmina delgada do perfil P4 (Gleissolo Háplico) obtidas ao microscópio petrográfico. Detalhe do horizonte Cg4 com cristais de muscovita indicados por setas brancas. A fotomicrografia obtida com a luz polarizada em um só plano (polarizador inserido) recebeu a sigla PPL e aquela obtida com nicóis cruzados (polarizador e analisador inseridos) foi indicada com a sigla XPL.

Comportamento dos minerais secundários

Caulinita e Gibbsita

As baixas concentrações de caulinita, entre 9,49 e 24,11 %, e gibbsita, entre 0,21 e 1,03 %, resultam das condições de hidromorfia permanentes do perfil, pouco propícias à estabilidade desses minerais (Tabela 1.29).

O estudo detalhado do comportamento da caulinita e da gibbsita no perfil P4 foi realizado a partir de suas distribuições nas frações granulométricas argila, silte e areia (Tabelas 1.31 e1.31).

Foi identificada caulinita em todos os horizontes do perfil nas frações granulométricas argila e silte, na fração areia foi identificada apenas no horizonte superficial A (Tabela 1.30). De acordo com o resultado da análise térmica efetuada na fração areia apenas no horizonte Cg5 (Tabela 1.31), a caulinita concentrou-se na fração granulométrica mais representativa na amostra, a fração argila (Tabela 1.7). A gibbsita, identificada em todos os horizontes na fração argila (Tabela 1.30), apresentou concentrações muito baixas (Tabela 1.31).

Apesar de não ter sido analisada ao ATD-TG a fração areia dos demais horizontes pode-se, com base nos resultados da Tabela 1.31, afirmar que a caulinita e a gibbsita concentram-se na fração argila na maior parte dos horizontes.

Tabela 1.30 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico): Difração de raios-X das frações granulométricas areia, silte e argila.

Horizonte	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	Mineralogia [2]		
			Fração areia	Fração silte	Fração argila
A	0-30	15	Q, C, M, A	C, Q, M, G, R	C, G, Q, M, A
Cg1	30-50	40	Q, R, A	Q, R, C, M, A, Mc	C, Q, M, G, A, R
Cg2	50-70	60	Q	Q, R, C, A, Mc, M	C, Q, V, M, G, A, R
Cg3	70-130	85	Q, Mc	Q, Mc, C, A, R, M	C, Q, M, G, A
Cg4	130-180	155	Q, A, R	Q, R, C, A, I, M, Mc	C, M, V, G, Q, A, R
Cg5	180+	190	Q, R	Q, R, C, Mc, A, I, M	C, A, G, M, Q, R

(1) A = anatásio; C = caulinita; G = gibbsita; I = ilita; Mc = microclínio; M = muscovita; Q = quartzo; R = rutilo, V = vermiculita.

Tabela 1.31 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico): Análise térmica diferencial e gravimétrica das frações granulométricas argila e areia.

Horizonte	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	Fração argila		Fração silte [1]		Fração areia		Amostra bruta	
			Gibbsita	Caulinita	Gibbsita	Caulinita	Gibbsita	Caulinita	Gibbsita	Caulinita
			---------- % ----------							
A	0-30	15	1,03	11,90	NA [2]	NA	NA	NA	1,03	25,92
Cg1	30-50	40	0,35	12,67	NA	NA	NA	NA	0,43	18,85
Cg2	50-70	60	0,23	13,72	NA	NA	NA	NA	0,21	11,54
Cg3	70-130	85	0,19	13,08	NA	NA	NA	NA	0,50	10,29
Cg4	130-180	155	0,06	11,87	NA	NA	NA	NA	0,49	19,09
Cg5	180+	190	0,17	19,45	0,14	7,93	0,00	0,00	0,31	27,39

(1) Estimada pela diferença entre a amostra bruta e a soma dos teores das frações argila e areia, (2) NA = não analisado..

Óxidos de ferro e titânio

O TiO_2 e o Fe_2O_3(T) (Figura 1.66 e Tabela 1.28), presentes em todo o perfil, apresentam teores baixos e variados. A observação de cristais de rutilo (Figura 1.67) indica, a exemplo do quartzo, a existência desse mineral residual no perfil.

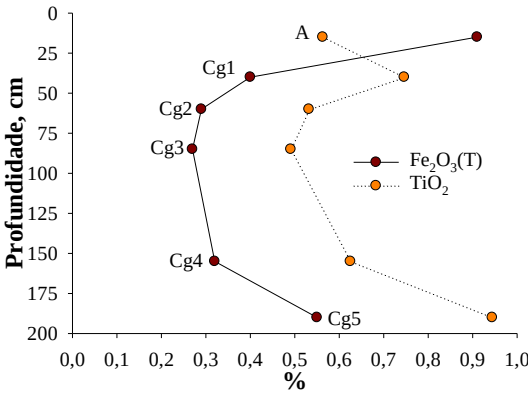

Figura 1.66 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico): Distribuição do TiO_2 e do Fe_2O_3(T) com a profundidade.

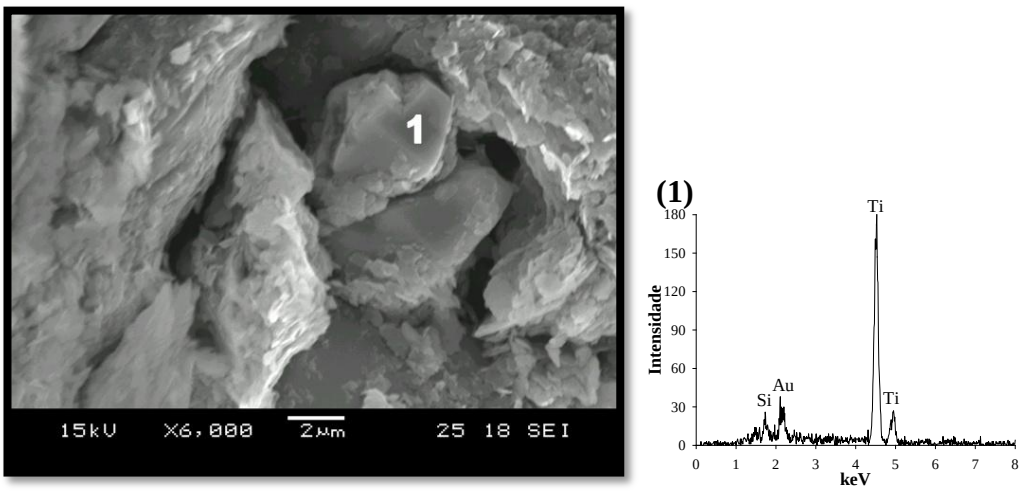

Figura 1.67 - Imagem obtida ao MEV e microanálise por raios-X por EDS (gráfico) em amostra do perfil P4 (Gleissolo Háplico). Horizonte Cg1: (1) rutilo. Atribui-se ao recobrimento com ouro (Au) da amostra, o pico a 2,12 keV.

Neste perfil também foram identificados por ERD goethita e hematita, respectivamente, pelas bandas de absorção entre 476 nm e 546 nm. As goethitas neste perfil, assim como nos demais apresentam substituição isomórfica de Fe por Al. (Figura 1.68).

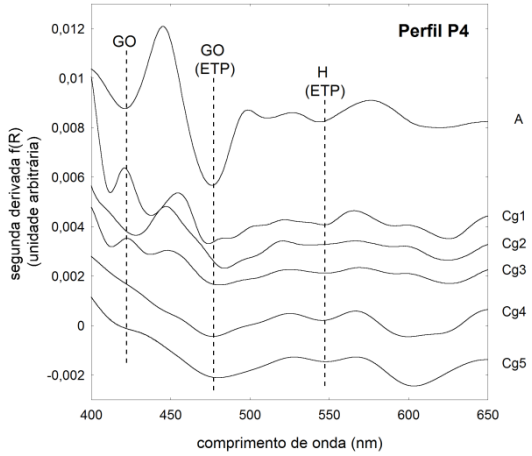

Figura 1.68 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico): Espectro da segunda derivada da função de remissão *f(R)* mostrando as bandas de absorção principais (ETP) para goethita (GO) e Hematita (H) de amostras brutas.

Assim como observado nos demais horizontes, a ocorrência de óxidos e oxidróxidos de ferro associados aos poros foi confirmada através da observação de ferrã ao microscópio petrográfico (Figura 1.69).

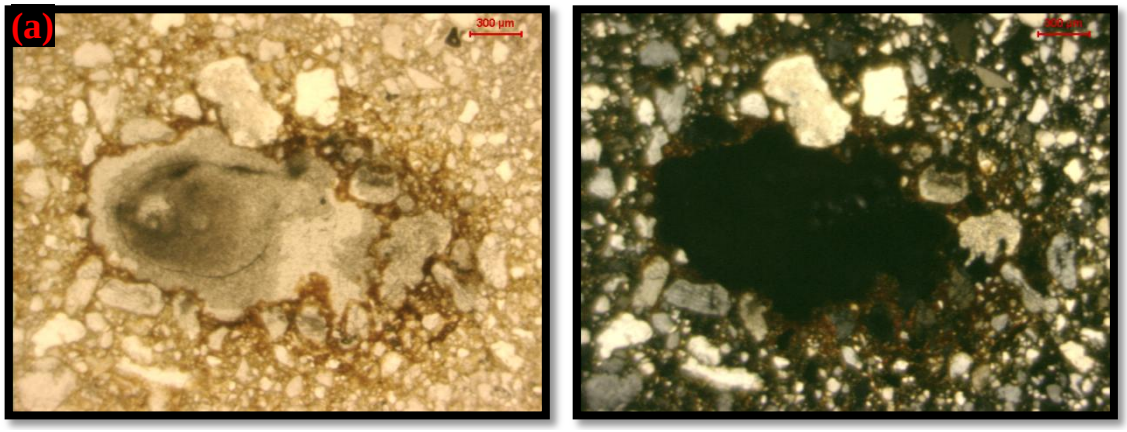

Figura 1.69 - Fotomicrografias de lâmina delgada do perfil P4 (Gleissolo Háplico) obtidas ao microscópio petrográfico. Ferrã associado a porosidade no horizonte Cg2. A fotomicrografia obtida com a luz polarizada em um só plano (polarizador inserido) recebeu a sigla PPL e aquela obtida com nicóis cruzados (polarizador e analisador inseridos) foi indicada com a sigla XPL.

Fator balanço de massa

A Tabela 1.32 exibe os resultados da aplicação do fator de balanço de massa no P4.

As perdas de alumínio e silício (Figura 1.70) confirmam a desestabilização dos minerais secundários (caulinita e gibbsita) e a dissolução do quartzo. A perda quase total do ferro está relacionada ao ambiente hidromórfico que propicia sua redução e exportação (Figura

1.71). As menores perdas de titânio (Figura 1.71) registradas com a profundidade estão relacionadas como mencionado no item 1.3.3.2 à migração do elemento através da porosidade do tipo empacotamento complexo (Figura 1.72).

Tabela 1.32 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel.

Horizonte	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	$\tau_{j,w}$							
			Si	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Ti
A	0-30	15	-0,67	-0,75	-0,91	-0,98	-1,00	-0,99	-0,98	-0,69
Cg1	30-50	40	-0,75	-0,88	-0,97	-0,99	-1,00	-1,00	-0,97	-0,72
Cg2	50-70	60	-0,58	-0,86	-0,97	-0,99	-1,00	-0,99	-0,97	-0,68
Cg3	70-130	85	-0,59	-0,86	-0,97	-0,99	-1,00	-0,99	-0,97	-0,71
Cg4	130-180	155	-0,64	-0,83	-0,97	-0,98	-1,00	-0,99	-0,95	-0,66
Cg5	180+	190	-0,58	-0,67	-0,93	-0,97	-1,00	-0,98	-0,88	-0,35

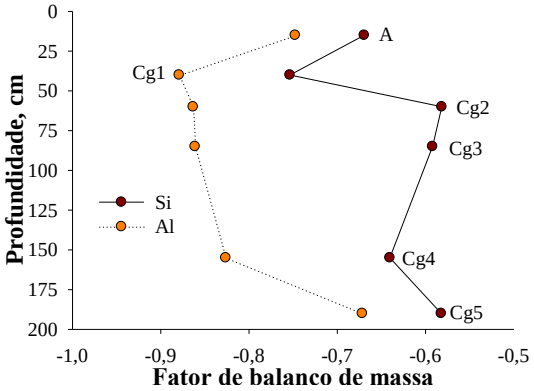

Figura 1.70 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel para Si e Al.

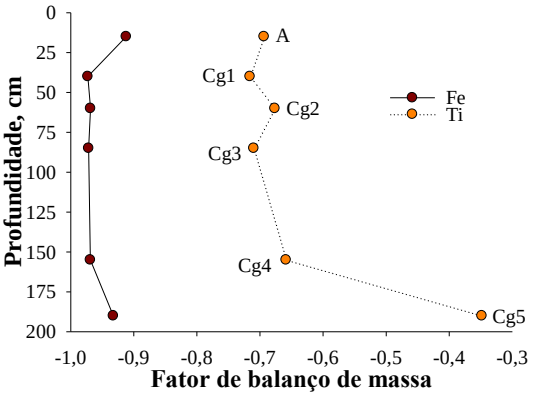

Figura 1.71 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel para Fe e Ti.

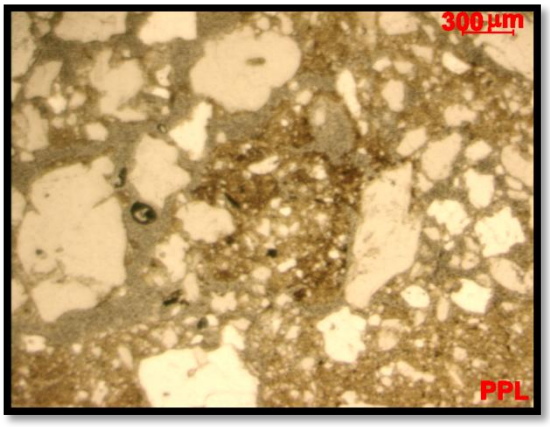

Figura 1.72 - Imagem de lâmina delgada do perfil P4 (Gleissolo Háplico) obtida ao microscópio petrográfico. Porosidade do tipo empacotamento complexo no Horizonte Cg4. A fotomicrografia obtida com a luz polarizada em um só plano (polarizador inserido) recebeu a sigla PPL.

Os elementos alcalino (Na) e alcalinos terrosos (Mg e Ca) apresentaram perdas significativas em todo o perfil (Figura 1.73). O elemento alcalino K apresentou tênues acúmulos nos horizontes Cg4 e Cg5 (Figura 1.73) em razão da maior presença de minerais primários alteráveis como muscovita, ilita e microclínio, identificados por DRX (Tabela 1.30).

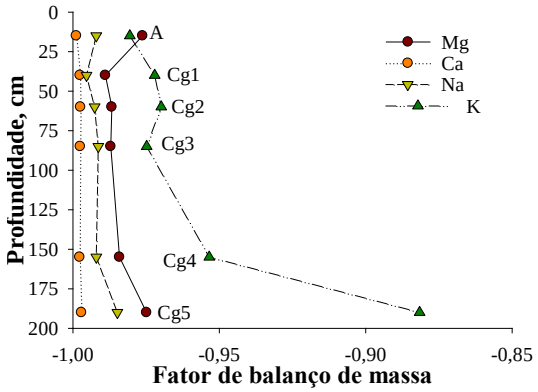

Figura 1.73- Perfil P4 (Gleissolo Háplico): Balanço de massa tendo o Zr como elemento imóvel para Mg, Ca, Na e K.

1.4. Considerações sobre o desenvolvimento vertical e lateral do solo e do caulim

Na maior parte dos sistemas Latossolo-Espodossolo desenvolvidos sobre os sedimentos da Formação Barreiras e rochas do embasamento cristalino, a podzolização ocorre de forma centrípeta com aparecimento de fluxos subsuperficiais laterais na base das vertentes (LUCAS et al., 1984; BRAVARD, RIGHI, 1988; BRAVARD, RIGHI, 1990; RIGHI et al., 1990; MAFRA et al., 2002; NASCIMENTO et al., 2004). Entretanto, no sistema estudado no presente trabalho, a podzolização ocorre de forma centrífuga com o desenvolvimento de fluxos subsuperficiais laterais no interflúvio. Sistemas similares foram estudados na Guiana Francesa (LUCAS et al., 1987; LUCAS et al., 1996) e na Indonésia (BRABANT, 1987). Na Guiana Francesa, Lucas et al. (1987, 1996), a exemplo do ocorrido no presente trabalho, também foram observadas espessas camadas de caulim enriquecidas por caulinita neoformada, na base do sistema de transformação.

O desenvolvimento desse sistema particular de solos tem relação com os ácidos orgânicos e complexos organometálicos (ferro e alumínio) formados a partir dos horizontes superficiais. Os ácidos orgânicos agem no intemperismo de minerais primários (feldspatos e micas), óxidos e oxidróxidos de ferro, caulinita e gibbsita. Concomitantemente, os complexos organometálicos promovem a migração, vertical e lateral, do ferro e alumínio. No perfil P1 da topossequência estudada, a ação de ácidos orgânicos provocou erosão química e física da cobertura ferralítica inicial a partir da desestabilização da caulinita, gibbsita e óxidos-oxidróxidos de ferro, resultando no acúmulo residual de quartzo. Dessa forma está instalado o processo de podzolização da cobertura ferralítica inicial.

No perfil P1, localizado no interflúvio, nota-se que as soluções ácidas carregadas de complexos organometálicos (ferro e alumínio) circulam rapidamente através dos poros de circulação dos horizontes álbicos (E1 e E2) pobres em superfícies de trocas, que não permitem a retenção desses complexos produzidos nos horizontes superficiais orgânicos (A1 e A2).

Parte desses complexos se depositam em profundidade sobre o caulim (K1 e K2), constituindo os horizontes espódicos (Bh e Bhs). O caulim maciço constituído por caulinita, neoformada e pré-existente, a partir do silício e do alumínio liberados em solução nos horizontes superiores e, também, transformada (*boxwork* de feldspato e mica), cria uma descontinuidade textural, sobre a qual se instala um aquífero suspenso. Parte do alumínio precipita como gibbsita. A outra parte dos complexos organometálicos juntamente com as bases migram lateralmente em subsuperfície por meio desse aquífero suspenso, exportando o ferro e o alumínio.

Lateralmente, do segmento médio *a* ao *d* da topossequência, em substituição aos horizontes espódicos do P1, surge um horizonte arenoso não espódico formado pelo acúmulo residual de quartzo e destruição da caulinita, gibbsita e óxidos e oxidróxidos de ferro causados pelas soluções provenientes de P1 que ao encontrarem os fluxos verticais promovem a gradual destruição do material fino por processos de dissolução. As soluções nos perfis P2 e P3 são menos agressivas do que no P1, visto pelos resultados de granulometria e química (análise normativa e fator de balanço de massa) que mostram aumento progressivo nos conteúdos da fração argila, diminuição da quantidade de quartzo residual e teores menores de perda de alumínio, respectivamente.

Estudos desenvolvidos por Fritsch (1986) e Nascimento et al. (2004) apontaram que a transformação de Latossolos em Espodossolos ocorre por meio do processo de hidromorfia associado à oscilação do nível do aquífero suspenso de acordo com os períodos secos e chuvosos que promovem o amarelecimento da laterita vermelha inicial. Esse amarelecimento é apontados por aqueles autores como a etapa inicial do processo de podzolização das lateritas na região Amazônica. A passagem do perfil P1 para os perfis P2 e P3 é marcada pelo aumento gradual das feições hidromórficas como, por exemplo, mosqueamento observado em campo e feições pedológicas de precipitação de óxidos e oxidróxidos ferro (ferrãs), associadas especialmente à porosidade. Essas características hidromórficas e o aumento gradual da fração argila concomitantemente à sucessiva diminuição da fração areia do perfil P1 ao P3 confirmam a hipótese levantada por Montes et al. (2007) de que a podzolização ocorre de forma gradual, centrífuga e a expensas do Latossolo Amarelo.

A ocorrência no caulim de minerais primários como muscovita nos perfis P1 (em traço), P2 e P3, biotita nos perfis P2 e P3 e de microclínio e magnetita no P3, confirma que a pedogênese no P1 é caracterizada por intemperismo ácido, como processo principal e condições oxiredutoras temporárias. Nos perfis P2 e P3 a hidromorfia temporária é o principal processo, tendo secundariamente a influência das soluções ácidas. A presença nas camadas de caulim com nódulos gibbsíticos dos perfis P2 (Kc1, Kc2, Kc3 e Kc4) e P3 (Kc topo, Kc cen-

tro e Kc base) de minerais primários como biotita, muscovita e microclínio e a menor perda de bases resulta em um aumento da reserva alcalina. As soluções, ricas em alumínio, provenientes do P1 ao atingirem zonas mais porosas, em equilíbrio com CO_2, e enriquecidos em elementos alcalinos e alcalinos terrosos (cátions básicos) provocam um aumento dos valores do pH suficiente para precipitação de nódulos gibbsíticos, confirmando hipótese levantada por Montes et al. (2007). Na topossequência, essas condições propícias à precipitação dos nódulos gibbsíticos ocorrem do segmento médio c ao segmento inferior g, esse trecho corresponde ao limite entre a influência das soluções mais agressivas, à montante, e a influência da hidromorfia permanente, à jusante. Dessa forma, conclui-se que a precipitação dos nódulos gibbsíticos depende, neste caso, da presença de ambiente rico em bases e não permanentemente encharcado.

Condições de hidromorfia permanente foram observadas na topossequência do segmento inferior *i* ao *k*, trecho onde se encontra o perfil P4, com o surgimento de típicas feições redoximórficas como mosqueados avermelhados e amarelados devido à precipitação de óxidos e oxidróxidos de ferro. A ocorrência de condições redutoras e pH mais elevados não favorecem a formação de caulinita (TARDY et al., 1973) e como consequência tem-se os baixos teores de caulinita no P4. A posição desse perfil na topossequência, as observações de campo e os resultados das análises laboratoriais mostraram tratar-se de material coluvionar, pouco intemperizado evidenciado pela presença de minerais primários e permanentemente inundado atestado pelas feições fortemente hidromórficas.

1.5. Referências

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, n. 1, p. 125-136, 1982.

BALAN, E.; FRITSCH, E.; ALLARD, T.; CALAS, G. Inheritance versus neoformation of kaolinite during lateritic soil formation: a case study in the middle Amazon basin. *Clays and Clay Minerals*, v. 55, n. 3, p. 253-259, 2007.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. *Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods.* 2nd ed. Madison: Soil Science Society of America, 1986a. cap.13, p. 363-375. (Agronomy, 9)

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle density. In: KLUTE, A. *Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods.* 2nd ed. Madison: Soil Science Society of America, 1986b. cap.13, p. 377-381. (Agronomy, 9)

BOULET, R.; CHAUVEL, A.; HUMBEL, F. X.; LUCAS, Y. Analyse structurale et cartographie en pédologie: I – Prise en compte de l'organisation bidimensionelle de la couverture pédologique: les études de toposéquences et leurs principaux apports à la connaissance dês sols. *Cahiers ORSTOM, Séries Pédologie*, Bondy, v. 19, n. 4, p. 309-321, 1982.

BRABANT, P. La repartition des podzols a Kalimantan. In: RIGHI, D.; CHAUVEL, A. *Podzols et podzolisation*. Plaisir e Paris: AFES e INRA, 1987. p. 13-24.

BRAVARD, S.; RIGHI, D. Characteristics of clays in an oxisol-spodosol toposequence in amazonia (Brazil). *Clay Minerals*, v. 23, n. 3, p. 279-289, 1988.

BRAVARD, S.; RIGHI, D. Geochemical Differences in an Oxisol-Spodosol Toposequence of Amazonia, Brazil. *Geoderma*, v. 44, n. 1, p. 29-42, 1989.

BRAVARD, S.; RIGHI, D. Podzols in Amazônia. *Catena*, v. 17, n. 4-5, p. 461-475, 1990.

BREEMEN, N. van; BUURMAN, P. *Soil formation*. Dordrecht: Kluwer Academic, 1998. 376 p.

BREWER, R. *Fabric and mineral analysis of soils*. New York: Robert E. Krieger, 1976. 482p.

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.

BUENO, G. T. *Appauvrissement et podzolisation des latérites du bassin du Rio Negro et genèse des Podzols dans le haut bassin amazonien*. 2006. 193 f Thèse (Doctorat), Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) et Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Paris et Rio Claro, 2006.

BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T. *Handbook for soil thin section description*. Wolverhampton: Waine Research Publications, 1985. 153 p.

BUOL, S. W.; HOLE, F. D.; McCRACKEN, R. J. *Soil Genesis and Classification*. 4th ed. Ames: Iowa State University Press, 1997. 527 p.

BUURMAN, P.; JONGMANS, A. G. Podzolisation and soil organic matter dynamics. *Geoderma*, v. 125, n. 1-2, p. 71–83, 2005.

CAMARGO, O. A. de; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. *Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas*. Campinas: IAC, 1986. 94 p. (Boletim Técnico, 106).

CARNEIRO, B. S.; ANGÉLICA, R. S.; SCHELLER, T.; CASTRO, E. A. S.; NEVES R. F. Caracterização mineralógica e geoquímica e estudo das transformações de fase do caulim duro da região do Rio Capim, Pará. *Cerâmica,* São Paulo, v. 49, p. 237-244, 2003.

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.

CHAUVEL, A.; LUCAS, Y.; BOULET, R. On the genesis of the soil mantle of the region of Manaus, Central Amazonia, Brazil. *Experiential*, Basel, v. 43, p. 234-241, 1987.

COMPANHIA DE PESQUISAS E RECURSOS MINERAIS. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Amazonas. 1. ed. Manaus: CPRM, 2006. 1 CD -ROM.

CONINCK, F.; RIGHI, D.; MAUCORPS, J.; ROBIN, A. M. Origin and micromorphology momenclature of organic matter in sandy spodosols. In: RUTHEFORD, G. K. *Soil microscopy*. Ontario: Limestone Press, 1974. p. 263-273.

CONINCK, F. Major mechanisms in formation of spodic horizons. *Geoderma*, v. 24, p. 101–128, 1980.

COSTA, A. M. R.; WAKE, M.; STRANGE, A.; SOUZA, L. F. P.; CARVALHO, A. L. Pedologia. In: Projeto RADAM BRASIL. Folha SA.19 Içá. Rio de Janeiro: MME, 1977. p. 181-296. (Levantamento de Recursos Naturais, 14).

COSTA, M. L. *Estudos mineralógicos, geoquímicos e físicos de caulins em São Gabriel da Cachoeira-AM, Manaus-Itacoatiara-AM e BR 010 / rio Capim-PA (Amazônia)*. 1994. 130 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Pará, Belém, 1994.

COSTA, M. L.; MORAES, E. L. As grandes reservas de caulim e a laterização na Amazônia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37., 1992. São Paulo. *Anais...* São Paulo: SBG-São Paulo, 1992. 1. p. 588-589.

COSTA, M. L.; MORAES, E. L. Mineralogy, geochemistry and genesis of kaolins from the Amazon region. *Mineralium Deposita*, Heidelberg, v. 33, p. 283-297, 1998.

COSTA, M. L.; SOUSA, D. J. L.; ANGÉLICA, R. S. The contribution of lateritization processes to the formation of the kaolin deposits from eastern Amazon. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 27, n. 2-3, p. 219-234, 2009.

COURA, F.; MEORI, E. N.; KERN, R. S Geologia do caulim do Jari. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34., 1986. Goiânia. *Anais...*Goiânia: SBG-Centro Oeste, 1986. 5. p. 2258-2284.

DALL´AGNOL, R.; ABREU, A. S. Características petrográficas e petrológicas do Complexo Guiananse na folha NA.19 Pico da Neblina. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29., 1976. Ouro Preto. *Anais...* Ouro Preto:SBG-Minas Gerais, 1976. 2. p.321-350.

DALL'AGNOL, R.; MACAMBIRA, M. J. B. Titanita-biotita granitos do Baixo Rio Uaupés, Província Rio Negro, Amazonas. Parte I: Geologia petrografia e geocronologia. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 22, n. 1, p. 3-14, 1992.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. Diretoria de Desenvolvimento e Economia Mineral. Sumário Mineral Brasileiro 2007. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 2007. Disponível em: http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriaDocumento/SumarioMineral2007/caulim_SM2007.doc . Acesso em: 8 jun. 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. Diretoria de Desenvolvimento e Economia Mineral. Sumário Mineral Brasileiro 2008. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 2008. Disponível em: http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriaDocumento/SumarioMineral2008/caulim.pdf. Acesso em: 15 ago 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. Economia Mineral do Brasil. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 2009. 764 p. Disponível em: https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=3994 . Acesso em: 19 abr 2010.

DUARTE, A. L. S.; KOTSCHOUBEY, B. Cobertura caulinítica da região do baixo rio Jari. Proposta de evolução. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 4., 1994. *Boletim de resumos expandidos*...Belém: SBG, 1994. p. 79-82.

DUBROEUCQ, D.; VOLKOFF, B. From Oxisols to Spodosols and Histosols: evolution of the soil mantles in the Rio Negro basin (Amazonia). *Catena*, S.l., v. 32, p. 245–280, 1998.

DUBROEUCQ, D.; VOLKOFF, B. Les sols du Haut Rio Negro. *Étude et Gestion des Sols*, v. 6, n. 2, p. 131-153, 1999.

DUBROEUCQ, D.; VOLKOFF, B.; PEDRO, G. La couverture pédologique du Bouclier Nord de l'Amazonie (bassin du haut rio Negro) – Séquence évolutive des sols et son rôle dans

l'aplanissement généralisé des zones tropicales perhumides. *Comptes Rendus Geoscience*, Paris, v. 312, p. 663-671, 1991.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROCUPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa em Solos. *Manual de métodos de análise de solo***.** 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROCUPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa em Solos. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.* 2. ed. Brasília: EMBRAPA, Produção de informação; Rio de Janeiro: EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa em Solos, 2006. 306p.

FARMER V. C.; FRASER, A. R. Chemical and colloidal stability of sols in the Al2O3-Fe_2O_3-SiO_2-H_2O system: their role in podzolization. *Journal of Soil Science*, v**.** 33, n. 4, p. 737-742, 1982.

FARMER, V. C.; LUMSDON, D. G. Interactions of fulvic acid with aluminium and a proto-imogolite sol: the contribution of E-horizon eluates to podzolization. *European Journal of Soil Science*, v. 52, n. 2, p. 177-188, 2001.

FARMER, V. C.; RUSSELL, J. D.; BERROW, M. L. Imogolite and proto-imogolite allophane in spodic horizons: evidence for a mobile aluminium slicate complex in podzol formation. *Journal of Soil Science*, v. 31, n. 4, p. 673-684, 1980.

FERNANDES, P. E. C. A; PINHEIRO, S. da S.; MONTALVÃO, R.M.G. de; ISSLER, R. S.; ABREU, A. S.; TASSINARI, C. C. G. *Geologia*. In: Projeto RADAM BRASIL. Folha SA.19 Içá. Rio de Janeiro: MME, 1977. p. 17-123. (Levantamento de Recursos Naturais, 14).

FRANCO, E. M. S; MOREIRA, M. M. A. *Geomorfologia.* In: Projeto RADAM BRASIL. Folha SA.19 Içá. Rio de Janeiro: MME, 1977. p. 125-180. (Levantamento de Recursos Naturais, 14).

FRITSCH, E.; BOCQUIER, G.; BOULET, R.; DOSSO, M.; HUMBEL, F. X. Les systems transformants d'une couverture ferrallitique de Guyane française. Analyse structural d'une formation supergène et mode de représentation. *Cahiers ORSTOM, Séries Pédologie*, v. **22**, p. 361-395, 1986.

FRITSCH, E.; HERBILLON, A. J.; JEANROY, E.; PILLON, P.; BARRES, O. Variations minéralogiques et structurales accompagnant le passage "sols rouges - sols jaunes" dans un bassin versant caractéristique de la zone de contact forêt-savane de l'Afrique occidentale (Booro-Borotou, Côte d'Ivoire). *Sciences Géologiques Bulletin*, Strasbourg, v. 42, n. 2, p. 65-89, 1989.

FRITSCH, E.; MONTES-LAUAR, C. R.; BOULET, R.; MELFI, A. J.; BALAN, E.; MAGAT, P. Lateritic and redoximorphic features in a faulted landscape near Manaus, Brazil. *European Journal of Soil Science*, UK, n. 53, p. 203-217, 2002.

HURST, V. J.; BOSIO, N. J. Rio Capim kaolin deposits, Brazil. *Economic Geology*, v. 70, p.990-992, 1975.

JACKSON, M. L. *Soil chemical analysis - advanced course*. 2.ed. Madison: Published by the author, 1969. 894 p.

JAMET, R.; GUILLET, B.; ROBERT, M.; RANGER, J.; VENEAU, G. Study of current dynamics of soils from a podzol-oxisol sequence in Tahiti(French polynesia) using the test-mineral technique. *Geoderma*, v. 73, p. 107-124, 1996.

JEANROY, E.; RAJOT, J. L.; PILLON, P.; HERBILLON, A. J. Differential dissolution of hematite and goethite in dithionite and its implication on soil yellowing. *Geoderma*, v. 50, n1-2, p. 79-94, 1991.

KLINGE, H. Podzol soils in the amazon basin. *Journal of Soil Science*, v. 16, n. 1, p. 95-103, 1965.

KOSMAS, C. S.; CURI, N.; BRYANT, R. B.; FRANZMEIER, D. P. Characterization of iron oxide minerals by second derivative visible spectroscopy. *Soil Science Society of America Journal*, v. 48, n. 2, p. 401-405, 1984.

KOTSCHOUBEY B.; DUARTE A. L.S.; TRUCKENBRODT W. Cobertura bauxítica e origem do caulim do Morro do Felipe, Baixo Rio Jari, Estado do Amapá. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 29, p. 331-338, 1999.

KOTSCHOUBEY, B.; TRUCKENBRODT, W.; HYERONIMUS, B. Depósitos de caulim e argila semi-flint no nordeste do Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 26, p. 71-80, 1996.

LIMA, M. I. C.; PIRES, J. L. Geologia da região do Alto Rio Negro – AM. *In*: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 2., 1985. Belém. *Anais*... Belém: SBG, 1985, v.1, p.140-154.

LUCAS, Y. *Systèmes pédologiques en Amazonie brésilienne.* Equilibres, desequilibres et transformations. 1988. 157 f. Thèse (Doctorat), Université de Poitiers, Poitiers. 1989.

LUCAS, Y.; BOULET, R.; ANDRIEUX, P. Un système pédologique aval en Guyane Française Organisation et fonctionnement hydrodynamique. *Cahiers ORSTOM, Séries Pédologie*, Bondy, v. 22, n. 1, p. 3-16, 1986.

LUCAS, Y.; BOULET, R.; CHAUVEL, A.; VEILLON, L. Systèmes sols Ferrallitiques-Podzols en région amazonienne. In: RIGHI, D.; CHAUVEL, A. *Podzols et podzolisation*. Plaisir e Paris: AFES e INRA, 1987. p. 53-65.

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.

LUCAS, Y.; NAHON, D.; CORNU, S.; EYROLLE, F. Genesè et fonctionament des sols en milieu équatorial. *Comptes Rendus Geoscience*, Paris, v. 322, n. 1, p. 1-16, 1996.

LUNDSTRÖM, U. S. The role of organic acids in soil solution chemistry in a podzolized soil. *Journal of Soil Science*, v. 44, n. 1, p. 121–133, 1993.

LUNDSTRÖM, U. S.; BREEMEN, N. van; BAIN, D. The podzolization process. A review. *Geoderma*, v. 94, p. 91-107, 2000.

LUXMOORE, R. J. Micro-, meso-, and macroporosity of soil. *Soil Science Society of America Journal*, v.45, p.671-672, 1981.

MAFRA, A. L.; MIKLÓS, A. A. W.; VOLKOFF, B.; MELFI, A. J. Pedogênese numa sequência Latossolo-Espodossolo na região do alto rio Negro, Amazonas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 26, p. 381-394, 2002.

MALENGREAU, N.; MULLER, J.P.; CALAS, G. Fe-speciation in kaolins: a diffuse reflectance study. *Clays and Clay Mineral*, v. 42, n.2, p. 137-147, 1994.

MALENGREAU, N.; BEDIDI, A.; MULLER, J. P.; HERBILLON, A. J. Spectroscopic control of iron oxide dissolution in two ferralitic soils. *European Journal of Soil Science*, v. 47, n. 1, p. 13-20, 1996.

McBRIDE, R. A.; JOOSSE, P. J. Overconsolidation in agricultural soil: Pedotransferfunctions for estimating preconsolidation stress. *Soil Science Society of America Journal*, v. 60, n. 2, p. 373-380, 1996.

McKEAGUE, J. A. Humic-fulvic acid ratio, Al, Fe and C in pyrophosphate extracts as criteria of A and B horizons. *Canadian Journal of Soil Science*, v. 48, n. 1, p. 27-35, 1968.

MCKEAGUE, J. A.; BRYDON, J. E.; MILES, N. M. Differentation of forms of extractable iron and aluminium in soils. *Soil Science Society of America Proceedings*, v. 35, p. 33-38, 1971.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals*, Washington, v. 7, p. 317-327, 1958. Artigo. Apresentado no National clay conference, 7., 1958, Washington.

MELO, A. F. F.; VILLAS BOAS, P. F. Projeto Alto Rio Negro. CPRM, Relatório Preliminar, 1993.

MONTES, C. R. Mecanismos e processos pedogenéticos envolvidos na formação dos depósitos de caolim de São Gabriel da Cachoeira. 2009. Relatório Fapesp nº 07/02543-0.

MONTES, C. R.; LUCAS, Y.; MELFI, A. J.; ISHIDA, D. A. Systèmes sols ferrallitiques-podzols et genèse des kaolins. *Comptes Rendus Geoscience*, Paris, v. 339, n. 1, p. 50-56, 2007.

MONTES, C. R.; MELFI, A. J.; CARVALHO, A.; VIEIRA-COELHO, A. C.; FORMOSO, M. L. L. Genesis, mineralogy and geochemistry of kaolin deposits of the Jari River, Amapá State, Brazil. *Clays and Clay Minerals*, v. 50, n. 4, p. 494-503, 2002.

MUGGLER, C. C.; BUURMAN, P.; DOESBURG, JAN D. J. van. Weathering trends and parent material characteristics of polygenetic oxisols from Minas Gerais, Brazil: I. Mineralogy. *Geoderma*, v. 138, p. 39-48, 2007.

MULLER, J. P.; BOCQUIER, G. Dissolution of kaolinites and accumulation **of** iron oxides in lateritic-ferruginous nodules : mineralogical and microstructural transformations. *Geoderma*, Amsterdam, v. 37, p. 113-136, 1986.

MURAD, E. Raman and X-ray diffraction data on anatase in fired kaolins. *Clays and Clay Minerals*, Washington, v. 51, p. 689-692, 2003.

MURRAY, H. H.; ALVES, C. A.; BASTOS, C. H. Mining, processing and applications of the Capim Basin kaolin, Brazil. *Clay Minerals*, v. 42, p. 145-151, 2007.

NASCIMENTO, M. S.; GÓES, A. N. Distribuição estratigráfica e proveniência de minerais pesados das Formações Ipixuna e Barreiras, região do rio Capim, sul da sub-bacia de Cameta. *Revista Brasileira de Geociências*, Brasília, v. 35, p. 49-58, 2005.

NASCIMENTO, N. R.; FRITSCH, E.; BUENO, G. T.; BARDY, M.; GRIMALDI, C.; MELFI, A. J. Podzolization as a deferralitisation process: dynamics and chemistry of ground and surface waters in an Acrisol–Podzol sequence of the upper Amazon Basin. *European Journal of Soil Science*, v. 59, p. 911-924, 2008.

NASCIMENTO, N. R.; BUENO, G. T.; FRITSCH, E.; HERBILLON, A. J.; ALLARD, T.; MELFI, A. J.; ASTOLFO, R.; BOUCHET, H.; LI, Y. Podzolization as a deferralitization process: a study of an Acrisol-Podzol sequence derived from Paleozoic sandstones in the northern upper Amazon Basin. *European Journal of Soil Science*, UK, v. 55, n. 3, p. 523-538, 2004.

PANDOLFO, C. Bauxita, caulins e argilas na Amazônia. *Cerâmica*, São Paulo, v. 25, p. 1-15, 1979.

PATEL-SORRENTINO, N.; LUCAS, Y.; EYROLLE, F.; MELFI, A. J. Fe, Al and Si species and organic matter leached off a ferrallitic and podzolic soil system from Central Amazonia. *Geoderma*, v. 137, p. 444-454, 2007.

RIGHI, D.; BRAVARD, S.; CHAUVEL, A.; RANGER, J.; ROBERT, M. In situ study of soil processes in an Oxisol-Spodosol sequence of Amazonia (Brazil). *Soil Science*, v. 150, n. 1, 438-445, 1990.

ROSSETI, D. F.; SANTOS JUNIOR., A. E. A. Analysing the origin of the Upper Cretaceous-? Lower Tertiary Rio Capim semi flint (Pará State, Brazil) under a sedimentologic perspective. *Sedimentary Geology*, S.l., v. 186, p. 133-144, 2006.

SANTOS JUNIOR., A. E. A.; ROSSETTI, D. F. Paleoambiente e estratigrafia da Formação Ipixuna, Área do Rio Capim, Leste da bacia de Cametá. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 33, p. 313-324, 2003.

SANTOS JUNIOR., A. E. A.; ROSSETTI, D. F. Depositional model of the Ipixuna Formation (late cretaceous? early tertiary), Rio Capim area, northern Brazil. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, v. 13, p. 65-87, 2006.

SANTOS JUNIOR., A. E. A.; ROSSETTI, D. F. Origin of the Rio Capim Kaolin based on optical (petrographic and SEM) data. *Journal of South American Earth Sciences*, v.26, p. 329-341, 2008.

SANTOS, J. O. S; HARTMANN, L. A.; GAUDETTE, H. E.; GROVES, D. I.; Mc NAUGHTON, N. J.; FLETCHER, I. R. A new understanding of the provinces of the Amazon Craton based on integration of field mapping and U-Pb and Sm-Nd geochronology. *Gondwana Research*, v. 3, n. 4, p. 453-488, 2000.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. 5. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100p.

SCHEINOST, A. C.; CHAVERNAS, A.; BARRÓN, V.; TORRENT, J. Use and limitations of second-derivative diffuse reflectance spectroscopy in the visible to near-infrared range to identify and quantify Fe oxide minerals in soils. *Clays and Clay Minerals*, v. 46, n. 5, p. 528-536, 1998.

SCHWARTZ, D. Some Podzols on Bateke Sands and their Origins, People's Republic of Congo. *Geoderma*, v. 43, p. 229-247, 1988.

SCOTT, A. J.; KNOTT, M. A Cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. *Biometrics*, v. 30, p. 507-512, 1974.

SILVA, F. C. F.; JESUS, R. M.; RIBEIRO, A. G. Vegetação. In: Projeto RADAM BRASIL. Folha SA.19 Içá. Rio de Janeiro: MME, 1977. p. 297-396. (Levantamento de Recursos Naturais, 14).

SOMBROEK, W. Amazon landforms and soils in relation to biological diversity. *Acta amazonica*, v. 30, n. 1, p. 81-100, 2000.

SOUSA, D. J. L.; VARAJÃO, A. F. D. C.; YVON, J. Geochemical evolution of the Capim River kaolin, Northern Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 88, p. 329-331, 2006.

STOOPS, G.; JONGERIUS, A. Proposal for a micromorphological classification in soil materials: I. A classification of the related distributions of coarse and fine particles. *Geoderma*, Amsterdam, v. 13, p. 189-200, 1975.

SUSZCZYNSKI, E. F. Os recursos minerais e potenciais do Brasil e sua metalogenia. 1. ed. Livraria Interciências: Rio de Janeiro, 1975. 533 p.

TARDY, Y.; BOCQUIER, G.; PAQUET, H.; MILLOT, G. Formation of clay from granite and its distribution in Relation to climate and topography. *Geoderma*, Amsterdam, v. 10, p. 271-284, 1973.

TASSINARI, C. C. G.; MACAMBIRA, M. J. B. Geochronological Provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, v. 22, n. 3, p. 174-182, 1999.

TASSINARI, C. C. G.; CORDANI, U. G.; NUTMAN, A. P.; Van SCHMUS, W. R.; BETTENCOURT, J. S.; TAYLOR, P. N. Geochronological systematics on basement rocks from the Rio Negro–Juruena Province (Amazonian Craton), and tectonic implications. *International Geology Review*, v. 38, n. 2, p. 1161-175, 1996.

THOMAS, M.; THORP, M.; McALISTER, J. Equatorial weathering, landform development and the formation of white sands in north western Kalimantan, Indonesia. *Catena*, v. 36, p. 205–232, 1999.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. United States Department of the Interior. Mineral Commodity Summaries 2008. Washington, United States Government Printing Office, 2008. 199 p. Disponível em:

<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2008/mcs2008.pdfhttp://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2007/mcs2007.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2009.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. United States Department of the Interior. Mineral Commodity Summaries 2009. Washington, United States Government Printing Office, 2009. 195 p. Disponível em: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2009/mcs2009.pdfhttp://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2007/mcs2007.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2009.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. United States Department of the Interior. Mineral Commodity Summaries 2010. Washington, United States Government Printing Office, 2010. 193 p. Disponível em: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2010/mcs2010.pdfhttp://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=68&IDPagina=789>. Acesso em: 3 mar. 2010.

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).

van GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

VEILLON, L. *Sols ferrallitiques et podzols en Guyane septentrionale*. 1990. 191 f. Thèse (Doctorat), Université de Paris VI, Paris. 1990.

VEILLON, L.; SORIA-SOLANO, B. Transition sol ferralitique-podzol: cas d'une terrase sedimentaire de l'Ucayali (Pérou). *Cahiers ORSTOM, Séries Pédologie*, Bondy, v. 24, n. 2, p. 97-113, 1988.

VIEIRA-COELHO, A. C.; SOUZA SANTOS, P. Study of the structural order degree of Brazilian kaolinites by X-ray diffraction. *Proceedings of the International Clay Conference*. Amsterdam: Elsevier, 2001. p. 347-354.

WILSON, I. R.; SOUZA SANTOS, H.; SOUZA SANTOS, P. Kaolin and halloysite deposits of Brazil. *Clay minerals*, v. 41, p. 697-716, 2006.

Parte 2 Característica cristalográfica das caulinitas do caulim de São Gabriel da Cachoeira

2.1. Revisão bibliográfica

2.1.1. Grau de ordem estrutural da caulinita

A caulinita é estruturalmente constituída por um empilhamento regular de camadas 1:1, na direção do eixo cristalográfico *c*, sendo uma folha tetraédrica de silício e oxigênio e outra octaédrica de alumínio, oxigênio e hidroxilas. Essas folhas são contínuas nas direções dos eixos cristalográficos *a* e *b* e formam cristais triclínicos. A fórmula estrutural da caulinita é $Si_4Al_4O_{10}(OH)_8$ e sua composição em óxidos é SiO_2 (46,54%), Al_2O_3 (39,5%) e H_2O (13,96%) (MINERAL DATA).

As caulinitas naturais podem apresentar diversos graus de desordem estrutural, causada por condições geológicas como formação, transporte, deposição e tratamento mecânico. Entende-se como desordem estrutural a presença de qualquer tipo de defeito que interrompa a perfeita repetição da estrutura cristalina nos três eixos cristalográficos (CASES et al., 1982; BRINDLEY et al., 1986; PLANÇON; GIESE; SNYDER, 1988).

Brindley (1946 apud CASES, 1982) e Murray (1954) desenvolveram os primeiros modelos com a finalidade de estudar defeitos de empilhamento causados por translação ($\pm b/3$) e por rotação ($\pm 2\pi/3$), respectivamente. Posteriormente, Plançon e Tchoubar (1977a,b)

e Tchoubar et al. (1982) afirmaram que os principais tipos de defeitos teriam relação com (i) a mudança da posição octaédrica vacante de uma camada para outra e com (ii) as translações aleatória.

Caulinitas perfeitamente ordenadas apresentam curvas de difração de raios-X com reflexões bem definidas e individualizadas. Enquanto, caulinitas desordenadas, com defeitos estruturais, apresentam curvas de difração menos definidas com certas reflexões alargadas e enfraquecidas (CASES et al., 1982).

A ordem estrutural de uma caulinita tem grande importância nos estudos genéticos, além de ser um parâmetro altamente relevante para a aplicação industrial do caulim, pois o grau de ordem estrutural está relacionado às propriedades tecnológicas como plasticidade, brilho e viscosidade (MURRAY; LYONS, 1955; TCHOUBAR et al., 1982; BRINDLEY et al., 1986; GONZÁLEZ; APARICIO; GALÁN, 1997; GALÁN et al., 1977 apud APARICIO et al., 2006).

Há uma extensa literatura relacionada ao estudo desses defeitos estruturais, baseada nos padrões de difração de raios-X como posição e amplitude dos picos e suas intensidades. Nestes estudos são propostos métodos experimentais que permitem avaliar a ordem estrutural de caulinitas a partir de uma abordagem qualitativa (métodos de Hinckley, Stoch, Aparicio-Galán-Ferrell, R2 de Lièтard, Amigó, Hughes-Brown) e quantitativa (Plançon-Zacharie).

Na presente revisão, os métodos para o estudo do grau de ordem estrutural das caulinitas, mais conhecidos e estudados, utilizados neste trabalho de pesquisa, serão apresentados.

2.1.2. Índice de Hinckley

Dentre os procedimentos empregados na identificação de determinados defeitos nos planos cristalográficos das caulinitas, o índice de Hinckley é um dos mais comumente utilizados, em razão de sua fácil aplicação e de necessitar uma varredura de pequena amplitude (de 20º até 23º 2θ) (HINCKLEY, 1962; CASES et al., 1982; PLANÇON; GIESE; SNYDER, 1988; PLANÇON; ZACHARIE, 1990; GONZÁLEZ; APARICIO; GALÁN, 1997; APARICIO; GALÁN, 1999). Por outro lado, esse índice não é eficiente para distinguir se uma diferença no resultado de duas amostras de caulinita foi causada em virtude de uma real alteração na ordem estrutural de ambas ou simplesmente em razão da proporção dos diversos tipos de caulinita presentes em uma mistura e, além disso, não quantifica os defeitos (PLANÇON; GIESE; SNYDER, 1988; PLANÇON et al., 1989; PLANÇON; ZACHARIE, 1990). Esse índice é especialmente sensível aos defeitos relativos às translações aleatórias de $\pm nb/3$ entre camadas adjacentes, ao longo do eixo cristalográfico b.

Trata-se de uma aproximação qualitativa que deriva de um parâmetro numérico baseado em medidas das intensidades relativas de certos picos de Bragg e o *background* adjacente (PLANÇON; ZACHARIE, 1990). O índice de Hinckley é calculado a partir da Equação 2.1, onde a soma da altura dos picos $1\bar{1}0$ (4,37 Å) (A na Figura 2.1) e $11\bar{1}$ (4,19 Å) (B na Figura 2.1) é dividida pela altura entre a extremidade superior do pico $1\bar{1}0$ (4,37 Å) e o *background* geral (At na Figura 2.1) (HINCKLEY, 1962; PLANÇON; GIESE; SNYDER, 1988; GONZÁLEZ; APARICIO; GALÁN, 1997; FRANCO; PÉREZ-MAQUEDA; PÉREZ-RODRÍGUEZ, 2004).

Assim uma caulinita com alto grau de ordem estrutural apresenta picos $1\bar{1}0$ e $11\bar{1}$ bem definidos, principalmente devido à diminuição das translações aleatórias de $\pm\, nb/3$ entre camadas adjacentes no eixo cristalográfico *b*. A boa resolução do pico $1\bar{1}0$ na curva de difração leva ao aumento do sinal formado entre este e o pico 020, o que resulta no aumento das alturas (A e B na Figura 2.1) dos picos $1\bar{1}0$ e $11\bar{1}$ e, consequentemente, da sua soma. Simultaneamente, proporciona um aumento na medida da intensidade absoluta do pico $1\bar{1}0$ (At na Figura 2.1). Como consequência, o valor do índice de Hinckley resultante será maior (PLANÇON; GIESE; SNYDER, 1988). De acordo com Hinckley (1962) valor do índice varia de 0,2 (caulinitas menos ordenadas) até 1,5 (caulinitas mais ordenadas).

$$\text{Índice de Hinckley} = \frac{\text{A} + \text{B}}{\text{At}} \qquad \text{Equação 2.1}$$

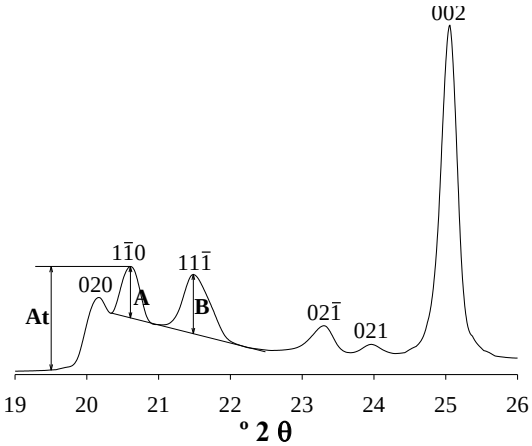

Figura 2.1 - Difratograma de raios-X ilustrando os parâmetros a serem medidos para o cálculo do índice de Hinckley.

O índice de Hinckley é muito sensível à presença de quartzo, goethita e gibbsita uma vez que os picos 101 (4,26 Å) do quartzo, 110 (4,18 Å) da goethita e 110 (4,37 Å) da gibbsita podem afetar a intensidade dos picos $1\bar{1}0$ (4,37 Å) e $11\bar{1}$ (4,19 Å) da caulinita e, por isso, a

utilização do índice de Hinckley em amostras que contenham esses minerais não é apropriada (HINCKLEY, 1962; GALÁN et al.; 1994; APARICIO; GALÁN, 1999).

2.1.3. Índice de Stoch

A utilização do método experimental de Stoch, da mesma forma que o método de Hinckley, requer uma varredura de pequena amplitude (de 20º até 23º 2θ) e sua aplicação é simples. Pode ser usado na presença de quartzo, feldspato e fases amorfas de ferro e silício, porém não é recomendada sua utilização na presença de outros filossilicatos (GALÁN et al., 1994; APARICIO; GALÁN, 1999). Este índice é sensível aos mesmos defeitos medidos por Hinckley com a vantagem de ser menos sensível a presença do quartzo (GALÁN et al., 1994).

A Equação 2.2 mostra que o índice de Stoch é calculado a partir da razão entre a altura dos picos 020 (4,48 Å) (A na Figura 2.2) e $1\bar{1}0$ (4,37 Å) (B na Figura 2.2) (GALÁN et al., 1994; APARICIO; GALÁN, 1999; APARICIO et al., 2004).

$$\text{Índice de Stoch} = \frac{A}{B} \qquad \text{Equação 2.2}$$

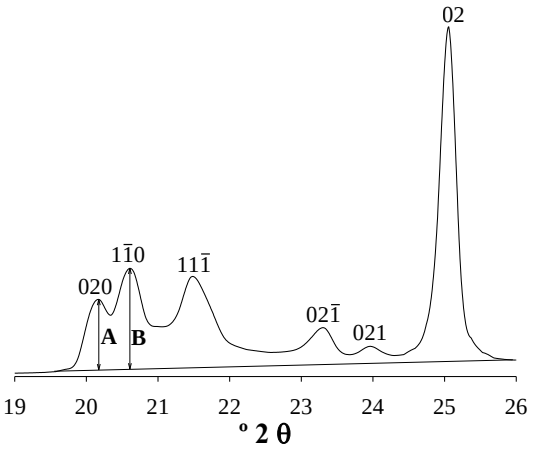

Figura 2.2 - Difratograma de raios-X ilustrando os parâmetros a serem medidos para o cálculo do índice de Stoch.

Os valores para este índice variam de >1,0 (caulinitas desordenadas) a <0,7 (caulinitas ordenadas) (APARICIO; GALÁN, 1999).

2.1.4. Índice de Aparicio-Galán-Ferrell

A utilização desse método experimental, assim como nos métodos de Hinckley e de Stoch, requer uma varredura de pequena amplitude (de 20º até 23º 2θ) e é sensível aos defeitos relativos às translações aleatórias entre as camadas de $\pm nb/3$ ao longo do eixo cristalográfico b (GALÁN et al., 1994; APARICIO; GALÁN, 1999). O índice Aparicio-Galán-Ferrell é menos influenciado pela associação de fases minerais e amorfas do que os índices de

Hinckley e Stoch, uma vez que decompõe os picos sobrepostos com a utilização de um programa de deconvolução de curvas de difração de raios-X, que permite ajustar a forma do pico através da função simétrica de Pearson VII (APARICIO et al., 2004; APARICIO, GALÁN, FERRELL, 2006).

O índice de Aparicio-Galán-Ferrell é calculado pela Equação 2.3, onde a soma da altura dos picos $1\bar{1}0$ (4,37 Å) (I_A na Figura 2.3) e $11\bar{1}$ (4,19 Å) ($I_B$na Figura 2.3) é dividida pela altura do pico 020 (4,48 Å) multiplicada por dois ($2I_C$ na Figura 2.3) (APARICIO et al., 2004; APARICIO; GALÁN; FERRELL, 2006).

$$\text{Índice de Aparicio} - \text{Galán} - \text{Ferrel} = \frac{I_A + I_B}{2I_C} \qquad \text{Equação 2.3}$$

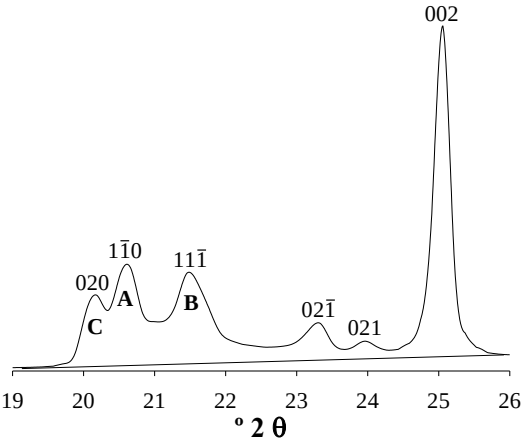

Figura 2.3 - Difratograma de raios-X ilustrando os parâmetros a serem medidos para o cálculo do índice de Aparicio-Galán-Ferrell.

Valores inferiores a 0,90 e entre 1,25 e 1,6 representariam, respectivamente, caulinitas com baixo e alto grau de ordem estrutural (APARICIO; GALÁN; FERRELL, 2006).

2.1.5. Índice R2 de Lièтard

Este índice é sensível somente aos pequenos defeitos aleatórios nos planos cristalográficos $\vec{a}$ e $\vec{b}$, por isso pode ser considerado complementar ao índice de Hinckley. (CASES et al., 1982; GALÁN et al., 1994; GONZÁLEZ; APARICIO; GALÁN, 1997). Assim como no índice de Hinckley, o índice de Lièтard é calculado a partir de uma equação simples (Equação 2.4) e requer uma varredura de pequena amplitude de 37º até 40º 2 θ, que corresponde à região onde são observados os picos $1\bar{3}1$ (2,34 Å) e 131 (2,29 Å). As deficiências do índice R2 de Lièтard também são similares ao índice de Hinckley, pois não é sensível a todos os tipos de defeitos e também é afetado pela presença do quartzo, cujo pico 102 (2,28 Å) está próximo ao

pico 131 da caulinita (CASES et al., 1982; GALÁN et al., 1994; GONZÁLEZ; APARICIO; GALÁN, 1997).

Os pequenos defeitos aleatórios nos planos cristalográficos $\vec{a}$ e $\vec{b}$ são avaliados a partir da Equação 2.4, onde K1 e K2 indicam a altura dos picos 131 e $1\bar{3}1$, respectivamente, e k indica a altura do background entre os picos 131 e $1\bar{3}1$ (Figura 2.4) (CASES et al., 1982; GONZÁLEZ; APARICIO; GALÁN, 1997; FRANCO; PÉREZ-MAQUEDA; PÉREZ-RODRÍGUEZ, 2004).

$$\text{Índice R2 de Lièrard} = \frac{1/2(\text{K1} + \text{K2}) - \text{k}}{1/3\,(\text{K1} + \text{K2} + \text{k})} \qquad \text{Equação 2.4}$$

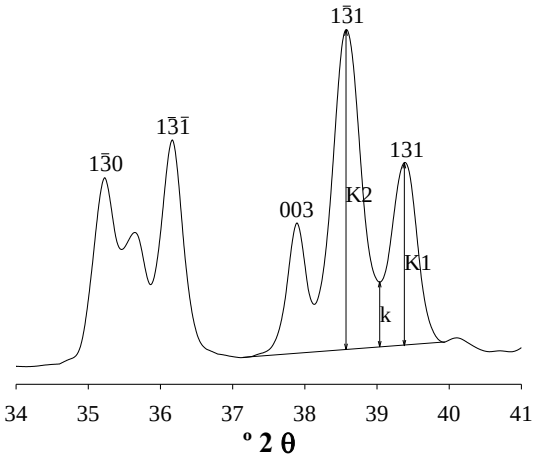

Figura 2.4 - Difratograma de raios-X ilustrando os parâmetros a serem medidos para o cálculo do índice R2 de Lièrard.

Os valores >1,2 e <0,7 representariam, de acordo com o índice R2 de Lièrard, caulinitas ordenadas e desordenadas, respectivamente (APARICIO; GALÁN; FERRELL, 2006).

2.1.6. Índice de Amigó

O uso da medida da largura à meia altura do pico 001 (7,17 Å) foi amplamente utilizado em estudos relativos às condições de formação, à diagênese e ao baixo grau de metamorfismo (KUBLER, 1964, 1968; DUNOYER de SEGONZAC et al., 1968; WEBER, 1972, WEBER et al., 1976) em ilitas. Eberl et al. (1987) aplicaram esse método nas relações entre estrutura, composição e origem de sericitas. Amigó et al. (1987 apud APARICIO; GALÁN, 1999) e Amigó et al. (1994) propuseram o uso da medida da largura à meia altura dos picos 001 e 002 como parâmetros de avaliação do grau de ordem estrutural de caulinitas (Figura 2.5).

Os métodos apresentados nos itens anteriores são sensíveis aos defeitos relacionados aos eixos a e b, que refletem na extensão do domínio coerente dos empilhamentos ao longo do

eixo c. A fórmula de Scherrer (KLUG; ALEXANDER, 1954) tem sido aplicada aos picos 001 (7,17 Å) e 002 (3,58 Å) com a finalidade de obter informações mais diretas a respeito da ordem ao longo desse eixo. Através dessa fórmula, que utiliza a largura à meia altura do pico, é possível estimar a extensão do domínio coerente dos empilhamentos ao longo do eixo c. Quanto maior a extensão desse empilhamento menor será o valor resultante do índice de Amigó. Assim valores inferiores a 0,3 indicarão caulinitas melhor ordenadas e valores acima de 0,4 para caulinitas menos ordenadas (AMIGÓ et al., 1987 apud APARICIO; GALÁN, 1999; AMIGÓ et al., 1994; VIEIRA-COELHO; MONTES; VALERA, 2000).

Diferentemente dos demais métodos, este pode ser aplicado em difratogramas de amostras orientadas e seu tratamento pode ser feito com a utilização de um programa de deconvolução de curvas de difração de raios-X. Uma limitação deste índice é ser sensível a presença de anatásio que tem o pico mais intenso próximo ao pico 002 da caulinita.

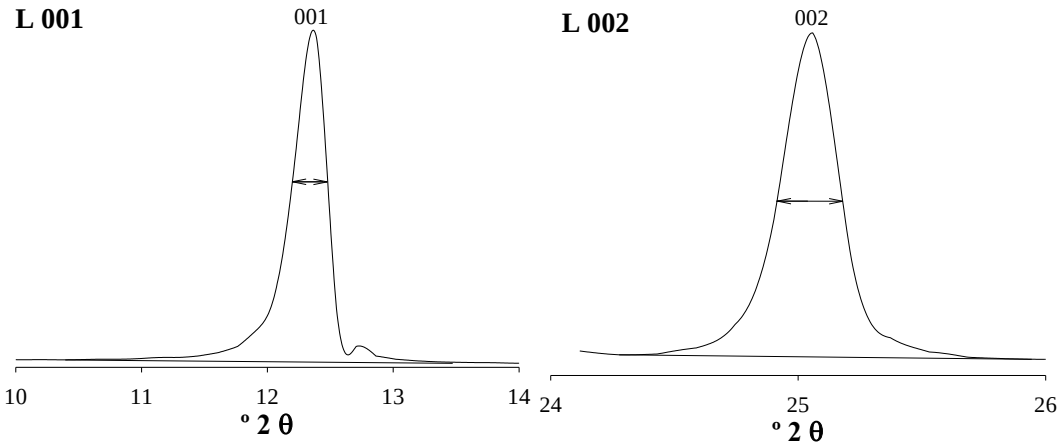

Figura 2.5 - Difratogramas de raios-X ilustrando os parâmetros a serem medidos para o cálculo dos índices de Amigó (L001 e L002).

2.1.7. Índice de Hughes-Brown

Dentre os métodos experimentais aplicados neste trabalho, o de Hughes-Brown é o único definido especificamente para o estudo do grau de ordem estrutural da caulinita presente em solos (HUGHES; BROWN, 1979). Os autores salientam que para caulinitas de solos a aplicação de índices que utilizam os picos $1\bar{1}0$, $1\bar{1}1$ e $02\bar{1}$ são, em geral, inviáveis, pois estas caulinitas exibem alta desordem estrutural e estes picos podem estar ausentes ou apresentar intensidades muito baixas para que as medidas sejam confiáveis. Desta forma, os autores propõem para o cálculo de seu índice utilizar regiões do difratograma onde, mesmo em caulinitas com baixo grau de ordem estrutural, os parâmetros necessários para sua determinação poderiam ser medidos com segurança.

O cálculo do índice de Hughes-Brown é efetuado a partir da Equação 2.5, onde a altura do pico 020 (4,48 Å) (h1 na Figura 2.6) é multiplicada por uma constante igual a 1,93 e dividida pela distância entre o sinal formado pelos picos $1\bar{3}\bar{1}$ (2,50 Å) e 003 (2,39 Å) e a linha do *background* (h2 na Figura 2.7) (HUGHES; BROWN, 1979; GALÁN et al., 1994; APARICIO; GALÁN, 1999).

$$\text{Índice de Hughes} - \text{Brown} = \frac{1{,}93\ \text{h1}}{\text{h2}} \qquad \text{Equação 2.5}$$

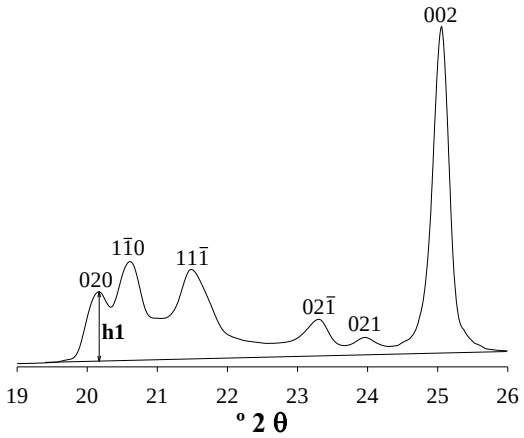

Figura 2.6 - Difratograma de raios-X ilustrando os parâmetros a serem medidos para o cálculo do índice de Hughes-Brown para o intervalo 19 a 26 º 2θ.

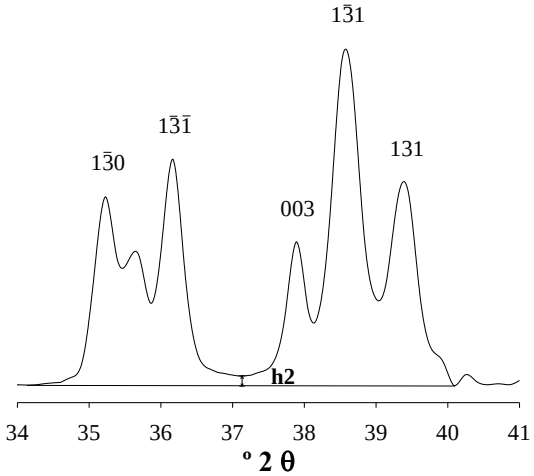

Figura 2.7 - Difratograma de raios-X ilustrando os parâmetros a serem medidos para o cálculo do índice de Hughes-Brown para o intervalo 37 a 40 º 2θ.

Estudos visando avaliar a reprodutibilidade desse método, contrariando seus autores, não recomendam sua utilização em solos onde há grande quantidade de gel de ferro e de alumina devido a sua grande sensibilidade a interferência (GALÁN et al., 1994; APARICIO; GALÁN, 1999).

Para este índice não existe um limite preciso de valores estabelecido pelos autores para separar caulinitas bem ordenadas daquelas com maiores defeitos. Entretanto, a partir dos resultados apresentados por Hughes, Brown (1979), é possível propor que valores >20 e <10 representariam as caulinitas com alta e baixa ordem estrutural, respectivamente. Estes valores serão utilizados nas comparações dos resultados obtidos no presente trabalho.

2.1.8. Índice de Plançon-Zacharie

O método de Plançon-Zacharie permite a realização de uma análise quantitativa dos defeitos estruturais, por meio de onze parâmetros que abrangem, nos eixos cristalográficos $\vec{a}$ e $\vec{b}$, as regiões compreendidas entre os picos $1\bar{1}0$ e $11\bar{1}$ e entre os picos $1\bar{3}1$ e 131 (37º e 40º 2θ), que correspondem às regiões analisadas por Hinckley e Lièrtard, respectivamente (GALÁN et al., 1994; PLANÇON; ZACHARIE, 1990). De acordo com Plançon, Zacharie (1990), os onze parâmetros representados nas Figuras 2.8 e 2.9 podem ser divididos em dois intervalos:

Intervalo 19 a 26 º 2θ (Figura 2.8) onde: m1 = altura do pico $1\bar{1}0$; m2 = intensidade do pico $1\bar{1}0$; m3 = intensidade $11\bar{1}$;m4 = distância entre os picos 020 e 002; m5 = distância entre os picos $1\bar{1}0$ e $02\bar{1}$; m6 = altura do *background* entre os picos $1\bar{1}0$ e $11\bar{1}$; m7 = largura à meia altura (HWHM) do pico 002.

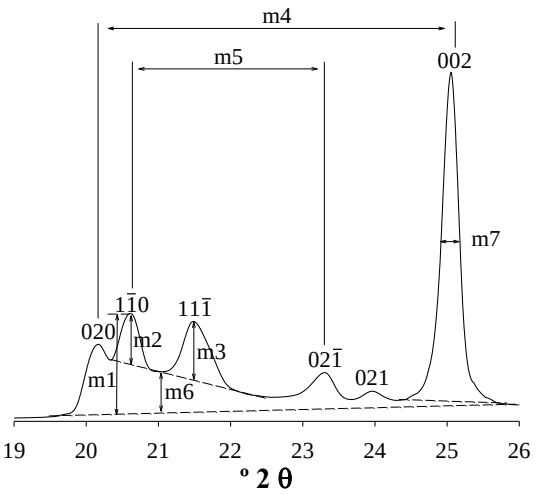

Figura 2.8 - Difratograma de raios-X ilustrando os parâmetros a serem medidos para o cálculo do índice de Plançon-Zacharie para o intervalo 19 a 26 º 2θ.

Intervalo 37 a 40 º 2θ (Figura 2.9) onde: m8 = distância entre os picos $1\bar{3}1$ e 131; m9 = altura do pico $1\bar{3}1$; m10 = altura do *background* entre os picos $1\bar{3}1$ e 131; m11 = intensidade do pico 131.

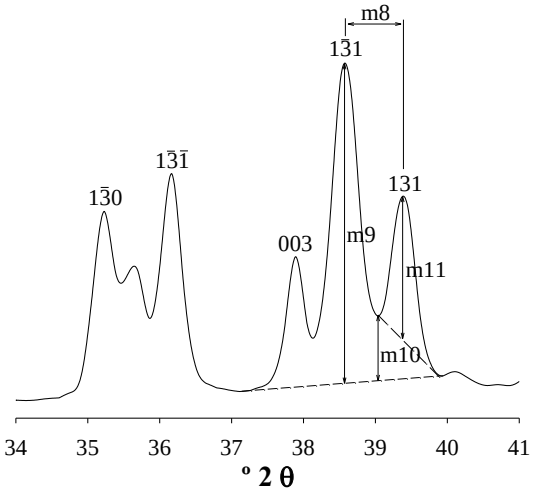

Figura 2.9 - Difratograma de raios-X ilustrando os parâmetros a serem medidos para o cálculo do índice de Plançon-Zacharie para o intervalo 37 a 40 º 2θ.

A partir dos onze parâmetros medidos e utilizando um *software* desenvolvido pelos autores (PLANÇON; ZACHARIE, 1990), obtém-se as informações estruturais para as caulinitas. O primeiro parâmetro estrutural a ser obtido é o número de diferentes fases (monofásico ou bifásico) na amostra, pois este determinará o passo seguinte da análise. Para um sistema bifásico, o índice de Plançon-Zacharie estabelece o parâmetro % ldp, que fornece a porcentagem da fase com menor quantidade de defeitos e resulta da razão entre a intensidade do pico 1$\bar{1}$0 e o *background* (m2 e m6, respectivamente) (Figura 2.8). Quanto maior o valor de % ldp, melhor será a ordem estrutural da caulinita.

Para um sistema monofásico o método determina os seguintes parâmetros: (i) proporção de camadas com posições octaédricas vacantes do tipo C (Wc), que depende diretamente da diminuição da distância entre os picos 1$\bar{3}$1 e 131 (m8); (ii) proporção de pequenas translações entre camadas (δ), calculada a partir da razão entre a intensidade do pico 131 (m11) e a altura do pico 1$\bar{3}$1 (m9) que pode ser relacionada com a diminuição do pico 131 em relação ao 1$\bar{3}$1; (iii) proporção de grandes defeitos de translação entre camadas adjacentes (p), cuja determinação está baseada na mudança na razão (m2+m3)/m1, que corresponde as medidas efetuadas por Hinckley (1962); e (iv) número de camadas (M), que está diretamente relacionada à largura à meia altura (HWHM) do pico 002 (APARICIO; GALÁN, 1999; GALÁN et al., 1994; PLANÇON; ZACHARIE, 1990).

A principal limitação ao emprego do índice de Plançon-Zacharie está na maior complexidade de utilização quando comparado aos demais índices, além da baixa reprodutibilidade em caulinitas com médio grau de ordem estrutural, porque a presença da fase ordenada é dificilmente detectada (PLANÇON; ZACHARIE, 1990). A principal vantagem desse índice e

o que o difere dos demais, está no fato de considerar os diferentes tipos de defeitos. Além disso, fornece informações de caráter quantitativo enquanto os demais índices fornecem informações apenas qualitativas, baseadas em números que permitem classificar as amostras segundo os graus de ordem estrutural (VIEIRA-COELHO; MONTES; VALERA, 2000).

2.1.9. Análise Térmica - temperatura de desidroxilação da caulinita e nucleação da mulita

A caulinita quando submetida a ciclo de aquecimento sofre transformações térmicas que se iniciam com sua desidroxilação e terminam com a formação da mulita. A desidroxilação da caulinita ocorre por meio de reações endotérmicas entre as temperaturas de 450 e 600º C. Estes valores de temperatura variam, principalmente, em razão do tamanho de partícula e da ordem estrutural das caulinitas. De maneira geral, para caulinitas com boa ordem estrutural apresentam temperatura de desidroxilação superiores a 530 º C (GRIM, 1942 a, b; SMYKATZ-KLOSS, 1974; SOUSA SANTOS, 1989). Os valores da temperatura de nucleação da mulita (entre 970 e 980º C) também estão, portanto, relacionada ao ordenamento estrutural. Em caulinitas com baixo grau de ordem estrutural este valor ocorre por volta de 975º C.

2.2. Materiais e métodos

Os ensaios mineralógicos para determinação do grau de ordem estrutural foram obtidos mediante emprego de tratamento dos dados de difração de raios X (DRX) e, adicionalmente, a partir dos resultados obtidos da análise térmica diferencial e gravimétrica, realizados no Laboratório de Mineralogia do Nupegel, USP.

2.2.1. Pré-tratamento e separação das frações granulométricas

Amostra bruta: A TFSA (amostra bruta) dos perfis, sem pré-tratamento, foi moída em almofariz de ágata e passada em peneira com malha de 0,106 mm.

Fração argila sem matéria orgânica: A amostra de TFSA recebeu um tratamento prévio com peróxido de hidrogênio (H_2O_2) para a remoção de matéria orgânica. Livre de matéria orgânica, a TFSA foi passada por peneira de malha 0,053 mm para a separação da fração areia, tendo como resultado amostra constituída pelas frações silte e argila. Em seguida, adicionou-se à amostra NaOH 0,02 mol L^{-1} como agente dispersante a fim de separar a fração inferior a 0,002 mm. Dessa separação feita por centrifugação a 700 rpm separou-se a fração argila livre de matéria orgânica.

2.2.2. Difração de raios X

As análises foram realizadas em difratômetro Philips PW 1877 operado em potencial de 40 kV, corrente de 40 mA, com uso de monocromador para eliminação da radiação Kβ, e fonte de Cu (radiação Kα, λ=1,54186 Å). A varredura foi realizada com passo de 0,02° (2θ) e tempo de acumulação de 10 segundos por passo.

Os ensaios para a determinação do grau de ordem estrutural da caulinita foram realizados tanto em amostras brutas como em amostras da fração argila livre de matéria orgânica, ambas pulverizadas, sendo a primeira moída em almofariz de ágata e passada por peneira com malha de 0,106 mm. As amostras foram acondicionadas em porta-amostra procurando mini-

mizar a orientação preferencial dos cristais e analisadas nos intervalos de 8° a 16°, 18° a 26° e 31° a 44° (2θ).

2.2.2.1. Métodos utilizados para avaliação do grau de ordem estrutural

A avaliação do grau de ordem estrutural da caulinita foi realizada a partir dos cálculos dos seguintes métodos: a) Hinckley, b) R2-Lièrtard, c) Amigó, d) Stoch, e) Hughes-Brown, f) Aparicio-Galán-Ferrell, g) Plançon-Zacharie.

Os limites das classes de grau de ordem estrutural dos métodos de Hinckley, R2-Lièrtard e Stoch, mostrados na Tabela 2.1, foram assumidos como sendo os mesmos definidos por Aparicio, Galán e Ferrell (2006), enquanto os limites do método de Amigó (picos 001 e 002) foram aqueles empregados por Aparicio e Galán (1999). Para o índice de Hughes-Brown, os limites foram extraídos dos resultados apresentados por HUGHES; BROWN (1979), conforme informado anteriormente .

Tabela 2.1 - Classes de grau de ordem estrutural da caulinita para os seguintes métodos: Hinckley, R2-Lièrtard, Stoch, Hughes-Brown, Aparicio-Galán-Ferrell e Amigó.

Grau de ordem estrutural	Métodos						
	Hinckley	R2-Lièrtard	Stoch	Hughes-Brown	Aparicio-Galán-Ferrell	Amigó 001	Amigó 002
Alto	0,90 - 1,15	> 1,20	< 0,70	>20	1,25 - 1,60	< 0,3	< 0,3
Moderado	0,50- 0,90	0,70 - 1,20	0,70 - 1,00	10-20	0,90 - 1,25		
Baixo	< 0,50	< 0,70	> 1,00	<10	< 0,90	> 0,4	> 0,4

2.2.2.2. Testes preliminares

Previamente à realização das análises ao difratômetro de raios-X a fim de estudar o grau de ordem estrutural das caulinitas, foram realizados testes experimentais com o objetivo de avaliar se havia diferença nos resultados do grau de ordem estrutural quando calculados a partir de difratogramas obtidos de difratômetro desprovido de estágio para rotação de amostras, utilizado para minimizar o efeito de orientação preferencial dos cristais de caulinita. Para isso, as amostras foram analisadas em dois difratômetros, sendo um equipado com o estágio de rotação de amostras (Laboratório LMPsol EP/USP). Com base nos testes, constatou-se que não havia diferença entre os resultados obtidos para o grau de ordem estrutural e, por isso, optou-se por utilizar o difratômetro do Nupegel, sem estágio de rotação.

Inicialmente, foram realizados ensaios de cristalinidade apenas em amostras brutas pulverizadas. Notou-se, entretanto, dois fatores limitantes: o quartzo e o anatásio. A interfe-

rência do quartzo, sobretudo nas amostras mais arenosas, inviabilizaria o cálculo ou alteraria o resultado dos métodos de Hinckley, de R2-Lièrtard, de Stoch e de Plançon-Zacharie e, como consequência, prejudicaria o estudo do grau de ordem estrutural da caulinita em todo o perfil, como, por exemplo, no P1 (Espodossolo Humilúvico). Os picos a 3,52 Å; 2,38 Å e 2,33 Å do anatásio, quando muito intensos, alterariam a intensidade dos picos 002 (3,58 Å), 003 (2,39 Å) e $1\bar{3}1$ (2,34 Å) da caulinita e, como consequência, poderiam distorcer o resultado dos métodos de R2-Lièrtard, Amigó (001) e de Plançon-Zacharie. Foram realizados, portanto, os ensaios com a fração argila. Verifcou-se que as amostras da fração argila e da amostra bruta apresentaram classes de grau de ordem estrutural idênticos ou muito próximos, mostrando assim que a utilização da fração argila nos horizontes com maior quantidade de quartzo não influenciou na classificação da caulinita dos demais horizontes. Desta forma, para facilitar a apresentação dos resultados, utilizou-se para todos os horizontes e camadas os dados obtidos das amostras na fração argila.

2.2.2.3. Tratamento dos dados

Os programas Winfit (KRUMM, 1994) e Winplotr (ROISNEL; RODRÍGUEZ-CARVAJAL, 2001) foram utilizados com a finalidade de minimizar a influência do quartzo e de efetuar as medidas necessárias ao cálculo dos índices. A comparação entre os diferentes índices e alguns parâmetros selecionados foi feita pelo teste de Tukey (1 e 5%).

2.2.3. Análise térmica diferencial e gravimétrica

Visando complementar as informações a respeito da ordem estrutural das caulinitas com relação ao eixo cristalográfico *b*, analisou-se também as temperaturas de desidroxilação da caulinita e de nucleação da mulita que ocorrem por meio de reações endotérmicas e exotérmicas, respectivamente, medidas nos mesmos termogramas utilizados na identificação e semiquantificação dos minerais (item 1.3.3, Parte 1).

2.3. Resultados e Discussões

Dois fatores principais limitam a aplicação dos métodos para a determinação da ordem estrutural de caulinitas a partir dos dados de DRX: a porcentagem de caulinita na amostra e a presença de outros minerais, cujas reflexões possam interferir na resolução dos picos da caulinita. A partir de estudos detalhados chegou-se à conclusão que valores superiores à 20 % em peso de caulinita seriam recomendados para a utilização dos índices de Hinckley, Stoch, R2-Lièтard, Hughes-Brown, Amigó 001 e 002 e Plançon-Zacharie (APARICIO; GALÁN, 1999). Enquanto para o índice Aparicio-Galán-Ferrell, valores superiores a 10 % em peso já seriam adequados (APARICIO, GALÁN, FERRELL, 2006).

As fases minerais e amorfas que mais interferem nos cálculos do grau de ordem estrutural para os diferentes índices, que podem impedir por vezes sua aplicação, estão resumidas na Tabela 2.2 (APARICIO; GALÁN, 1999). Nesta tabela Sim representa que a interferência não é significativa; Não indica que a interferência é importante e, em alguns casos, impede o cálculo do índice; o valor em % e n>5 indicam, respectivamente, a quantidade da fase mineral para causar a interferência significativa e a necessidade de efetuar-se, no mínimo, cinco determinações para a confiabilidade dos resultados, em razão da variabilidade. Além disso, determinados índices somente podem ser usados em caulinitas com alto (A), médio (M) ou baixo (B) grau de ordem estrutural na presença das fases assinaladas.

Tabela 2.2 – Indicações para aplicação dos métodos de avaliação do grau de ordem estrutural de caulinita na presença de outras fases minerais e amorfas. Modificada de Aparicio e Galán (1999).

Métodos	Quartzo	Felds-pato	Sílica amorfa	Ferro amorfo	Ilita	Esmec-tita	Clorita	Haloisita
Amigó 001 e 002	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não
Stoch	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	B (1)	A (2)	Não
R2 de Lièrtard	Não	Não	Sim	Sim	M (3)	n > 5 (4)	Não	n > 5
Hinckley	Não	< 10 %	n > 5	n > 5	< 5 %	< 5 %	Não	Não
Hughes-Brown	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	M - B	B
Plançon-Zacharie	B	B	B	M - B	B	B	M - B	B

(1) B = caulinita com baixo grau de ordem estrutural, (2) A = caulinita com alto grau de ordem estrutural, (3) M = caulinita com médio grau de ordem estrutural, (4) n = número de análises por DRX na presença de fases minerais e amorfas.

Como consequência desses dois fatores limitantes não foi possível aplicar todos os índices em alguns horizontes.

Os resultados obtidos neste trabalho, como será evidenciado no decorrer deste capítulo, indicaram que os processos pedogenéticos influenciaram de forma considerável na aplicabilidade dos métodos de estudo do grau de ordem estrutural. Desta forma, para permitir uma discussão mais sintética, os resultados serão apresentados não para cada perfil individualmente, mas em conjunto, enfocando os processos ocorridos ao longo da topossequência (Figura 1.5, Item 1.3.1, Parte 1).

Quando os resultados obtidos a partir dos cálculos dos índices são analisados individualmente para os diferentes perfis (Tabela C 1, ANEXO C), verifica-se que, de maneira geral, existe uma tendência de diminuição da ordem estrutural da base para o topo dos perfis. Entretanto, quando todos os dados dos índices são observados em conjunto, verificam-se inconsistências nos resultados.

Nas Figuras 2.10, 2.11, 2.12 e 2.13 são apresentados, respectivamente, os resultados dos diferentes índices calculados para os perfis P1 (Espodossolo Humilúvico), P2 (Latossolo Amarelo), P3 (Latossolo Amarelo) e P4 (Gleissolo Háplico). Na Tabela 2.3 estão os resultados do índice de Plançon-Zacharie para esses perfis.

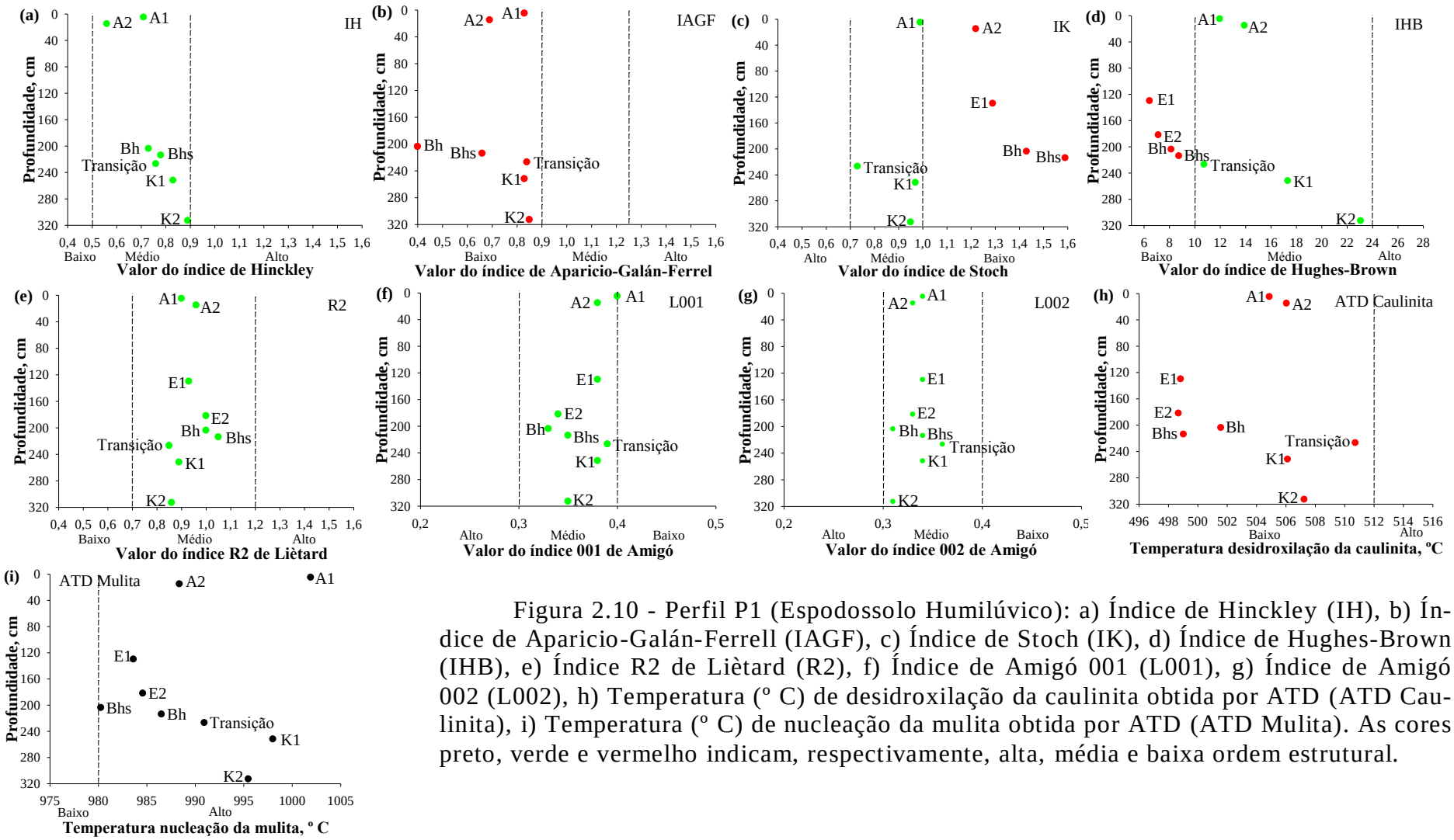

Figura 2.10 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico): a) Índice de Hinckley (IH), b) Índice de Aparicio-Galán-Ferrell (IAGF), c) Índice de Stoch (IK), d) Índice de Hughes-Brown (IHB), e) Índice R2 de Lièrtard (R2), f) Índice de Amigó 001 (L001), g) Índice de Amigó 002 (L002), h) Temperatura (º C) de desidroxilação da caulinita obtida por ATD (ATD Caulinita), i) Temperatura (º C) de nucleação da mulita obtida por ATD (ATD Mulita). As cores preto, verde e vermelho indicam, respectivamente, alta, média e baixa ordem estrutural.

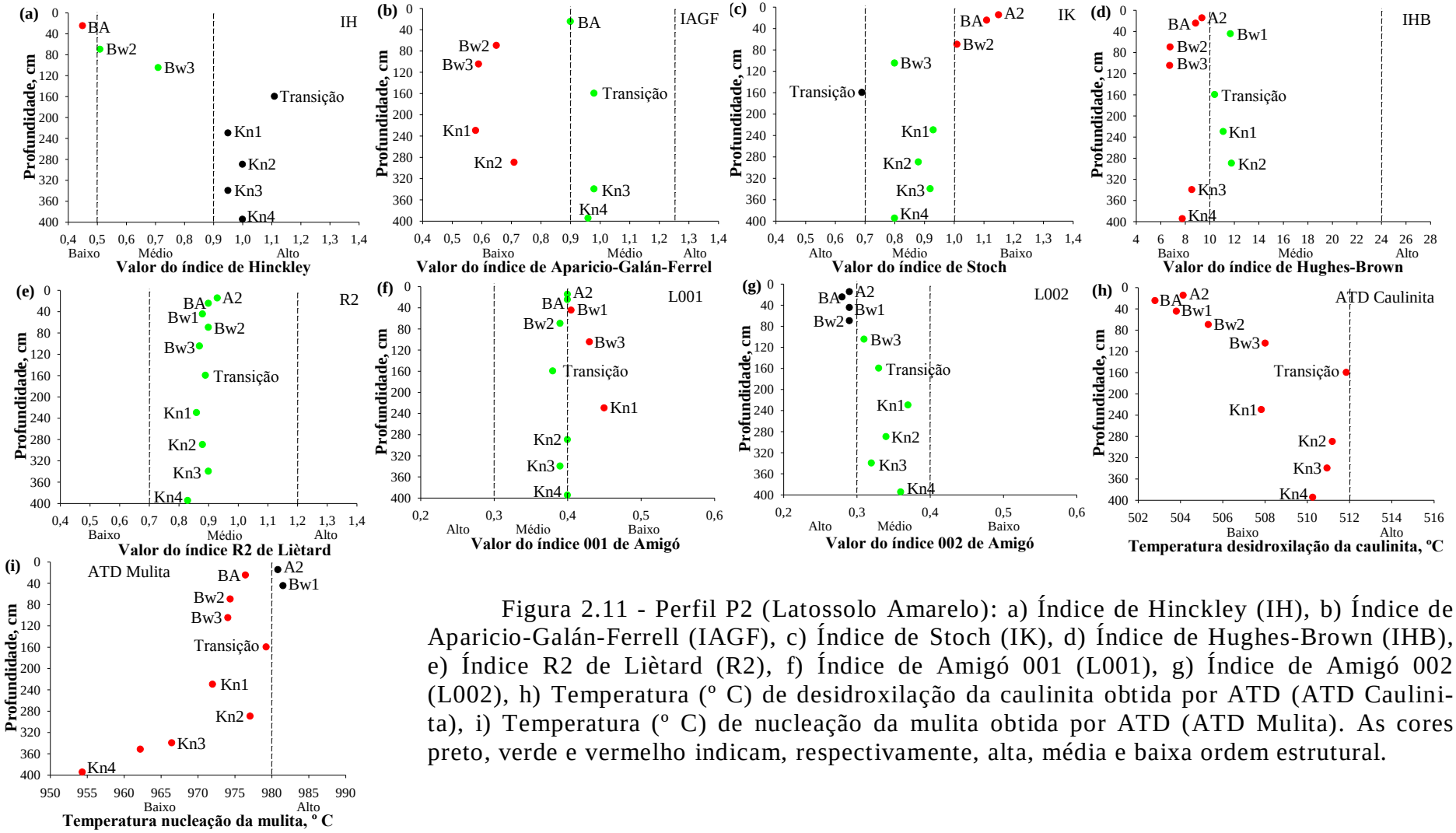

Figura 2.11 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo): a) Índice de Hinckley (IH), b) Índice de Aparicio-Galán-Ferrell (IAGF), c) Índice de Stoch (IK), d) Índice de Hughes-Brown (IHB), e) Índice R2 de Lièrtard (R2), f) Índice de Amigó 001 (L001), g) Índice de Amigó 002 (L002), h) Temperatura (º C) de desidroxilação da caulinita obtida por ATD (ATD Caulinita), i) Temperatura (º C) de nucleação da mulita obtida por ATD (ATD Mulita). As cores preto, verde e vermelho indicam, respectivamente, alta, média e baixa ordem estrutural.

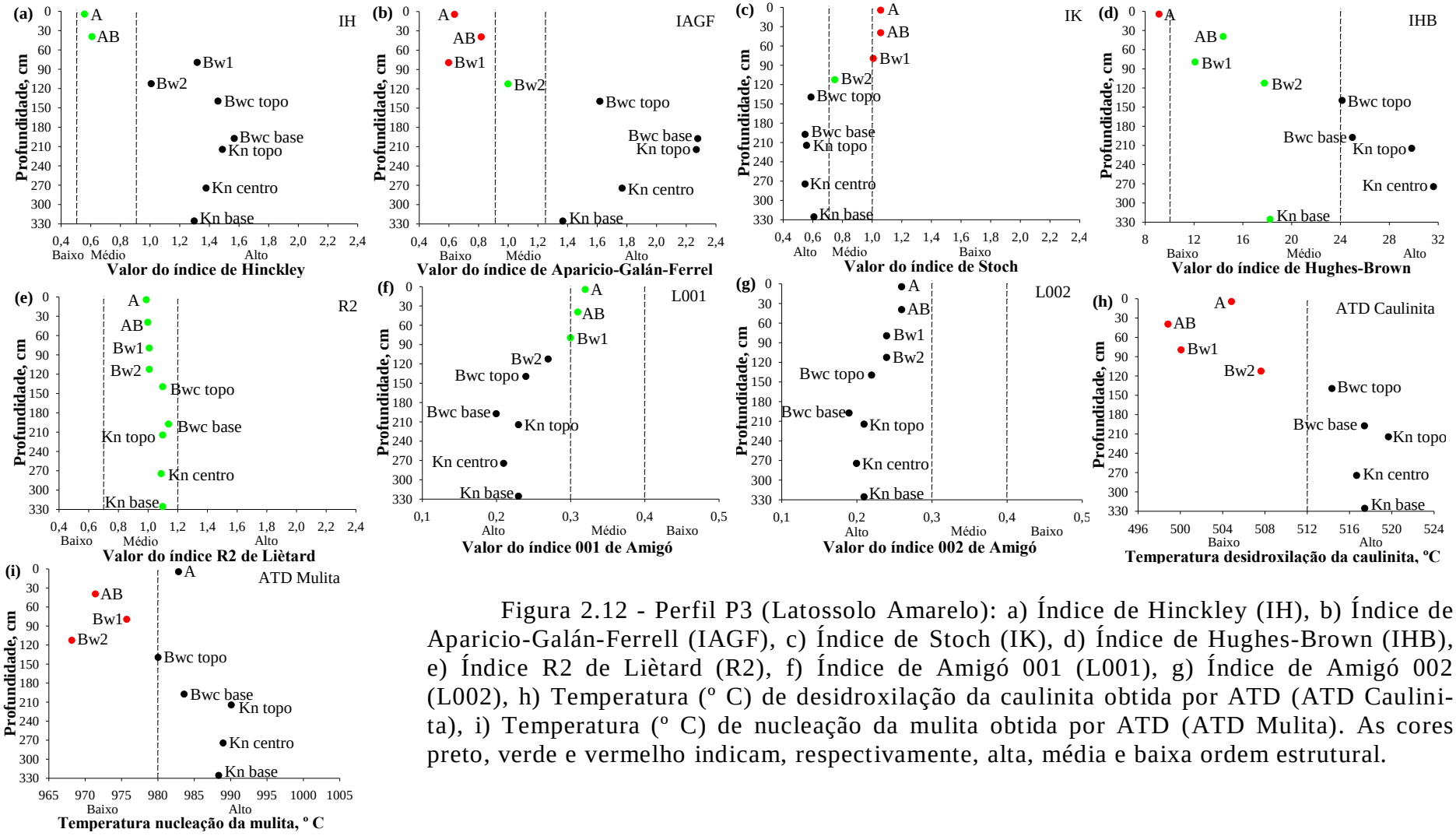

Figura 2.12 - Perfil P3 (Latossolo Amarelo): a) Índice de Hinckley (IH), b) Índice de Aparicio-Galán-Ferrell (IAGF), c) Índice de Stoch (IK), d) Índice de Hughes-Brown (IHB), e) Índice R2 de Lièrtard (R2), f) Índice de Amigó 001 (L001), g) Índice de Amigó 002 (L002), h) Temperatura (º C) de desidroxilação da caulinita obtida por ATD (ATD Caulinita), i) Temperatura (º C) de nucleação da mulita obtida por ATD (ATD Mulita). As cores preto, verde e vermelho indicam, respectivamente, alta, média e baixa ordem estrutural.

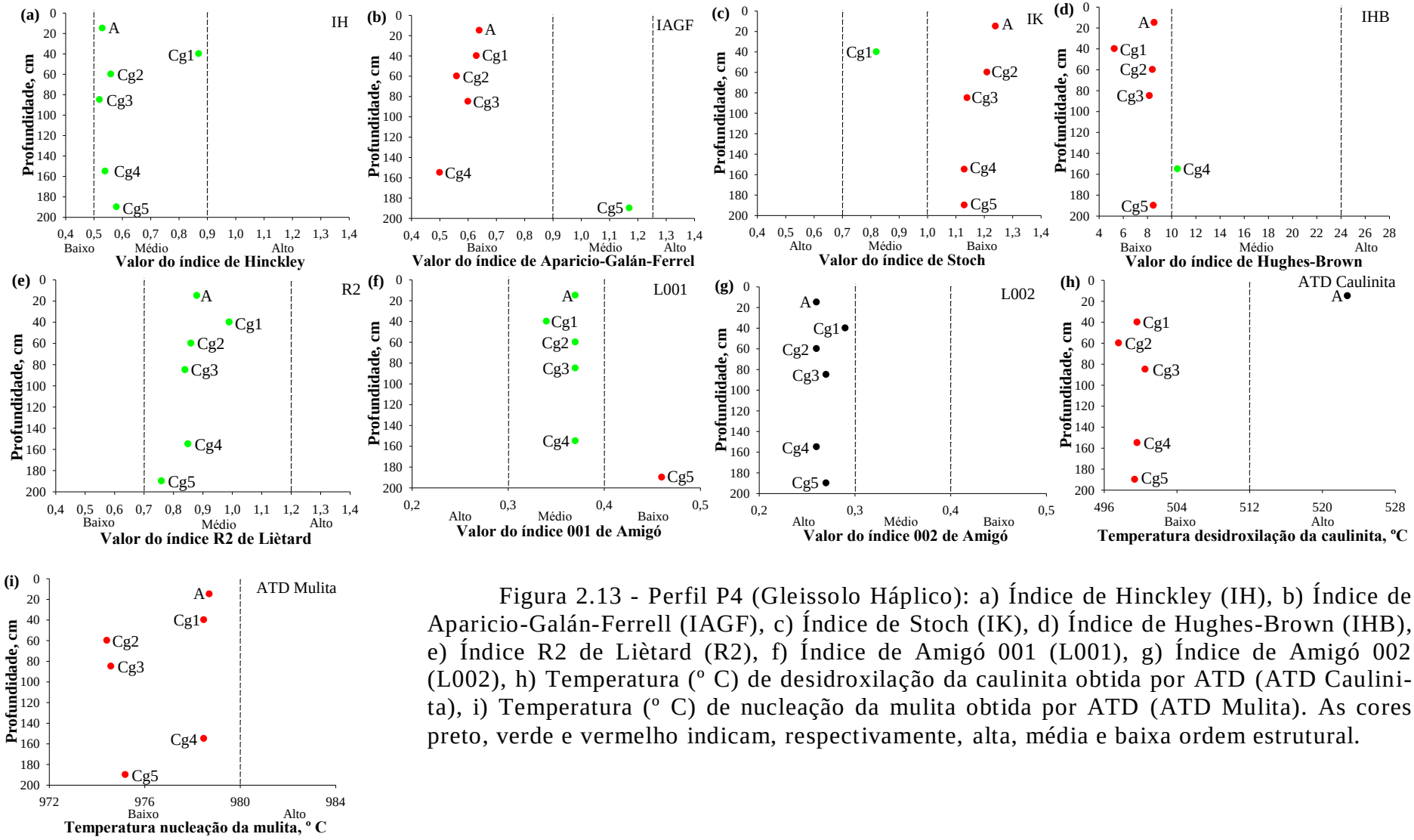

Figura 2.13 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico): a) Índice de Hinckley (IH), b) Índice de Aparicio-Galán-Ferrell (IAGF), c) Índice de Stoch (IK), d) Índice de Hughes-Brown (IHB), e) Índice R2 de Lièrtard (R2), f) Índice de Amigó 001 (L001), g) Índice de Amigó 002 (L002), h) Temperatura (º C) de desidroxilação da caulinita obtida por ATD (ATD Caulinita), i) Temperatura (º C) de nucleação da mulita obtida por ATD (ATD Mulita). As cores preto, verde e vermelho indicam, respectivamente, alta, média e baixa ordem estrutural.

Tabela 2.3 - Resultados experimentais da aplicação do método de Plançon-Zacharie para estimar o grau de ordem estrutural da caulinita na fração argila.

Horizonte/ Camada	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	Plançon-Zacharie [1]					
			Número de fases	%ldp	M	Wc	δ	p
P1 - Espodossolo Humilúvico								
A1	0-5	5	1	-	37	0	0,02	0,2
A2	5-30	15	2	12,87	-	-	-	-
E1	60-180	130	NC [2]	NC	NC	NC	NC	NC
E2	180-202,5	182	NC	NC	NC	NC	NC	NC
Bh	202,5-204	204	2	14,14	-	-	-	-
Bhs	204-214	214	2	22,64	-	-	-	-
Transição	214-245	227	2	34,25	-	-	-	-
K1	245-290	252	2	24,85	-	-	-	-
K2	290+	313	2	28,89	-	-	-	-
P2 - Latossolo Amarelo								
A2	10-20	15	NC	NC	NC	NC	NC	NC
BA	20-30	25	1	-	45	0	0,03	0,27
Bw1	30-60	45	NC	NC	NC	NC	NC	NC
Bw2	60-90	70	2	13,77	-	-	-	-
Bw3	90-120	105	2	26,58	-	-	-	-
Transição	120-210	160	2	44,19	-	-	-	-
Kn1	210-250	230	2	29,13	-	-	-	-
Kn2	250-320	290	2	33,51	-	-	-	-
Kn3	320-380	340	2	28,35	-	-	-	-
Kn4	380+	395	1	-	28	0	0,02	0,13
P3 - Latossolo Amarelo								
A	0-10	5	2	11,19	-	-	-	-
AB	10-40	40	2	13,35	-	-	-	-
Bw1	40-95	80	2	41,07	-	-	-	-
Bw2	95-130	113	2	31,4	-	-	-	-
Bwc topo	130-210	140	2	57,04	-	-	-	-
Bwc base		198	2	68,12	-	-	-	-
Kn topo		215	2	62,39	-	-	-	-
Kn centro	210+	275	2	61,71	-	-	-	-
Kn base		326	2	53,73	-	-	-	-
P4 - Gleissolo Háplico								
A	0-30	40	2	9,34	-	-	-	-
Cg1	30-50	60	2	28,62	-	-	-	-
Cg2	50-70	85	2	11,98	-	-	-	-
Cg3	70-130	155	2	12,08	-	-	-	-
Cg4	130-180	190	2	10,14	-	-	-	-
Cg5	180+	0	1	-	46	0	0,03	0,29

(1) ldp % = porcentagem relativa da fase bem ordenada da caulinita bifásica, M = número médio de camadas ao longo do eixo *c*, Wc = porcentagem de camadas com posições octaédricas vacantes, δ = variação de pequenas translações aleatórias entre camadas adjacentes, p = proporção de grandes defeitos de translação entre camadas adjacentes; (2) NC = não calculado.

Os índices deveriam ser capazes de separar populações de caulinitas que apresentam ordem estrutural diferente (HUGHES; BROWN, 1979; CASES et al., 1982; MELO et al., 2001; APARICIO; GALÁN; FERRELL, 2006) e, evidentemente, esta separação deveria ter

um sentido físico. Analisando-se as Figuras 2.10, 2.11, 2.12 e 2.13, verifica-se que somente no perfil P3 (Latossolo Amarelo) foram obtidos resultados consistentes para a maior parte dos índices. Considerando como exemplo o perfil P2 (Latossolo Amarelo), verifica-se que para os índices de Hinckley, Aparicio-Galán-Ferrell e Stoch que medem o mesmo tipo de defeito estrutural (translações aleatórias de $\pm nb/3$ entre camadas adjacentes, ao longo do eixo cristalográfico *b*), os resultados indicam para um mesmo horizonte (Kn1, por exemplo, Figura 2.11) alta, média ou mesmo baixa ordem estrutural, respectivamente. Além disso, estas inconsistências também são evidenciadas pela baixa correlação (Tabela 2.4, 2.5 e 2.7) obtida tanto entre os índices como entre os índices e alguns parâmetros clássicos encontrados na literatura como a profundidade da amostra ao longo do perfil (VARAJÃO; GILKES; HART, 2001; MONTES et al., 2002; BALAN et al., 2005), porcentagem de caulinita (TCHOUBAR et al., 1982; GALÁN et al., 1994; APARICIO; GALÁN, 1999; MELO et al. 2001; APARICIO et al., 2006), temperatura de desidroxilação da caulinita (GRIM, 1968; CARTHEW, 1955; GRIM, 1942 a, b; FIALIPS et al., 2000; VARAJÃO; GILKES; HART, 2001; MELO et al. 2001; ECE; NAKAGAWA; SCHROEDER, 2003) e nucleação da mulita (GRIM, 1942 a, b; CARTHEW, 1955; ECE; NAKAGAWA; SCHROEDER, 2003).

Tabela 2.4 - Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico). Correlação linear entre os índices de Plançon-Zacharie (% ldp), Hinckley (IH), Aparicio-Galán-Ferrell (IAGF), Stoch (IK), Lièтard (R2), Hughes-Brown (IHB), Amigó (L001), Amigó (L002), profundidade das amostras no perfil de solo (Prof.), porcentagem de caulinita na amostra (% K am.) e temperatura de desidroxilação da caulinita (TD).

	% ldp	IH	IAGF	IK	R2	IHB	L001	L002	Prof.	% K am.	TD
% ldp	1										
IH	0,68	1									
IAGF	0,76	0,33	1								
IK	-0,71	-0,24	-0,77	1							
R2	-0,70	-0,34	-0,77	0,96	1						
IHB	0,32	0,47	0,61	-0,53	-0,61	1					
L001	0,39	-0,29	0,72	-0,60	-0,61	0,12	1				
L002	0,51	-0,13	0,50	-0,35	-0,24	-0,31	0,71	1			
Prof.	0,69	0,86	0,06	-0,13	-0,16	0,34	-0,51	-0,20	1		
% K am.	0,93	0,54	0,58	-0,78	-0,73	0,50	0,26	0,34	0,58	1	
TD	0,58	0,07	0,67	-0,89	-0,81	0,65	0,51	0,23	0,11	0,81	1

Em laranja significativo a p<0,05, em cinza significativo a p<0,01. Número de resultados submetidos às análises estatíticas mínimo 6 e máximo 9.

Tabela 2.5 - Perfil P2 (Latossolo Amarelo). Correlação linear entre os índices de Plançon-Zacharie (% ldp), Hinckley (IH), Aparicio-Galán-Ferrell (IAGF), Stoch (IK), Lièrtard (R2), Hughes-Brown (IHB), Amigó (L001), Amigó (L002), profundidade das amostras no perfil de solo (Prof.), porcentagem de caulinita na amostra (% K am.) e temperatura de desidroxilação da caulinita (TD).

	% ldp	IH	IAGF	IK	R2	IHB	L001	L002	Prof.	% K am.	TD
% ldp	1										
HI	0,95	1									
IAGF	0,73	0,27	1								
IK	-0,85	-0,46	-0,15	1							
R2	-0,19	-0,60	-0,10	0,42	1						
IHB	0,68	0,31	0,00	-0,25	0,22	1					
L001	-0,19	0,32	-0,24	0,36	-0,47	-0,41	1				
L002	0,53	0,69	0,09	0,06	-0,66	-0,33	0,85	1			
Prof.	0,52	0,80	0,23	-0,35	-0,84	-0,13	0,43	0,78	1		
% K am.	0,51	0,21	-0,25	-0,42	0,08	0,02	0,07	0,12	0,00	1	
TD	0,95	0,95	0,24	-0,66	-0,59	-0,06	0,26	0,66	0,82	0,48	1

Em laranja significativo a p<0,05, em cinza significativo a p<0,01. Número de resultados submetidos às análises estatísticas mínimo 5 e máximo 10.

Tabela 2.6 - Perfil P3(Latossolo Amarelo). Correlação linear entre os índices de Plançon-Zacharie (% ldp), Hinckley (IH), Aparicio-Galán-Ferrell (IAGF), Stoch (IK), Lièrtard (R2), Hughes-Brown (IHB), Amigó (L001), Amigó (L002), profundidade das amostras no perfil de solo (Prof.), porcentagem de caulinita na amostra (% K am.) e temperatura de desidroxilação da caulinita (TD).

	% ldp	IH	IAGF	IK	R2	IHB	L001	L002	Prof.	% K am.	TD
% ldp	1										
HI	0,97	1									
IAGF	0,86	0,76	1								
IK	-0,91	-0,82	-0,89	1							
R2	0,93	0,85	0,92	-0,91	1						
IHB	0,83	0,74	0,90	-0,89	0,80	1					
L001	-0,93	-0,84	-0,91	0,97	-0,95	-0,88	1				
L002	-0,96	-0,89	-0,89	0,92	-0,95	-0,83	0,98	1			
Prof.	0,81	0,71	0,68	-0,85	0,80	0,71	-0,87	-0,86	1		
% K am.	0,82	0,79	0,80	-0,90	0,78	0,82	-0,87	-0,81	0,61	1	
TD	0,85	0,74	0,89	-0,95	0,91	0,82	-0,92	-0,89	0,84	0,75	1

Em laranja significativo a p<0,05, em cinza significativo a p<0,01. Número de resultados submetidos às análises estatíticas: 9.

Tabela 2.7 - Perfil P4 (Gleissolo Háplico). Correlação linear entre os índices de Plançon-Zacharie (% ldp), Hinckley (IH), Aparicio-Galán-Ferrell (IAGF), Stoch (IK), Lièrtard (R2), Hughes-Brown (IHB), Amigó (L001), Amigó (L002), profundidade das amostras no perfil de solo (Prof.), porcentagem de caulinita na amostra (% K am.) e temperatura de desidroxilação da caulinita (TD).

	% ldp	IH	IAGF	IK	R2	IHB	L001	L002	Prof.	% K am.	TD
% ldp	1										
HI	0,99	1									
IAGF	0,41	0,01	1								
IK	-0,96	-0,95	0,01	1							
R2	0,94	0,76	-0,58	-0,68	1						
IHB	-0,89	-0,86	-0,08	0,77	-0,68	1					
L001	-0,99	-0,36	0,91	0,34	-0,86	0,33	1				
L002	0,96	0,91	0,17	-0,94	0,58	-0,89	-0,21	1			
Prof.	-0,30	-0,27	0,58	0,10	-0,74	0,49	0,76	-0,14	1		
% K am.	0,21	-0,03	0,95	0,05	-0,64	-0,06	0,91	0,13	0,62	1	
TD	-0,34	-0,25	-0,08	0,39	0,11	0,09	-0,12	-0,31	-0,53	-0,30	1

Em laranja significativo a $p<0,05$, em cinza significativo a $p<0,01$. Número de resultados submetidos às análises estatíticas mínimo 5 e máximo 6.

Alguns fatores poderiam explicar os resultados obtidos: (i) nos perfis P1, P2 e P4 as quantidades de caulinita nas amostras são inferiores às apresentadas pelas amostras do perfil P3 (Tabela C 2, ANEXO C). O conteúdo de caulinita na amostra tem grande influência sobre os resultados dos índices não sendo recomendada sua aplicação, como já mencionado, em amostras com teores inferiores a 10 e 20% (GALÁN et al., 1994; APARÍCIO; GALÁN, 1999; APARICIO et al., 2006). Neste trabalho, este fator não interferiu nos resultados, uma vez que, para os cálculos dos índices, foram utilizados os difratogramas de raios-X obtidos em amostras da fração argila. A concentração em caulinita nestas amostras, determinada pela análise térmica (Tabela C 2, ANEXO C), exibiu valor médio de 82,22 %, considerando os resultados de todos os perfis, sendo 23,22 % o menor valor (horizonte E1 álbico do P1) obtido. (ii) a presença de impurezas de fases minerais e amorfas que poderiam interferir na resolução dos picos da caulinita (GALÁN et al., 1994; APARICIO; GALÁN, 1999; APARICIO et al., 2006). Na fração argila das amostras analisadas, as fases minerais determinadas por DRX são, de maneira geral, as mesmas para todos os perfis, com distribuição semelhante entre os horizontes, sendo a caulinita a fase mais importante (Tabelas 1.12, 1.18, 1.24 e 1.30; Parte 1). Sem dúvida a maior interferência observada foi a presença de quartzo, cujo pico a 4,26 Å interferiu na resolução dos picos a 4,37 e 4,19 Å da caulinita, o que impediu o cálculo dos índices de Hinckley, Aparicio-Galán-Ferrell e Plançon-Zacharie em alguns horizontes, como, por exemplo, nos horizontes E1 e E2 do perfil P1. Além disso, a presença do anatásio, segundo mineral que mais poderia interferir no cálculo dos índices, em razão de seus picos (3,52 e 2,38

Å) estarem muito próximos à importantes picos da caulinita, não impediu a aplicação de nenhum dos métodos aqui empregados. Portanto, a presença de impurezas não pôde ser considerada um fator particularmente importante na classificação do grau de ordem estrutural das amostras. (iii) os processos pedogenéticos. Os solos da topossequência, que representam um sistema Latossolo-Espodossolo (Figura 1.5, Parte 1), têm em comum o material de origem, a vegetação e o clima, entretanto, são resultantes de processos pedogenéticos distintos, que poderiam resultar na formação de caulinitas com características cristalográficas diversas. A formação dos Espodossolos a partir dos Latossolos é resultado de condições extremas de acidez das soluções que percolam o sistema e tem reflexo direto na mineralogia e na dinâmica dos elementos em solução. Como apresentado no Perfil P1 (Espodossolo Humilúvico) (item 1.3.3.1 Parte 1) soluções extremamente ácidas (pH 3,6 - 3,9 e carbono orgânico dissolvido - COD 15 - 40 mgL^{-1}) provenientes dos horizontes superficiais (A1 e A2), álbicos (E1 e E2) e espódicos (Bh e Bhs) levaram à desestabilização da caulinita, gibbsita e óxidos e oxidróxidos de ferro inicialmente presentes no Latossolo original, sendo ainda responsáveis pela mobilização dos elementos, especialmente alumínio, na forma de complexos organometálicos. Com o aumento do pH e a diminuição do COD ao longo do perfil, este último em grande parte formando os horizontes espódicos (Bh e Bhs), é possível ocorrer a precipitação de uma segunda fase de caulinitas, que pode ser evidenciada pelos resultados obtidos no índice de Plançon-Zacharie (Tabela 2.3), com maior quantidade da fase bem ordenada (25 a 34%) na transição e nas camadas de caulim K1 e K2.

O Perfil P2, classificado como um Latossolo Amarelo, mesmo tipo de solo encontrado no perfil P3, ainda sofre, mesmo que em condições menos agressivas que no perfil P1, influência das soluções ácidas, que o atingem através de fluxos, laterais e verticais, capazes de promover a desestabilização das caulinitas (item 1.4, Parte 1). Neste perfil, assim com no P1, duas fases de caulinita estão presentes, com maior porcentagem da fase bem ordenada na transição e nas camadas de caulim (28 a 44%, Tabela 2.3). No perfil P3 isto não ocorre, portanto, as respostas dos índices na caracterização da ordem estrutural apresentaram consistência, concordando com os dados existentes na literatura para amostras de outras localidades (CASES et al., 1982; APARICIO; GALÁN, 1999; MELO et al. 2001; VARAJÃO; GILKES; HART, 2001; MONTES et al., 2002; APARICIO; GALÁN; FERREL, 2006). Para este perfil, os índices foram capazes de separar populações de caulinitas com diferentes graus de ordem estrutural (Figura 2.12) que apresentaram fortes correlações entre si (Tabela 2.6).

O perfil P4 (Gleissolo Háplico) reforça a importância de processos pedogenéticos mais agressivos na consistência dos resultados obtidos da aplicação dos índices (Figura 2.13,

Tabela 2.7). Neste caso, a hidromorfia permanente impõe condições adversas para a formação e estabilidade de caulinitas (item 1.4, Parte 1).

Considerando a coerência dos resultados para o perfil P3 (Figura 2.12, Tabela 2.6), uma análise mais detalhada será apresentada. Observou-se correlação significativa entre os índices e, também, entre os índices e fatores como profundidade da amostra no perfil, porcentagem de caulinita na amostra e temperatura de desidroxilação da caulinita (Tabela 2.7). Correlações significativas entre os índices de Hinckley, de Aparicio-Galán-Ferrell e de Stoch também foram observadas por Aparicio, Galán e Ferrell (2006) estudando amostras de caulinitas da Europa, América do Norte e África. Em todo o perfil P3, verificou-se duas fases de caulinitas (Tabela 2.3), sendo que, nos horizontes latossólicos (Bwc) e nas camadas de caulim, a fase com maior ordem estrutural variou de 54 a 68 %. Nestes mesmos horizontes e camadas de caulim, a ordem estrutural foi considerada alta em todos os índices exceto para o índice R2 de Lièrtard (Figura 2.12 e). Embora tenha sido observada uma correlação significativa entre a temperatura de desidroxilação (TD) e os índices de cristalinidade (Tabela 2.6), verificou-se que os valores dos primeiros são inferiores àqueles reportados na literatura para caulinitas com baixos defeitos estruturais (TD > 530º C para caulinita pura) (GRIM, 1942 a, b; GRIM, 1968; SMYKATZ-KLOSS, 1974, MELO et al. 2001; VARAJÃO; GILKES; HART, 2001; ECE; NAKAGAWA; SCHROEDER, 2003). Como a temperatura de desidroxilação tem uma forte dependência com a dimensão dos cristais (CARTHEW, 1955), é provável que este fator tenha sido mais importante que a ordem estrutural do cristal. Entretanto, isto deverá ser verificado posteriormente com a determinação dos índices de cristalinidade e da temperatura de desidroxilação das caulinitas na fração silte das amostras estudadas.

Nos horizontes A, AB, Bw1, Bw2 do perfil P3 também foram observadas duas fases de caulinita, entretanto, com menor porcentual da fase bem ordenada (de 11 a 41%), o que seria esperado, pois, como já mencionado, tem sido verificado na literatura, da base para o topo dos perfis, um aumento dos defeitos estruturais das caulinitas (VARAJÃO; GILKES; HART, 2001; MONTES et al., 2002; BALAN et al., 2005), que poderiam estar relacionados à dissolução e reprecipitação deste mineral durante a evolução dos processos pedogenéticos.

Considerando apenas as camadas de caulim dos perfis (K1 e K2, perfil P1; Kn1 a Kn4, perfil P2; Kn topo, base, centro, perfil P3), verifica-se que há correlação significativa entre os índices, a porcentagem de caulinita na amostra e a temperatura de desidroxilação da caulinita (Tabela 2.8).

Tabela 2.8 – Todas as camadas de caulim dos perfis P1 (Espodossolo Humilúvico), P2 (Latossolo Amarelo) e P3 (Latossolo Amarelo). Correlação linear entre os índices de Plançon-Zacharie (% ldp), Hinckley (IH), Aparicio-Galán-Ferrell (IAGF), Stoch (IK), Lièrtard (R2), Hughes-Brown (IHB), Amigó (L001), Amigó (L002), porcentagem de caulinita na amostra (% K am.) e temperatura de desidroxilação da caulinita (TD).

	% ldp	HI	AGFI	IK	R2	HB	L001	L002	% K am.	TD
% ldp	1									
HI	0,99	1								
AGFI	0,91	0,91	1							
IK	-0,99	-0,82	-0,81	1						
R2	0,92	0,89	0,88	-0,83	1					
HB	0,65	0,59	0,78	-0,63	0,77	1				
L001	-0,88	-0,73	-0,83	0,89	-0,90	-0,86	1			
L002	-0,91	-0,67	-0,76	0,89	-0,87	-0,84	0,98	1		
% K am.	0,93	0,86	0,89	-0,77	0,95	0,87	-0,89	-0,84	1	
TD	0,97	0,98	0,88	-0,83	0,89	0,54	-0,74	-0,69	0,84	1

Em laranja significativo a $p<0,05$, em cinza significativo a $p<0,01$. Número de resultados submetidos às análises estatíticas: 10.

As amostras destas camadas são aquelas que apresentam, dentro de cada perfil, a melhor ordem estrutural relativa (Tabela 2.3 e Tabela C 1 no ANEXO C) e os maiores teores de caulinita (Tabela C 2 no ANEXO C). A partir destas observações seria válido dizer: (i) a aplicação/coerência dos resultados dos índices estaria condicionada somente às amostras bem ordenadas estruturalmente? (ii) a proporção de caulinita nas amostras seria o principal fator que condicionaria os resultados dos índices? (iii) o fator pedogenético teria importância secundária e não determinante como sugerido neste trabalho?

Para responder à estas questões serão necessários estudos adicionais considerando não apenas amostras de solos coletadas em perfis isolados ou em ocorrências individuais de caulins, como geralmente encontra-se na literatura, mas sim a partir de amostras coletadas no contexto da topossequência onde a dinâmica lateral e vertical condiciona a evolução dos minerais. Além disso, outras técnicas, como a espectroscopia na região do infravermelho (FTIR) e a ressonância paramagnética eletrônica (RPE), poderiam trazer grandes contribuições aos estudos cristalográficos.

2.4. Considerações sobre o grau de ordem estrutural de caulinitas

Os resultados obtidos para os índices não permitiram concluir sobre a ordem estrutural das caulinitas estudadas ao longo da topossequência, exceto para aquelas do perfil P3 (Latossolo Amarelo) onde da base para o topo as caulinitas passaram de alto a médio/baixo grau de ordem estrutural. Para os demais perfis os resultados não foram conclusivos em razão da incosistência dos dados derivados dos cálculos dos índices, o que indica que são as condições mais agressivas atuantes a montante (acidez e hidromorfia temporária) e a jusante (hidromorfia permanente) na vertente determinantes para a confiabilidade das respostas para o grau da ordem estrutural a partir dos métodos utilizados.

A presença de duas fases de caulinitas determinadas a partir do índice de Plançon-Zacharie considerado, em razão do maior número de parâmetros cristalográficos que utiliza, o método que refletiria com maior fidelidade a ordem estrutural das caulinitas, associados aos os resultados geoquímicos permitiram as seguintes considerações: (i) os baixos percentuais da fase bem ordenada no P1, indicaria que as caulinitas tem sofrido desestabilização e dissolução (congruente e incongruente) em função da acidez das soluções que percolam o perfil. Concomitantemente a isso, tem ocorrido a neoformação da segunda geração deste mineral com baixo ordenamento estrutural; (ii) apesar da semelhança genética entre o P2 e o P3, o primeiro ainda sofre influência maior das soluções ácidas através de fluxos laterais, que promovem a desestabilização da caulinita bem ordenada o que indicaria, como no perfil P1, que a fase bem ordenada estaria sendo substituída por caulinitas neoformadas de baixo grau de ordem estrutural. Isso justificaria os baixos percentuais da fase bem ordenada das caulinitas no P2; (iii) no perfil P3 o elevado percentual da fase bem ordenada das caulinitas estaria associado às populações mais antigas, com menos defeitos estruturais, que em razão das condições serem menos agressivas, sofreram menor desestabilização e substituição por caulinitas neoformadas (segunda geração) com baixo ordenamento estrutural; (iv) no perfil P4, os baixos percentuais da

fase bem ordenada das caulinitas estaria associado à hidromorfia permanente que atinge o perfil na maior parte do ano e não favorece a estabilidade da caulinita.

Em razão das questões levantadas sobre a representatividade do grau de ordem estrutural determinado a partir dos métodos mais utilizados na literatura e os fatores que condicionariam estes resultados, serão necessários estudos adicionais considerando as amostras no contexto da topossenquência onde a dinâmica lateral e vertical das soluções são responsáveis pela evolução dos minerais.

2.5. Referências

AMIGÓ, J. M.; BASTIDA, J.; SANZ, A.; SIGNES, M.; SERRANO, J. Crystallinity of Lower Cretaceous kaolinites of Teruel (Spain). *Applied Clay Science*, v. 9, p. 51-69, 1994.

APARICIO, P.; GALAN, E. Mineralogical interference on kaolinite crystallinity index measurements. *Clays and Clay Minerals*, v. 47, n. 1, p. 12-27, 1999.

APARICIO, P.; GALÁN, E.; FERRELL, R. E. A new kaolinite order index based on XRD profile fitting. *Clay Minerals*, v. 41, n. 4, p. 811-817, 2006.

APARICIO, P.; PEREZ-BERNAL, J. L.; GALAN, E.; BELLO, M. A. Kaolin fractal dimension. Comparison with other properties. *Clay Minerals*, v. 39, n. 1, p. 75-84, 2004.

BALAN, E.; ALLARD, T.; FRITSCH, E.; SELO, M.; FALGUERES, C.; CHABAUX, F.; PIERRET, M.-C.; CALAS, G; Formation and evolution of lateritic profiles in the middle Amazon basin: Insights from radiation-induced defects in kaolinite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 69, n. 9, p. 2193-2204, 2005.

BRINDLEY, G.W.; KAO, C.C.; HARRISON, J.L.; LIPSICAS, M.; RAYTHATHA, R. Relation between structural disorder and other characteristics of kaolinites and dickites. *Clays and Clay Minerals*, S.l., v. 34, p. 239-249, 1986.

CARTHEW, A. R. The quantitative estimation of kaolinite by differential thermal analysis. *American Mineralogist*, v. 40, n. 1 e 2, p. 107-117, 1955.

CASES, J.M.; LIETARD, O.; YVON, J.; DELON, J.F. Étude des propriétés cristallochimiques, morphologiques, superficielles des kaolinites désordonnées. *Bulletin Minéralogie*, S.l., v. 105, p. 439-455, 1982.

DUNOYER DE SEGONZAC, G.; FERRERO, G.; KUBLER, B. Sur la cristallinité de l'illite dans la diagenèse et l'anchimétamorphisme. *Sedimentology*, v. 10, p. 137-143, 1968.

EBERL, D.; SRODON, J.; MINGCHOU, L; NADEAU, P.H; NORTHROP, H.R. Sericite from the Silverton caldera, Colorado: Correlation among structure, composition, origin and particle thickness. *American Mineralogist*, v. 72, p. 914-934, 1987.

ECE, O. I.; NAKAGAWA, Z.E.; SCHROEDER, P. A. Alteration of volcanic rocks and genesis of kaolin deposits in the sile region, northern Istanbul, Turkey. I: clay mineralogy. *Clays and Clay Minerals*, V. 51, N. 6, P. 675-688, 2003.

FIALIPS, C-I; PETIT, S.; DECARREAU, A.; BEAUFORT, D. Influence of synthesis pH on kaolinite ‘‘crystallinity’’ and surface properties. Clays and Clay Minerals, v. 48, n. 2, p. 173–184, 2000.

FRANCO, F.; PÉREZ-MAQUEDA, L.A.; PÉREZ-RODRÍGUEZ, J.L. The effect of ultrasound on the particle size and structural disorder of well-ordered kaolinite. *Journal of Colloid and Interface Science*, S.l., v. 274, p. 107-117, 2004.

GALÁN, E.; APARICIO, P.; GONZÁLES, I; LA IGLESIA, A. Influence of associated components of kaolin on the degree of disorder of kaolinite as determinated by XRD. *Geologica Carpathica Clays*, Bratislava, v. 3, p. 59-75, 1994.

GONZÁLEZ, I.; APARICIO, P.; GALÁN, E. Correlation among the most frequently used XRD crystallinity indices for kaolinite: their accuracy and reproducibility. In: INTERNATIONAL CLAY CONFERENCE, 11., 1997. Ottawa. Proceedings...Ottawa, Carleton University, 1997, p. 367-374, 1997.

GRIM, R.E. *Clay Mineralogy*. 2nd edition. New York: McGraw-Hill, 1968. 596 p.

GRIM, R. E.; ROWLAND, R. A. Differential thermal analysis of clay minerals and other hydrous materials. Part 1. *American Mineralogist*, v. 27, N. 11, p. 746-760, 1942.

GRIM, R. E.; ROWLAND, R. A. Differential thermal analysis of clay minerals and other hydrous materials. Part 2. *American Mineralogist*, v. 27, N. 12, p. 801-818, 1942.

HINCKLEY, D.N. Variability in cristallinity values among the kaolin deposits of the coastal plain of Georgia and South Carolina. *Clays and Clay Minerals*, Washington, v. 11, p. 229-235, 1962. Artigo. Apresentado na Clay Minerals Conference of the Clay Minerals Committee of the National Research Council, 11., 1962, Ottawa.

HUGHES, JC; BROWN, G. A crystallinity index for soil kaolins and its relation to parent rock, climate and soil nature. *Journal Soil Science*, v. 30, p. 557-563, 1979.

KLUG, H. P.; ALEXANDER, L.E. *X-Ray Diffraction Procedures*. New York: Wiley, 1974. 965 p.

KRUMM, S. WINFIT1.0 - a public domain program for interactive profile-analysis under WINDOWS. *Acta Universitatis Carolinae Geologica*, v. 38, p. 253-261, 1994.Artigo. Apresentado no Conference on Clay Mineralogy and Petrology, 13th., 1994, Praha.

KÜBLER B. Les argiles, indicateurs de métamorphisme. *Revue de l'Institut Francaise du Petrole*, v. 19, p. 1093–1112, 1964.

KUBLER, B. Evaluation quantitative de metamorphisme par la cristallinité de l'illite. *Bulletin Centre Recherche Pau-SNPA*, v. 2, p. 385-397, 1968.

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 America Journal*, v. 65, n. 4, p. 1324-1333, 2001.

MINERAL DATA: banco de dados . disponível em: <http://webmineral.com>.

MONTES, C. R.; MELFI, A. J.; CARVALHO, A.; VIEIRA-COELHO, A. C.; FORMOSO, M. L. L. Genesis, mineralogy and geochemistry of kaolin deposits of Jari River, Amapá State, Brazil. *Clays and Clay Minerals*, S.l., v.50, p.494-503, 2002.

MURRAY, H.H. Structural variations of some kaolinites in relation to dehydrated halloysite. *American Mineralogist,* v. 39, n. 1-2, p. 97-108, 1954.

MURRAY, H.H.; LYONS, S.C. Correlation of paper coating quality with degree os crystal perfection of kaolinite. *Clays and Clay Minerals*, Washington, v. 4, p. 31-40, 1955. Artigo. Apresentado na ANNUAL Conference, 4., 1955, Pennsylvania.

PLAÇON, A.; GIESE Jr., R.F.; SNYDER, R. The Hinckley index for kaolinites. *Clay minerals*, S.l., v.23, p. 249-260, 1988.

PLAÇON, A.; GIESE Jr., R.F.; SNYDER, R.; DRITS, V.A.; BOOKIN, A.S. Stacking faults in the kaolin-group minerals: defect structures of kaolinite. *Clays and Clay Minerals*, S.l., v. 37, p. 203-210, 1989.

PLAÇON, A.; TCHOUBAR, C. Determination of Structural Defects in Phyllosilicates by X-Ray Powder Diffraction—I. Principle of Calculation of the Diffraction Phenomenon. *Clays and Clay Minerals*, S.l., v. 25, p. 430-435, 1977a.

PLAÇON, A.; TCHOUBAR, C. Determination of Structural Defects in Phyllosilicates by X-Ray Powder Diffraction— II. Nature and Proportion of Defects in Natural Kaolinites. *Clays and Clay Minerals*, S.l., v. 25, p. 436-450, 1977b.

PLAÇON, A.; ZACHARIE, C. An expert system for the structural characterization of kaolinites. *Clay Minerals*, S.l., v. 25, p. 249-260, 1990.

ROISNEL, T.; RODRÍGUEZ-CARVAJAL, J. WinPLOTR: A Windows tool for powder diffraction pattern analysis. *Materials Science Forum*, v. 378-381, p. 118-123, 2001.

SMYKATZ-KLOSS, W. *Differential thermal analysis: Application and results in mineralogy*. Berlim: Springer, 1974. 185 p.

SOUZA SANTOS, P. *Ciência e tecnologia de argilas*. 2ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1989. 408 p.

TCHOUBAR, C.; PLANÇON, A. BEN BRAHIM, J.; CLINARD, C.; SOW, C. caractéristiques structurales des kaolinites désordennées. *Bulletin Minéralogie*, S.l., v. 105, p. 477-491, 1982.

VARAJÃO, A.F.D.C.; GILKES, R.J.; HART, R.D. The relationships between kaolinite crystal properties and the origin of materials for a brazilian kaolin deposit. *Clays and Clay Minerals*, S.l., v. 49, p. 44-59, 2001.

VIEIRA COELHO, A.C.; MONTES, C. R.; VALERA, T. S. Estudo do grau de ordem / desordem estrutural de Caulinitas em Caulins da Região Amazônica por difratometria de raios-X. In: 44º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2000, São Pedro (SP). Anais do 44º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2000. p. 00201-00213.

WEBER, K. Notes on the determination ofillite crystallinity. *Neue Jahrbuch Mineralogische Monatshefte*, v. 6, p. 267-276, 1972.

WEBER, K.; DUNOYER DE SEGONZAC, G.; ECONOMOU, C. Une nouvelle expression de la cristallinité de l'illite et des micas. Notion d'épaisseur apparente des cristallites. *Compte Rendus Sommaires Société Géologique de France*, v. 5, p. 225-227, 1976.

Conclusões gerais

Esse trabalho representa uma contribuição ao estudo de caulins associados a sistemas pedológicos de transformação Latossolo-Espodossolo, desenvolvidos a partir do intemperismo de rochas do embasamento cristalino na região amazônica.

O sistema Latossolo-Espodossolo na topossequência estudada representa um sistema em funcionamento sob condições climáticas atuais, sendo que o processo de podzolização se desenvolve de forma centrífuga, a partir do interflúvio, em detrimento da cobertura laterítica original. Persistindo essas condições (acidez e hidromorfia temporária) o Espodossolo continuará avançando sobre o Latossolo e, em consequência, a floresta será substituída pela campinarana.

Esta evolução pedológica é responsável pelo acúmulo de espessas camadas de caulim esbranquiçado na base dos perfis do solo. Nestas camadas de caulim, a caulinita aparece dominantemente na fração silte.

A aplicação de diferentes métodos de determinação da ordem estrutural das caulinitas não permitiu chegar a um resultado conclusivo pela falta de consistência dos dados. Entretanto o índice de Plançon-Zacharie, em razão do maior número de parâmetros cristalográficos que utiliza, apresentou resultados que foram considerados consistentes em todos os perfis.

Os processos pedogenéticos atuantes, por meio de mecanismos agressivos (forte acidez e hidromorfia), neste sistema de transformação seriam os fatores determinantes que limitariam a aplicação dos métodos de avaliação da ordem estrutural aqui empregados.

ANEXO A

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DOS PERFIS

DESCRIÇÃO GERAL

PERFIL - P1.

NÚMERO DE CAMPO - SGA4.

DATA - 17/02/2006.

CLASSIFICAÇÃO (SiBCS, 2006): Espodossolo Humilúvico.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS - Área de propriedade do Ministério da Aeronáutica, hidrelétrica do igarapé Miuá, São Gabriel da Cachoeira, Amazonas. Coordenadas geográficas 0°6'24,5"S e 66°54'19,3"W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL - Topo de vertente, sob floresta.

ALTITUDE - 71 m.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA - Complexo Guianense - Pré-Cambriano Inferior a Médio.

MATERIAL ORIGINÁRIO - granito, gnaisse, migmatitos.

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE - Não pedregoso e não rochoso.

RELEVO LOCAL - Plano ligeiramente ondulado.

RELEVO REGIONAL - Plano e suave ondulado.

EROSÃO - Não aparente.

DRENAGEM - Moderadamente a imperfeitamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA - Floresta.

USO ATUAL - Sem uso.

CLIMA - Af de Köeppen. Clima equatorial úmido, com meses mais chuvosos em abril, maio e junho e menos chuvosos em julho, agosto, setembro e outubro. Temperatura média anual 25°C e precipitação média anual 3000 mm.

DESCRITO E COLETADO POR - Débora Ayumi Ishida, Célia Regina Montes e Yves Lucas.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Horizonte O: 0 a +10 cm, serrapilheira do tipo MOR com muitas raízes e folhas com estrutura reconhecível.

Horizonte A1: 0-5 cm; bruno-avermelhado-escuro (5YR 3/2); arenosa; fraca pequena a grande grumosa; macia, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição gradual e ondulada.

Horizonte A2: 5-30 cm; bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2); arenosa; maciça; macia, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição difusa e irregular.

Horizonte E1: 30-180 cm; cinzento-claro (2,5Y 7/2); arenosa; maciça; macia, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição difusa e ondulada.

Horizonte E2: 180-202,5 cm; bruno-amarelado-claro (2,5Y 6/3); arenosa; maciça; macia, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição difusa e ondulada.

Horizonte Bh: 202,5-204 cm; bruno-acinzentado (10YR 5/2); areia franca; maciça; macia, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição difusa e irregular.

Horizonte Bhs: 204-214 cm; bruno-acinzentado e bruno-oliváceo-claro (2,5Y 5/2,5) no topo, bruno-avermelhado-escuro (5YR 3/2) na base e mosqueado cinzento-brunado-claro (2,5Y 6/2); franco arenosa; maciça; macia (topo) e muito dura (base), muito friável (topo) e muito firme (base), não plástica e não pegajosa (topo) e plástica e pegajoso (base); transição abrupta e irregular.

Camada de transição: 214-245 cm; amarelo (10YR 7/6) na base, bruno-forte (7,5YR 4,5/6) no topo e mosqueados bruno-avermelhado-escuro (5YR 3/4 e 3/2) e cinzento-brunado-claro (2,5Y 6/2); argilosa; maciça; muito dura, muito firme, muito plástica e muito pegajosa; transição difusa e irregular.

Camada K1: 245-290 cm; bruno muito claro-acinzentado (10YR 8/2) e mosqueados amarelo (10YR 7/8 e 8/6); bruno-avermelhado-escuro (5YR 3/2) e cinzento-brunado-claro (2,5Y 6/2); argilo-siltosa; maciça; macia; muito friável, muito plástica e muito pegajosa; transição difusa e ondulada.

Camada K2: 290+ cm; entre branco (5Y 8/1) e amarelo-claro-acinzentado (5Y 8/2) e mosqueado amarelo (10YR 7/8); franco-argilo-siltosa; maciça; macia, friável, plástica e pegajosa.

RAÍZES - Muitas finas e grossas no horizonte superficial orgânico O, muitas finas nos horizontes superficiais minerais A1 e A2; algumas finas e também grossas nos horizontes álbicos E1 e E2; algumas frescas e outras em decomposição nas camadas de caulim K1 e K2.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DETALHADA

0 a +5 cm: Horizonte O. Serrapilheira é constituída por material humificado e fragmentos de quartzo bem lavados.

0-5 cm: Horizonte A1. Horizonte organo-mineral é constituído por fragmentos de quartzo lavados. A atividade biológica é marcada pela presença de numerosas raízes. A passagem para o A2 faz-se de forma gradual e ondulada através da propagação da cor do fundo matricial que se torna bruno-acinzentado-escuro.

5-30 cm: Horizonte A2. Este horizonte organo-mineral é levemente heterogêneo e predominantemente bruno-acinzentado-escuro. Os demais atributos não diferem com relação ao A1. A transição para o EA se faz de forma difusa e irregular através da gradual diminuição do material humificado e do gradual clareamento do material.

30-180 cm: Horizonte E1. Neste horizonte álbico, constituído por areia fina, observaram-se micro-horizontes bruno avermelhados, sub-horizontais e irregulares e, também, volumes cinzentos escuros preenchendo antigas galerias de raízes grossas. Essas feições penetram o horizonte E2. O limite entre este horizonte e o subjacente é difuso e irregular tanto na cor como no tamanho dos fragmentos.

180-202,5 cm: Horizonte E2. Horizonte álbico é constituído por areia grossa e apresenta transição difusa e ondulada com o horizonte intermediário devido ao gradual escurecimento do matiz.

202,5-204 cm: Horizonte Bh. Horizonte espódico apresenta água livre e porosidade visível entre os grãos soltos de quartzo que indicam a formação de Bh. Foi observada uma antiga galeria de raiz preenchida por material vermelho escuro. A passagem deste horizonte para o subjacente dá-se de forma difusa e irregular devido ao surgimento do mosqueado que marca o Bhs.

204-214 cm: Horizonte Bhs. Este horizonte espódico heterogêneo tem cor dominante entre bruno-acinzentado e bruno-oliváceo-claro e volumes de cores cinza-brunado-claro e bruno-avermelhado-escuro. Foram observados mosqueados bruno-avermelhado-escuros com diâmetros inferiores a 2 mm e direção preferencial sub-vertical. A atividade biológica é marcada pelas galerias de raízes preenchidas por material orgânico bruno-avermelhado-escuro. Tanto os mosqueados como as galerias de raízes penetram no horizonte de transição. A passagem para o horizonte de transição ocorre de forma abrupta e irregular em função da mudança na textura e na cor.

214-245 cm: Camada de transição. Este transição é marcada pela mudança de cor que passa a bruno-forte, de textura que se torna argilosa, e de consistência que se torna muito dura. A cor dominante bruno-forte torna-se progressivamente mais clara e amarelada em direção à base, onde passa à amarela. Presença de fissuras sub-verticais com finos revestimentos bruno-avermelhado-escuros que, ao serem observados à lupa, parecem ter morfologia micro mamiliforme. Em algumas áreas há grandes revestimentos bruno-avermelhado-escuros. A atividade biológica é marcada pelas galerias de raízes preenchidas por material bruno-avermelhado-escuro e cinza-brunado-claro. A transição com o caulim K1 ocorre de forma difusa e irregular, sobretudo devido à cor e à consistência que passam progressivamente a bruno muito claro-acinzentada e macia, respectivamente.

245-290 cm: Camada K1. A matriz bruna muito clara-acinzentada é argilo-siltosa com alguns fragmentos muito grossos (2 mm) de quartzo. A atividade biológica é marcada pelos mosqueados de cores bruno-avermelhado-escuro e cinza-brunado-claro que preenchem antigas galerias de raízes. Nas galerias com preenchimentos cinza-brunado-claros notaram-se fragmentos milimétricos (1 a 2 mm) de quartzo. Neste caulim também foram observados muitos mosqueados amarelos com diâmetro inferior a 1 mm e direção preferencial vertical. A passagem para o caulim K2 ocorre de forma difusa e ondulada com a gradual propagação da cor do fundo matricial que se torna branca.

290+ cm: Camada K2. Camada com textura franco-argilo-siltosa, sem fragmentos grossos de quartzo, constituída por caulim branco levemente heterogêneo, com matizes entre branco e amarelo-claro-acinzentado. Neste caulim também foram notados alguns mosqueados amarelos com direção preferencial vertical e diâmetros de 1 mm a 10 mm. Embora apresente um aspecto muito compacto há, observando-se sob a lupa, muitos poros menores do que um milímetro. A atividade biológica é marcada pela presença de raízes muito finas, algumas ainda frescas e outras em decomposição, e por vestígios de galerias de raízes, com dois milímetros de diâmetro, alguns preenchidos com material de aspecto grumoso bruno muito claro e outros preenchidos por material argiloso bruno.

DESCRIÇÃO GERAL

PERFIL - P2.

NÚMERO DE CAMPO - SGA12.

DATA - 23/07/2007.

CLASSIFICAÇÃO (SiBCS, 2006): Latossolo Amarelo.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS - Área de propriedade do Ministério da Aeronáutica, hidrelétrica do igarapé Miuá, São Gabriel da Cachoeira, Amazonas. Coordenadas geográficas 0°6'24,5"S e 66°54'19,3"W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL - Segundo terço da porção de transição, sob floresta.

ALTITUDE - 69 m.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA - Complexo Guianense - Pré-Cambriano Inferior a Médio.

MATERIAL ORIGINÁRIO - granito, gnaisse, migmatitos.

PEDREGOSIDADE - Ausente.

ROCHOSIDADE - Ausente.

RELEVO LOCAL - Inclinado.

RELEVO REGIONAL - Plano e suave ondulado.

EROSÃO - Não aparente.

DRENAGEM - Imperfeitamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA - Floresta.

USO ATUAL - Sem uso.

CLIMA - Af de Köeppen. Clima equatorial úmido, com meses mais chuvosos em abril, maio e junho e os menos chuvosos em julho, agosto, setembro e outubro. Temperatura média anual 25°C e precipitação média anual 3000 mm.

DESCRITO E COLETADO POR - Débora Ayumi Ishida, Célia Regina Montes e Yves Lucas..

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Horizonte O: 0 a +5 cm; serrapilheira constituída por manto de raízes e folhas, muitas em decomposição.

Horizonte A1: 0-10 cm; bruno-avermelhado-escuro (10YR 4/4); franco-argilo-arenosa; moderada grande grumosa; macia; transição clara e ondulada.

Horizonte A2: 10-20 cm; bruno-avermelhado-escuro (10YR 4/4) e bruno (10YR 5/3); franco-argilo-arenosa; moderada grande blocos subangulares; macia, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição clara e ondulada.

Horizonte BA: 20-30 cm; bruno-claro-acinzentado (10YR 6/3, úmido) e bruno muito claro-acinzentado (10YR 8/2, seco); franco-argilo-arenosa; maciça; macia, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição clara e ondulada.

Horizonte Bw1: 30-60 cm; bruno-claro-acinzentado (10YR 6/3, úmido) e bruno muito claro-acinzentado (10YR 8/3, seco) e mosqueado amarelo-avermelhado (7,5YR 6/6); franco-argilo-arenosa; moderada grande e muito grande blocos subangulares; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica e não pegajosa; transição difusa e ondulada.

Horizonte Bw2: 60-90 cm; bruno muito claro-acinzentado (10YR 8/4, úmido) e amarelo-claro-acinzentado (2,5Y 8/2) e mosqueado amarelo-avermelhado (7,5YR 6/6 e 7,5YR 6/8); franco-argilo-arenosa com fragmentos grandes de quartzo; forte grande blocos subangulares; dura, firme, plástica e pegajosa; transição clara e ondulada.

Horizonte Bw3: 90-120 cm; amarelo-claro-acinzentado (2,5Y 8/3, úmido e 2,5Y 8/2, seco) e mosqueados amarelo (10YR 7/6) e vermelho-amarelado (5YR 5/8); franco-argilosa; forte grande blocos subangulares; dura, firme, plástica e pegajosa; transição difusa e ondulada.

Camada de transição: 120-210 cm; amarelo-claro-acinzentado (5Y 8/3, úmido e 5Y 8/2, seco) e mosqueado amarelo (10YR 7/6); franco-argilo-siltosa; forte grande blocos subangulares; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição difusa e ondulada.

Camada Kn1: 210-250 cm; amarelo-claro-acinzentado (5Y 8/3, úmido e 5Y 8/2, seco) e mosqueado amarelo (10YR 7/6); franco-siltosa; maciça; macia, muito friável, ligeiramente plástica e não pegajosa; transição difusa e ondulada.

Camada Kn2: 250-320 cm; amarelo-claro-acinzentado (2,5Y 8/3, úmido) e branco (5Y 8/1, seco) e mosqueados amarelo (10YR 7/6) e vermelho-claro (10R 6/6); franco-argilo-siltosa; maciça; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição difusa e ondulada.

Camada Kn3: 320-380 cm; amarelo-claro-acinzentado (5Y 8/2, úmido) e branco (5Y

8/1, seco) e volumes vermelho (10R 5/8, úmido) e vermelho-claro (10R 6/8, seco); franco-argilo-siltosa; maciça; macia, friável, não plástica e não pegajosa; transição abrupta e ondulada.

Camada Kn4: 380-410+ cm; volume branco (5Y 8/1, úmido) e cinzento-esverdeado-claro (GLEY1 8/1, seco), volume amarelo-claro-acinzentado (5Y 8/2, úmido) e branco (5Y 8/1, seco) e mosqueado amarelo (10YR 7/6); franco-argilo-siltosa; maciça; macia, muito friável, ligeiramente plástica e não pegajosa.

RAÍZES - Muitas finas a grossas no O, A1, A2, BA, Bw1; muitas finas a médias no Bw2, Bw3, Bw4; algumas muito finas frescas e outras, também muito finas, em decomposição no Kn1, Kn2, Kn3 e Kn4.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DETALHADA

0 a +5 cm: Horizonte O. Serrapilheira constituída por manto de raízes e folhas em diferentes estágios de decomposição.

0-10 cm: Horizonte A1. O horizonte organo-mineral é homogêneo com estrutura grumosa muito porosa. A atividade biológica é marcada pela presença de numerosas raízes. A passagem para o A2 ocorre de forma clara e ondulada através da cor e da estrutura que se tornam, respectivamente, bruna e blocos subangulares.

10-20 cm: Horizonte A2. Este horizonte organo-mineral é heterogêneo com matizes bruno-avermelhado-escuro e bruno dominante. A atividade biológica é notada pela presença de numerosos poros e raízes. A transição para o BA ocorre de forma clara e ondulada com a gradual diminuição da matéria orgânica, que confere à cor valores mais elevados.

20-30 cm: Horizonte BA. A cor bruno-claro-acinzentada indica que o solo deste horizonte ainda é influenciado pela matéria orgânica, mesmo apresentando aparentemente menores quantidades do que nos horizontes A1 e A2. Ocorrência comum de poros muito pequenos a grandes. A transição com o Bw1 ocorre de forma clara e ondulada, especialmente, devido ao aparecimento de feições hidromórficas.

30-60 cm: Horizonte Bw1. Este horizonte heterogêneo de cor dominante bruno-claro-acinzentada marca o início da ocorrência de ambiente oxiredutor neste perfil a partir do surgimento de volumes vermelho-amarelados e de galerias preenchidas por material bruno-claro-acinzentado com auréola esbranquiçada (típica de hidromorfia). Assim como observado no BA, é comum a ocorrência de poros muito pequenos a grandes. A passagem para o Bw2 ocorre de maneira difusa e ondulada através do progressivo clareamento do matiz.

60-90 cm: Horizonte Bw2. Horizonte heterogêneo bruno muito claro-acinzentado com volumes amarelo-avermelhados. As galerias bruno-claro-acinzentadas com auréola esbranquiçada presentes no Bw1, penetram neste horizonte. Observaram-se também feições de hidromorfia com o centro amarelo e bordas amarelo-avermelhadas. Surgem muitos fragmentos grandes (4 cm) de quartzo que se quebram com as mãos em fratura do tipo sacaroidal. A transição para o Bw3 faz-se de modo claro e ondulado pelo amarelecimento do matiz.

90-120 cm: Horizonte Bw3. A matriz a cor e a textura tornam-se, respectivamente, amarelo-claro-acinzentada e franco-argilosa. A atividade biológica é marcada por galerias de antigas raízes grossas preenchidas por material bruno-claro-acinzentado com fragmentos de quartzo, muito provavelmente, proveniente da superfície ou transportados pela micro e meso faunas. Foram observados, neste horizonte e no sobrejacente, muitos poros de tamanho muito pequeno a pequeno no interior dos blocos subangulares. A passagem para o CB ocorre de forma muito progressiva numa faixa de transição difusa e ondulada, através da diminuição da quantidade de areia e do surgimento de filamentos amarelos.

120-210 cm: Camada de transição. A cor permanece amarelo-claro-acinzentada e notaram-se alguns filamentos amarelos. Observaram-se galerias de raízes muito grossas preenchidas por material mais quartzoso cinzento de origem biológica. A transição com acamada Kn1 ocorre de forma difusa e ondulada através do leve clareamento da cor e da progressiva diminuição da fração areia.

210-250 cm: Camada Kn1. A matriz permanece amarelo-claro-acinzentada com uma quantidade um pouco maior de filamentos amarelos e textura franco-siltosa. Foram observados alguns nódulos gibbsíticos de dimensões de 15mm de comprimento e 4mm de largura. A atividade biológica está presente em numerosos poros tubulares associados ou não aos filamentos amarelos. A passagem para a camada Kn2 acontece de maneira difusa e ondulada a partir do progressivo aumento dos filamentos amarelos e do surgimento de volumes avermelhados.

250-320 cm: Camada Kn2. Essa camada heterogênea de cor amarelo-claro-acinzentada tem volumes amarelos e avermelhados e textura franco-argilo-siltosa. Os filamentos amarelos do caulim Kn1 penetram neste horizonte, onde são mais abundantes até a profundidade de 280 cm. Nessa profundidade surge uma feição curvada sub-vertical, herdada da rocha com um centímetro de espessura, cuja matriz é bem argilosa e possui alguns nódulos gibbsíticos pequenos. A maior parte dos nódulos gibbsíticos observados nesta camada tem dimensões de 20mm de comprimento e 4mm de largura. Da base em direção ao topo desse

horizonte, há variação muito progressiva entre os volumes das feições herdadas da rocha, estrias finas avermelhadas e cinza-brunadas, e os volumes argilosos claros.

320-380 cm: Camada Kn3. Caulim de cor amarela-clara-acinzentada (úmida) e branca (seca) com volumes avermelhados que aparecem em todo o horizonte e nas quatro paredes da trincheira. Esses volumes avermelhados estão localizados, sobretudo, entre 350 e 380 cm de profundidade, sendo na base dacamada mais intensamente avermelhados. Observaram-se de numerosos nódulos gibbsíticos com dimensões da ordem de 30mm de comprimento e 10mm de largura. A passagem para a camada subjacente faz-se de forma abrupta e ondulada a partir da mudança da cor.

380-410 cm: Camada Kn4. Caulim manchao com alternância de volumes mais claros e mais escuros, branco (úmido) e amarelo-claro-acinzentado (úmido), respectivamente. Notou-se filamentos e pontuações amarelas na argila branca, além de alguns volumes avermelhados. Em 390 cm de profundidade há volumes arenosos que parecem rocha alterada. Observaram-se muitos nódulos gibbsíticos de tamanhos variados de 30 a 50mm de comprimento e de 25 a 40mm de largura, predominando os grandes. O material é muito seco, embora o lençol aflore no fundo da trincheira. Da transição até esta camada, o material é constituído por muitos poros de tamanho muito pequeno.

DESCRIÇÃO GERAL

PERFIL - P3.

NÚMERO DE CAMPO - SGA9.

DATA - 19/02/2006.

CLASSIFICAÇÃO (SiBCS, 2006): Latossolo Amarelo.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS - Área de propriedade do Ministério da Aeronáutica, hidrelétrica do igarapé Miuá, São Gabriel da Cachoeira - AM. Coordenadas geográficas 0°6'24,5"S e 66°54'19,3"W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL - Situa-se no limite com o compartimento de jusante, sob floresta.

ALTITUDE - 65 m.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA - Complexo Guianense - Pré-Cambriano Inferior a Médio.

MATERIAL ORIGINÁRIO - granito, gnaisse, migmatitos.

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE - Não pedregoso e não rochoso.

RELEVO LOCAL - Suave ondulado.

RELEVO REGIONAL - Plano e suave ondulado.

EROSÃO - Não aparente.

DRENAGEM - Imperfeitamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA - Floresta.

USO ATUAL - Sem uso.

CLIMA - Af de Köeppen. Clima equatorial úmido, com meses mais chuvosos em abril, maio e junho e os menos chuvosos em julho, agosto, setembro e outubro. Temperatura média anual 25°C e precipitação média anual 3000 mm.

DESCRITO E COLETADO POR - Débora Ayumi Ishida, Célia Regina Montes e Yves Lucas.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Horizonte O: 0 a +4 cm; serrapilheira constituída por manto de raízes e folhas, estando algumas em decomposição e outras com estrutura reconhecível.

Horizonte A: 0-10 cm; bruno-escuro (7,5YR 3/2, úmido) e bruno (7,5YR 4/3, seco) e mancha bruno muito escura (10YR 2/2); franco-argilo-arenosa; fraca grande a pequena grumosa; dura, muito friável, plástica e ligeiramente

friável; transição clara e irregular.

Horizonte AB: 10-40 cm; bruno (7,5YR 4/2, úmido e 7,5YR 5/3, seco) no topo, bruno-claro-acinzentado (10YR 6/3, úmido) e bruno muito claro-acinzentado (10YR 7/3, seco) na base e mosqueados branco (10YR 8/1) e amarelo-brunado (10YR 6/8); franco-argilo-arenosa; moderada grande blocos subangulares e fraca grande a pequena grumosa; dura, firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição gradual e ondulada.

Horizonte Bw1: 40-95 cm; bruno muito claro-acinzentado (10YR 8/4, úmido e 10YR 8/4, seco) e mosqueados branco (10YR 8/1) e amarelo-brunado (10YR 6/8); argilo-arenosa; forte grande blocos subangulares; dura, muito firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição difusa e ondulada.

Horizonte Bw2: 95-130 cm; amarelo-avermelhado (7,5YR 7/6, úmido) e rosado (7,5YR 8/3, seco) e mosqueados branco (5Y 8/1) e vermelho-claro (2,5YR 6/8); argilosa; forte grande e muito grande blocos subangulares; muito dura, muito firme, muito plástica e pegajosa; transição difusa e ondulada.

Horizonte Bwc: 130-210 cm; amarelo-avermelhado (7,5YR 7/6, úmido) e rosado (7,5YR 8/3, seco), bruno-claro-acinzentado (10YR6/3) nas faces dos blocos e mosqueados vermelho-claro (10R 6/6) e branco; argilosa; forte grande a muito grande blocos subangulares; dura, friável, muito plástica e muito pegajosa; transição difusa e ondulada.

Camada Kn: 210-335+ cm; branco (5Y 8/1, úmido e GLEY1 8/N, seco) e mosqueados amarelo (10YR 8/8 e 7/8), vermelho (10R 4/8) e amarelo-claro-acinzentado (2,5Y 8/2); argilo-siltosa a argilosa; maciça dominante e forte grande a muito grande blocos subangulares; dura, friável, muito plástica e muito pegajosa.

RAÍZES - Muitas muito finas a grossas no O, A, AB; comuns muito finas a médias no Bw1; poucas muito finas a finas no Bw2; raras muito finas a finas no Bwc e Kn. Em todo o perfil há tanto raízes frescas como em decomposição.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DETALHADA

0 a +4 cm: Horizonte O. Horizonte orgânico constituído por manto de raízes e folhas em diferentes estágios de decomposição.

0-10 cm: Horizonte A. Horizonte organo-mineral heterogêneo bruno-escuro com volumes bruno muito escuros apresenta muitos fragmentos grandes de quartzo e muitos poros de tamanho muito pequeno a grande. A passagem para o AB ocorre de forma clara e irregular devido à distribuição irregular da matéria orgânica.

10-40 cm: Horizonte AB. Do topo em direção a base desse horizonte, nota-se uma diminuição progressiva de matéria orgânica que confere ao solo um clareamento progressivo. Na base do horizonte observaram-se manchas brancas com bordas amarelo-avermelhadas, típicas de ambientes oxiredutores. A transição para o Bw1 ocorre de forma gradual e ondulada a partir do progressivo clareamento do matiz.

40-95 cm: Horizonte Bw1. O material latossólico de cor muito claro-acinzentado possui mosqueados de coloração branca e amarelo-brunada. Nesse horizonte e no sobrejacente foram observados fragmentos grandes de quartzo e muitos poros de tamanhos muito pequeno a grande. A passagem para o Bw2 dá-se de maneira difusa e ondulada a partir do amarelecimento do matiz e da diminuição da fração areia.

95-130 cm: Horizonte Bw2. Este horizonte latossólico homogêneo possui cor amarelo-avermelhada. Notou-se alternância de volumes brancos e vermelho-claros resultantes de hidromorfia. Observaram-se muitos fragmentos grandes de quartzo, poros comuns de tamanhos grande e médio e muitos poros de tamanhos pequeno e muito pequeno. A transição com o Bwc é de forma difusa e ondulada devido ao progressivo avermelhamento da matriz e do mosqueamento.

130-210 cm: Horizonte Bwc. Esse horizonte possui cor amarelo-avermelhada no topo e amarelo-claro-acinzentada na base. Aumento progressivo na ocorrência dos volumes brancos e vermelho-claros relacionados à hidromorfia foi observado em direção a base do horizonte. Observaram-se nódulos gibbsíticos muito pequenos (0,6 cm de diâmetro), médios (2,1cm de comprimento e 1,3 cm de largura), e grandes (2,7 cm de comprimento e 1,8 cm de largura) com manchas amareladas. Foram observados poros comuns de tamanhos grande e médio e muitos poros de tamanhos pequeno e muito pequeno. A passagem para o Kn faz-se de maneira difusa e ondulada em função do progressivo branqueamento da matriz do solo.

210-335 cm: Camada Kn. O caulim branco apresenta textura argilo-siltosa com mosqueados de coloração amarela, vermelha e amarelo-claro-acinzentada. Observaram-se nódulos gibbsíticos endurecidos de tamanhos grande (6,0 cm de comprimento e 4,0 cm de largura), médio (4,0 cm de comprimento e 2,5 cm de largura), e pequeno (1,0 cm de comprimento e 0,9 cm de largura) com mosqueados de coloração similar àqueles presentes na matriz. Notaram-se galerias de origem biológica, raízes e mesofauna, algumas preenchidas por material fino ama-

relado e outras preenchidas por material fino cinzento-brunado-claro argiloso com fragmentos grandes de quartzo. Observaram-se muitos poros de tamanhos pequeno e muito pequeno.

DESCRIÇÃO GERAL

PERFIL - P4.

NÚMERO DE CAMPO - SGA3.

DATA - 18/07/2007.

CLASSIFICAÇÃO (SiBCS, 2006): Gleissolo Háplico.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS - Área de propriedade do Ministério da Aeronáutica, hidrelétrica do igarapé Miuá, São Gabriel da Cachoeira, Amazonas. Coordenadas geográficas 0°6'24,5"S e 66°54'19,3"W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL - Situa-se no último segmento côncavo do compartimento da jusante, sob floresta.

ALTITUDE - 62 m.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA - Complexo Guianense - Pré-Cambriano Inferior a Médio.

MATERIAL ORIGINÁRIO - granito, gnaisse, migmatitos.

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE - Não pedregoso e não rochoso.

RELEVO LOCAL - Plano levemente inclinado.

RELEVO REGIONAL - Plano e suave ondulado.

EROSÃO - Não aparente.

DRENAGEM - Mal drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA - Floresta.

USO ATUAL - Sem uso.

CLIMA - Af de Köeppen. Clima equatorial úmido, com meses mais chuvosos em abril, maio e junho e os menos chuvosos em julho, agosto, setembro e outubro. Temperatura média anual 25°C e precipitação média anual 3000 mm.

DESCRITO E COLETADO POR - Débora Ayumi Ishida, Célia Regina Montes e Yves Lucas.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Horizonte O: 0 a +5 cm; serrapilheira constituída por manto de raízes e folhas, estando algumas em decomposição e outras com estrutura reconhecível.

Horizonte A: 0-30 cm; amarelo-avermelhado (7,5YR 6/6, úmido) e rosado (7,5YR 8/4, seco), volume bruno-acinzentado (10YR 5/2, úmido) e cinzento-claro (10YR 7/2, seco), volume cinzento-claro (10YR 7/2, úmido) e

bruno muito claro-acinzentado (10YR 8/2, seco) e mosqueado fino vermelho-amarelado (7,5YR 5/6 e 5/8); franco-arenosa; fraca grande e muito grande blocos subangulares; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica e não pegajosa; transição clara e ondulada.

Horizonte Cg1: 30-50 cm, cinzento-claro (10YR 7/2, úmido) e branco (10YR 8/1, seco) e mosqueados bruno-forte (7,5YR 5/6) e bruno (10YR 4/3); franco-arenosa; maciça; dura, friável, não plástica e não pegajosa; transição difusa e ondulada.

Horizonte Cg2: 50-70 cm; cinzento-claro (5Y 7/1, úmido) e amarelo-claro-acinzentado (2,5Y 8/2, seco) e mosqueado amarelo-brunado (10YR 6/8); franco-arenosa; maciça; dura, friável, não plástica e não pegajosa; transição difusa e ondulada.

Horizonte Cg3: 70-130 cm; cinzento-claro (10YR 7/1, úmido) e amarelo-claro-acinzentado (2,5Y 8/2, seco) e mosqueado amarelo-brunado (10YR 6/8); franco-arenosa; maciça; dura, friável, não plástica e não pegajosa; transição difusa e ondulada.

Horizonte Cg4: 130-180 cm; cinzento-claro (2,5Y 7/2, úmido) e branco (2,5Y 8/1, seco), volumes bruno-acinzentado muito escuro (10YR 3/2, úmido) e bruno-acinzentado (10YR 5/2, seco) e mosqueados bruno-oliváceo (2,5Y 4/4) e branco (GLEY 1 8/N); franco-arenosa; maciça; dura, friável, não plástica e não pegajosa; transição difusa e ondulada.

Cg5: 180-200+ cm; amarelo-claro-acinzentado (2,5Y 8/2, úmido) e branco (2,5Y 8/1, seco) e volumes bruno-acinzentado muito escuro (2,5Y 3/2, úmido) e cinzento-brunado-claro (2,5Y 6/2, seco); franca; maciça; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica e não pegajosa.

RAÍZES - Muitas muito finas a grossas no O, A; comuns muito finas e finas no Cg1, Cg2, Cg3, Cg4, Cg5.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DETALHADA

0 a +5 cm: Horizonte O. Horizonte orgânico constituído por manto de raízes e folhas em diferentes estágios de decomposição.

0-30 cm: Horizonte A. Horizonte organo-mineral heterogêneo apresenta matiz amarelo-avermelhado com volumes bruno-acinzentados e cinzento-claros influenciados pela matéria orgânica. Notaram-se sinais de hidromorfia através dos mosqueados finos vermelho-

amarelados. A passagem para o Cg1 faz-se de forma clara e ondulada devido à diminuição de matéria orgânica.

30-50 cm: Horizonte Cg1. Esse horizonte franco-arenoso apresenta matiz cinzento-claro com muitos mosqueados de coloração bruno-forte e bruna, típicos de ambientes hidromórficos, associados às raízes finas. A transição com o Cg2 faz-se de forma difusa e ondulada a partir do clareamento do matiz.

50-70 cm: Horizonte Cg2. Similar ao horizonte anterior, a diferença está no matiz que embora continue o mesmo, torna-se um pouco mais claro. A transição com o Cg3 é difusa e ondulada devido ao amarelecimento do matiz.

70-130 cm: Horizonte Cg3. Idem ao anterior, com exceção ao veio de fragmentos grandes de quartzo que ocorre entre 100 e 130 cm de profundidade. A transição com o Cg4 é difusa e ondulada devido ao amarelecimento do matiz.

130-180 cm: Horizonte Cg4. Horizonte apresenta matiz cinzento-claro e textura franco-arenosa com volumes decorrentes da mesofauna, preenchidos por material fino e fragmentos de quartzo, associados à circulação de água. A passagem para o Cg5 faz-se de maneira difusa e ondulada a partir do amarelecimento do matiz e da diminuição da fração areia.

180-200 cm: Horizonte Cg5. Nesse horizonte franco, observaram-se cores amarelo-claro-acinzentada com volumes bruno-acinzentados muito escuros. Os volumes associados à atividade biológica observados no horizonte sobrejacente penetram nesse horizonte. Foi observado afloramento de lençol associado às galerias de origem biológica, raízes e mesofauna, preenchidas por plasma bruno-acinzentados com fragmentos de quartzo mais grosseiros.

Em todo o perfil ocorrem muitos pedotúbulos alguns preenchidos por material preto (2,5Y 2,5/1), provavelmente excrementos de minhocão, outros preenchidos por material argiloso bruno-acinzentado muito escuro (10YR 3/2), e outros vazios com revestimento amarelo-brunado (10YR 6/8). Os volumes bruno-acinzentados observados em topo o perfil, estão associados à circulação de água.

ANEXO B

RESULTADOS DAS ANÁLISES MINERALÓGICAS DOS PERFIS, DA ALTERAÇÃO E DOS NÓDULOS

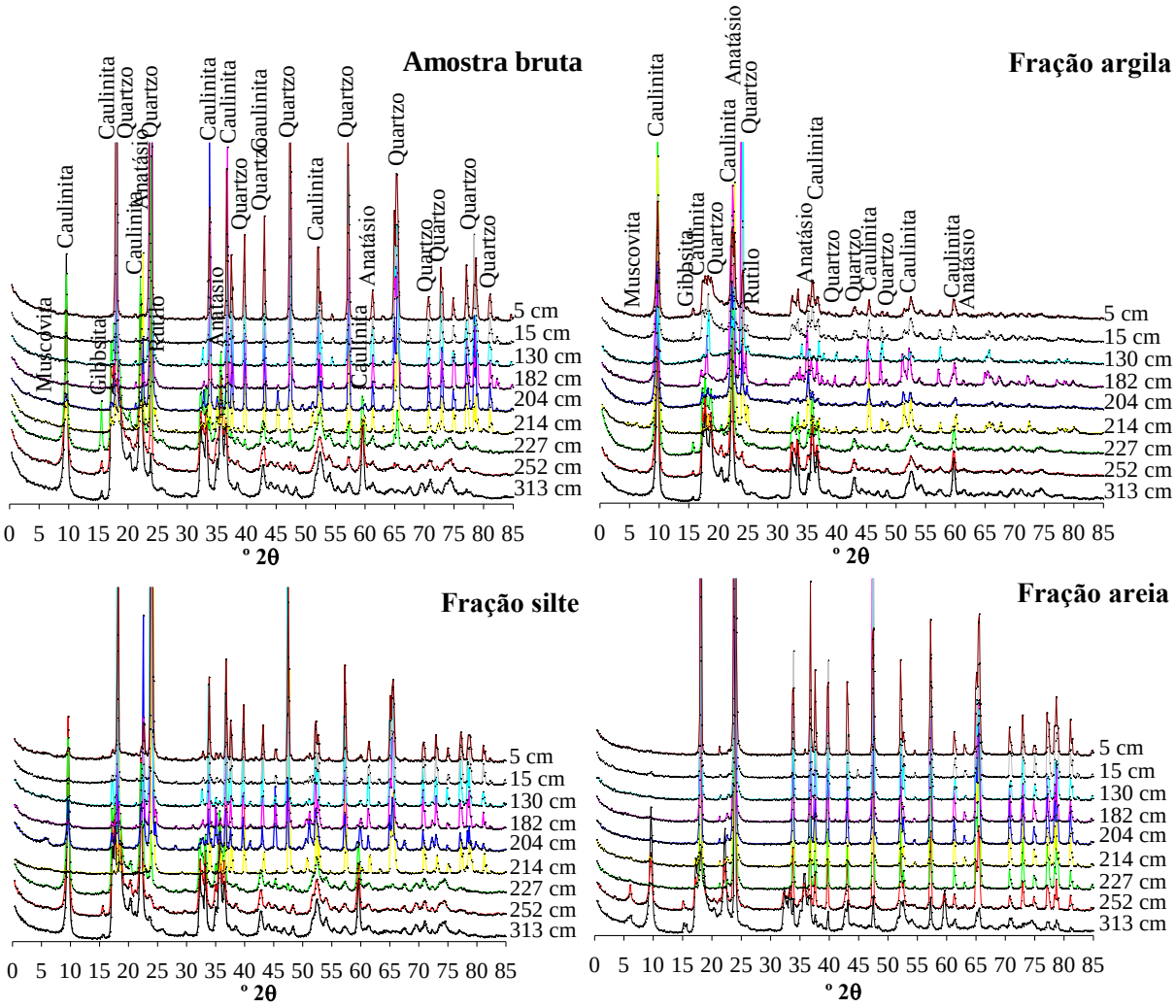

Figura B. 1 - Difratogramas de raios-X do perfil P1 (Espodossolo Humilúvico).

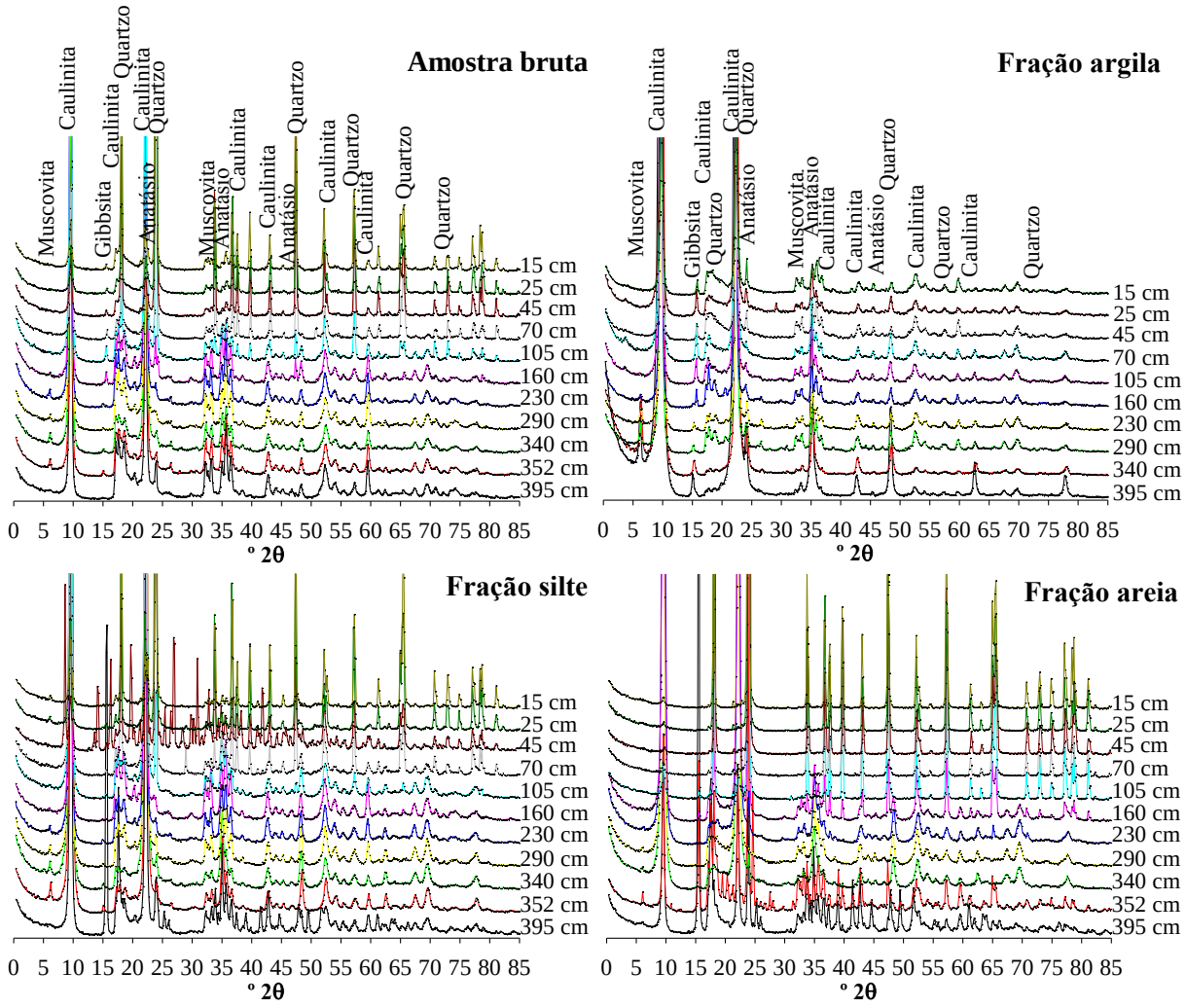

Figura B. 2 - Difratogramas de raios-X do perfil P2 (Latossolo Amarelo).

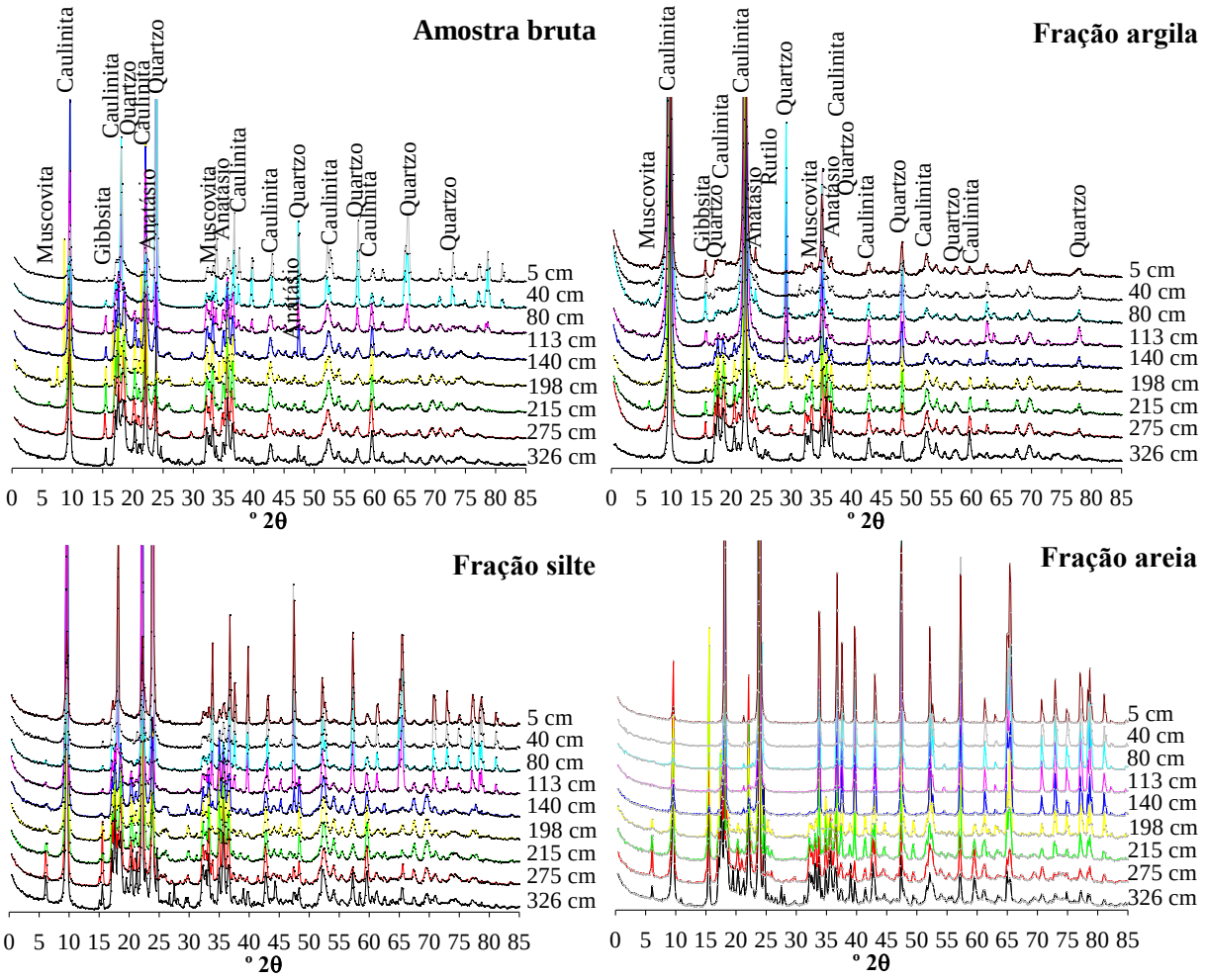

Figura B. 3 - Difratogramas de raios-X da fração areia do perfil P3 (Latossolo Amarelo).

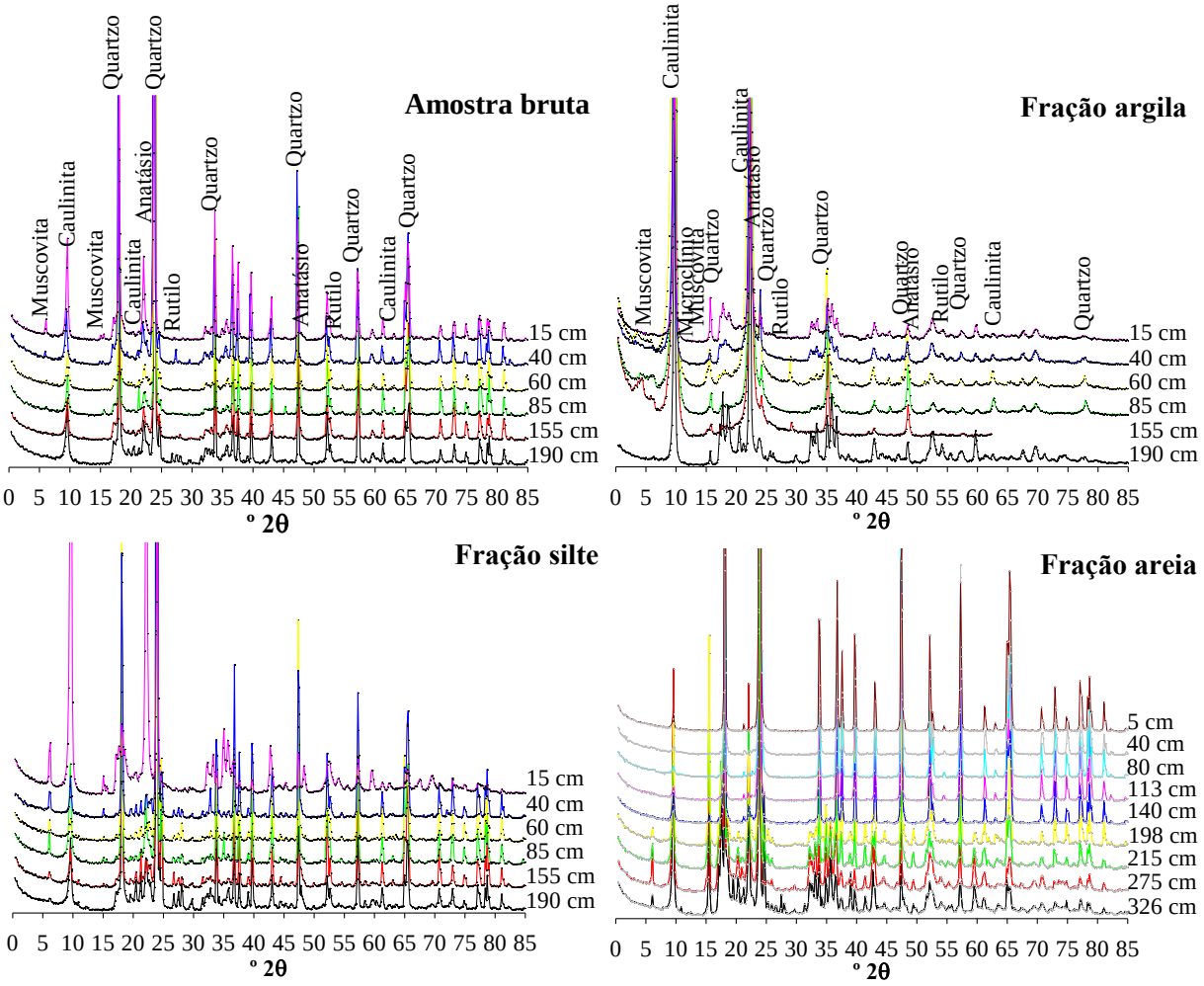

Figura B. 4 - Difratogramas de raios-X do perfil P4 (Gleissolo Háplico).

ANEXO C

RESULTADOS DA APLICAÇÃO DE MÉTODOS PARA ESTIMAR A ORDEM ESTRUTURAL DA CAULINITA

Tabela C 1 - Resultados experimentais da aplicação de sete métodos para estimar o grau de ordem estrutural da caulinita na fração argila.

Horizonte/ Camada	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	Métodos								
			Hinckley	R2 Liètard	Stoch	Hughes-Brown	Aparicio-Galán-Ferrell	Amigó 001	Amigó 002	Caulinita (ºC)	Mulita (ºC)
P1 - Espodossolo Humilúvico											
A1	0-5	5	0,71	0,90	0,99	23,10	0,83	0,40	0,34	504,88	1004,97
A2	5-30	15	0,56	0,96	1,22	26,86	0,69	0,38	0,33	506,05	988,37
E1	30-180	130	NC	0,93	1,29	12,43	NC	0,38	0,34	498,84	983,63
E2	180-202,5	182	NC	1,00	NC	13,76	NC	0,34	0,33	498,69	984,59
Bh	202,5-204	204	0,73	1,00	1,43	15,72	0,40	0,33	0,31	501,58	980,27
Bhs	204-214	214	0,78	1,05	1,59	16,89	0,66	0,35	0,34	499,03	986,52
Transição	214-245	227	0,76	0,85	0,73	20,72	0,84	0,39	0,36	510,73	990,94
K1	245-290	252	0,83	0,89	0,97	33,45	0,83	0,38	0,34	506,12	998,01
K2	290+	313	0,89	0,86	0,95	44,52	0,85	0,35	0,31	507,25	995,48
P2 - Latossolo Amarelo											
A2	10-20	15	NC	0,93	1,15	18,09	NC	0,40	0,29	504,14	980,84
BA	20-30	25	0,45	0,90	1,11	17,10	0,90	0,40	0,28	502,81	976,45
Bw1	30-60	45	NC	0,88	NC	22,57	NC	0,41	0,29	503,82	981,54
Bw2	60-90	70	0,51	0,90	1,01	13,09	0,65	0,39	0,29	505,33	974,39
Bw3	90-120	105	0,71	0,87	0,80	13,03	0,59	0,43	0,31	508,02	974,07
Transição	120-210	160	1,11	0,89	0,69	20,10	0,98	0,38	0,33	511,86	979,26
Kn1	210-250	230	0,95	0,86	0,93	21,44	0,58	0,45	0,37	507,84	972,00
Kn2	250-320	290	1,00	0,88	0,88	22,75	0,71	0,40	0,34	511,20	977,09
Kn3	320-380	340	0,95	0,90	0,92	16,51	0,98	0,39	0,32	510,95	966,47
Kn4	380+	395	1,00	0,83	0,80	15,01	0,96	0,40	0,36	510,27	954,36
P3 - Latossolo Amarelo											
A	0-10	5	0,56	0,99	1,06	17,67	0,64	0,32	0,26	504,87	982,88
AB	10-40	40	0,61	1,00	1,06	27,81	0,82	0,31	0,26	498,86	917,44
Bw1	40-95	80	1,32	1,01	1,01	23,37	0,60	0,30	0,24	500,10	975,75

Horizonte/ Camada	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	Métodos								
			Hinckley	R2 Lièrtard	Stoch	Hughes-Brown	Aparicio-Galán-Ferrell	Amigó 001	Amigó 002	Caulinita (ºC)	Mulita (ºC)
Bw2	95-130	113	1,01	1,01	0,75	34,33	1,00	0,27	0,24	507,66	968,20
Bwc topo	130-210	140	1,46	1,10	0,59	46,62	1,62	0,24	0,22	514,37	980,07
Bwc base		198	1,57	1,14	0,55	48,25	2,28	0,20	0,19	517,44	983,64
Kn topo	210+	215	1,49	1,10	0,56	57,63	2,27	0,23	0,21	519,71	990,13
Kn centro		275	1,38	1,09	0,55	61,07	1,77	0,21	0,20	516,70	989,01
Kn base		326	1,30	1,10	0,61	35,23	1,37	0,23	0,21	517,47	988,40
P4 - Gleissolo Háplico											
A	0-30	40	0,53	0,88	1,24	16,54	0,64	0,37	0,26	522,77	978,71
Cg1	30-50	60	0,87	0,99	0,82	10,19	0,63	0,34	0,29	499,64	978,48
Cg2	50-70	85	0,56	0,86	1,21	16,27	0,56	0,37	0,26	497,61	974,42
Cg3	70-130	155	0,52	0,84	1,14	15,78	0,60	0,37	0,27	500,52	974,59
Cg4	130-180	190	0,54	0,85	1,13	20,27	0,50	0,37	0,26	505,82	ND (1)
Cg5	180+	0	0,58	0,76	1,13	16,41	1,17	0,46	0,27	499,38	975,19

(1) ND = não analisado

Tabela C 2 - Análise térmica diferencial e gravimétrica da fração granulométricas argila.

Horizonte/ Camada	Profundidade (cm)	Profundidade de coleta (cm)	ATG Caulinita (%)	ATD Caulinita (º C)	ATD Mulita (º C)
P1 - Espodossolo Humilúvico					
A1	0-5	5	91,28	504,88	1004,97
A2	11079	15	83,37	506,05	988,37
E1	60-180	130	23,22	498,84	983,63
E2	180-202,5	182	48,17	498,69	984,59
Bh	202,5-204	204	70,57	501,58	980,27
Bhs	204-214	214	39,84	499,03	986,52
Transição	214-245	227	89,62	510,73	990,94
K1	245-290	252	87,71	506,12	998,01
K2	290+	313	95,32	507,25	995,48
P2 - Latossolo Amarelo					
A2	10-20	15	82,66	504,14	980,84
BA	20-30	25	82,92	502,81	976,45
Bw1	30-60	45	83,84	503,82	981,54
Bw2	60-90	70	84,15	505,33	974,39
Bw3	90-120	105	81,52	508,02	974,07
Transição	120-210	160	85,85	511,86	979,26
Kn1	210-250	230	82,64	507,84	972,00
Kn 2	250-320	290	89,28	511,20	977,09
Kn 3	320-380	340	82,29	510,95	966,47
Kn 4	380+	395	88,21	510,27	954,36
P3 - Latossolo Amarelo					
A	0-10	5	99,56	504,87	982,88
AB	14885	40	84,87	498,86	917,44
Bw1	40-95	80	87,36	500,10	975,75
Bw2	95-130	113	99,62	507,66	968,20
Bwc topo	130-210	140	96,74	514,37	980,07
Bwc base	0	198	96,10	517,44	983,64
Kn topo	210+	215	89,36	519,71	990,13
Kn centro	0	275	87,86	516,70	989,01
Kn base	0	326	86,38	517,47	988,40
P4 - Gleissolo Háplico					
A	0-30	15	78,48	522,77	978,71
Cg1	30-50	40	77,42	499,64	978,48
Cg2	50-70	60	84,66	497,61	974,42
Cg3	70-130	85	85,54	500,52	974,59
Cg4	130-180	155	81,83	505,82	ND (1)
Cg5	180+	190	87,26	499,38	975,19