



Universidade Federal do Pará
Centro de Geociências
Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

**MINERAIS PESADOS DAS FORMAÇÕES IPIXUNA E
BARREIRAS, REGIÃO DE IPIXUNA, LESTE DA
SUB-BACIA DE CAMETÁ – NE DO PARÁ**

TESE APRESENTADA POR

MARIVALDO DOS SANTOS NASCIMENTO

Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências
na Área de GEOLOGIA.

Data de Aprovação: **20 / 02 / 2002**

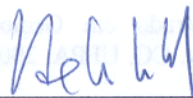
Comitê de Tese:



ANA MARIA GÓES (Orientador)



WERNER TRUCKENBRODT



HELENICE VITAL

*Aos meus pais Raimundo e Rosalina.
Ao meu irmão Raimundo Nascimento "Raimundinho",
(in memoriam)*

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas contribuíram para a realização deste trabalho e, desta forma, manifesto a todas elas o meu mais profundo reconhecimento:

À minha orientadora Prof. Dra. Ana Maria Góes (CG/UFGA), pela amizade e constantes incentivos à minha formação profissional.

Aos meus amigos e co-orientadores Dra. Dilce de Fátima Rossetti e Dr. Werner Truckenbrodt, pelo apoio científico, discussões e sugestões.

Ao MSc. Antônio Emídio Santos Júnior, pelo convívio harmonioso e contribuições científicas.

Ao pesquisador do MPEG, Dr. Hilton Túlio Costi, pela prestigiosa ajuda na realização das análises em MEV das amostras de minerais pesados.

Aos meus grandes amigos: MSc. Fabrício D. Lima, MSc. Junny Keley e Dr. Roberto Vizeu, pelo companheirismo e incentivo.

Aos meus pais Raimundo e Rosalina, pelo exemplo de vida.

Os agradecimentos também são extensivos:

À Universidade Federal do Pará, através dos seus laboratórios de sedimentologia e petrografia, e do Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica.

À CAPES, pelo apoio financeiro mediante a concessão da bolsa de mestrado durante a realização deste trabalho.

Ao Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG), pelo apoio financeiro e, também, laboratorial.

À Imery Rio Capim Caulim (IRCC) e Parapigmentos/SA (PPSA) nas pessoas do Eng. de Minas Leonardo Duarte Fonseca e do geólogo Carlos Henrique L. Bastos, respectivamente, pelos apoios logísticos durante os trabalhos de campo.

SUMÁRIO

	Pg.
DEDICATÓRIA.....	i
AGRADECIMENTOS.....	ii
LISTA DE LUSTRAÇÕES.....	iv
RESUMO	1
ABSTRACT	3
1- INTRODUÇÃO	5
2- GEOLOGIA REGIONAL	7
3- ASPECTOS ESTRATIGRÁFICOS E FACIOLÓGICOS	10
3.1- FORMAÇÃO IPIXUNA	16
3.2- FORMAÇÃO BARREIRAS	19
4- METODOLOGIA	21
4.1- AMOSTRAGEM E TÉCNICAS DE LABORATÓRIO	21
4.2- DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES DE ZTR E RUZI.....	22
4.3- ESTUDO DAS VARIEDADES DE TURMALINA E ZIRCÃO	23
5- PROCESSOS CONTROLADORES DOS MINERAIS PESADOS NO AMBIENTE GEOLÓGICO	24
5.1- INTRODUÇÃO	24
5.2- COMPORTAMENTO HIDRÁULICO	25
5.3- INTEMPERISMO QUÍMICO/DIAGÊNESE	26
6- APLICAÇÃO DO ESTUDO DE MINERAIS PESADOS	28
6.1- PROVENIÊNCIA E ESTRATIGRAFIA	28
6.2- PALEOGEOGRAFIA, PAEOCLIMA E PAEOAMBIENTE	29
7- MINERALOGIA E ASPECTOS TEXTURAIS DOS MINERAIS PESADOS DAS FORMAÇÕES IPIXUNA E BARREIRAS	30
7.1- VISÃO GERAL	30
7.2- FORMAÇÃO IPIXUNA	35
7.3- FORMAÇÃO BARREIRAS	44
8- VARIEDADES DE TURMALINA E ZIRCÃO DAS FORMAÇÕES IPIXUNA E BARREIRAS	53
8.1- TURMALINA	53
8.2- ZIRCÃO	61
9- DISCUSSÃO	68
10- CONCLUSÕES	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

	Pg.
Figura 1: Arcabouço tectônico regional (B), mostrando a localização da Sub-bacia de Cametá, os afloramentos estudados e os principais lineamentos.....	6
Figura 2: Carta estratigráfica da Bacia de Marajó e os posicionamentos dos depósitos estudados. Adaptada de Villegas (1991).....	8
Figura 3: Representação do empilhamento estratigráfico e da distribuição lateral dos depósitos que ocorrem nos afloramentos estudados, na borda leste da Sub-Bacia de Cametá. As seções (1) na BR 010, (5) na IRCC e (6) na PPSA estão localizadas nas figuras 1 e 7.....	12
Figura 4: Depósitos atribuídos à Formação Alcântara sobrepostos pela Formação Ipixuna às margens do Rio Capim na interseção com a PA 451.....	12
Figura 5: Vista panorâmica da Formação Ipixuna ao longo da rodovia Belém-Brasília (BR 010), próximo à cidade de Ipixuna.....	13
Figura 6: Vista geral das formações Ipixuna, Barreiras e Pós-Barreira na mina da Imery Rio Capim Caulim (IRCC), na região de Tomé-Açú. Notar a discordância erosiva (em vermelho) entre as formações Ipixuna e Barreiras.....	14
Figura 7: Vista panorâmica das formações Ipixuna e Barreiras expostas na Parapigmento SA. (PPSA), região de Tomé-Açú. Notar a discordância (linha em vermelho).....	15
Figura 8: Seções colunares mostrando os intervalos estratigráficos estudados das formações Ipixuna e Barreiras com a distribuição dos principais minerais pesados encontrados nos depósitos arenosos destas formações: 1-7) seções elaboradas a partir de dados coletados em afloramentos, onde as amostras foram posicionadas de acordo com as mudanças faciológicas e superfícies de descontinuidades; o comportamento do índice RuZi indica mudanças na proveniência de sedimentos. Notar a inconformidade entre as duas formações estudadas indicada pela linha vermelha.	34
Figura 9: Fotomicrografia das variedades de zircão da Formação Ipixuna: (Zr2) forma euédrica zonada; (Zr3) forma euédrica não zonada; (Zr4) forma euédrica, amarelada, zonada; (Zr5) formas subédricas, arredondadas zonadas e não zonadas (luz natura).....	37

Figura 10: Fotomicrografias das principais variedades de turmalina da Formação Ipixuna: (Tu1) forma irregular marrom; (Tu2) formas angulosas com inclusões e fraturamentos conchoidais; (Tu4) formas prismáticas subédricas partição basal e inclusões; (Tu5) formas prismáticas arredondadas e corroídas, com inclusão de zircão; (Tu6) formas alongadas verde; (Tu7) forma bem arredondada com sobrecrecimento (luz natural).....**38**

Figura 11: Fotomicrografias de cianita da Formação Ipixuna exibindo formas ainda prismáticas e arredondadas, bastante corroídas. Estas características são exclusivas desta formação (luz natural).....**39**

Figura 12: Imagens de microscopia eletrônica de varredura de cianita da Formação Ipixuna exibindo estágios avançados de dissolução: (A) forma irregular com cavidades triangulares formadas pela intercessão de planos de clivagens; (B) detalhe de (A) mostrando cavidades (setas); e (C e D) aspecto cavernoso dos grãos mas ainda exibindo clivagem (setas).....**43**

Figura 13a: Fotomicrografias de estaurolita da Formação Ipixuna corroídas, exibindo geralmente formas irregulares e corroídas (luz natural).....**40**

Figura 13b: Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de estaurolita da Formação Ipixuna: (A-D) grãos irregulares corroídos. Notar a forma lenticular das cavidades orientadas com os planos de clivagem (setas vermelhas e linha pontilhada); e (E) Grão com inclusão de turmalina (Tu) e sinais de corrosão**40**

Figura 14a: Fotomicrografias de rutilo da Formação Ipixuna: (A) forma arredondada; e (B) forma prismática arredondada (luz natural).....**41**

Figura 14b: Imagens de microscopia eletrônica de varredura de rutilo: (A-C) grãos prismáticos arredondados da Formação Ipixuna mostrando forte retrabalhamento e ausência de corrosão.....**41**

Figura 15: Fotomicrografias de anatásio da Formação Ipixuna: (A) forma irregular arredondada, provavelmente transportada, exibindo feições de clivagem; (B) forma em caixa (autigênica) com arestas preservadas indicando pouco ou nenhum transporte; e (C) forma prismática arredondada (luz natural).....**42**

Figura 16: Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de ilmenita com intercrecimento de magnetita da Formação Ipixuna..**43**

Figura 17: Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em ilmenita da Formação Ipixuna.....**43**

Figura 18: Fotomicrografias à de zircão da Formação Barreiras: (Zr2) formas subédricas zonadas; (Zr3) formas prismáticas e euédricas com ou sem zoneamento; e (Zr5) formas arredondadas, incolores, sem zoneamento (luz natural).....46

Figura 19: Fotomicrografias de estaurolita da Formação Barreiras: mostrando formas geralmente irregulares, angulosas e subarredondadas, pseudo-prismáticas, com coloração amarelo intenso a amarelo pálido (luz natural).....47

Figura 20: Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em estaurolita da Formação Barreiras: (A) forma alongada angulosa, mostrando em (A1) detalhe de feições de clivagem e bordas arredondadas; (B e C) texturas de dissolução inicial dos grão (formas mamelonadas); (D e E) grãos irregulares e angulosos exibindo fraturamentos conchoidais, feições de corrosão e uma inclusão de zircão (Zr).....48

Figura 21: Fotomicrografias de turmalina da Formação Barreiras: (Tu2) forma angulosa sem inclusões; (Tu3) forma euédrica com inclusões; (Tu4) forma subédrica com abundantes inclusões; e (Tu7) forma bem arredondada; Os tipos Tu3 ocorrem preferencialmente nestes depósitos (luz natural).....49

Figura 22: Fotomicrografias de cianita da Formação Barreiras mostrando o caráter, geralmente, prismático tabular dos grãos, incolores ou suavemente azulados, pouco corroídos, contendo raras inclusões de minerais opacos e cavidades(luz natural).....50

Figura 23: Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de cianita da Formação Barreiras: (A - F) grãos, geralmente, pouco corroídos, exibindo caráter prismático tabular, com clivagem e partição formando ângulo de quase 90° graus.....51

Figura 24: Fotomicrografias de rutilo da Formação Barreiras à mostrando formas prismáticas, subédricas, com geminações em cotovelo. As cores variam entre amarelo avermelhado a vermelho escuro. Os grãos não apresentam sinais de corrosão e contêm inclusões (luz natural).52

Figura 25: Imagens de microscopia eletrônica de varredura de grãos de rutilo da Formação Barreiras: (A) grãos geralmente com caráter prismático subédricos e irregulares; (B) grãos com feições de fraturamento conchoidal e retrabalhamento.....52

Figura 26: Seções colunares das formações Ipixuna e Barreiras, expostas nas minas de caulim da IRCC,PPSA e na BR 010, mostrando a distribuição dos principais tipos de turmalina e a correlação das zonas definidas.....55

Figura 27: Imagens de microscopia eletrônica de varredura de turmalina da Formação Ipixuna mostrando a morfologia e texturas de dissolução: (A e B) formas prismáticas, subédricas, com fraturamentos (tipo Tu4); (C-E) formas prismáticas arredondadas (tipo Tu5); (F) detalhe do aspecto cavernoso dado pela dissolução. Notar as inclusões de zircão (seta).....56

Figura 28: Imagens de microscopia eletrônica de varredura de turmalina da Formação Ipixuna mostrando detalhes de texturas de dissolução: (A) superfície rugosa, (B) estruturas microgranulares, (C) grão irregular, arredondado e corroído, (D) placas hexagonais na superfície do grão.....57

Figura 29: Imagens de microscopia eletrônica de varredura de variedades de turmalina da Formação Barreiras: (A-E) formas euédricas com suas faces cristalinas (tipo Tu3), sugerindo sedimentos de primeiro ciclo sedimentar; (F) formas subédricas indicando sedimentos também pouco transportado (tipo Tu4).....58

Figura 30: Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de variedades de turmalina que ocorrem subordinadamente na Formação Barreiras : (A-D) formas prismáticas subédricas, exibindo fraturamentos, indicativo de primeiro ciclo sedimentar (tipo Tu4); (E-F) formas bem arredondadas, indicando sedimentos policíclicos (tipos Tu5 e Tu7). Observadas inclusão de zircão (seta). Os grãos arredondados (tipos Tu5 e Tu7).....59

Figura 31: Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em grãos de turmalina da Formação Barreiras mostrando algumas texturas superficiais e morfologias: (A e B) formas irregulares exibindo fraturamentos conchoidais (tipos Tu1 e Tu2); (C) uma seção basal desse mineral; (D) inclusões de zircão indicadas pela seta; (E) textura esferulítica superficial dos grãos; e (F) estriações (seta).....60

Figura 32: Distribuição estratigráfica das variedades de zircão nos depósitos das formações Barreiras e Ipixuna expostos nas minas de caulim da IRCC e PPSA, e na BR 010 na região de Tomé-Açú/Ipixuna, NE do Pará.....64

Figura 33: Imagens de microscopia eletrônica de varredura em grãos de zircão da Formação Ipixuna: (A-D) formas euédricas e subédricas exibindo suas faces cristalinas com terminações piramidais (tipo Zr2) indicando primeiro ciclo; (E) grãos com sobrecrecimento alterado pela corrosão (tipo Zr4).....65

Figura 34: Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em grãos de zircão da Formação Ipixuna: (A-E) formas prismáticas arredondadas sem a preservação de suas faces cristalinas e abundantes fraturamentos (tipo Zr5).....66

Figura 35: Imagens de microscopia eletrônica de varredura em zircões da Formação Barreiras: (A-B) formas euédrica exibindo faces cirtalinas (tipo Zr2); (C-D) formas subédricas com suas arestas suavemente arredondadas (tipo Zr2); (E-F) formas arredondado, indicando reciclagem de sedimento e/ou transporte prolongado (tipo Zr5).....	67
Figura 36: Separação das formações Ipixuna e Barreiras, através dos teores dos minerais pesados principais e do índice de ZTR.....	69
Figura 37: - Modelo ilustrando as possíveis áreas-fontes para as formações Ipixuna(A) e Barreiras (B).....	73
Figura 38: - Distribuição estratigráfica dos grãos euédricos, subédricos e arredondados de turmalina e zircão para formações Ipixuna e Barreiras.....	74

TABELAS

Tabela 1: Principais feições e proposta de proveniência de zircão detrítico (adaptada de Caironi et al 1996).....	24
Tabela 2: Estabilidade relativa de minerais pesados em solos podzólicos, com base em informações de Batemam & Catt (1985) e comparado com dados de estabilidade experimental de Nickel (1973).....	26
Tabela 3: Teores de minerais pesados, transparentes, não micáceos das formações Ipixuna (FI) e Barreiras (FB) das minas IRCC, PPSA e BR 010.....	31
Tabela 4: Grupos de zircão das formações Ipixuna e Barreiras. O comprimento das tarjas em negrito mostra a ordem crescente de abundância.....	72

RESUMO

Os minerais pesados transparentes (intervalo granulométrico 0,125-0,062mm) estudados neste trabalho, contidos em arenitos médios e finos, foram utilizados na investigação da proveniência e da influência dos processos intempéricos e ambientais relacionados às formações Ipixuna (Cretáceo Superior) e Barreiras (Mioceno Médio/Superior) do leste da Sub-Bacia de Cametá (NE do Pará). A Formação Ipixuna consiste em arenitos grossos, médios e finos, caulínicos, com estratificação cruzada orientada preferencialmente para NE, N e subordinada para SE. Na base da formação ocorrem depósitos fluviais que gradam verticalmente para fácies estuarinas influenciadas por processos de maré e onda. A Formação Barreiras, por sua vez, é formada por arenitos médios a finos, quartzosos, com estratificação cruzada orientada preferencialmente para NW, NE e SW, depositados em canal fluvial influenciado por maré, bem como argilitos laminados, maciços e intercalações de argilitos e arenitos de planície de inundação.

Os minerais da Formação Ipixuna incluem grãos de zircão euédricos e subédricos zonados, euédricos e subédricos não-zonados e arredondados; e turmalinas angulosas e arredondadas de cores marrom, verde e azul, bem como grãos subédricos marrons e verdes. Subordinadamente, ocorrem zircão com forma angulosa e subédrica, amarelados; turmalina euédrica; marrom; cianita e estaurolita. Esporadicamente, ocorrem rutilo, andaluzita, sillimanita, anfibólio, topázio e anatásio. Zircão, turmalina, estaurolita e cianita compõem, em média, 72, 15, 6 e 3% da assembléia, respectivamente. Os valores de ZTR atingem 98% enquanto o índice de RuZi é sempre menor que 10. Os grãos de estaurolita e cianita, como também de turmalina apresentam feições expressivas de dissolução bem visíveis através do microscópio eletrônico de varredura.

Os principais minerais da Formação Barreiras incluem: zircão arredondado e subédrico; estaurolita angulosa, de colorações amarelo-pálida e amarelo-avermelhada; turmalinas euédrica, subédrica, arredondada e angulosa; e cianita eudédrica. Secundariamente ocorrem turmalinas arredondadas nas colorações marrom, verde e azul. Muito pouco expressivos são rutilo, sillimanita, andaluzita, topázio e anatásio. Zircão, turmalina, estaurolita e cianita compõem, em média, 35, 19, 24 e 15% da assembléia, respectivamente. Os valores de ZTR atingem 70% e o índice de RuZi é para todas as amostras maior que 10. Ao contrário da Formação Ipixuna, os minerais pesados da Formação Barreiras são muito pouco afetados pelo intemperismo químico.

Conclue-se a partir destes dados que: (1) as formações Ipixuna e Barreiras podem ser separadas estratigraficamente através dos seus aspectos litológicos, teores relativos dos principais minerais pesados, variedades de turmalina e zircão, índices de ZTR e RuZi, e também pelo grau de corrosão da cianita, estaurolita e turmalina, mais expressiva na Formação Ipixuna; (2) a dissolução dos minerais da Formação Ipixuna pode ser relacionada ao processo de laterização paleogênica que deu origem ao caulim (saprólito) desta unidade; (3) o intemperismo pós-paleogênico não se mostrou importante na Formação Barreiras, já que seus minerais são pouco corroídos; (4) os tipos de turmalina e zircão, as medidas de paleocorrentes e os índice RuZi sugerem proveniência diferente para as formações Ipixuna e Barreiras, envolvendo rochas do Escudo Brasil-Central e da Faixa Araguaia-Tocantins (ao sul), do Cráton de São Luís e da Faixa Gurupi (a NE), respectivamente; (5) coberturas sedimentares, de unidades paleozóicas, podem ter fornecido os grãos arredondados.

ABSTRACT

The transparent heavy minerals (grain size 0.125-0.062mm separated from medium/fine-grained sandstones) from the Ipixuna Formation (Upper Cretaceous) and Barreiras Formation (Middle/Upper Miocene) of eastern Cametá Basin were examined to determine provenance and the influence of weathering and environment processes on these minerals. The Ipixuna Formation consists of coarse, medium and fine-grained sandstones, rich in quartz and kaolin, showing cross-bedding oriented to NE, N and NW, and kaolin deposits, the origin of which is related to Paleogene laterization. The lower part of this unit is characterized by fluvial deposits, which grade in the upper part to estuarine facies influenced by waves. The Barreiras Formation is composed of medium to fine-grained quartz rich sandstones, also with cross-bedding NE, N and NW-oriented, deposited in fluvial channel environment and claystone/sandstone-claystone intercalations representing flood plain deposits.

The heavy minerals of the Ipixuna Formation include zoned and non-zoned, euhedral and subhedral, as well as rounded zircon grains; angular and rounded, brown, green and blue tourmaline species, together with subhedral brown and green grains of this mineral group. Angular and subhedral, yellow zircon, euhedral brown tourmaline, kyanite and staurolite are fewer fragments whereas rutile, amphibole, topaz and anatase only occur sporadically. The zircon, tourmaline, staurolite and kyanite contents average 72, 15, 6 and 3% respectively of the assemblage. The ZTR values make 98% and the RuZi index is less than 10 for every sample. Staurolite, kyanite and even tourmaline grains show dissolution features that are very distinct in scanning electron micrographs.

The principal heavy mineral of the Barreiras Formation are rounded and subhedral zircon grains; angular light-yellow and reddish staurolite grains; euhedral, subhedral, rounded and irregular-angular tourmaline species and euhedral kyanite. Less abundant are brown, green

and blue tourmaline grains, whereas rutile, sillimanite, andalusite, topaz and anatase occur sporadically. The zircon, tourmaline, staurolite and kyanite contents average 35, 19, 24 and 15%, respectively of the mineral assemblage. The ZTR values make 70% and the RuZi index is greater than 10 for all samples. Contrary to the heavy minerals of the Ipixuna Formation, the Barreiras minerals are only little affected by chemical weathering.

The data obtained permit the following conclusions: the relative values of the principal minerals, the varieties of tourmaline and zircon, the ZTR and RuZi indices, as well as the distinct corrosion features in kyanite, staurolite and tourmaline grains of the Ipixuna Formation allow to separate this unit from the Barreiras Formation. The dissolution process, which affected the minerals of the Ipixuna Formation, is related to the Paleogene laterization responsible for the origin of kaolin (saprolite) and bauxite of the Paragominas District. The younger weathering processes were less important, considering that the heavy minerals of the Barreiras Formation were nearly spared from dissolution. The fact that the rounded zircon and tourmaline grains are more representative in the estuarine than in the fluvial deposits of the Ipixuna Formation point to intense sediment reworking in the former environment. However, part of the rounded grains may be related also to recycling. The few paleocurrent measures available and the nature of the heavy minerals for the Ipixuna and Barreiras formations, suggest as source for the sediments metamorphic and plutonic rocks of the Central-Brazil Shield and Araguaia-Tocantins Fold-Belt in the south, and the São Luís Craton and Gurupi in the northeast, respectively. Paleozoic(?) sediment cover could have supplied rounded grains.

1- INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o NE do Pará e o NW do Maranhão têm sido palco de intensas pesquisas sedimentológicas sobre depósitos cretáceos e terciários, que contribuíram, significativamente, para o entendimento da evolução paleoambiental, paleogeográfica e organização estratigráfica destas sucessões sedimentares (Anaisse Jr., 1999; Rossetti *et al.*, 1989, 1999; Rossetti, 2000, 2001; Rossetti & Truckenbrodt, 1997; Lima & Rossetti, 2001). Nota-se que são muitos os trabalhos enfocando os aspectos faciológicos e estratigráficos destas unidades, enquanto que ainda não existem pesquisas sistemáticas voltadas especificamente para mineralogia, em particular, os minerais pesados contidos nestes depósitos.

Na região do médio Rio Capim (NE do Pará), em função da lavra a céu-aberto para exploração do caulim, são encontradas belíssimas exposições sedimentares cretáceas e terciárias, as quais ainda não foram estudadas sistematicamente sob o ponto de vista de minerais pesados. Registram-se apenas os trabalhos de Hurst & Bosio (1975) e Sousa (2000) enfocando os aspectos mineralógicos, geoquímicos e tecnológicos dos depósitos de caulim. Desta forma, é dentro deste contexto que a presente dissertação visa: (1) estudar sistematicamente as assembléias desses minerais e as variedades de turmalina e zircão destes depósitos e analisar sua distribuição dentro de um contexto faciológico e estratigráfico, (2) avaliar a influência do intemperismo sobre esses minerais; (3) investigar a proveniência dos sedimentos, e (4) testar a aplicabilidade estratigráfica dos minerais pesados.

Os afloramentos estudados encontram-se na BR 010 e em frentes de lavras das minas da Imery Rio Capim Caulim (IRCC) e da Pará Pigmento/SA (PPSA). Estes depósitos fazem parte da porção leste

da Sub-Bacia de Cametá (sul da Bacia do Marajó) e correlacionam-se com as formações Ipixuna (Cretáceo Superior-Terciário Inferior?) e Barreiras (Mioceno Médio/Superior) da Bacia de São Luís-Grajaú (Figura 1).

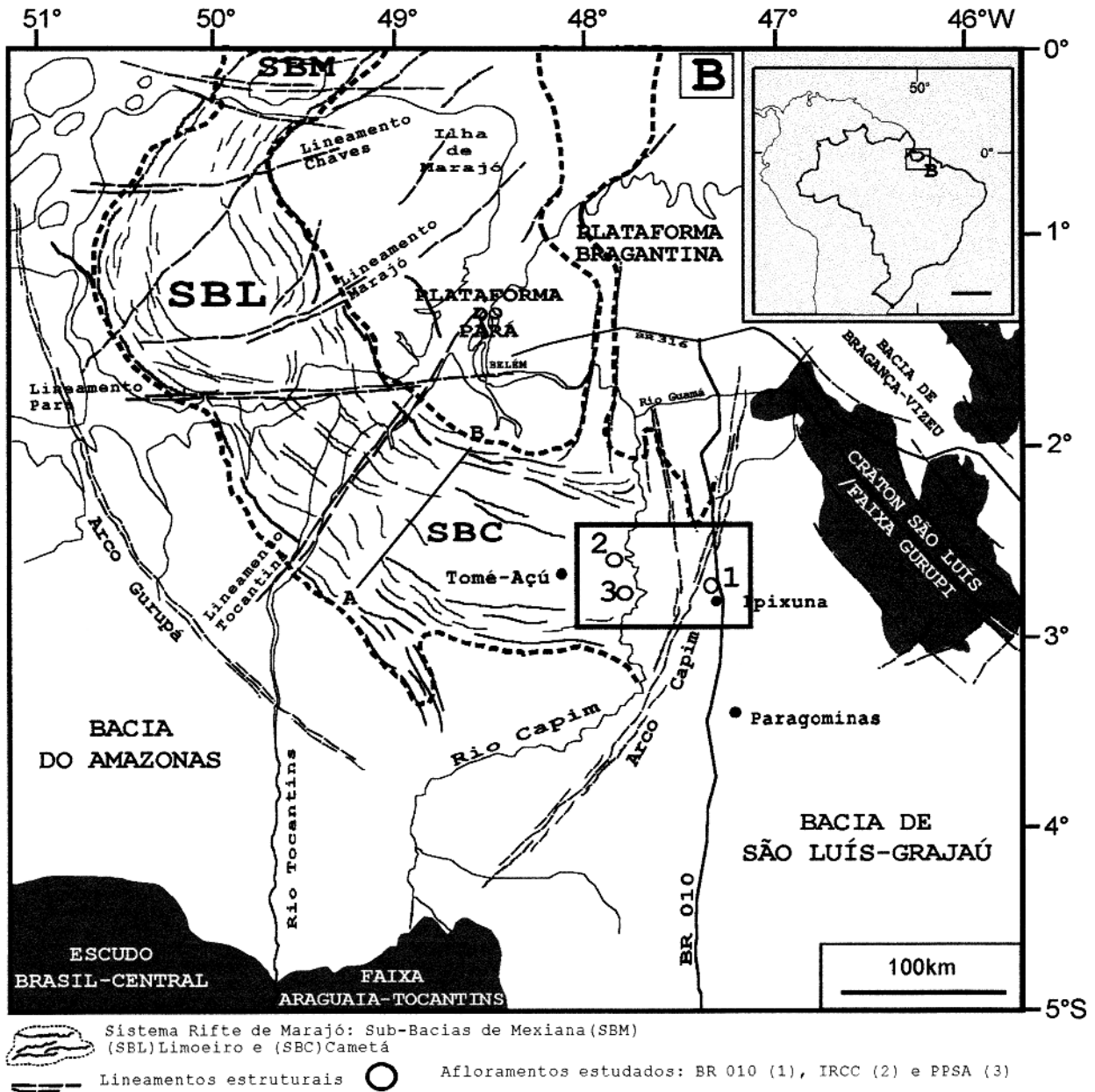


Figura 1 - Arcabouço tectônico regional (B), mostrando a localização da Sub-bacia de Cametá, os afloramentos estudados e os principais lineamentos.

2- GEOLOGIA REGIONAL

Localizada no norte do Brasil, a Bacia de Marajó (BM) é também conhecida como um complexo geológico denominado de "Sistema de Rifte do Marajó" (Galvão, 1991). Este rifte possui como limites a Bacia do Amazonas a sul, Bacia de São Luís-Grajaú a leste e as plataformas do Pará e Bragantina a nordeste (Figura 1). Esta bacia ocupa uma área de aproximadamente 180.000km² de extensão e tem sua origem relacionada à evolução da Margem Continental Norte Brasileira e, conseqüentemente, à abertura do Oceano Atlântico (Evento Sul-Atlântico), iniciada no Eocretáceo (Azevedo, 1991; Galvão, 1991; Igreja, 1992; Costa et al., 1996). À semelhança das bacias marginais brasileiras, a BM subdivide-se em três seqüências pré, sin e pós-rifte (Figura 2). O embasamento deste rifte é composto por rochas cristalinas (Craton São Luís, Escudo Brasileiro e faixas Gurupi e Tocantins-Araguaia) e pela seqüência intracratônica representada por rochas siliciclásticas paleozóicas depositadas em condições, ora correlacionadas aos depósitos fluviais e fluvio-glaciais a marinhos rasos do Grupo Serra Grande (Bacia do Parnaíba), ora aos folhelhos e diamictitos marinhos/glaciais do Grupo Urupadi (Bacia do Baixo Amazonas) (Figura 2). As seqüências pré e sin-rifte são formadas por dois pacotes sedimentares: o mais antigo (Neoconiano), reconhecido apenas através de dados indiretos, representa estágios precoces de abertura da bacia, enquanto o pacote mais novo (Aptiano-Cenomaniano) é composto de sedimentos arenosos da Formação Breves e está relacionado ao estágio de ampliação da bacia (Schaller et al., 1971; Villegas, 1994). A seqüência pós-rifte inclui duas unidades principais: a mais antiga corresponde à Formação Limoeiro (Campaniano-Paleoceno) que consiste em arenitos, conglomerados e argilitos. Já a unidade superior (Eoceno-Holoceno) é composta de arenitos, argilitos e carbonatos da Formação Marajó que grada lateralmente para espessa seqüência

carbonática da Formação Amapá, ambos pacotes sobrepostos por arenitos e argilitos das formações Pirarucu e Tucunaré (Schaller et al., 1971; Villegas, 1994) (Figura 2).

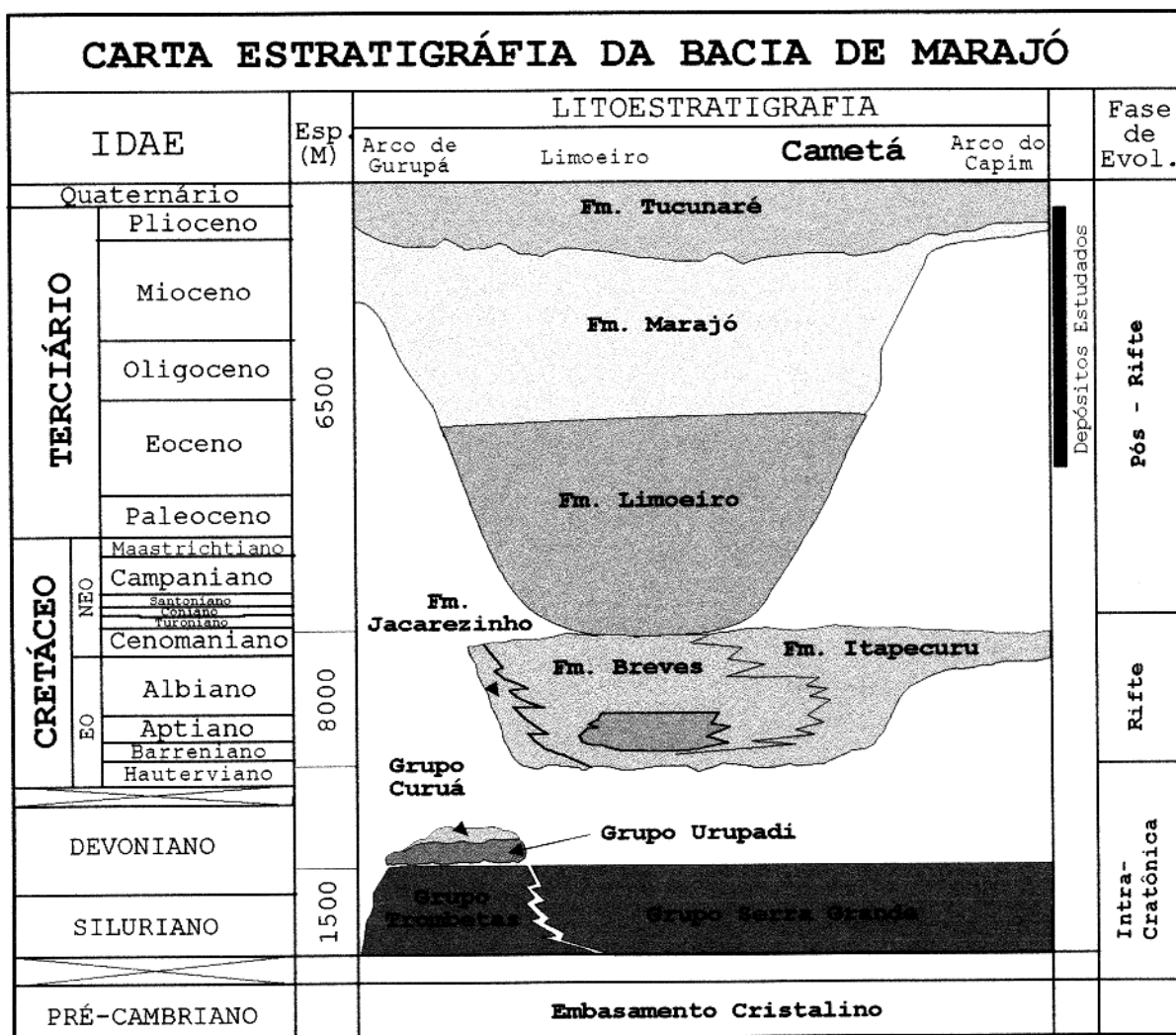


Figura 2 - Carta estratigráfica da Bacia de Marajó e os posicionamentos dos depósitos estudados. Adaptada de Galvão (1991).

A BM está subdividida em três sub-bacias Mexiana, Limoeiro e Cametá (Villegas, 1994). Os depósitos estudados encontram-se expostos na borda leste da Sub-Bacia de Cametá e por isso serão feitas algumas considerações a respeito da mesma. Esta sub-bacia possui forma assimétrica e alongada de direção NW-SE, com dimensões de 80 km de largura por 140km de comprimento, limitando-se a oeste pelo Lineamento Tocantins, a leste pelo Arco de Capim, a sul pela Bacia do Baixo Amazonas e a norte pela Plataforma do Pará (Figura 1). Circundando esta sub-bacia, ocorrem unidades geotectônicas representadas por núcleos cratônicos sinbrasilianos amazônicos e faixas de dobramentos que incluem o Escudo Brasil-Central, Cráton de São Luís e as faixas móveis Araguaia-Tocantins e Gurupi (Galvão, 1991), além das bacias do Baixo Amazonas e de São Luís-Grajaú, e das plataformas do Pará e Bragantina.

O Escudo Brasil-Central é essencialmente composto por gnaisses, migmatitos, granodioritos, riolitos, andesitos, sienitos, monzonitos, metassedimentos, rochas metabásicas e ultrabásicas, granulitos e anfibolitos, além de inúmeros granitóides (Cordani et al., 1984;). O Cráton de São Luís é constituído por gnaisses e migmatitos de composição granítica e tonalitos, supracrustais e granitóides não-metamorfizados (Almeida & Hasui, 1984).

A Faixa Araguaia-Tocantins, que bordeja o Escudo Brasil-Central por vários quilômetros, constitui-se numa extensa faixa de dobramentos com idade brasileira, onde se reúnem dois conjuntos litoestratigráficos: inferior (complexos Colméia e Porto Nacional) que compreendem gnaisses, granitóides e rochas metamórficas de alto-grau; e superior (grupos Estrondo e Pequizeiro), que envolvem metassedimentos da fácies xisto-verde a anfibolito (Hasui & Schobbenhaus, 1984). Esta faixa projeta-se

sobre a Sub-Bacia de Cametá, constituindo-se assim no seu principal embasamento (Galvão, 1991).

A Faixa Gurupi possui trend NW-SE e é composta por um complexo de rochas metamórficas designado de Grupo Gurupi. Este grupo contém diferentes tipos de gnaisses, granitos colisionais, fragmentos cratônicos remobilizados, quinzigitos, xistos, filitos, quartzitos e rochas metavulcânicas (Sadowiski, 2000).

Pouco se conhece sobre a natureza do embasamento entre as faixas Araguaia-Tocantins e Gurupi, sendo pouco provável que elas constituam um único sistema de dobramentos (Galvão, 1991). De acordo com este autor, existe a possibilidade de ocorrer um maciço entre as mesmas, talvez constituído por rochas mais antigas, retrabalhadas no Ciclo Brasileiro

3 - ASPECTOS ESTRATIGRÁFICOS E FACIOLÓGICOS

Os depósitos cretáceos e terciários aqui estudados encontram-se expostos na borda leste da Sub-Bacia de Cametá, na região do médio Rio Capim, e são correlacionados às formações Ipixuna e Barreiras (Santos Jr., 2002) pertencentes à seqüência pós-rifte desta sub-bacia.

A região do médio Rio Capim tem se destacado no âmbito nacional por comportar uma das maiores ocorrências de caulim do mundo, cuja origem ainda é motivo de intensas especulações. Este depósito faz parte de uma unidade sedimentar de idade cretácea, que até então tem sido estudada apenas nos seus aspectos geoquímicos e tecnológicos (Hurst & Bosio, 1975; Sousa, 2000). Além desta unidade cretácea podem ser encontradas consideráveis exposições terciárias que permitem uma excelente investigação da sua evolução paleoambiental. Apesar disso, são raros os trabalhos que tratem do detalhamento faciológico e estratigráfico destes depósitos nesta região. Registra-se apenas o trabalho de Góes

(1980) que focalizou os depósitos que ocorrem ao longo da BR 010. Mais recentemente foram realizadas investigações sedimentológicas por Santos Jr. (2002) abordando estas formações, que proporcionou significativos avanços para o entendimento da evolução paleoambiental destas sucessões sedimentares.

Além das formações Ipixuna e Barreiras, enfocadas neste trabalho, são registradas duas outras unidades litoestratigráficas correlacionadas à Formação Alcântara e aos depósitos Pós-Barreiras (Figura 3). Os arenitos e argilitos de coloração vermelho-chocolate, com estratificação cruzada *swaley* e laminação cruzada truncante de baixo ângulo, que ocorrem isoladamente nas margens do rio Capim, na interseção com a PA 451, mostram semelhança com os Depósitos Itapecuru na área de Açailândia (MA) (Anaisse et al. 2001), atribuídos à Formação Alcântara, considerada de idade neoalbian-cenomaniana (Figura 4). A Formação Ipixuna (Cretáceo Superior/Terciário Inferior?) ocorre amplamente ao longo da BR 010 (Figura 5), entretanto, as melhores exposições encontram-se nas minas da IRCC (Figura 6) e PPSA (Figura 7), e inclui arenitos e argilitos caulínicos, com abundantes estratificações cruzadas de diversos tipos, de coloração esbranquiçada (Santos Jr. 2002). A Formação Barreiras e os depósitos Pós-Barreiras expõe-se nas minas supracitadas, sendo encontrados com espessuras máximas de 20 e 8m, respectivamente, estando, aparentemente, ausentes ao longo da BR 010. A Formação Barreiras é representada por arenitos finos e médios, quartzosos, argilitos e conglomerados, de coloração amarela-avermelhada (figuras 6 e 7). Os depósitos Pós-Barreiras são constituídos de arenitos finos, maciços, de coloração marrom-amarelada.

O estudo de minerais pesados, conduzido neste trabalho, restringe-se às formações Ipixuna e Barreiras, e foi executado em conjunto com as investigações faciológicas e estratigráficas de Santos Jr. (2002), cujos resultados são sumarizados a seguir.

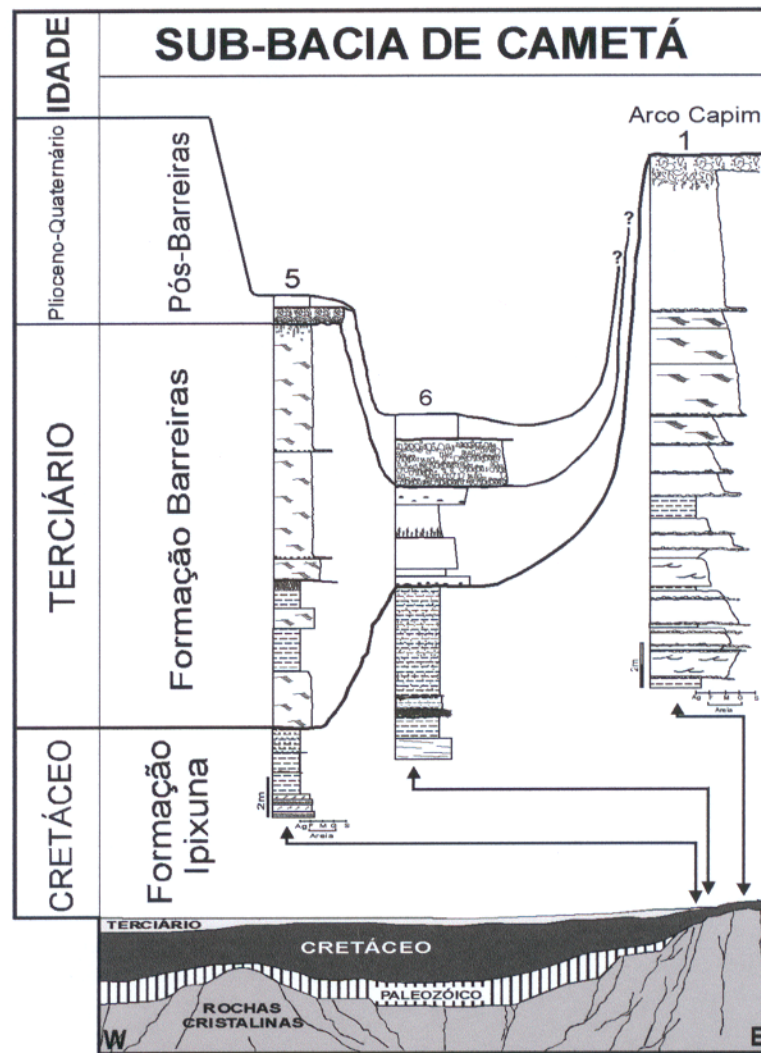


Figura 3 - Representação do empilhamento estratigráfico e da distribuição lateral dos depósitos que ocorrem nos afloramentos estudados, na borda leste da Sub-Bacia de Cametá. As seções (1) na BR 010, (5) na IRCC e (6) na PPSA estão localizadas nas figuras 1 e 7.

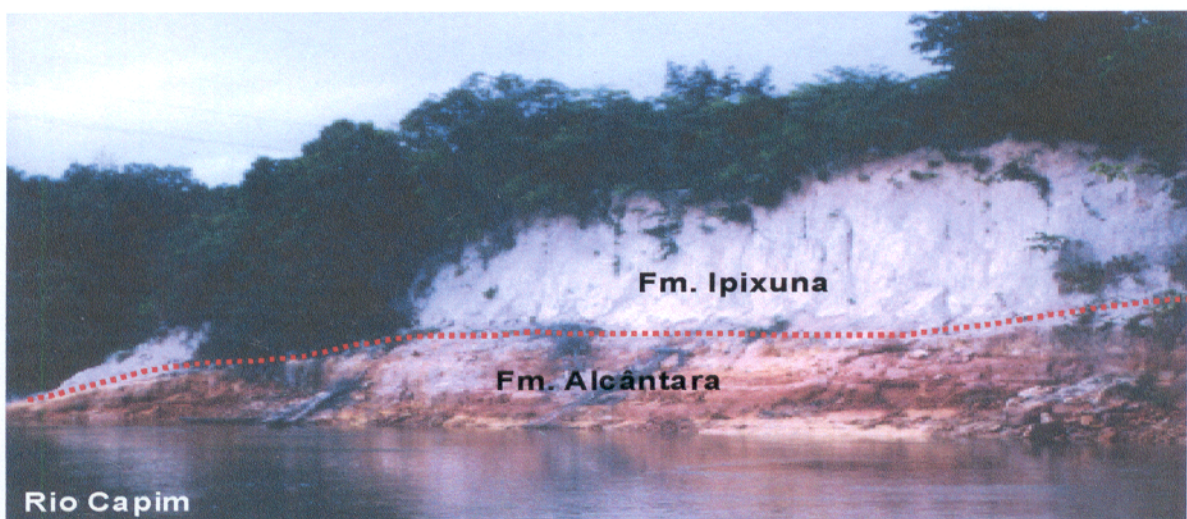


Figura 4 - Depósitos atribuídos à Formação Alcântara sobrepostos pela Formação Ipixuna às margens do Rio Capim na interseção com a PA 451.



Figura 5 - Vista panorâmica da Formação Ipixuna ao longo da rodovia Belém-Brasília (BR 010), próximo à cidade de Ipixuna.



Figura 6 - Vista geral das formações Ipixuna, Barreiras e Pós-Barreira na mina da Imery Rio Capim Caulim (IRCC), na região de Tomé-Açu. Notar a discordância erosiva (em vermelho) entre as formações Ipixuna e Barreiras.

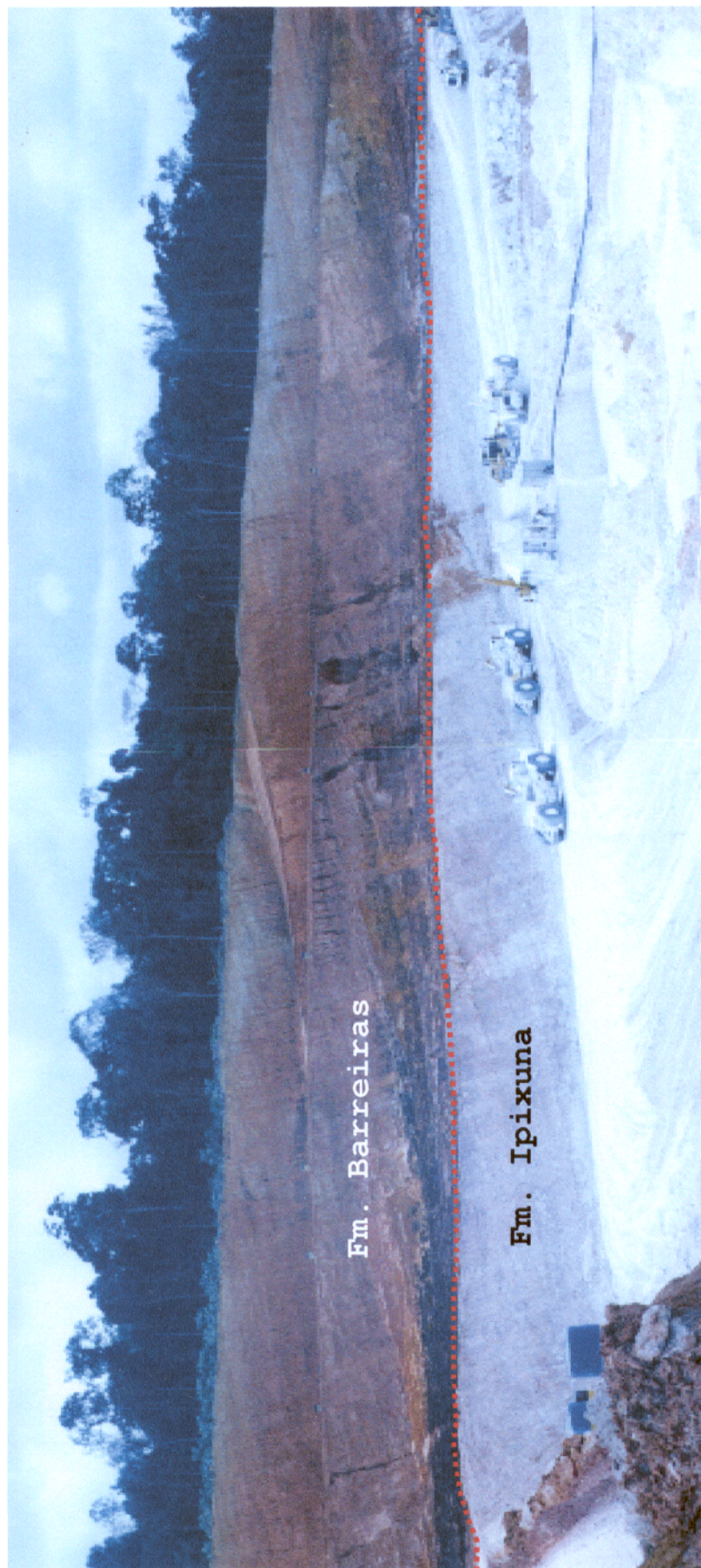


Figura 7 - Vista panorâmica das formações Ipixuna e Barreiras expostos na da Parapigmento SA. (PPSA), região de Tomé-Açu. Notar a discordância (linha em vermelho).

3.1- FORMAÇÃO IPIXUNA

A natureza caulínica dos depósitos da Formação Ipixuna a torna litologicamente diferente das demais unidades adjacentes, onde seus sedimentos podem ser facilmente distinguidos pelo seu aspecto esbranquiçado ou bege dado à presença do caulim. A origem destes depósitos ainda é objeto de intensas pesquisas (Koutschoubey *et al.*, 1996; Costa & Moraes, 1998; Sousa, 2000). Admite-se que, provavelmente, o intemperismo de rochas cristalinas feldspáticas, sob condições climáticas semi-áridas, produziu os sedimentos arcoseanos que originalmente formavam esta unidade (Koutschoubey *et al.*, 1996; Costa & Moraes, 1998). Porém, o clima não foi o único fator importante para a preservação dos feldspatos, uma vez que não são conhecidos arcóseos de idades aptiana-albiana quando as condições climáticas eram ainda mais secas, comparativamente ao Cretáceo Superior. Desta forma, acredite-se que o tectonismo tenha desempenhado importante papel (Rossetti *et al.*, 2001). Assim, estes sedimentos teriam sido produzidos em áreas soerguidas tectonicamente, transportados e depositados num ambiente estuarino (Santos Jr., 2002). Posteriormente, sob clima úmido e quente, foram alterados pela laterização paleogênica que promoveu a alteração do feldspato, filossilicatos, lixiviação do ferro e neoformação da caulinita dando origem aos depósitos de caulim (Koutschoubey *et al.*, 1996).

Os depósitos da Formação Ipixuna, aqui enfocados, são representados por arenitos caulínicos grossos, médios e finos, subordinadamente quartzosos, atribuídos a ambiente estuarino influenciado por onda. Nestes depósitos foram definidos sete sub-ambientes que podem ser agrupados em duas associações intergradacionais, atribuídas a ambientes deposicionais representativos de complexo fluvial na base e estuarino no topo (Santos Jr. 2002).

O complexo fluvial ocorre na base desta unidade, com espessura de aproximadamente 12m, é particularmente representado por arenitos estratificados, siltitos, argilitos e conglomerados intraformacionais, configurando uma granodecrescência ascendente. Este complexo pode ser subdividido em 2 sub-associações de fácies: (1) canal fluvial (influenciado por maré?) e (2) planície de inundação/*mud plug*.

(1) o **canal fluvial (influenciado por maré?)** ocorre na base da unidade com até 5m de espessura e inclui: um pacote de clastos de argilitos subangulosos a arredondados, maciços ou laminados, envolvidos por uma matriz arenosa de granulação média a grossa, mal selecionada, de composição quartzo-feldspática; conglomerados de arcabouço fechado, com clastos localmente imbricados; arenitos grossos, mal selecionados, com estratificação cruzada tabular de médio porte com paleocorrente dominante para NNE e SE.

(2) a **planície de inundação/*mud plug*** é representada por argilitos laminados, arenitos finos, com laminação plano-paralela e arenitos maciços, os quais formam um pacote com até 6m de espessura.

O complexo estuarino chega a medir cerca de 25 a 30m de espessura próximo à cidade de Ipixuna. Pode ser dividido em cinco sub-associações de fácies: (1) praia; (2) planície de maré; (3) preenchimento de baía central; (4) canal de maré; e (5) delta de maré.

(1) depósitos de **praia** possuem espessura de até 1m, encontram-se posicionados sobre os depósitos fluviais, sendo representados por arenitos finos, apresentando estratificação cruzada de baixo ângulo para NNE, N e NNW, onde são registrados traços fósseis de *Ophiomorpha* e *Thalassinoides*, *Planolites* e *Skolithos*; arenitos finos a muito finos, bem selecionados, com estratificação cruzada de baixo ângulo truncante, ressaltada por concentrações de minerais pesados. O alto grau de seleção e

arredondamento dos grãos, as características extremamente marcante de fluxo e refluxo de ondas, as altas concentrações de minerais pesados, a presença dos traços fósseis, sugerem um ambiente de praia em área próxima ao litoral.

(2) os depósitos de **planície de maré** possuem espessura máxima de 5m, são representados por argilitos com acamamento heterolítico, *wavy*, *linsen*, *flaser* e *pin stripe*, com abundantes traços fósseis de *Diploclaterion*, *Planolites*, *Thalassinoides*, *Teichichinus*, *Skolithos* e *Cylindrichnus*. Estes depósitos são atribuídos a ambientes com mudanças periódicas de energia que resultaram na alternância de deposição por tração e suspensão com influência marinha, dada a abundância de traços fósseis.

(3) os depósitos de **preenchimento de baía** possuem cerca de 20m de espessura e incluem argilitos maciços, lateralmente contínuos, com fósseis traços de *Chondrites*, conglomerados intraformacionais monomíticos, contendo clastos de argilito numa matriz argilosa, arenitos caulínicos, com traços fósseis de *Skolithos*, *Ophiomorpha* e *Thalassinoides*.

A relação dos depósitos supracitados com os ambientes de praia e de planície de maré sugere deposição sedimentar relacionada a um ambiente estuarino. Considerando-se este contexto paleoambiental, a abundância de litologias finas e o predomínio de diminutos traços de *Chondrites*, sugere-se que estes depósitos representem a baía estuarina.

(4) os depósitos de **canal de maré/barra de maré** ocorrem em com cerca de 40 m de altura por 300 m de continuidade lateral, são caracterizados por corpos limitados, na base, por superfície ligeiramente côncava, recoberta por grânulos de quartzo e argilito; arenitos médios e finos com estratificação cruzada tabular composta com paleocorrente para NNE e subordinadamente para SE, estratificação ondulante quase planar do tipo *swaley*;

argilitos maciços; ocorrem abundantes traços fósseis de *Skolithos* e, de forma dispersa, *Taenidium*.

(5) os depósitos de **delta de maré** ocorrem na BR 010 a 10 km a sul de Ipixuna e consistem em lobos de arenitos arcoseanos, amalgamados, com espessura de 0,5m, podendo alcançar 2m; arenitos finos a médios, maciços, bem selecionados, micáceos, com estratos cruzados tabulares incipientes recobertos por filmes e/ou fragmentos de argila nos *foresets*; argilitos maciços, bioturbados, com intercalações de arenitos maciços. O empilhamento vertical de fácies nesta formação caracteriza um processo de retrogradação, impulsionado pela elevação do nível do mar, o que resultou no afogamento do sistema fluvial.

3.2 - FORMAÇÃO BARREIRAS

A Formação Barreiras tem sido amplamente estudada ao longo de falésias e de afloramentos corte de estrada, localizados nos litorais do NE do Pará e NW do Maranhão. Estudos realizados por Rossetti et al. (1989, 1990) e Rossetti (2000, 2001) têm contribuído para o entendimento da idade e das condições deposicionais desta unidade sedimentar. A história deposicional da Formação Barreiras está intimamente ligada a flutuações do nível relativo do mar que podem ser correlacionadas a eventos tectônicos maiores que afetaram a América do Sul, como também às mudanças eustáticas e climáticas (que variou de tropical ou equatorial a seco) ocorridas durante os últimos 25 milhões de ano (Rossetti, 2001).

Na região do Médio Rio Capim, a Formação Barreiras é reconhecida por incluir depósitos siliciclásticos sobrepostos discordantemente à Formação Ipixuna, da qual é separada por um limite de seqüência com geometria côncava, representando um paleovale com depressão de até 40m por 1Km de largura. O

preenchimento deste paleovale é representado por arenitos friáveis e quartzosos, argilitos mosqueados e conglomerados, onde são encontradas estruturas típicas de ação de maré (reativação e bandamentos de maré), traços de *Skolithos*, *Ophiomorpha*, *Planolites* e *Gyrolithes*. Estas características sugerem num ambiente deposicional estuarino influenciado por maré, onde foram definidos dois ambientes deposicionais: (1) complexo de canal de maré e (2) planície de maré/mangue.

O complexo de canal de mãe pode ser subdividido em duas sub-associações: (a) centro de canal e (b) margem de canal.

(a) O **centro de canal** inclui conglomerados monomíticos de seixos e grânulos de quartzo, numa matriz arenosa grossa; recobertos por arenitos com estratificações cruzadas tabular, acanalada e composta, com um arranjo em *finning- thinning-upward*; lâminas de argila (*mud couplets*) e/ou superfícies de reativação. Nos arenitos com estratos cruzados ocorrem traços de *Skolithos*, *Ophiomorpha*, *Planolithes* e *Gyrolithes*.

(b) Os depósitos de **margem de canal** incluem arenitos finos e grossos, com estratificação cruzada tabular cujos *foresets* são recobertos por argila (reativação); gradam lateralmente a barras arenosas compostas; arenitos finos e médios, com estratificação cruzada de pequeno a médio porte, intercalados a argilitos laminados, definindo um acamamento heterolítico.

(2) A associação de fácies de **planície de maré/mangue** apresenta intercalações de argilitos laminados e arenitos fino e médio, definindo acamamentos wavy e lenticular, compondo ciclos de argilosidade ascendente, com topos marcados por horizontes de paleossolos. Ocorrem estratificações cruzadas com abundantes superfícies de reativação e/ou recobrimentos argilosos nos *foresets*.

4- METODOLOGIA

4.1- AMOSTRAGEM E TÉCNICAS DE LABORATÓRIO

As 111 amostras analisadas neste trabalho foram coletadas em afloramentos de corte de estrada e de frentes de lavras a céu-aberto, cujo posicionamento das mesmas seguiu rigorosamente o contexto faciológico e estratigráfico das unidades. Os litotipos escolhidos para estudo foram os arenitos, preferencialmente, de granulação média a fina. O processamento das amostras, a concentração e a identificação dos minerais pesados foram realizados nos laboratórios de Sedimentologia e de Microscopia Eletrônica de Varredura (LME) do Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG) e nos laboratórios de Sedimentologia e Minerais Pesados da Universidade Federal do Pará (UFPA). As etapas de tratamento e análise são descritas a seguir.

(A) As amostras foram previamente lavadas e peneiradas via-úmido em peneiras com abertura de 0.062mm. Durante esta fase não foi utilizada substância química. Não houve necessidade de ataque para desagregação dos grãos, uma vez que as amostras de arenitos achavam-se friáveis.

(B) A fração >0,062mm foi secada, quarteada, e uma alíquota de 100g peneirada durante 10 minutos. A princípio, tentou-se utilizar o intervalo granulométrico 0.250-0.125mm, entretanto este intervalo não apresentou uma distribuição satisfatória dos minerais pesados. Então, optou-se pela fração 0,125-0.062mm que, ao contrário, apresentou uma boa distribuição dos minerais pesados. Além disso, Morton & Hallsworth (1994) recomendam que, para a determinação dos índices de proveniência, a análise seja conduzida nesta fração.

(c) Na concentração dos minerais pesados foi utilizado o bromofórmio (CHBr_3), de densidade de 2.89g/ml, e em seguida lavados com álcool para posterior montagem dos grãos em lâminas de vidro com bálsamo do Canadá ($n=1.538$).

(d) A identificação dos grãos foi realizada ao microscópio petrográfico binocular. Foram contados para avaliação quantitativa 100 a 200 grãos de minerais transparentes não micáceos. Os minerais de ocorrência inferiores a 1% foram considerados traços.

(e) Para examinar as feições de corrosão dos grãos foi utilizada a microscopia eletrônica de varredura (MEV). Para essa análise, os grãos foram separados com auxílio de uma lupa binocular, colados em fita adesiva e metalizados com ouro. Esta etapa foi realizada no Laboratório de Microscopia Eletrônica (LME) do Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG).

4.2- DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES DE ZTR E RuZi

Em função de suas estabilidades mecânica e química, o zircão, turmalina e rutilo são minerais que apresentam extrema resistência aos processos sedimentares, diagenéticos e intempéricos. Durante o ciclo sedimentar a concentração destes minerais tende a aumentar nos sedimentos em função da perda dos minerais menos resistentes. Dessa forma, a maturidade mineralógica (Hubert, 1962) de depósitos sedimentares é expressa através da soma dos percentuais de zircão, turmalina e rutilo (ZTR).

Durante o ciclo sedimentar as composições de assembléias de minerais pesados podem ser modificadas por ação de processos intempéricos, diagenéticos e hidráulicos. O cálculo de índices

utilizando-se minerais com densidade, forma e estabilidade química similares permite eliminar os efeitos desses processos sobre as assembléias mineralógicas (Morton & Hallsworth, 1994). Dessa forma, as interpretações sobre a proveniência de depósitos sedimentares siliciclásticos através dos minerais pesados tornam-se mais segura. Neste trabalho, o índice de RuZi (rutilo e zircão) foi determinado a partir da contagem relativa (100grãos/por amostra) entre estes dois minerais, cuja equação para o cálculo do índice é dada por: $(Ru/Ru+Zr) \times 100$ (Morton & Hallsworth, 1994).

4.3- ESTUDO DAS VARIEDADES DE TURMALINA E ZIRCÃO

O estudo dos minerais pesados tem comprovado que a acurácia das interpretações sobre a proveniência aumenta consideravelmente quando as variedades de um mineral particular (ou grupo de mineral) são distinguidas e contadas sistematicamente. Focalizando as variedades de um mineral, minimiza-se os efeitos do comportamento hidráulico e dos processos intempéricos que podem modificar a composição de uma assembléia mineral.

Neste trabalho foram selecionados a turmalina e zircão para este estudo pelo fato destes minerais apresentarem ampla distribuição nas amostras e, também, por serem minerais de extrema resistência aos processos diagenéticos e intempéricos. Contando-se separadamente 100 grãos de cada mineral por amostra, as propriedades como: cor, forma, zoneamento (no zircão) e grau de arredondamento, foram analisadas ao microscópio.

A identificação das variedades de turmalina foi baseada nos estudos de Krynine (1946) que define os ambientes de formação desse mineral com base na cor, forma e tipo de inclusão dos grãos. O estudo das variedades de zircão foi baseado no grau de arredondamento, cor e tipo zoneamento dos grãos, de acordo com os

critérios adotados por Caironi et al. (1996) para determinação da proveniência de zircões detríticos (Tabela 1).

Tabela 1 - Principais feições e proposta de proveniência de zircão detrítico (adaptada de Caironi et al 1996).

Grupo	Zoneamento	Cor	Arredondamento	Rocha-fonte
A	Pouco bastante	Incolor róseo pálido	Euédrico sub-arredondado	granitóides calcioalcalinos ou ortognaisses
C1 C2 C3	Raro	Incolor róseo pálido	Euédrico sub-arredondado	migmatitos granulitos
D	Raro	Incolor	Anguloso	riolitos alcalinos
E	Raro	Incolor	Arredondado	rochas sedimentares

5- PROCESSOS CONTROLADORES DOS MINERAIS PESADOS NO AMBIENTE GEOLÓGICO

5.1- INTRODUÇÃO

Os minerais pesados (MP), constituintes acessórios das rochas sedimentares siliciclásticas, são originados durante os processos magmáticos, metamórficos e diagenéticos, e através de intemperismo, erosão e transporte, principalmente fluvial, são fornecidos ao sistema sedimentar. Os MP podem ser parcial ou totalmente destruídos pelo intemperismo químico e diagênese e também desgastados por abrasão mecânica durante o transporte. As proporções relativas destes minerais numa assembléia são controladas pela composição da área-fonte, estabilidade química, resistência mecânica e comportamento hidráulico dos grãos, além da granulometria do sedimento e da técnica de separação. Desta forma, muitas vezes as informações obtidas diretamente de uma assembléia não refletem fielmente as características da rocha-

fonte. Dentre estes processos os mais importantes são: comportamento hidráulico, intemperismo e/ou diagênese (Morton & Hallsworth, 1994).

5.2- COMPORTAMENTO HIDRÁULICO

O comportamento hidráulico dos minerais pesados durante o transporte sedimentar é controlado pela forma, tamanho e densidade dos grãos que determinam a ordem de segregação dos MP durante a deposição. A forma determina a abundância relativa entre minerais que possuem hábitos cristalinos diferentes. Grãos de minerais placóides ou tabulares bem desenvolvidos tendem a ser transportados, juntamente aos grãos prismáticos ou irregulares de quartzo de tamanho menor (Flores & Shideler, 1978). Da mesma forma, minerais com densidades similares tendem a ter comportamento hidráulico semelhante. Por esta razão, durante o estudo de proveniência sedimentar, os melhores resultados são alcançados quando são avaliadas as proporções relativas de minerais com similaridades de hábito e densidade.

Diversos estudos, especialmente os que investigam os mecanismos de evolução de *placers* fluviais, têm facilitado a compreensão do comportamento hidráulico dos minerais pesados (Slingerland, 1977, 1984; Sallenger, 1979; Komar & Wang, 1984; Komar & Clemens, 1986; Peterson et al., 1986). A influência do comportamento hidráulico no selecionamento de minerais pesados deve ser cuidadosamente avaliada em estudos de proveniência. Este efeito pode ser minimizado através da qualidade da amostragem, intervalo granulométrico mais representativo da amostra, estudo de uma variedade ou grupo de mineral e determinação de uma série de índices calculados a partir da relação entre pares de minerais com densidade e hábitos similares (e.g. RuZi) (Morton & Hallsworth, 1994).

5.3- INTEMPERISMO QUÍMICO/DIAGÊNESE

A ordem de persistência dos minerais pesados no ambiente geológico é determinada principalmente a partir da sua estabilidade química, de forma que as condições químicas ocorridas durante o ciclo sedimentar condicionam a capacidade de sobrevivência desses.

A dissolução de minerais pesados é um processo amplamente pesquisado tanto em escala de laboratório quanto em estudos pedogenéticos (Reaside, 1959; Huang & Keller, 1970, 1972; Nickel, 1973; Wilson, 1975; Bermer, 1978; Schott *et al.*, 1981; Bermer & Schott, 1982; Nahon & Colin, 1982; Anand & Gilkes, 1984; Velbel, 1984). Geralmente, a diversidade dos minerais pesados tende a diminuir num perfil de intemperismo e próximo a limites de seqüências, dada à exposição subaérea e à percolação de águas intersticiais ácidas que promove a dissolução dos minerais menos estáveis. Nickel (1973), nos seus experimentos sobre a estabilidade de minerais pesados, mostrou que estes minerais apresentam estabilidades visivelmente diferentes em condições de pH também diferentes (Tabela 2).

Tabela 2 - Estabilidade relativa de minerais pesados em solos podzólicos, com base em informações de Bateman & Catt (1985) e comparado com dados de estabilidade experimental de Nickel (1973).

PERFIL DE SOLO PODZÓICO		pH 3.6	pH 5.6	pH 10.6
Rutilo, Anatásio, Brookita				
Zircão	(+)	Zircão, Rutilo	Zircão, Rutilo	Zircão, Rutilo
Turmalina				Granada, Estaurolita
Sillimanita		Anfibólio cálcico		Anfibólio cálcico
Andalusita				Apatita
Cianita		Cianita	Cianita	Cianita
Estaurolita		Estaurolita	Estaurolita, Turmalina	Turmalina
Topázio		Turmalina		
Titanita			Epídoto	
Monazita		Epídoto	Anfibólio cálcico	
Granada		Granada	Granada	
Epídoto				Epídoto
Anfibólio cálcico				
Ortopiroxênio				
Clinopiroxênio	(-)			
Olivina				
Apatita		Apatita	Apatita	

Em todo estudo de proveniência, a intensidade dos processos diagenéticos e intempéricos pode ser avaliada através da determinação do grau de dissolução dos MP. A eliminação dos MP menos estáveis causa o aumento relativo da concentração das espécies mais estáveis como: zircão, turmalina e rutilo. Este fenômeno pode causar um aumento da "maturidade mineralógica" dos sedimentos, que por outro lado pode também ser provocada por processos hidrodinâmicos. No último caso, a maturidade mineralógica é acompanhada por uma maturidade textural, que pode ser avaliada pelo grau de arredondamento dos grãos, significando que grãos arredondados e bem arredondados associados a índices de ZTR altos indicam uma maturidade mineralógica produzida preferencialmente por intenso retrabalhamento hidrodinâmico.

Os processos químicos sobre os MP podem ser facilmente distinguidos através das evidências de corrosão dos grãos. Um outro fator a ser considerado é que, geralmente, numa sucessão sedimentar, próximo a superfícies de descontinuidades, onde ocorrem exposição subaérea e formação de solos, tende haver uma depleção no teor de minerais pesados.

6- APLICAÇÃO DO ESTUDO DE MINERAIS PESADOS

6.1- PROVENIÊNCIA E ESTRATIGRAFIA

A sobrevivência dos minerais pesados durante o ciclo sedimentar tem sido tradicionalmente utilizada como argumento nos estudos de proveniência pelo fato desses minerais registrarem a assinatura petrogenética da rocha-mãe mesmo após severas condições de eventos químicos. Isto permite uma interpretação a proveniência. Muitas vezes, a interpretação da proveniência de minerais pesados é tão complexa quanto o contexto geológico da área-fonte.

A distribuição espacial de minerais pesados numa área geográfica pode levar ao reconhecimento de províncias que se caracterizam pela presença de espécies de MP volumetricamente mais importantes, as quais não ocorrem em províncias adjacentes. Este procedimento é muito utilizado no estudo de proveniência de grandes sistemas fluviais que drenam extensas áreas geográficas através de seus afluentes (Morton, 1985). Por outro lado, o mapeamento da distribuição vertical desses minerais, geralmente em afloramentos ou furos de sondagem, permite caracterizar zonas mineralógicas tipificadas por espécies que, volumetricamente, não ocorrem ou são raras em camadas adjacentes. Este procedimento permite correlacionar depósitos sedimentares verticalmente adjacentes, bem como associar as variações nos teores de MP com as mudanças ambientais.

Em estudos de bacias sedimentares, os MP têm comprovado sua eficiência na dedução da proveniência dos sedimentos e no auxílio da interpretação da história deposicional. Por exemplo, quebras deposicionais ou inconformidades em unidades estratigráficas são geralmente caracterizadas por mudanças marcantes nas associações de minerais pesados. Isto enfatiza o valor estratigráfico dos minerais pesados, que adicionalmente são importantes ferramentas

na análise de sedimentação associada a eventos tectônicos, uma vez que o comportamento estratigráfico desses minerais fornece informações sobre os processos de erosão em áreas-fontes. Por exemplo, os sedimentos erodidos de cinturões orogênicos costumam apresentar assembléias de MP mais complexas e, verticalmente, esta evolução reflete o soerguimento e sucessiva erosão (*unroofing*) de litologias também mais complexas na área-fonte (Dill, 1995). Neste contexto, as zonas de MP são visualizadas na ordem inversa da seqüência da área-fonte.

6.2- PALEOGEOGRAFIA, PALEOCLIMA E PALEOAMBIENTE

Embora os minerais pesados tenham sua aplicação, tradicionalmente, em estudos de proveniência, eles também são empregados em investigações paleogeográficas, paleoclimáticas e paleoambientais.

As assembléias de pesados de relevos marcantes, normalmente, tendem a ser mais preservadas em função das altas taxa de sedimentação, soterramento e pouca ação de águas intersticiais ácidas. Onde o relevo é menos acentuado e sob condições climáticas úmidas, os sedimentos ficam mais tempo expostos ao intemperismo que provoca sua dissolução, portanto, as assembléias mineralógicas têm chance de sofrer maior alteração.

As mudanças climáticas, que podem ocorrer em intervalos de tempo envolvendo séculos e milênios (Taylor et al., 1993), promovem mudanças marcantes nos padrões sedimentares (Bradley, 1999). Os períodos chuvosos exercem uma intensa atividade morfodinâmica provocando a denudação de coberturas sedimentares, sendo o material erodido conduzido ao longo dos sistemas de drenagem, para acumular-se na forma de leques aluviais ou alimentar sistemas deltaicos em ambientes transicionais (Passos & Bigarella, 1998). Em climas tropicais úmidos, a maioria dos

minerais pesados tende a ser destruída pela dissolução provocada pela ação de águas intersticiais ácidas. Estas soluções ácidas são produzidas principalmente a partir de degradação da matéria orgânica através da atividade de bactérias. Este processo pode ser facilmente identificado pelas texturas de corrosão dos grãos (Morton, 1985).

Vaughn Barrie & Emory-Moor (1994) descreveram depósitos de *placers* marcando paleolinhas de costa preservadas durante rápida subida do nível do mar, no Holoceno, Canadá. Estes autores mostram que a maturidade textural (grau de arredondamento) de muitas espécies de MP é de grande auxílio na distinção e correlação de depósitos onde os processos sedimentares são bem identificados.

7- MINERALOGIA E ASPECTOS TEXTURAIS DOS MINERAIS PESADOS DAS FORMAÇÕES IPIXUNA E BARREIRAS

7.1.- VISÃO GERAL

A distribuição estratigráfica dos teores relativos dos principais minerais pesados das formações Ipixuna e Barreiras está representada na Figura 8 e os dados valores da contagem, incluindo os minerais de menor ocorrência, na Tabela 2. Com base nos teores relativos desses minerais foi possível separar as duas unidades estudadas. A Formação Ipixuna é representada por uma associação de zircão, turmalina, estaurolita e cianita que compõem, em média, 72, 15, 6 e 3% da assembléia, respectivamente. Esporadicamente, ocorrem rutilo, andaluzita, sillimanita, anfibólio, topázio e anatásio. Os valores de ZTR atingem até 98%, enquanto o índice de RuZi é sempre menor que 10.

A Formação Barreiras é composta por uma associação de zircão, estaurolita, turmalina e cianita que compõem, em média, 35, 24, 19 e 16% da assembléia, respectivamente. Muito pouco expressivos são rutilo, sillimanita, andaluzita, topázio e anatásio. Os valores de ZTR atingem até 70% e o índice de RuZi é, para todas as amostras, maior que 10.

A descrição detalhada de cada mineral pesado de acordo com as suas unidades será apresentada a seguir.

Tabela 3 - Teores de minerais pesados, transparentes, não micáceos das formações Ipixuna (FI) e Barreiras (FB) das minas IRCC, PPSA e BR 010. Zr=zircão; Tu= turmalina; Ru=rutilo; Es=estaurolita; Ci=cianita; Si=sillimanita; Ad=andalusita; Gr=granada; To=topázio; Anf=anfíbólio; An=anatásio; G=fração 0.250-0.125mm; F=fração 0.125-0.062mm; ZTR=zircão+turmalina+rutilo; TR=traços; (***) ausentes; (Total) número de grãos contados.

Amostra	Zr		Tu		Ru		Es		Ci		Si		Ad		Gr	To	Anf	An	Total		ZTR	
	G	F	G	F	G	F	G	F	G	F	G	F	G	F	F	F	F	F	G	F	G	F
FB-01	2	37	12	23	1	10	54	25	30	5	1	***	***	***	***	***	***	***	150	203	15	70
FB-02	2	43	16	19	1	6	66	25	14	7	1	***	***	***	***	***	***	***	150	200	19	68
FB-03	1	39	18	13	2	17	57	23	22	8	***	***	***	***	***	***	***	***	150	207	21	69
FB-04	3	40	8	18	2	10	53	30	32	12	2	***	***	***	***	***	***	***	150	194	13	68
FB-05	1	30	21	14	1	8	47	26	30	19	***	***	***	***	***	3	***	***	150	207	23	52
FB-06	1	29	14	16	1	10	46	25	38	20	***	***	***	***	***	***	***	***	150	202	16	55
FB-07	***	43	21	17	2	10	48	21	29	9	***	***	***	***	***	***	***	***	150	204	23	70
FB-08	***	26	23	21	***	11	40	26	37	16	***	***	***	***	***	***	***	***	150	207	23	58
FB-09	3	29	18	26	3	9	50	29	26	14	***	***	***	***	***	***	***	***	150	200	24	64
FB-10	6	32	20	15	1	10	32	27	40	14	1	2	***	***	***	***	***	***	150	202	27	57
FB-11	3	20	26	22	4	9	34	28	33	21	***	***	***	***	***	***	TR	***	150	200	33	51
FB-12	***	40	21	14	5	10	42	24	32	12	***	***	***	***	***	***	***	***	150	204	26	64
FB-13	3	39	18	22	4	11	41	23	34	5	***	***	***	***	***	***	***	***	150	204	25	72
FB-14	4	39	20	17	2	9	47	21	24	14	***	***	***	***	***	TR	***	***	150	200	26	65
FB-15	4	39	16	11	4	6	43	27	33	15	***	***	***	1	***	***	***	1	150	204	24	56
FB-16	***	24	21	21	4	11	58	28	17	16	***	***	***	***	***	***	***	***	150	205	25	56
FB-17	1	36	34	21	1	8	31	20	33	15	***	***	***	***	***	***	***	***	253	202	36	65
FB-18	***	30	38	20	***	10	30	23	32	17	***	***	***	***	***	***	***	TR	155	205	38	60
FB-100	3	19	19	26	3	8	33	22	42	25	***	***	***	***	***	***	***	TR	150	207	25	43
FB-101	3	18	29	19	3	6	40	39	25	18	***	***	***	***	***	***	***	***	150	205	35	43
FB-102	2	30	17	13	3	10	49	31	29	16	***	***	***	***	***	***	***	***	150	202	22	53
FB-105	***	41	20	11	3	9	47	26	30	13	***	***	***	***	***	***	***	***	150	205	23	61
FB-107	19	48	7	19	12	5	54	19	8	9	***	***	***	***	***	TR	***	TR	162	206	38	72

(continuação)

FB-108	6	48	22	24	3	6	43	15	23	7	***	***	3	***	***	***	***	***	150	202	31	78	
FB-109	1	47	29	16	4	7	37	21	27	9	***	***	1	***	***	***	***	***	160	209	34	70	
FB-110	2	32	17	24	2	9	57	17	21	16	***	2	***	***	***	***	***	***	158	200	21	65	
FI-01	33	85	48	7	3	3	10	4	6	1	***	***	***	***	***	***	***	***	150	233	84	95	
FI-02	32	83	50	10	***	3	4	3	5	1	***	***	9	***	***	***	***	***	102	215	82	93	
FI-03	44	88	26	6	***	1	18	2	8	3	***	***	4	***	***	***	***	***	119	207	70	94	
FI-04	21	82	43	10	2	2	17	5	14	1	**	****	3	TR	***	***	TR	***	116	206	66	94	
FI-05	23	85	50	7	***	3	12	4	10	1	**	***	5	***	***	***	TR	***	101	201	73	92	
FI-06	37	88	31	3	3	2	18	4	5	3	1	***	5	***	***	***	***	***	106	214	71	94	
FI-07	41	93	34	2	2	1	5	3	9	1	***	***	9	***	***	***	***	***	124	221	77	96	
FI-08	16	84	52	11	***	TR	19	3	11	2	***	***	***	***	***	***	***	***	104	203	68	95	
FI-09	14	86	72	9	2	TR	4	1	8	4	***	**	***	***	**	***	***	***	150	204	88	95	
FI-10	33	87	51	5	4	2	6	3	6	3	***	***	***	***	***	***	***	***	102	205	88	96	
FI-11	32	82	36	10	2	2	21	2	3	4	***	***	***	***	TR	***	***	***	140	208	70	94	
FI-12	40	83	30	11	10	2	7	TR	13	1	3	***	4	***	***	3	1	2	***	207	***	96	
FI-13	30	88	50	10	3	1	7	0	10	1	***	***	***	***	***	TR	TR	TR	***	201	***	99	
FI-14	10	30	13	12	3	3	5	3	35	1	2	***	2	***	***	***	TR	TR	***	212	***	96	
FI-15	20	88	30	5	11	2	20	2	7	TR	2	***	***	***	****	4	***	3	***	213	***	95	
FI-16	***	90	***	5	***	3	***	2	***	0	***	***	***	***	***	***	***	TR	***	214	***	98	
FI-17	***	80	***	15	***	3	***	2	***	0	***	***	***	***	***	***	***	TR	***	200	***	98	
FI-20	***	84	***	14	***	1	***	TR	***	TR	***	***	***	***	***	***	TR	1	***	203	***	99	
FI-22	***	80	1	10	***	***	***	5	***	5	***	***	***	***	***	***	TR	TR	***	201	***	90	
FI-23	***	85	***	7	***	2	***	2	***	3	***	***	***	***	***	**	***	1	***	205	***	94	
FI-28	***	67	***	24	***	3	***	2	***	2	***	***	***	***	***	***	***	2	TR	***	217	***	94
FI-29	10	78	35	9	5	4	35	6	13	3	***	***	***	***	***	3	TR	TR	156	213	49	91	
FI-30	21	87	53	8	2	2	16	3	5	TR	***	***	***	***	***	3	***	***	153	213	***	97	
FI-33	***	88	***	7	***	1	***	3	***	1	***	***	***	***	***	***	TR	TR	***	207	***	96	
FI-34	71	78	15	17	7	1	1	2	4	TR	***	***	***	***	****	***	TR	2	156	206	***	96	
FI-100	***	82	***	10	***	2	***	4	***	2	***	***	***	***	***	***	TR	***	***	205	***	94	
FI-101	***	88	***	6	***	1	***	2	***	3	***	***	***	***	***	***	TR	***	***	203	***	95	
FI-102	***	87	***	6	***	***	***	3	***	3	***	***	***	***	***	***	1	***	***	206	***	93	
FI-103	4	88	20	7	***	2	57	2	16	1	3	***	***	***	***	***	1	TR	150	206	24	97	
FI-104	18	85	50	5	***	2	19	5	5	2	***	***	5	1	**	3	***	***	154	210	68	92	
FI-105	***	69	***	16	***	1	***	5	***	7	***	***	***	1	***	***	***	1	***	200	***	86	
FI-106	***	82	***	8	***	2	***	6	***	2	***	***	***	***	***	***	***	***	***	207	***	92	
FI-107	11	73	67	13	2	3	11	6	7	3	***	***	2	2	***	***	***	***	157	203	80	89	
FI-108	***	77	***	9	***	1	***	5	***	7	***	***	***	1	***	***	***	***	***	200	***	87	
FI-109	16	81	62	8	***	1	17	6	5	4	***	***	***	***	****	***	***	***	150	200	78	90	
FI-110	***	76	***	15	***	2	***	4	***	3	***	***	***	1	***	***	***	***	***	206	***	93	
FI-111	***	61	***	27	***	2	***	4	***	4	***	***	***	2	***	***	***	***	***	202	***	90	
FI-112	21	79	33	10	***	***	40	7	4	2	***	***	2	***	***	***	***	***	103	202	54	89	
FI-113	***	69	***	19	***	3	***	6	***	3	***	***	***	***	***	***	***	TR	***	200	***	91	
FI-114	8	79	56	13	4	TR	21	5	11	1	***	***	***	TR	**	***	TR	***	100	207	68	92	
FI-115	18	80	39	8	3	2	20	8	4	2	***	***	4	***	***	***	**	***	100	203	60	90	
FI-116	15	75	37	12	***	1	25	10	9	2	***	***	4	***	1	***	***	***	100	204	52	88	
FI-117	8	79	54	7	***	***	25	4	9	5	***	***	4	3	***	***	***	***	150	201	62	86	
FI-118	***	80	***	11	***	1	***	5	***	3	***	***	***	***	***	***	***	***	***	201	***	92	
FI-119	***	82	***	7	***	3	***	4	***	4	***	***	***	***	***	***	***	***	***	207	***	92	
FI-120	***	68	***	19	***	2	***	5	***	6	***	***	***	***	****	***	***	***	***	201	***	89	

(conclusão)

FI-121	***	67	***	24	***	2	***	2	***	4	***	**	***	***	***	1	***	***	***	201	***	93	
FI-122	9	80	62	12	***	1	20	4	6	3	***	***	3	***	***	***	***	***	150	200	71	93	
FI-123	9	77	59	8	***	3	17	9	7	3	***	**	8	***	***	***	***	***	150	202	68	88	
FI-124	***	70	***	16	***	2	***	3	***	7	***	***	***	2	***	***	***	***	***	210	***	88	
FI-125	***	69	***	15	***	2	***	7	***	6	***	**	***	1	**	***	***	***	***	200	***	86	
FI-126	***	62	***	22	***	2	***	5	***	7	***	***	***	3	***	***	***	TR	***	204	***	86	
FI-127	***	76	***	13	***	1	***	6	***	4	***	***	***	TR	***	***	***	TR	***	210	***	90	
FI-128	29	85	42	5	3	1	16	4	4	4	***	***	6	***	***	***	1	***	150	219	74	93	
FI-129	23	79	49	8	2	3	12	5	10	5	***	***	4	***	***	***	***	***	150	208	74	90	
FI-130	23	83	41	11	2	2	19	3	9	1	***	***	6	***	***	***	TR	TR	100	203	66	96	
FI-131	15	77	50	13	3	2	18	4	6	4	1	***	10	***	***	***	***	***	150	209	68	92	
FI-132	7	73	75	15	3	2	5	7	4	3	***	***	6	***	***	***	***	***	155	204	85	90	
FI-133	27	76	66	15	3	4	0,5	3	***	2	***	***	3	***	***	***	***	***	150	222	96	95	
FI-134	21	73	61	14	3	5	3	4	4	1	***	***	8	2	***	***	1	***	150	206	85	92	
FI-135	29	84	36	10	3	1	21	2	8	2	***	***	3	***	**	***	1	***	150	210	68	95	
FI-136	11	80		1		2		4			***	***	2	***	***	***	***	***	150	***	92	***	
FI-137	20	85	59	10	3	***	8	3	4	2	***	***	6	***	***	***	***	***	150	198	82	95	
FI-139	28	82	35	10	4	2	22	3	9	3	***	***	1	TR	***	1	***	***	150	207	67	94	
FI-140	16	80	42	11	2	2	31	2	3	3	***	***	6	2	***	***	TR	***	150	201	60	93	
FI-141	13	74	65	17	2	TR	8	2	7	7	***	***	5	***	TR	***	TR	TR	150	201	80	91	
FI-142	37	82	33	12	3	1	19	3	3	2	***	***	5	***	***	***	***	TR	155	203	73	95	
FI-143	35	87	56	8	5	3	2	2	2	***	***	***	***	***	***	***	***	***	150	200	96	98	
FI-144	46	83	45	13	5	3	3	1	TR	TR	***	***	4	***	***	***	***	***	150	204	96	99	
FI-145	7	85	57	5	3	4	20	3	10	TR	***	***	3	***	***	***	3	***	150	205	67	94	
FI-146	***	90	***	5	***	3	***	2	***	TR	***	***	***	***	***	***	2	***	***	200	***	97	
FI-147	33	84	50	11	***	2	5	0	TR	***	***	***	***	***	***	***	6	1	***	211	***	97	
FI-148	***	91	***	4	2	2	***	2	***	***	***	***	***	***	***	***	10	1	TR	157	211	85	97

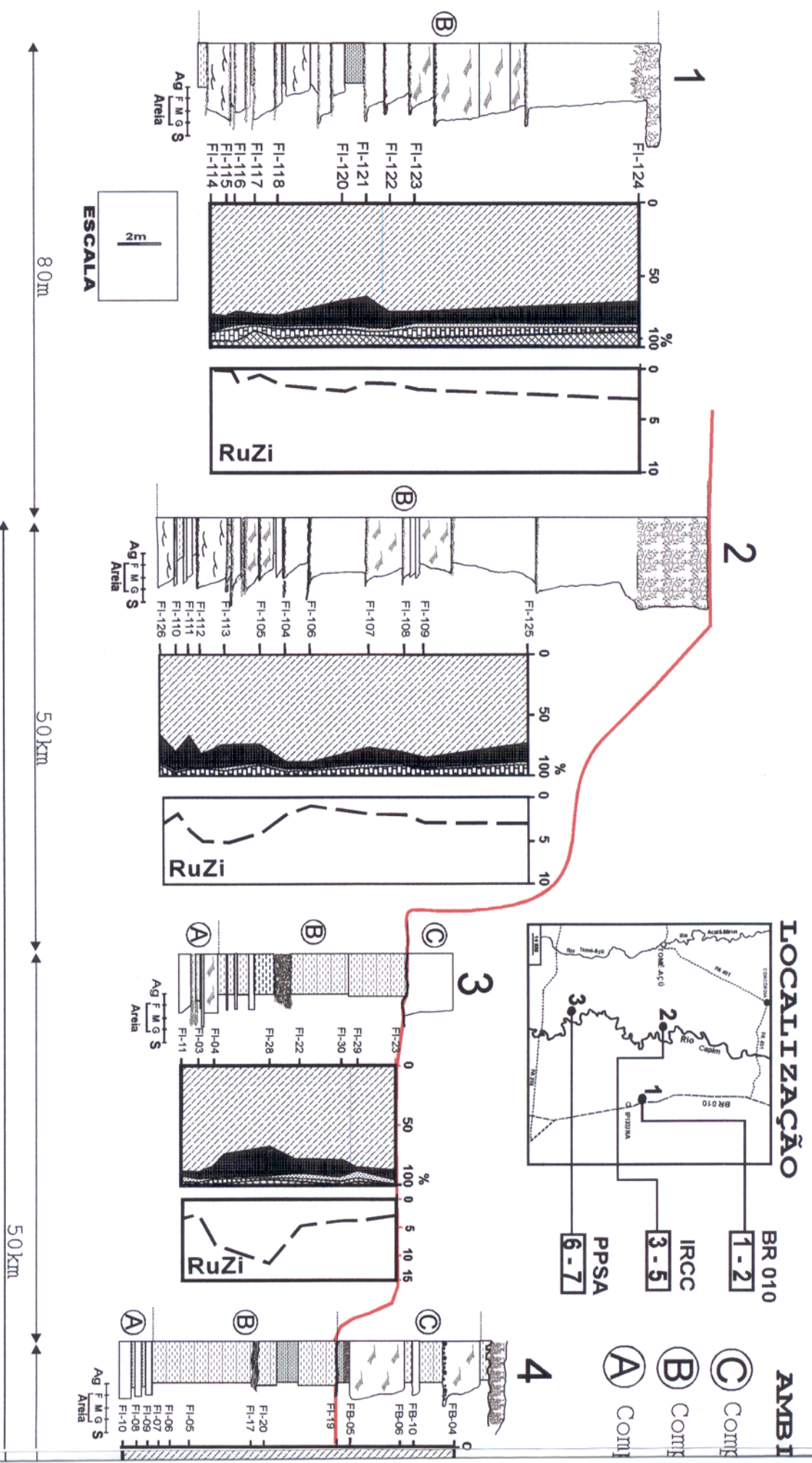


Figura 8 - Seções colunares mostrando os intervalos estratigráficos estudados das formações Ipixuna e Barreiras com elaboradas a partir de dados coletados em afloramentos, onde as amostras foram posicionadas de acordo com as mudanças sedimentos. Notar a inconformidade entre as duas formações estudadas indicada pela linha vermelha.

LENTES

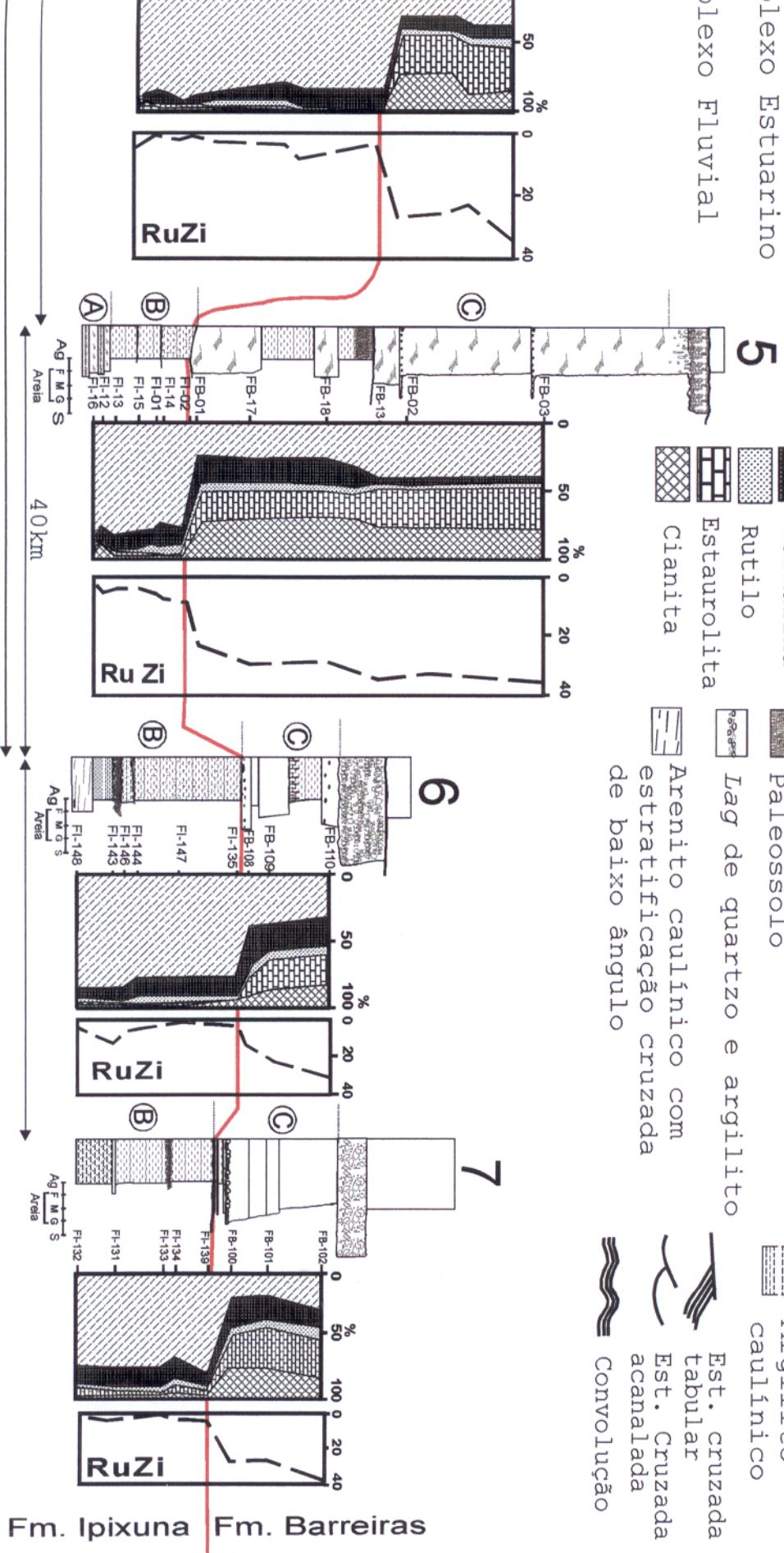
leixo fluvial
leixo Estuarino
leixo Fluvial

MINERAIS

Zircão
Turmalina
Rutilo
Estaurolita
Cianita

LITOLOGIA E ESTRUTURAS

Conglomerado laterítico
Paleossolo
Lag de quartzo e argilito
Arenito caulínico com estratificação cruzada de baixo ângulo
Arenitos
Argilito caulínico
Est. cruzada tabular
Est. Cruzada acanalada
Convolação



a distribuição dos principais minerais pesados encontrados nos depósitos arenosos destas formações: 1-7) seções faciológicas e superfícies de descontinuidades; o comportamento do índice **RuZi** indica mudanças na proveniência de

7.2- FORMAÇÃO IPIXUNA

A assembléia de minerais pesados da Formação Ipixuna é caracterizada por:

Zircão - é o mineral mais abundante nesta formação, ocorrendo as formas prismáticas curtas e longas, euédricas a subédricas, com terminações bipiramidais, incolores, castanhos e amarelados. Os grãos exibem inclusões de opacos, cavidades e sobrecrecimento. Não mostram evidências de corrosão, porém apresentam diversos fraturamentos conchoidais. Os grãos de coloração castanha apresentam-se, geralmente, com hábito euédrico. Subordinadamente ocorrem grãos arredondados com poucas inclusões e ausência de zoneamento (Figura 9).

Turmalina - este mineral ocorre nas formas euédricas a subédricas, com terminações raramente piramidais, bem como formas arredondadas e fragmentos irregulares. As colorações são bastante variadas, ocorrendo: marrom-amarelado, marrom-esverdeado, marrom-escuro, amarelo-amarronzado, verde e azul. São observadas feições de corrosão, partição e microfraturamentos. Geralmente, os grãos de turmalina possuem vacúolos, micrólitos e inclusões carbonáceas (?). Mais raramente foi observada turmalina com crescimento secundário arredondado (Figura 10). As variedades de turmalina são descritas com mais detalhe no Capítulo 8.

Cianita - ocorre, geralmente, nas formas prismáticas irregulares, com abundantes feições de dissolução. Os grãos incolores e raramente azuis. São pouco freqüentes as inclusões de minerais opacos e vacúolos. A análise ao MEV revelou que esses grãos são extremamente corroídos. Nessas imagens podem ser observados planos de clivagem do mineral, bem como o seu aspecto cavernoso dado pela corrosão (figuras 11 e 12).

Estauroлита - apresenta hábito irregular, anguloso e subarredondado, com fraturamento conchoidal. As colorações variam de amarelo pálido, amarelo claro a amarelo-avermelhado. São freqüentes sinais de corrosão, que ao MEV manifestam-se como vesículas orientadas no sentido dos planos de clivagem. Ocorrem inclusões, pouco freqüentes, de zircão e minerais opacos (figuras 13a e 13b).

Rutilo - ocorre como grãos irregulares, eqüidimensionais, subangulosos, alongados, bem arredondados a arredondados, raramente prismáticos ou geminados. Possui colorações amarelo forte, amarelo-avermelhado e vermelho escuro. Em alguns casos, ocorrem feições conchoidais. Esses grãos no MEV mostram fortes feições de retrabalhamento e fraturamentos, sem evidências de corrosão (figuras 14a e 14b).

Os minerais pouco freqüentes incluem: a) sillimanita prismática curta e fragmentos irregulares exibindo aspecto fibroso, geralmente, incolores; b) andalusita como fragmentos irregulares, subarredondados, incolores, com clivagens pouco evidentes; c) granada na forma de fragmentos irregulares, sub-arredondadas, de coloração verde pálido; d) topázio na forma de grãos irregulares, sub-arredondados a arredondados, com abundantes fraturamentos conchoidais, raras inclusões, incolor, róseo e azul pálido; e) espinélio são grãos irregulares, com fraturamento conchoidal, verde e isotrópico; f) anatásio euédrico e subédrico, de coloração amarelo-pálida, alguns grãos mostram feições de retrabalhamento (Figura 15). Embora não tenham sido realizada sua caracterização sistemática, verificou-se que os principais minerais opacos que ocorrem em algumas amostras da Formação Ipixuna são ilmenita, magnetita, hematita e leucoxênio. A ilmenita apresenta trilhas de intercrescimento com magnetita e feições de dissolução. Geralmente os grãos ocorrem nas formas irregulares e subarredondadas (figuras 16 e 17)

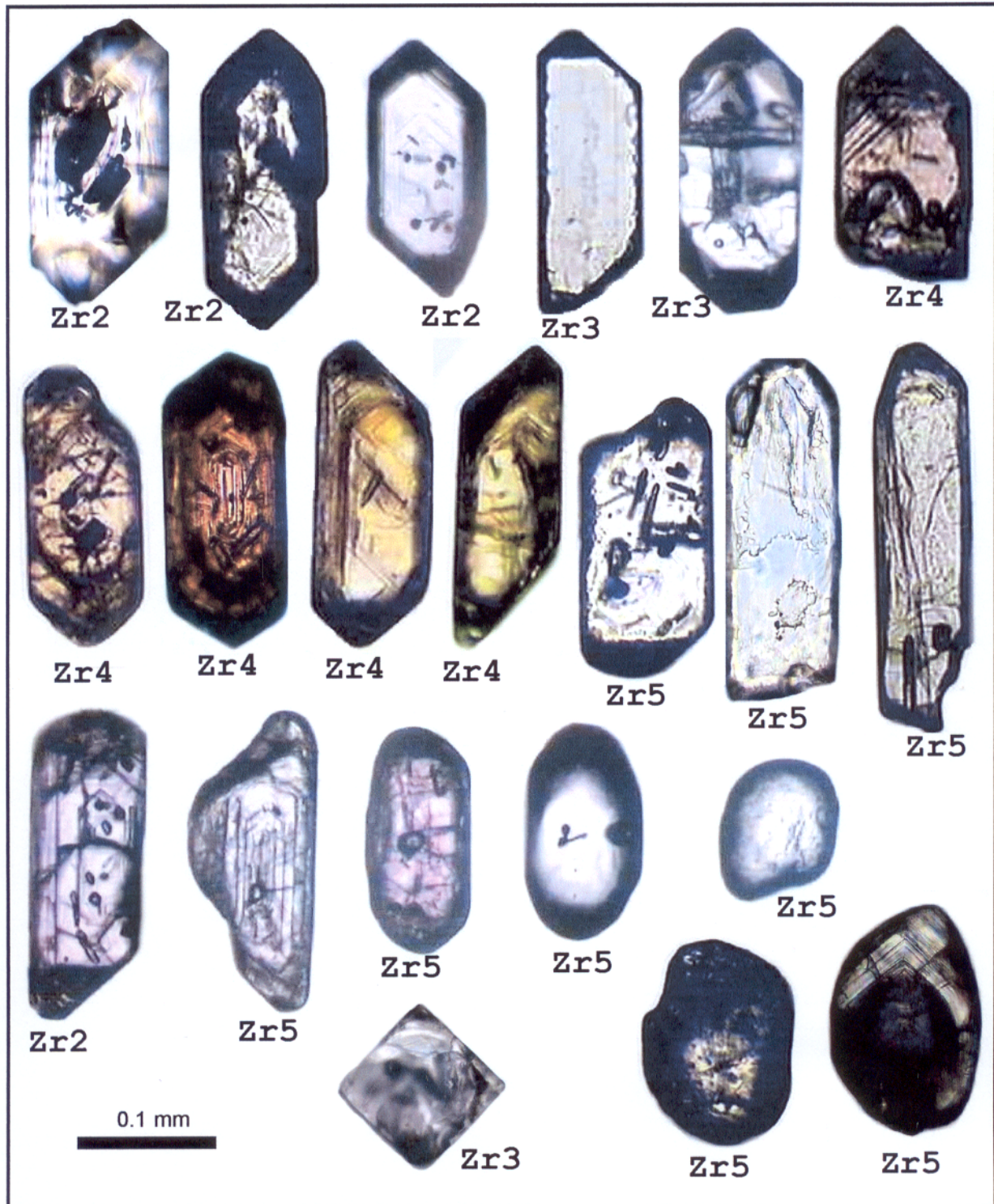


Figura 9 - Fotomicrografia das variedades de zircão da Formação Ipixuna: (Zr2) forma euédrica zonada; (Zr3) forma euédrica não zonada; (Zr4) forma euédrica, amarelada, zonada; (Zr5) formas subédricas, arredondadas zonadas e não zonadas (luz natural).

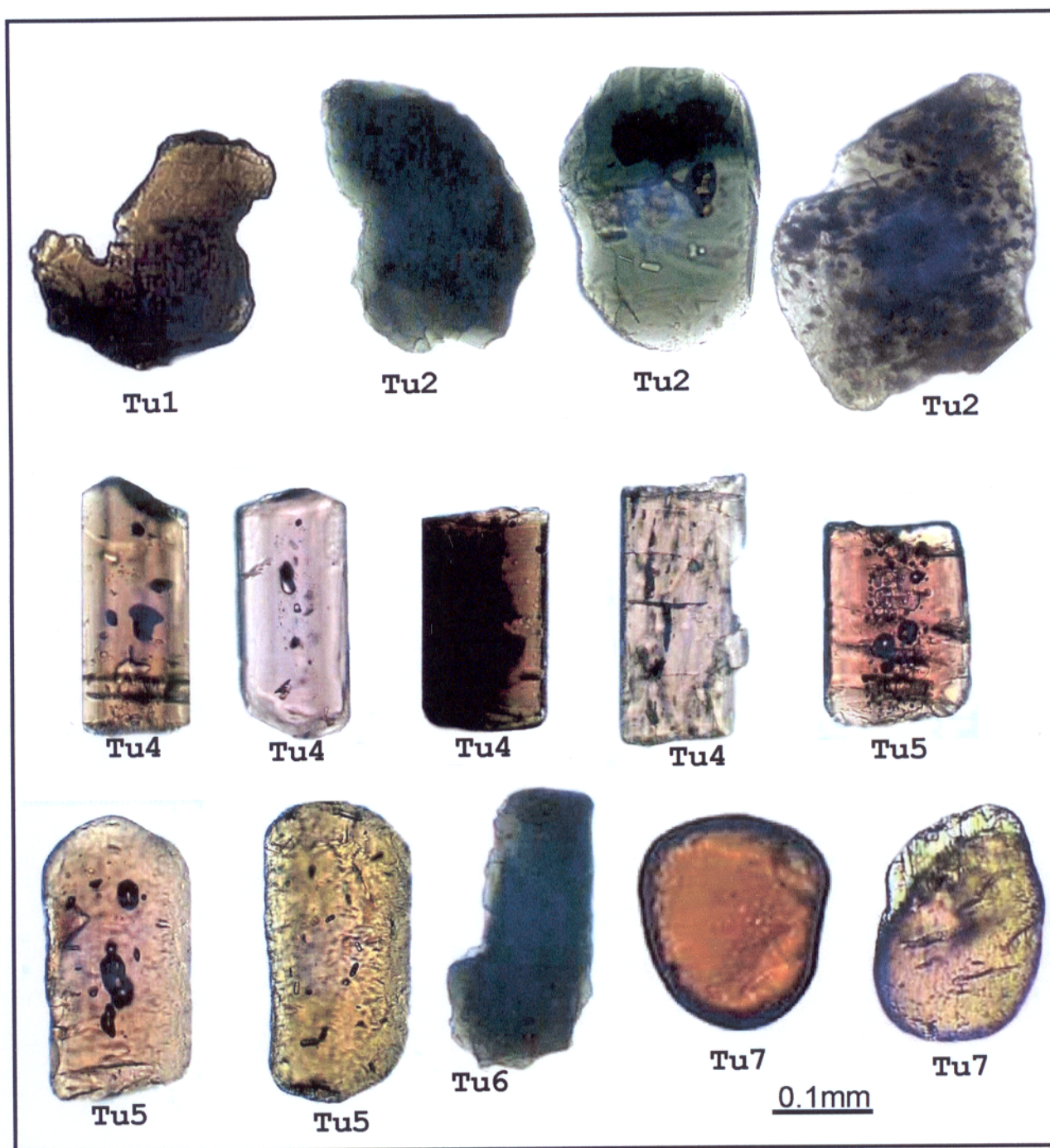


Figura 10 - Fotomicrografias das principais variedades de turmalina da Formação Ipixuna: (Tu1) forma irregular marrom; (Tu2) formas angulosas com inclusões e fraturamentos conchoidais; (Tu4) formas prismáticas subédricas partição basal e inclusões; (Tu5) formas prismáticas arredondadas e corroídas, com inclusão de zircão; (Tu6) formas alongadas verde; (Tu7) forma bem arredondada com sobrecrecimento (luz natural).

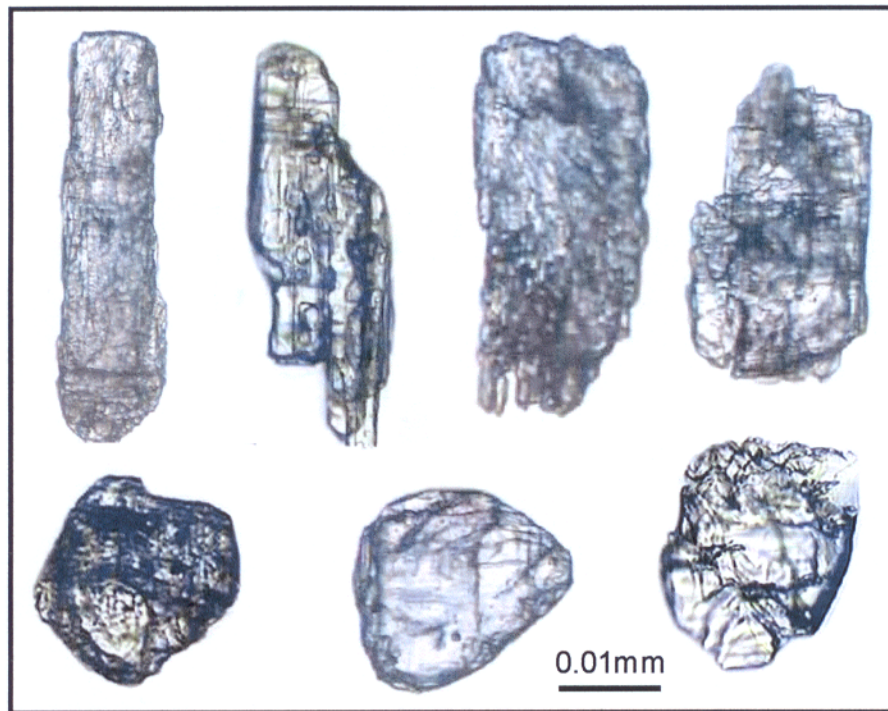


Figura 11 - Fotomicrografias de cianita da Formação Ipixuna exibindo formas ainda prismáticas e arredondadas, bastante corroídas. Estas características são exclusivas desta formação (luz natural).

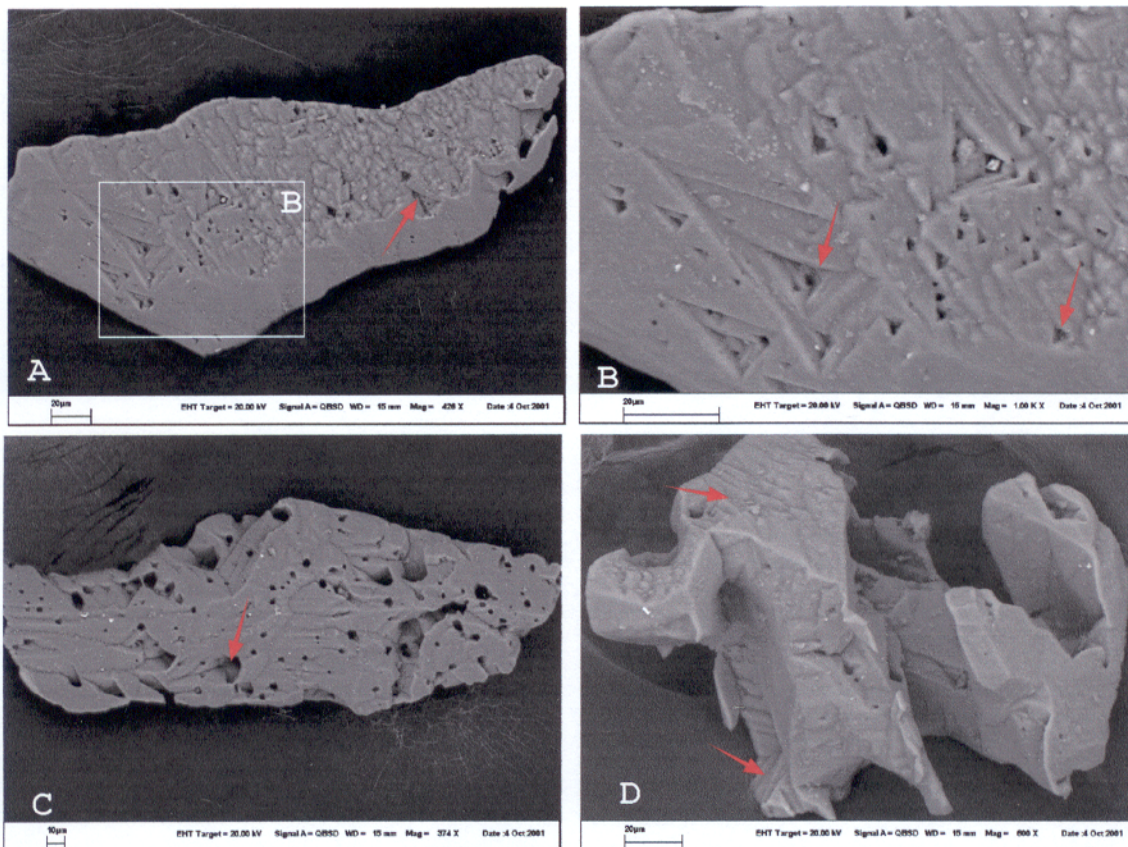


Figura 12 - Imagens de microscopia eletrônica de varredura de cianita da Formação Ipixuna exibindo estágios avançados de dissolução: (A) forma irregular com cavidades triangulares formadas pela intercessão de planos de clivagens; (B) detalhe de (A) mostrando cavidades (setas); e (C e D) aspecto cavernoso dos grãos mas ainda exibindo clivagem (setas).

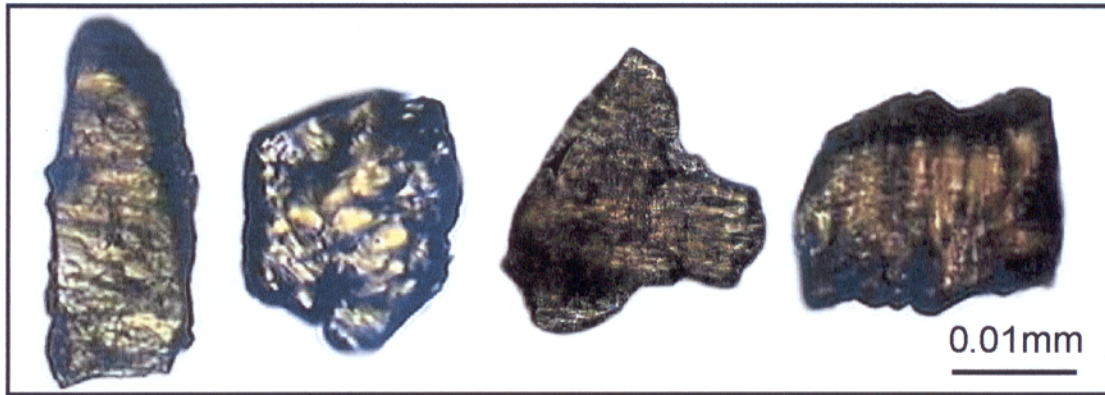
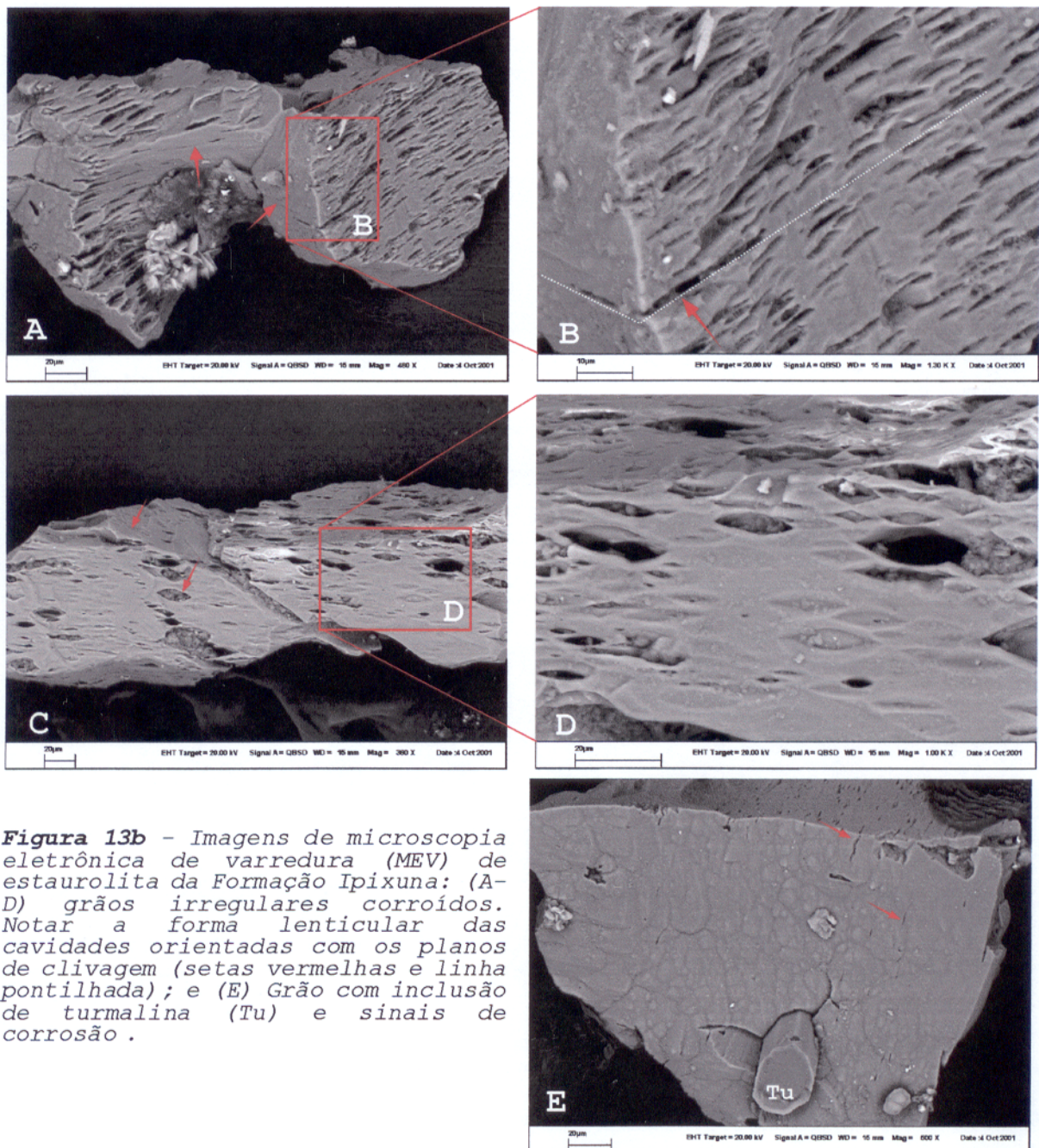


Figura 13a - Fotomicrografias de estaurolita da Formação Ipixuna corroídas, exibindo geralmente formas irregulares e corroídas (luz natural).



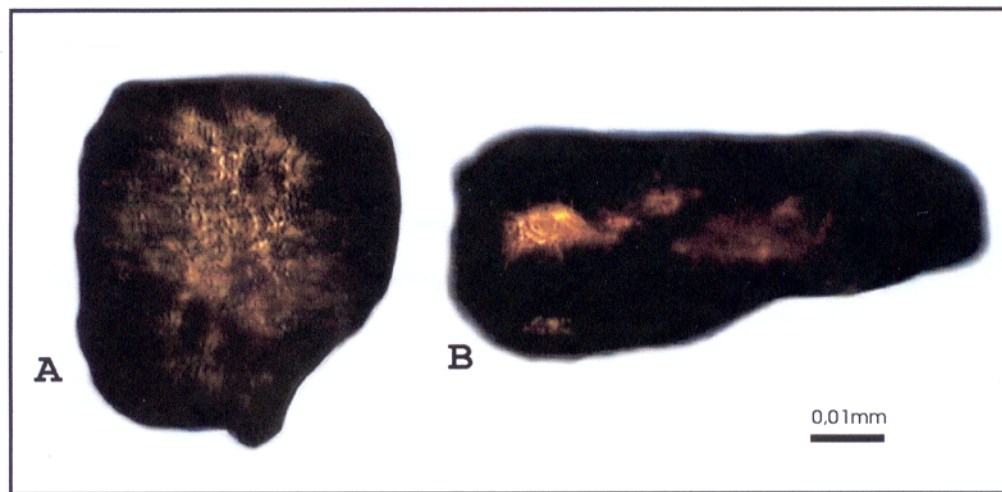


Figura 14a - Fotomicrografias de rutilo da Formação Ipixuna: (A) forma arredondada; e (B) forma prismática arredondada (luz natural).

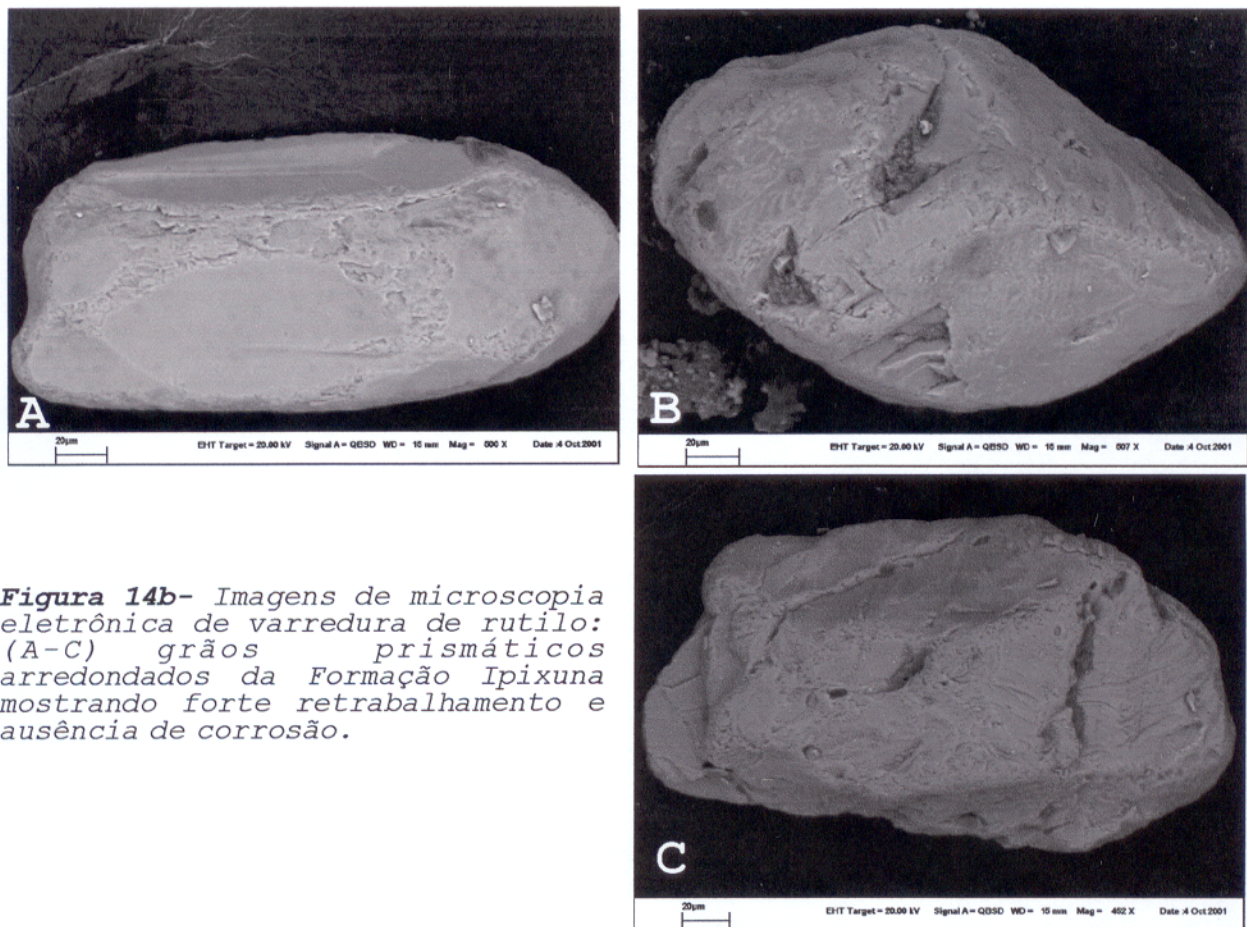


Figura 14b- Imagens de microscopia eletrônica de varredura de rutilo: (A-C) grãos prismáticos arredondados da Formação Ipixuna mostrando forte retrabalhamento e ausência de corrosão.

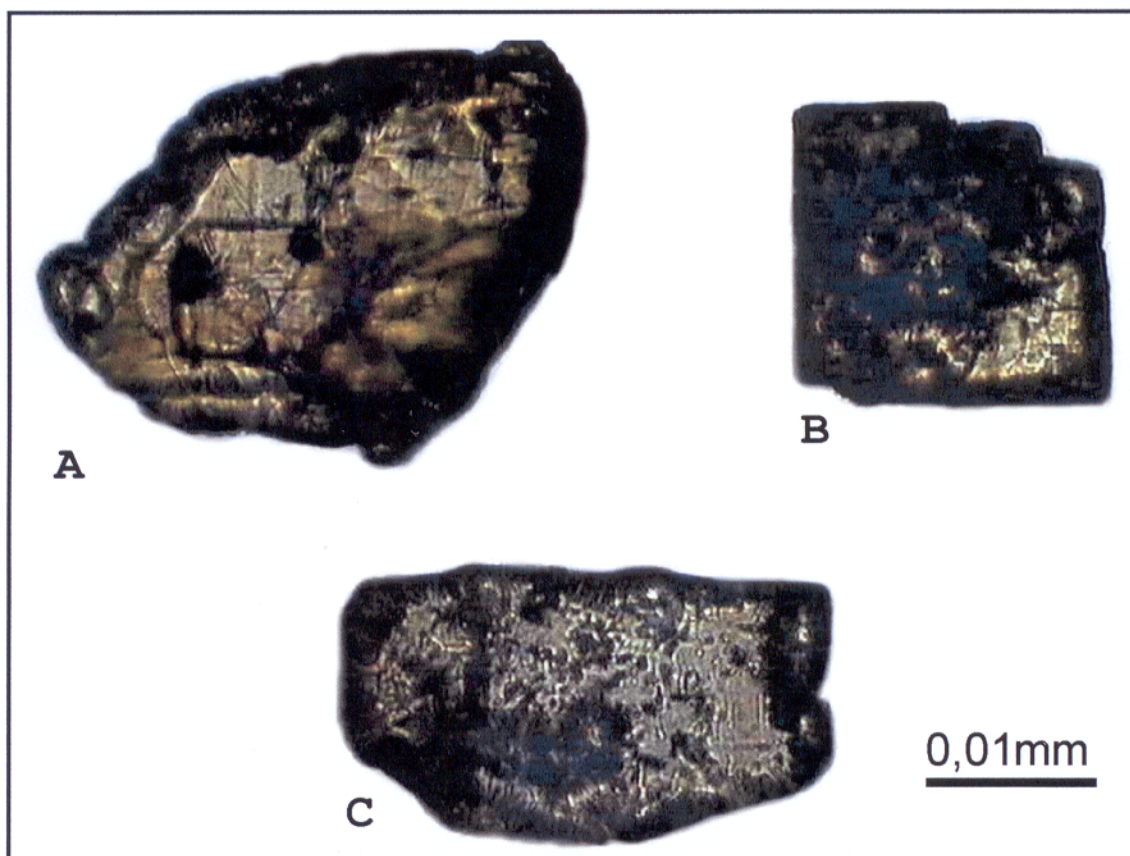


Figura 15 - Fotomicrografias de anatásio da Formação Ipixuna: (A) forma irregular arredondada, provavelmente transportada, exibindo feições de clivagem; (B) forma em caixa (autigênica) com arestas preservadas indicando pouco ou nenhum transporte; e (C) forma prismática arredondada (luz natural).

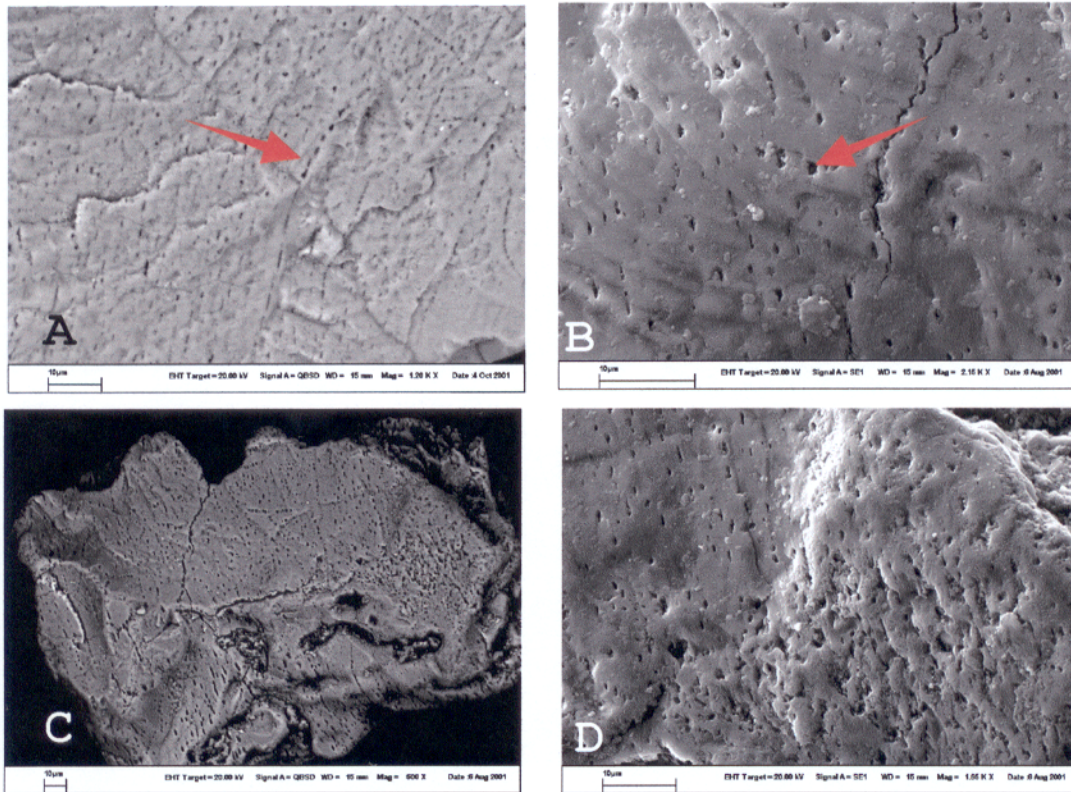


Figura 16 - Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) grão de ilmenita da Formação Ipixuna: (A-D) mostram trilhas de intercrescimento de magnetita (setas).

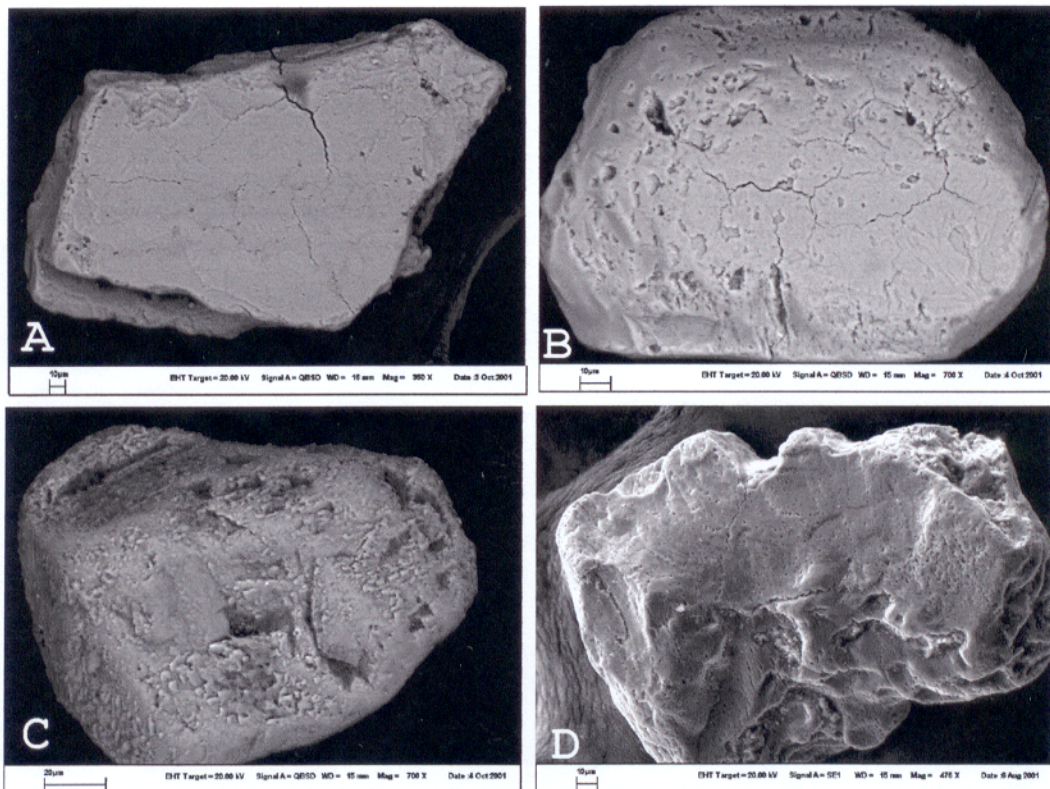


Figura 17 - Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em ilmenita da Formação Ipixuna: (A) grãos irregular; (B) forma prismática subédrica; e (C e D) grãos irregulares arredondados.

7.3- FORMAÇÃO BARREIRAS

A assembléia de minerais pesados da Formação Barreiras é caracterizada por:

Zircão - é um dos minerais mais abundantes e freqüentes nesta formação, apresentando uma ampla variedade de formas e zoneamentos (Figura 18). São freqüentes grãos prismáticos euédricos, ocorrendo também formas arredondadas, sub-arredondadas e fragmentos angulosos. Menos freqüentes são os grãos coloridos. São freqüentes inclusões, fraturamentos e zoneamentos. Este mineral é descrito detalhadamente no Capítulo 8.

Estaurolita - abundante nesta formação, exibindo, geralmente, grãos irregulares, angulosos a sub-angulosos, com fraturas conchoidais e, menos freqüentes, prismáticos (Figura 19). As colorações variam de amarelo-pálido, amarelo intenso a vermelho amarelado. Ao MEV, foram observadas inclusões de zircão e estágios incipientes de corrosão (Figura 20).

Turmalina - este mineral mostra formas: a) prismáticas euédricas longas e curtas, contendo inclusões (opacos, zircão e rutilo) e cavidades; b) prismáticas e esféricas arredondadas, normalmente com coloração variando de verde-azulado, marrom-esverdeado a marron, possuindo inclusões de opacos e carbonáceas(?); c) fragmentos anédricos bastante irregulares de coloração azulada, verde-azulada e marrom, com abundantes fraturamentos conchoidais e raras inclusões (Figura 21). As variedades de turmalina são descritas com mais detalhe no Capítulo 8.

Cianita - é abundante e freqüente a Formação Barreiras, ocorrendo geralmente formas tabulares prismáticas, curtas e longas. A partição perpendicular ao alongamento ocorre em quase todos os grãos, que normalmente são incolores, com raríssimas ocorrências de coloração azulada (Figura 22). Feições de corrosão

raramente aparecem nas bordas e superfícies dos grãos. São pouco freqüentes inclusões (opacos) e cavidades. Ao MEV os grãos mostram-se muito pouco corroídos, mas exibem evidências de retrabalhamento (Figura 23).

Rutilo - mineral menos abundante, porém é comum em todas as amostras. Os grãos são prismáticos longos e curtos, por vezes arredondados ou irregulares angulosos. Ocorrem formas em cotovelo e ramificadas. As colorações variam entre amarelo pálido, amarelo-avermelhado e vermelho-amarelado (Figura 24). Inclusões são raras. Ao MEV esse mineral, assim como o zircão, não exhibe feições de corrosão, mas mostra fortes feições de retrabalhamento e fraturamentos (Figura 25).

Esporadicamente ocorrem: a) sillimanita prismática subarredondada e fragmentos irregulares; b) andalusita na forma irregular, subarredondada, incolor e com clivagem; c) topázio como grãos arredondados ou fragmentos irregulares, azulados pálidos, com raras inclusões; d) anatásio nas formas euédricas e subédricas, coloração amarelo-pálida. Os principais minerais opacos que ocorrem na Formação Barreiras são ilmenita e magnetita. Entretanto estes minerais não foram caracterizados sistematicamente neste trabalho.

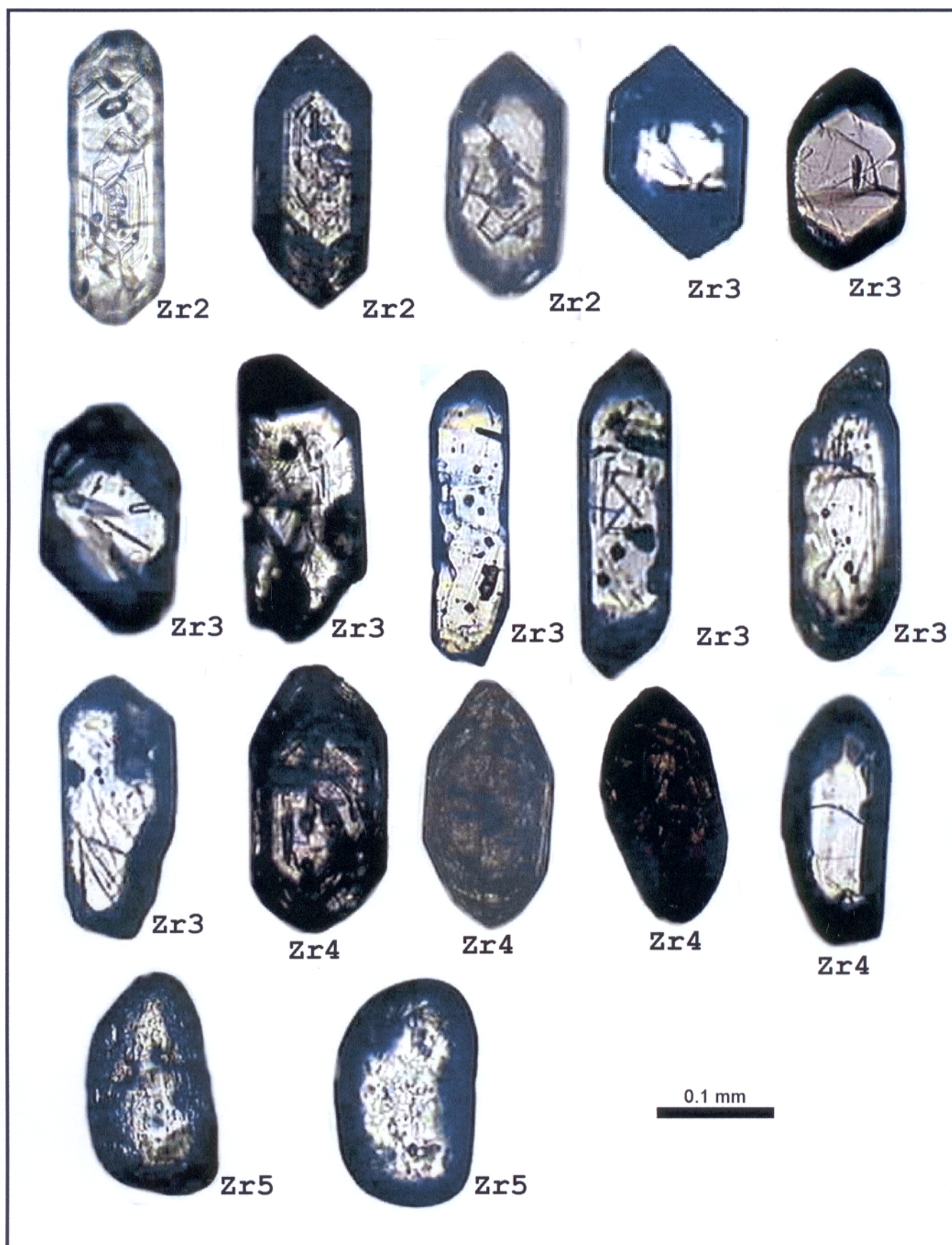


Figura 18 - Fotomicrografias à de zircão da Formação Barreiras: (Zr2) formas subédricas zonadas; (Zr3) formas prismáticas e euédricas com ou sem zoneamento; e (Zr5) formas arredondadas, incolores, sem zoneamento (luz natural).

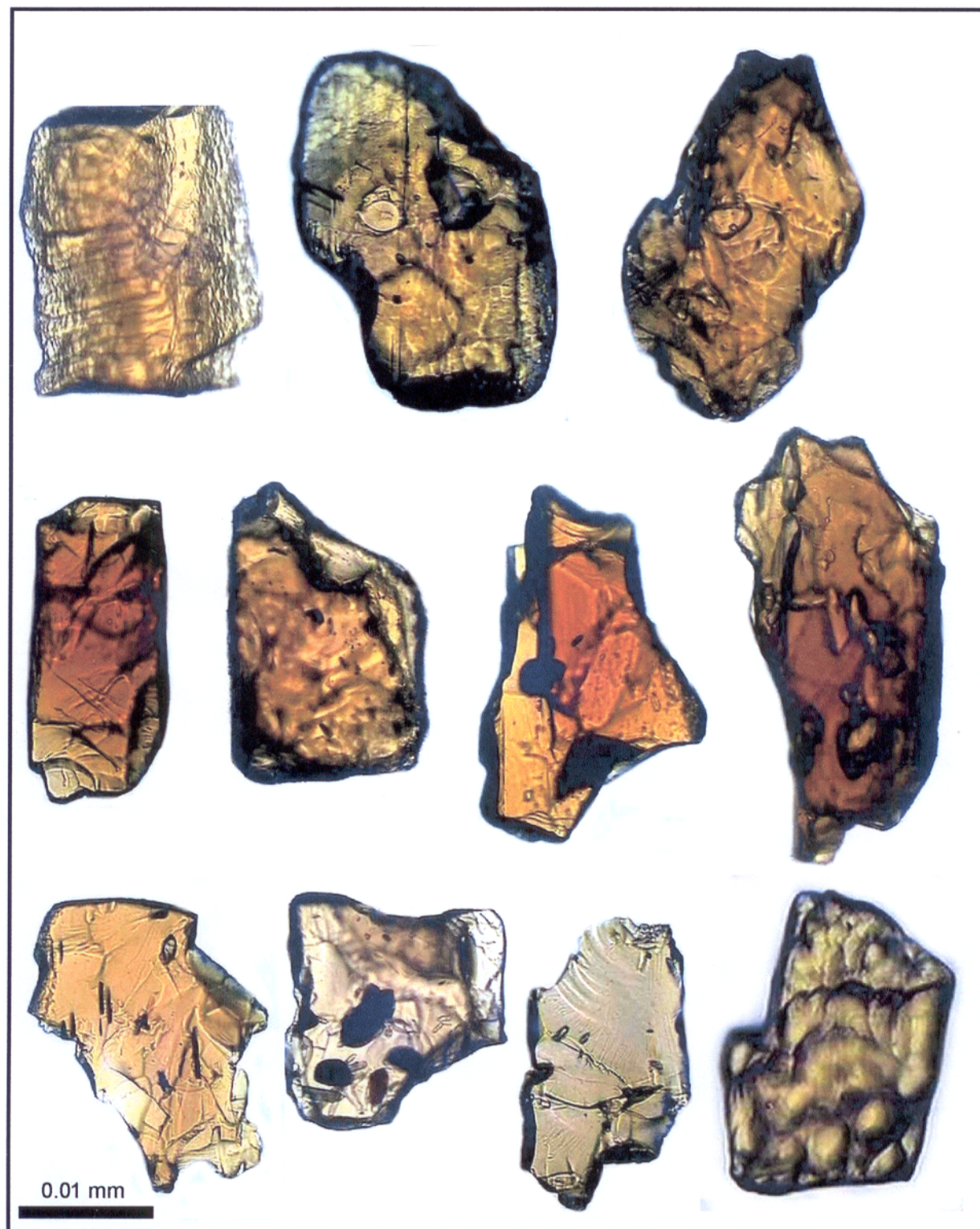


Figura 19 - Fotomicrografias de estaurolita da Formação Barreiras: mostrando formas geralmente irregulares, angulosas e subarredondadas, pseudo-prismáticas, com coloração amarelo intenso a amarelo pálido (luz natural).

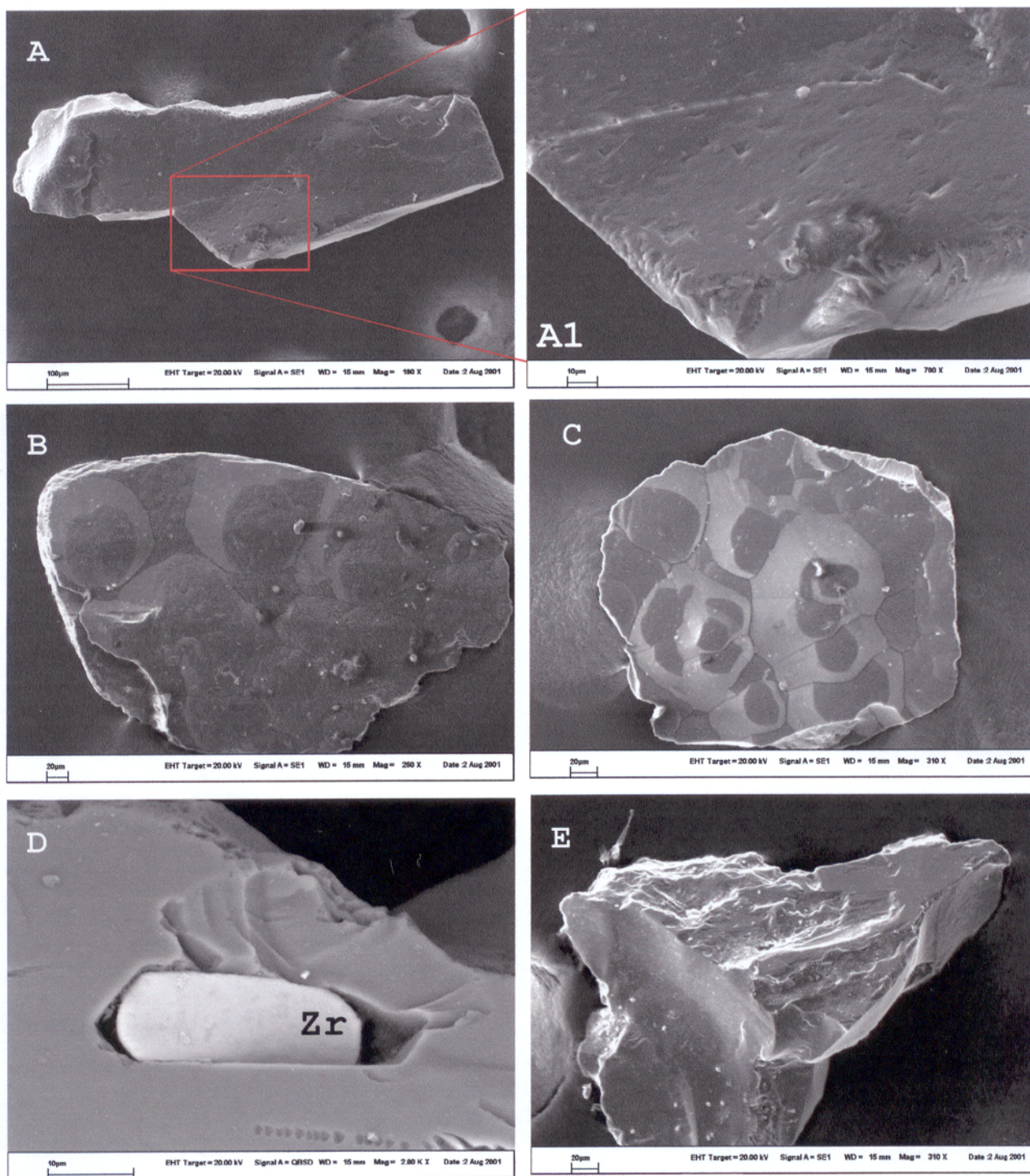


Figura 20 - Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em estaurolita da Formação Barreiras: (A) forma alongada angulosa, mostrando em (A1) detalhe de feições de clivagem e bordas arredondadas; (B e C) texturas de dissolução inicial dos grão (formas mamelonadas); (D e E) grãos irregulares e angulosos exibindo fraturamentos conchoidais, feições de corrosão e uma inclusão de zircão (Zr).

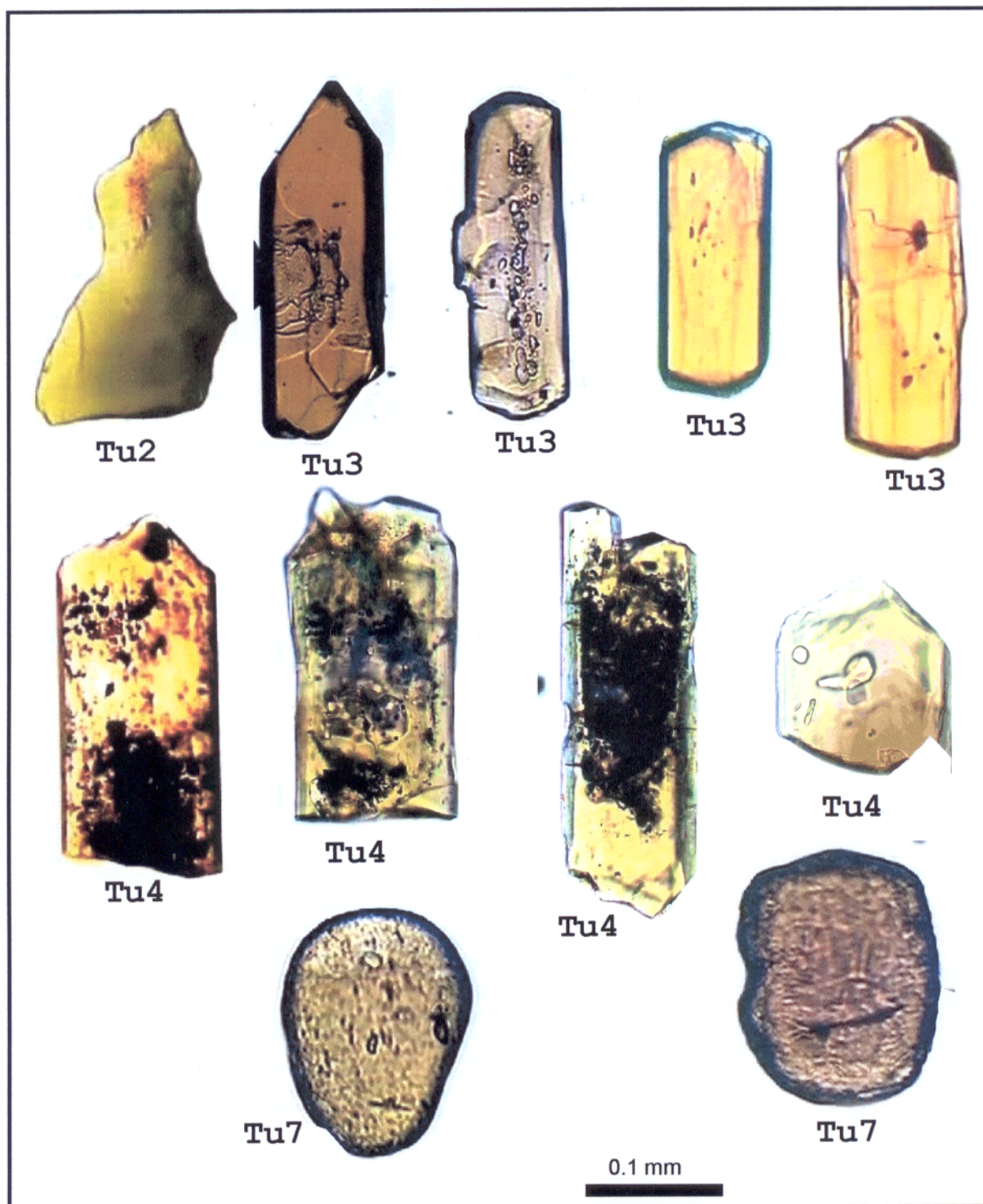


Figura 21 - Fotomicrografias de turmalina da Formação Barreiras: (Tu2) forma angulosa sem inclusões; (Tu3) forma euédrica com inclusões; (Tu4) forma subédrica com abundantes inclusões; e (Tu7) forma bem arredondada; Os tipos Tu3 ocorrem preferencialmente nestes depósitos (luz natural).

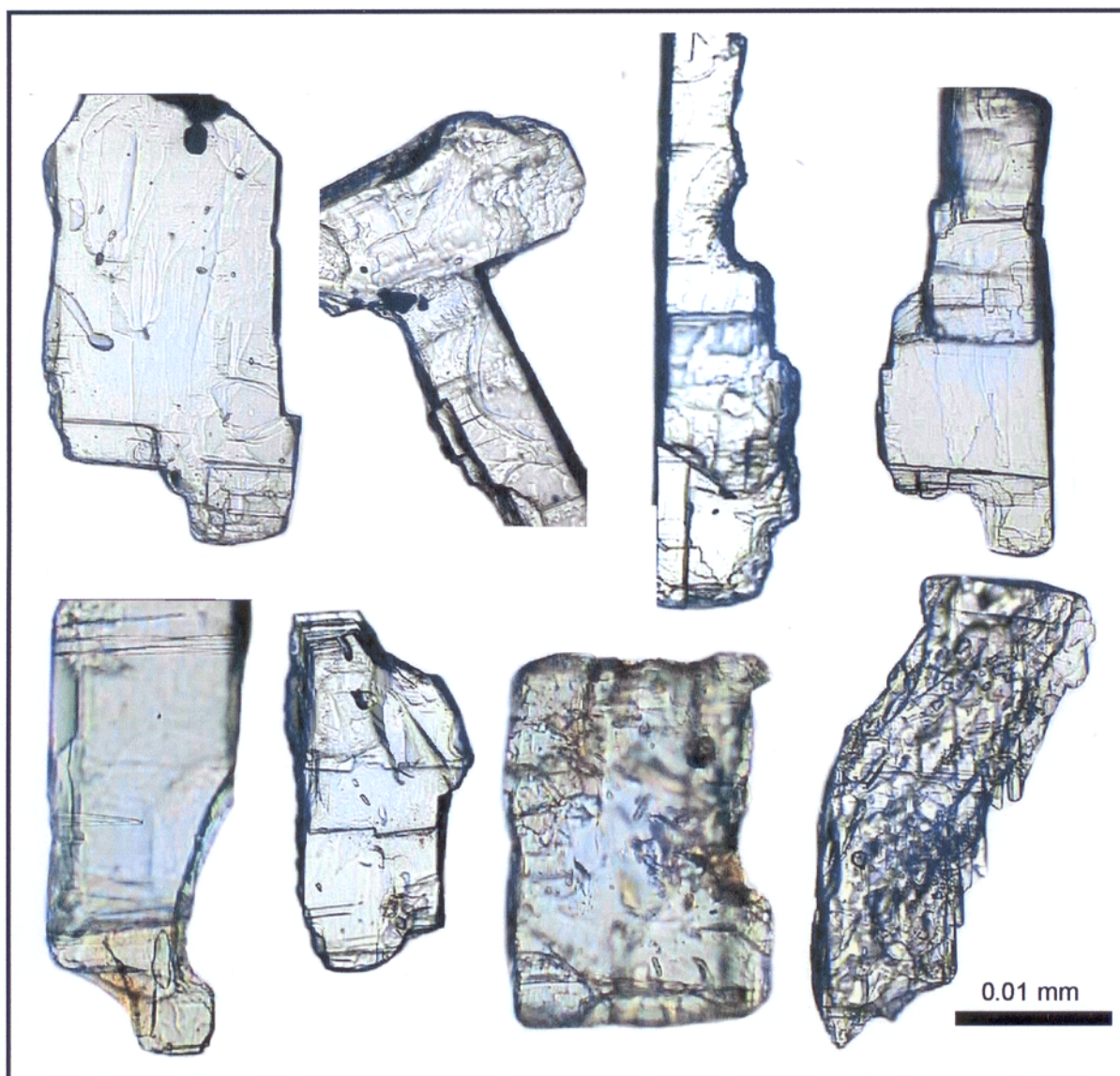


Figura 22 - Fotomicrografias de cianita da Formação Barreiras mostrando o caráter, geralmente, prismático tabular dos grãos, incolores ou suavemente azulados, pouco corroídos, contendo raras inclusões de minerais opacos e cavidades (luz natural).

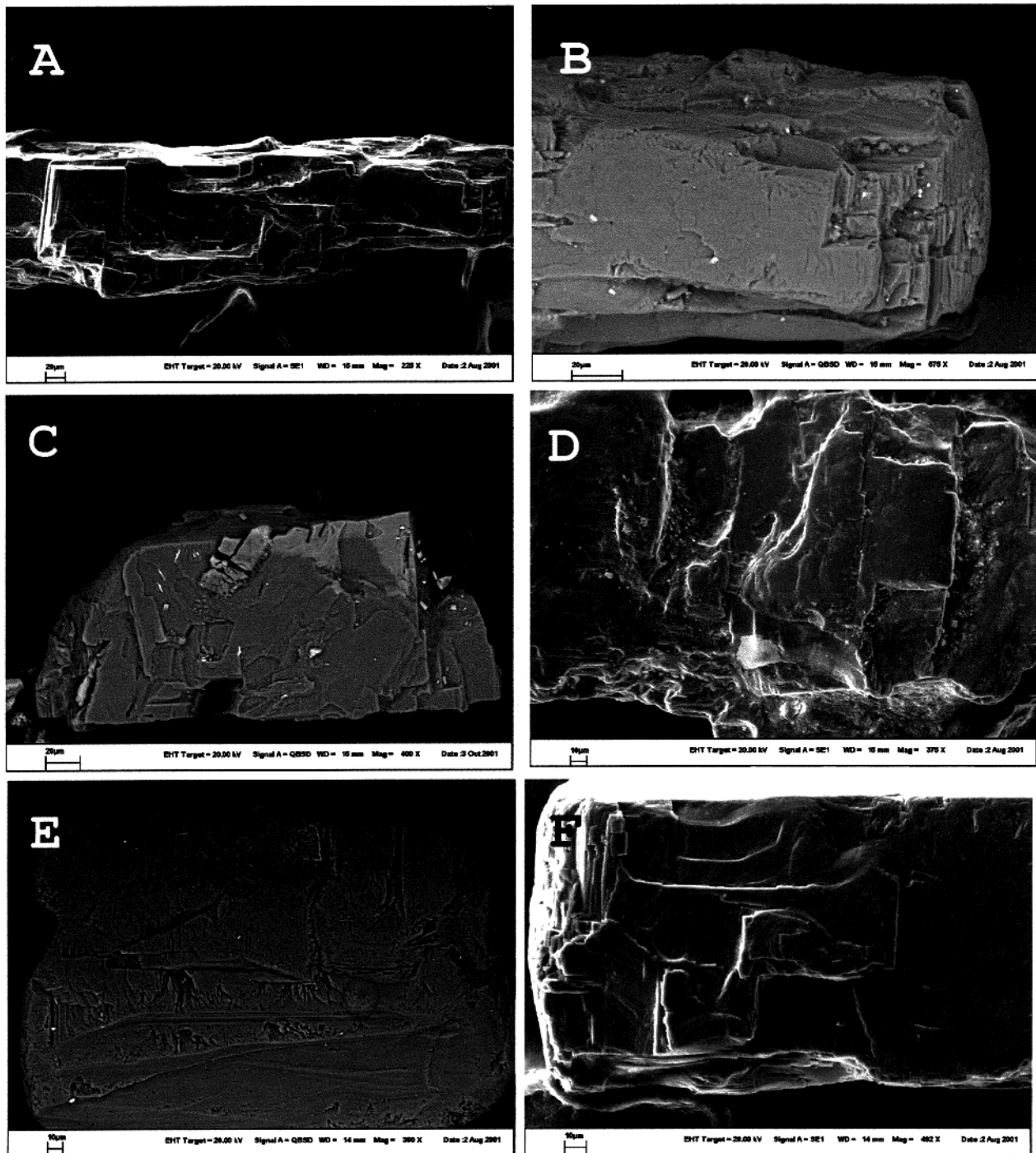


Figura 23 - Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de cianita da Formação Barreiras: (A - F) grãos, geralmente, pouco corroídos, exibindo caráter prismático tabular, com clivagem e partição formando ângulo de quase 90° graus.

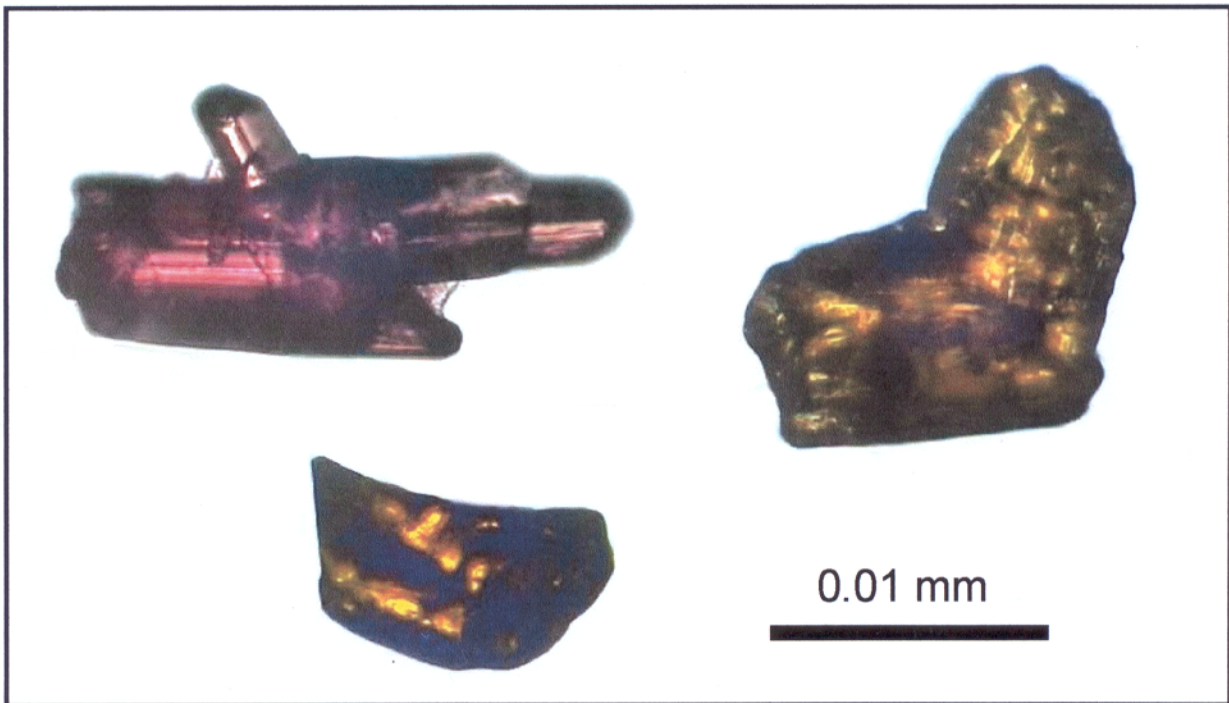


Figura 24 - Fotomicrografias de rutilo da Formação Barreiras à mostrando formas prismáticas, subédricas, com geminações em cotovelo. As cores variam entre amarelo avermelhado a vermelho escuro. Os grãos não apresentam sinais de corrosão e contêm inclusões (luz natural).

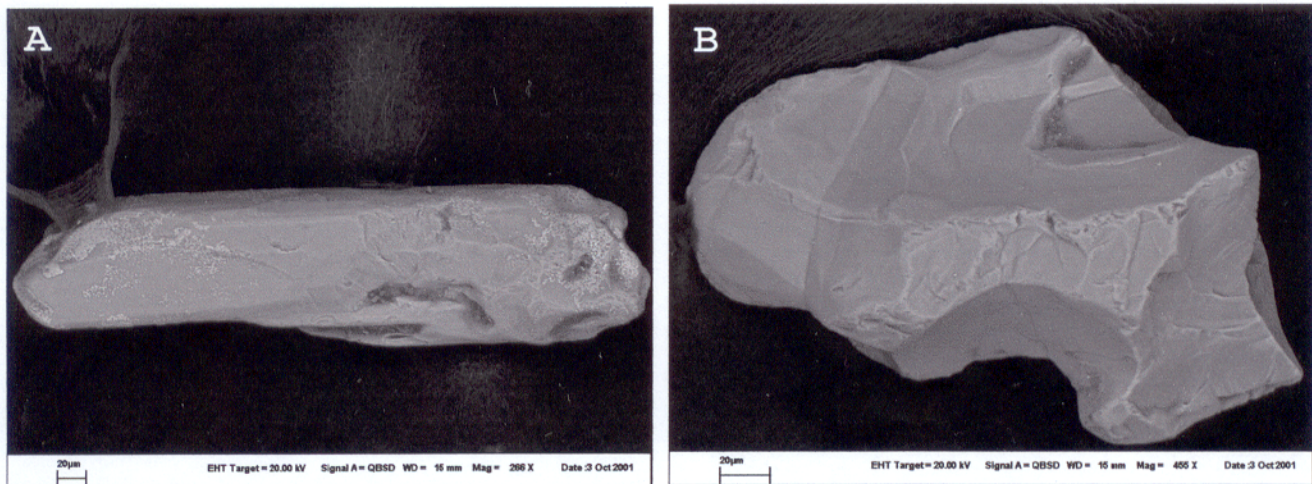


Figura 25 - Imagens de microscopia eletrônica de varredura de grãos de rutilo da Formação Barreiras: (A) grãos geralmente com caráter prismático subédricos e irregulares; (B) grãos com feições de fraturamento conchoidal e retrabalhamento.

8- VARIEDADES DE TURMALINA E ZIRCÃO DAS FORMAÇÕES IPIXUNA E BARREIRAS

8.1 - TURMALINA

A turmalina é um aluminossilicato de boro com Mg, Li e Fe que corresponde a uma série de solução sólida cujos três membros finais são representados pela schorlita (rica em Fe), elbaíta (rica em Al+Li) e dravita (rica em Mg). Esta ampla variedade mineralógica mostra que este mineral tem grande capacidade de incorporar uma série de cátions em termos de carga e tamanho, que o torna dono de uma assinatura geoquímica reveladora do meio a partir do qual se cristalizou (Henry & Guidotti, 1985; Pereira, 2001). Com uma densidade em torno de 3.1 e dureza 7.5, este mineral é muito comum em diversos tipos de rochas metamórficas, graníticas e auréolas hidrotermais (Henry & Guidotti, 1985). Em depósitos siliciclásticos, onde é considerada muito resistente química e mecanicamente, pode ser também de origem autigênica durante estágios avançados de diagênese (Krynine, 1946; Gautier, 1979).

O estudo da proveniência utilizando as variedades de turmalina pode ser conduzido a partir do reconhecimento das características texturais, mineralógicas e tipos de inclusão (Krynine, 1946; Lihou & Mange-Rajetzky, 1996). Os aspectos texturais como grau de arredondamento e feições corrosão dos grãos podem ser interpretados em termos de fonte e intemperismo, respectivamente. Dessa forma, foram identificados neste trabalho oito tipos nomeados genericamente de: Tu1, Tu2, Tu3, Tu4, Tu5, Tu6, Tu7 e Tu8 (Figura 26). O tipo Tu1 é representado por formas angulosas, de coloração marrom, normalmente sem inclusões. O tipo Tu2 possui caráter também anguloso, entretanto são de colorações esverdeada e azulada. O tipo Tu3 é caracterizado principalmente pela forma euédrica dos seus grãos, apresenta-se na cor marrom e

com presença de inclusões. O tipo Tu4 tem forma subédrica, cor marrom, e diferentes tipos de inclusões (cavidades e micrólitos). O tipo Tu5 além de possuir forma arredondada, apresenta-se preferencialmente na cor marrom e com poucas inclusões. O tipo Tu6 possui forma subédrica, cores verde e azul, e poucas inclusões. O tipo Tu7 destaca-se pela sua forma arredondada, cor marrom e poucas inclusões. Por final, o tipo Tu8 além da sua forma esférica, possui coloração esverdeada ou azulada e normalmente não possui inclusão.

Na Formação Ipixuna ocorrem todos estes tipos, com exceção do Tu3, que se destaca preferencialmente na Formação Barreiras. As formas euédricas e angulosas deste mineral são mais representativas dos depósitos localizados na porção inferior desta unidade. Por outro lado, na porção superior da referida formação, as formas subédricas e arredondadas são mais freqüentes (Figura 26). As mudanças nos teores relativos entre estes tipos coincidem com as superfícies de descontinuidades encontradas nesta unidade (Figura 27). Os grãos de turmalina desta formação apresentam variadas texturas superficiais, mostradas nas imagens de MEV, que se apresentam com aspecto cavernoso, superfícies rugosas contendo pequenas bolinhas ou placas hexagonais, as quais não foram analisadas composicionalmente (figuras 27 e 28).

Na Formação Barreiras predominam preferencialmente as turmalinas dos tipos Tu1, Tu3, Tu4 e Tu5. Os demais tipos (Tu2, Tu6, Tu7 e Tu8) são menos importantes. Como comentado anteriormente, o tipo Tu3 ocorre preferencialmente nestes depósitos, sendo um dos que mais se destaca, e ao MEV, mostra claramente seu caráter euédrico, com suas faces cristalinas e terminações piramidais preservadas (Figura 29). As imagens de MEV nos grãos de turmalinas desta formação não apresentam evidências de corrosão significativas dos grãos, mas são bem observadas inclusões de zircão (figuras 30C e 31D).

AMBIENTES

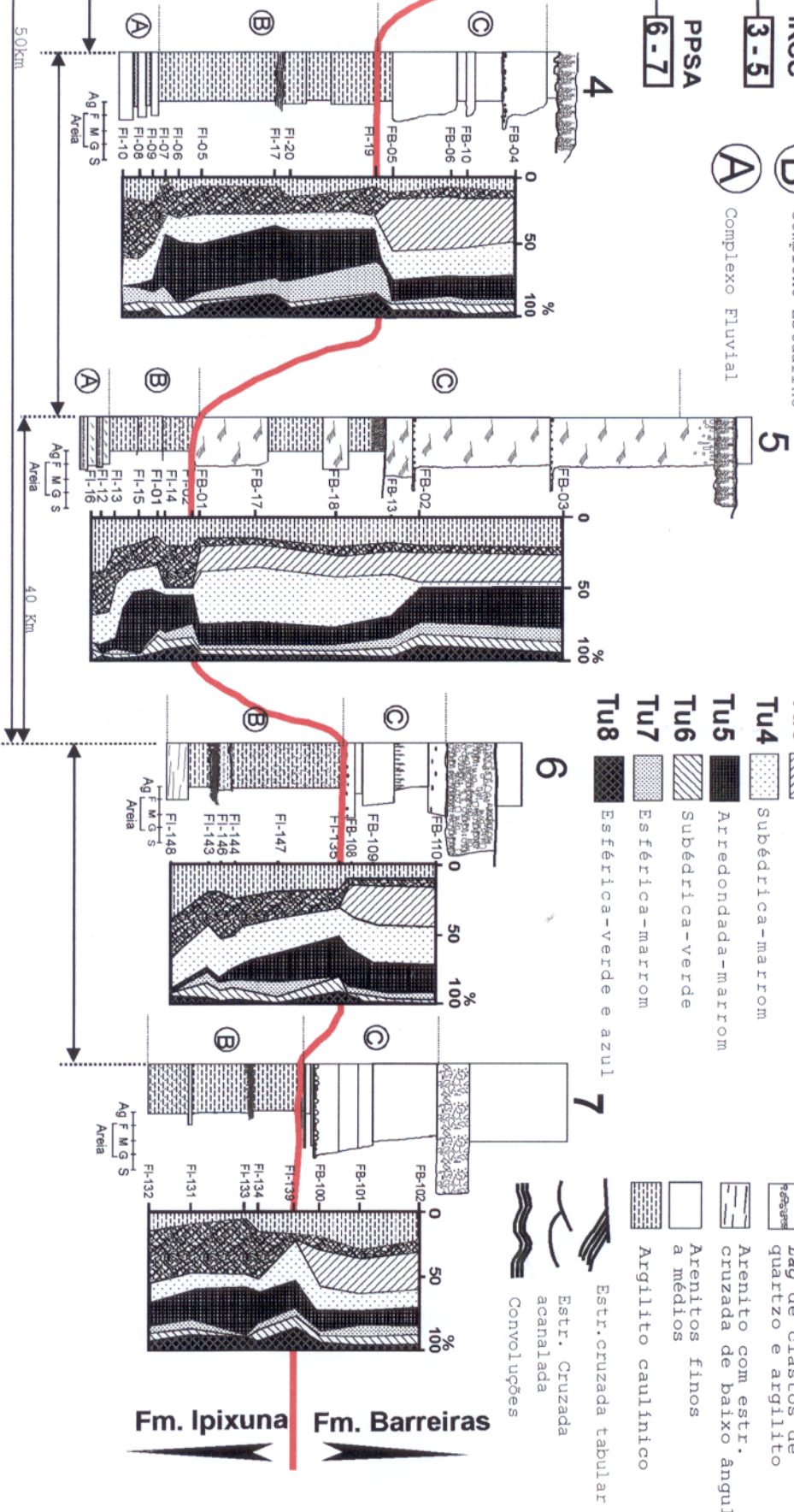
- BR 010**
- [1-2]** Complexo fluvial
- IRCC** **(B)** Complexo Estuarino
- [3-5]** **(A)** Complexo Fluvial
- PPSA**
- [6-7]**

VARIEDADES DE TURMALINA

- Tu1** Angulosa-marrom
- Tu2** Angulosa-verde e azul
- Tu3** Euédrica-marrom
- Tu4** Subédrica-marrom
- Tu5** Arredondada-marrom
- Tu6** Subédrica-verde
- Tu7** Esférica-marrom
- Tu8** Esférica-verde e azul

LITOLOGIA E ESTRUTURAS

- Nível conglomerático laterítico
- Paleossolo
- Lag de clastos de quartzo e argilito
- Arenito com estr. cruzada de baixo ângulo
- Arenitos finos
- Argilito caulínico
- Estr. cruzada tabular
- Estr. Cruzada acanalada
- Convoluções



expostas nas minas de caulim da IRCC, PPSA e na BR 010, mostrando a distribuição dos

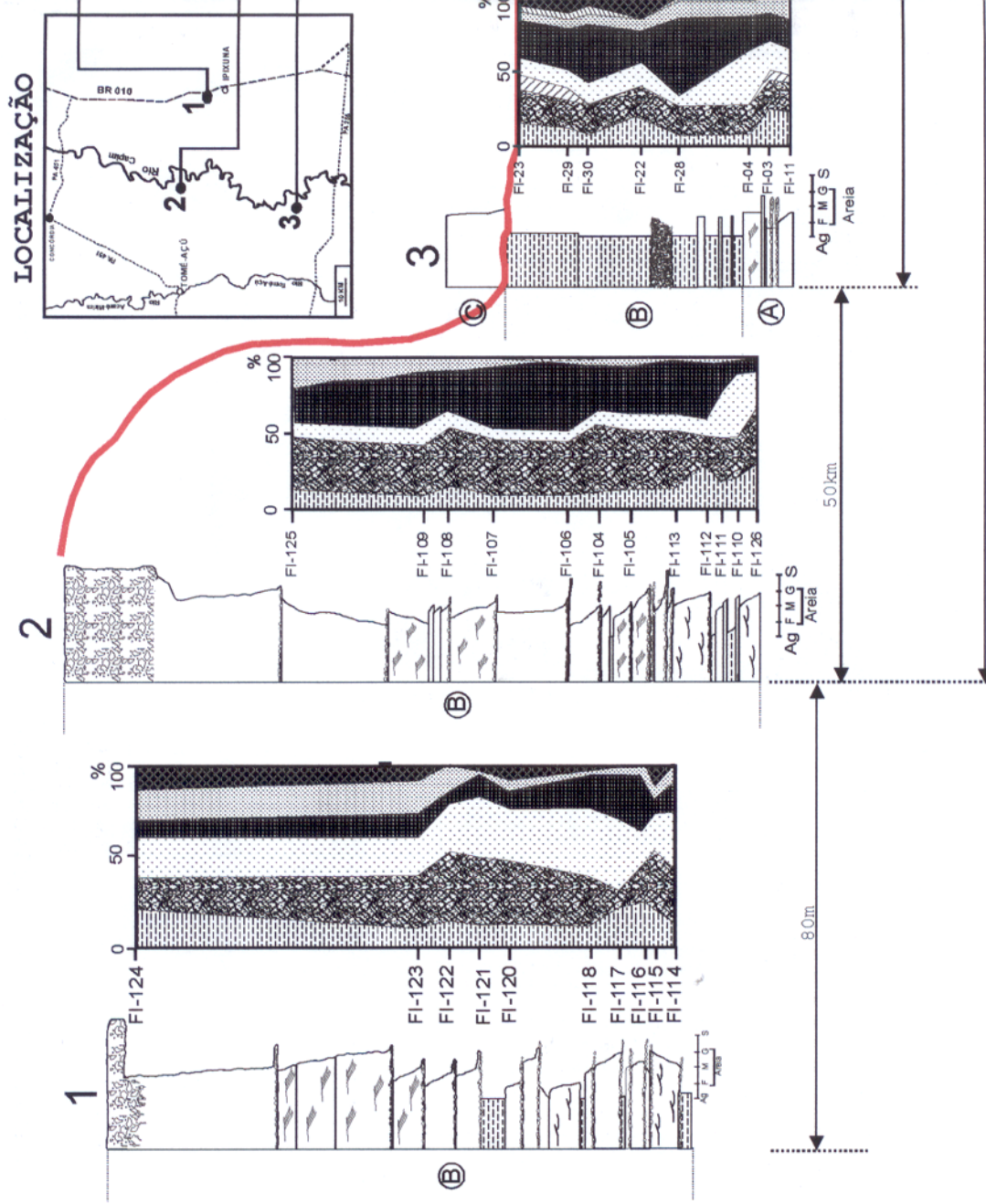


Figura 26 - Seções colunares das formações Ipixuna e Barreira e principais tipos de turmalina e a correlação das

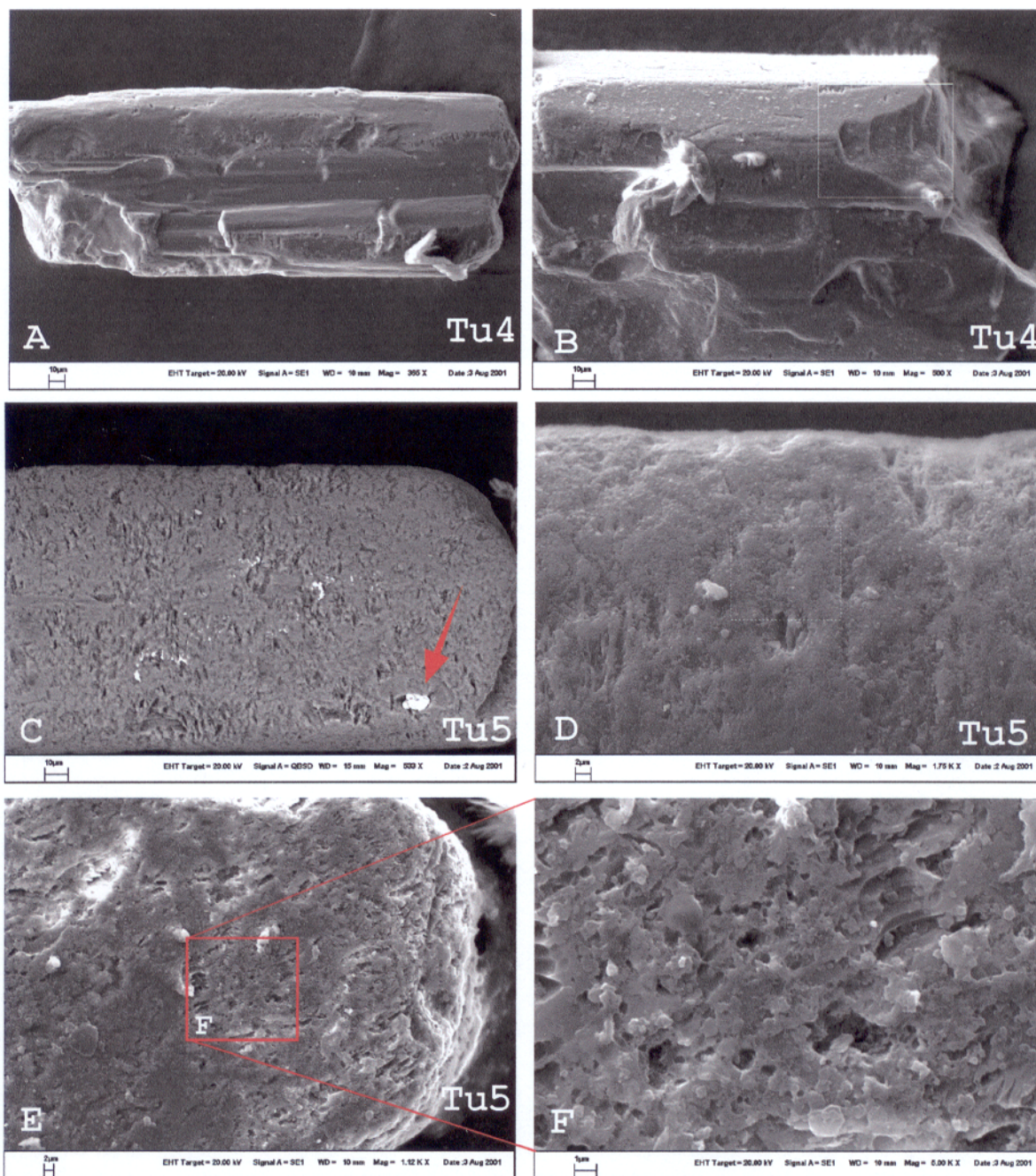


Figura 27 - Imagens de microscopia eletrônica de varredura de turmalina da Formação Ipixuna mostrando a morfologia e texturas de dissolução: (A e B) formas prismáticas, subédricas, com fraturamentos (tipo Tu4); (C-E) formas prismáticas arredondadas (tipo Tu5); (F) detalhe do aspecto cavernoso dado pela dissolução. Notar as inclusões de zircão (seta).

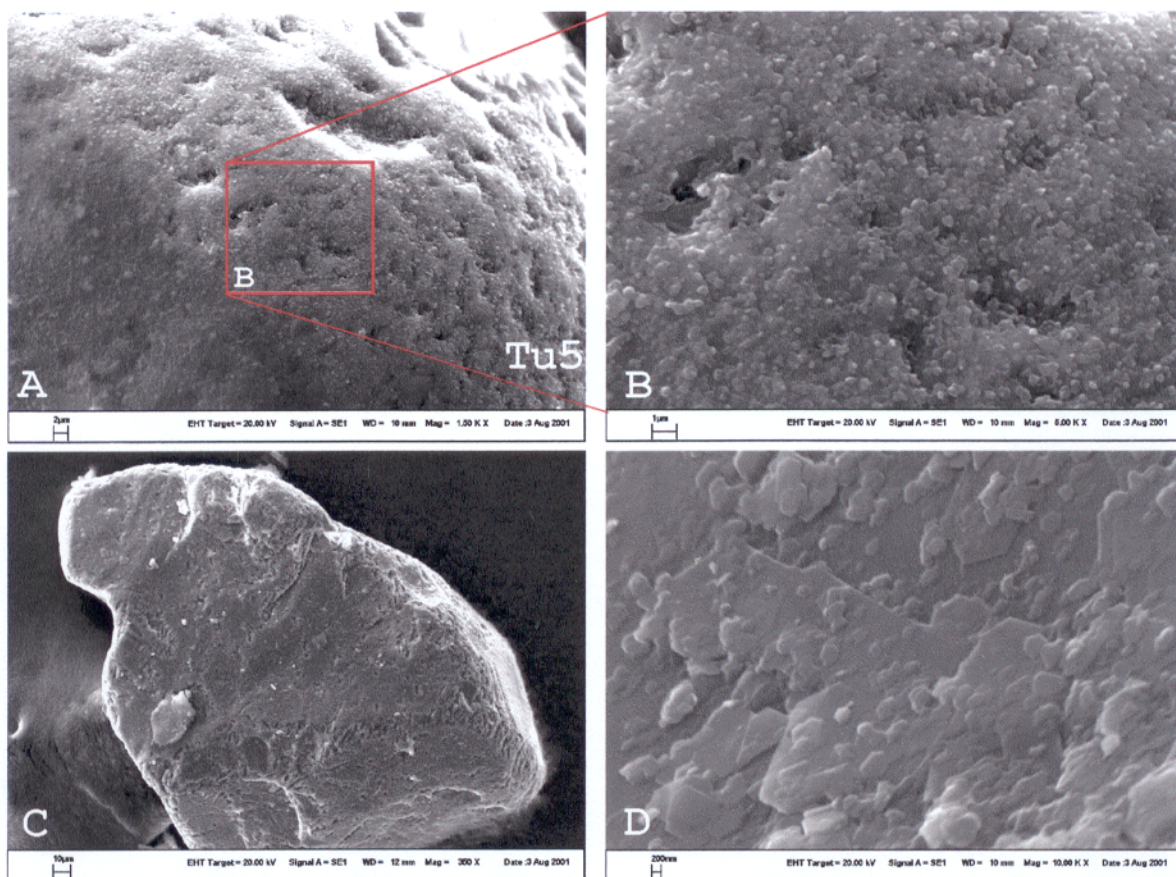


Figura 28 - Imagens de microscopia eletrônica de varredura de turmalina da Formação Ipixuna mostrando detalhes de texturas de dissolução: (A) superfície rugosa, (B) estruturas microgranulares, (C) grão irregular, arredondado e corroído, (D) placas hexagonais na superfície do grão.

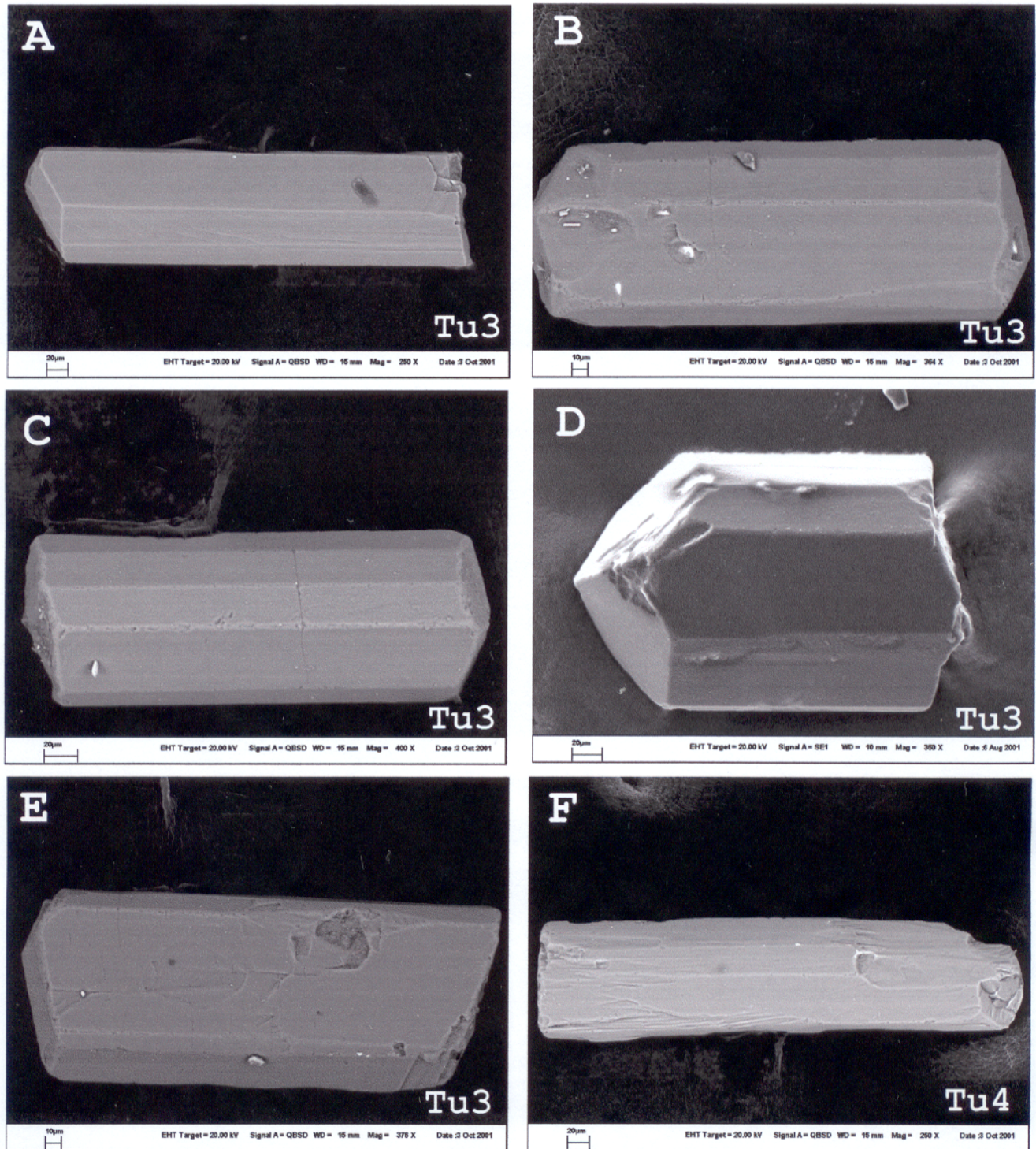


Figura 29 - Imagens de microscopia eletrônica de varredura de variedades de turmalina da Formação Barreiras: (A-E) formas euédricas com suas faces cristalinas (tipo Tu3), sugerindo sedimentos de primeiro ciclo sedimentar; (F) formas subédricas indicando sedimentos também pouco transportado (tipo Tu4).

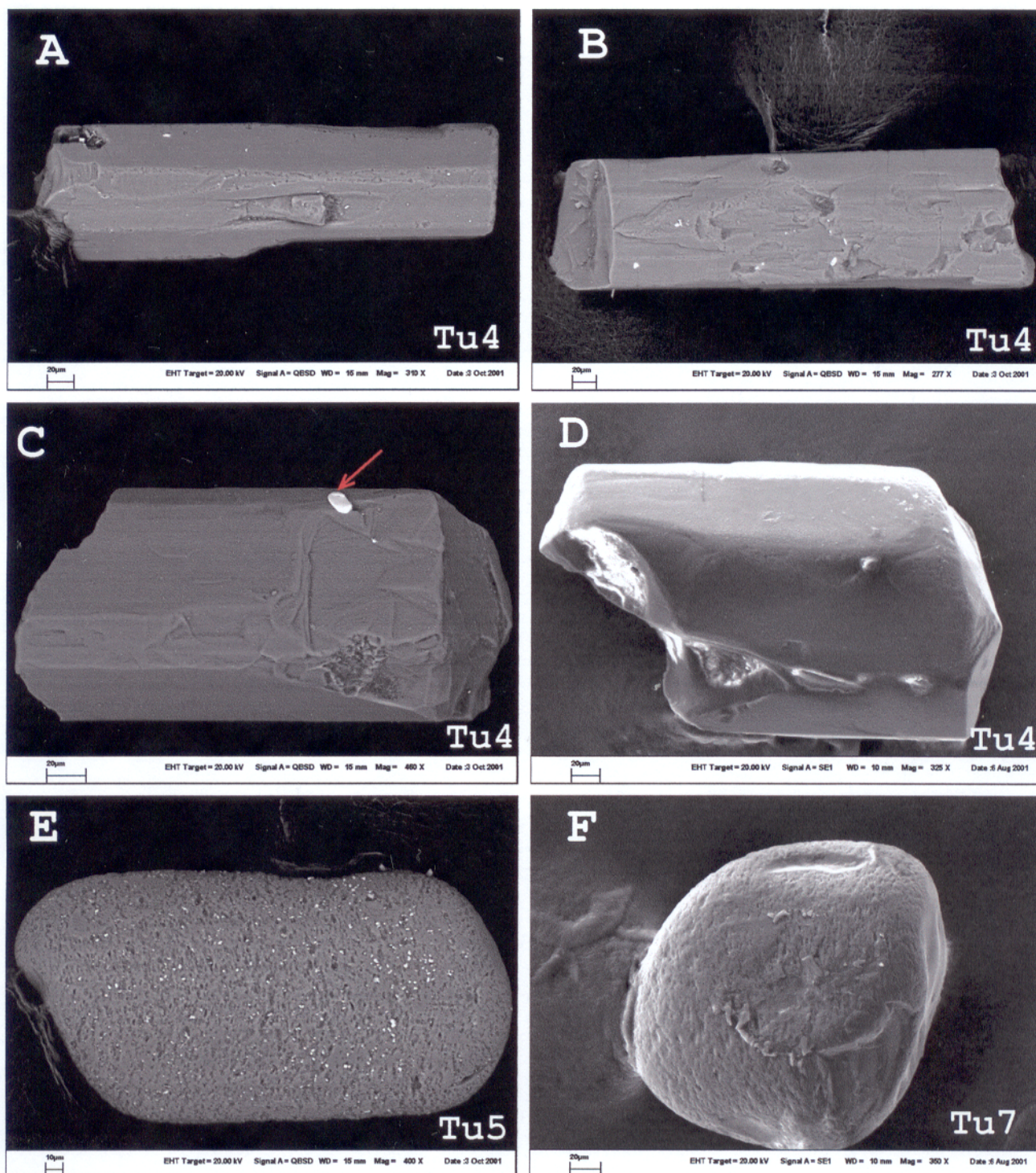


Figura 30 - Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de variedades de turmalina que ocorrem subordinadamente na Formação Barreiras : (A-D) formas prismáticas subédricas, exibindo fraturamentos, indicativo de primeiro ciclo sedimentar (tipo Tu4); (E-F) formas bem arredondadas, indicando sedimentos policíclicos (tipos Tu5 e Tu7). Observadas inclusão de zircão (seta). Os grãos arredondados (tipos Tu5 e Tu7).

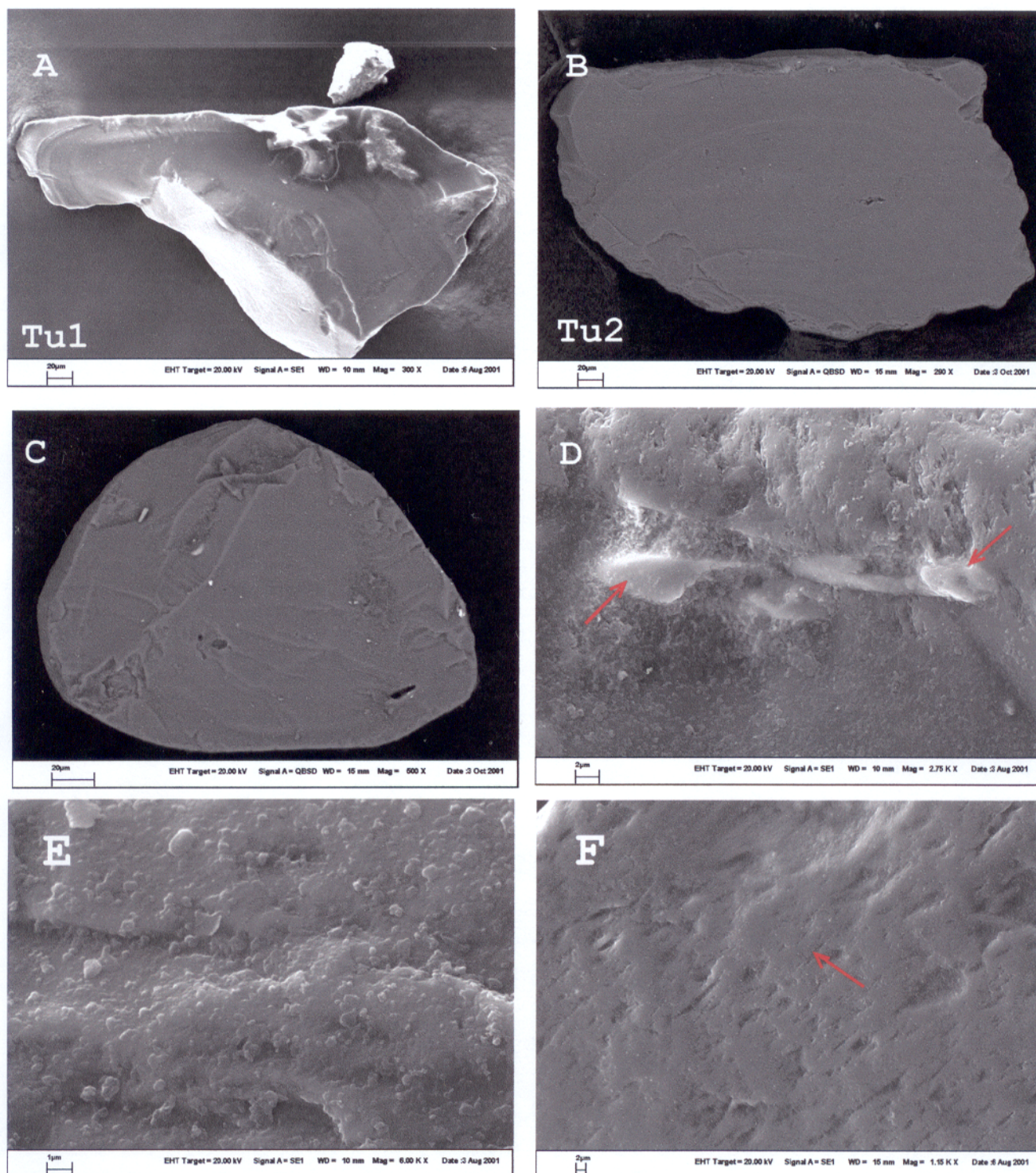


Figura 31 - Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em grãos de turmalina da Formação Barreiras mostrando algumas texturas superficiais e morfologias: (A e B) formas irregulares exibindo fraturamentos conchoidais (tipos Tu1 e Tu2); (C) uma seção basal desse mineral; (D) inclusões de zircão indicadas pela seta; (E) textura esferulítica superficial dos grãos; e (F) estriações (seta).

8.2.- ZIRCÃO

O zircão é considerado um mineral mecânica e quimicamente resistente, além de ser um excelente indicador petrogenético. O estudo das suas variedades cristalográficas informa os parâmetros físico-químicos atuantes durante a formação da rocha-mãe. A ocorrência de zircão com sobrecrecimento indica eventos metamórficos e de granitização da rocha-mãe (Speer, 1980). Por outro lado, o grau de arredondamento dos grãos fornece informações sobre a ciclicidade sedimentar dos grãos, tempo de transporte e/ou retrabalhamento expressivo por processos sedimentares (e.g. maré e onda). De uma maneira geral, as formas euédricas e subédricas são indicativas de detritos primários, pouco transportados. A cor, por sua vez, relaciona-se à idade do mineral e/ou à abundância de elementos radioativos na sua estrutura.

Estudo cristalográfico de grãos de zircão e a sua aplicação petrogenética foram sistematicamente abordados por Pupin (1976, 1980, 1985). Este autor distinguiu vários tipos de zircão através da caracterização dos seus prismas e terminações piramidais, as quais foram relacionadas à temperatura de cristalização e índice de alcalinidade do magma, respectivamente. Este método fornece informações precisas sobre as características petrogenéticas da rocha-fonte, entretanto a sua aplicação em proveniência de depósitos sedimentares é bastante limitada, uma vez que os grãos de zircão não mantêm a forma euédrica preservada após vários ciclos sedimentares. Dessa forma, foi possível estabelecer as possíveis proveniências de zircões detríticos, aqui estudados, com base na forma, cor, tipo de zoneamento e grau de arredondamento dos grãos, como utilizado por Caironi et al. (1996), Dabard et al. (1996), Lihou & Manger-Rajetzky (1996), Loi & Dabard (1997) e Schäfer & Dörr (1997).

Baseado nestes parâmetros, foi possível reconhecer cinco categorias de zircão presentes nos depósitos estudados: Zr1, Zr2, Zr3, Zr4 e Zr5 (Figura 32). O tipo Zr1 é representado por grãos anédricos, irregulares, possuindo ou não zoneamento. O tipo Zr2 caracteriza-se pela suas formas euédrica ou subédrica (representativas de sedimentos de primeiro ciclo sedimentar) e possui abundante zoneamento (figuras 9 e 33A-D). O tipo Zr3 possui também formas euédrica ou subédrica, mas sem a presença de zoneamento (Figura 9). O tipo Zr4 diferencia-se das anteriores pela sua coloração que geralmente é amarelada e/ou castanha (Figura 9). O tipo Zr5 representa os grãos policíclicos, caracterizados pela sua forma arredondada, independentemente da cor (figuras 9 e 34). A distribuição estratigráfica destes tipos de zircão é mostrada na figura 32 e a ocorrência dos mesmos nas formações Ipixuna e Barreiras será discutida a seguir.

A Formação Ipixuna é representada, principalmente, pelos tipos Zr2, Zr3 e Zr5, enquanto que os tipos Zr1 e Zr4 são menos freqüentes. Na base desta seqüência, onde ocorrem os depósitos fluviais, são representativas as formas euédricas ou subédricas, enquanto que as formas mais arredondadas são menos freqüentes (Figura 32: seções 4 e 5). Na porção superior desta formação, onde predominam os depósitos estuarinos tendem aumentar as concentrações dos tipos Zr2, Zr3 e Zr5. As imagens geradas pelo MEV permitiram observar sobrecrecimento em alguns grãos que se apresenta como espécie de "esfoliação" (Figura 33E). Ao MEV, os grãos pouco afetados pelo retrabalhamento sedimentar (e.g. Zr2) exibem nitidamente suas faces cristalinas (Figura 33). Por outro lado, os grãos arredondados possuem superfície fosca, porém sem evidências de corrosão (Figura 34).

Na Formação Barreiras são encontrados, preferencialmente, os tipos Zr4 e Zr5 com formas arredondadas e subordinadamente os tipos Zr1 e Zr2. Ao MEV, os grãos de zircão apresentam superfícies isentas de corrosão, mas com presença de diversos fraturamentos. Ao contrário das formas arredondadas (e.g. Zr5 e Zr4) que apresentam perda total de suas faces cristalinas, os grãos euédricos ou subédricos (e.g. Zr2) normalmente exibem suas faces cristalinas bem preservadas (Figura 35).

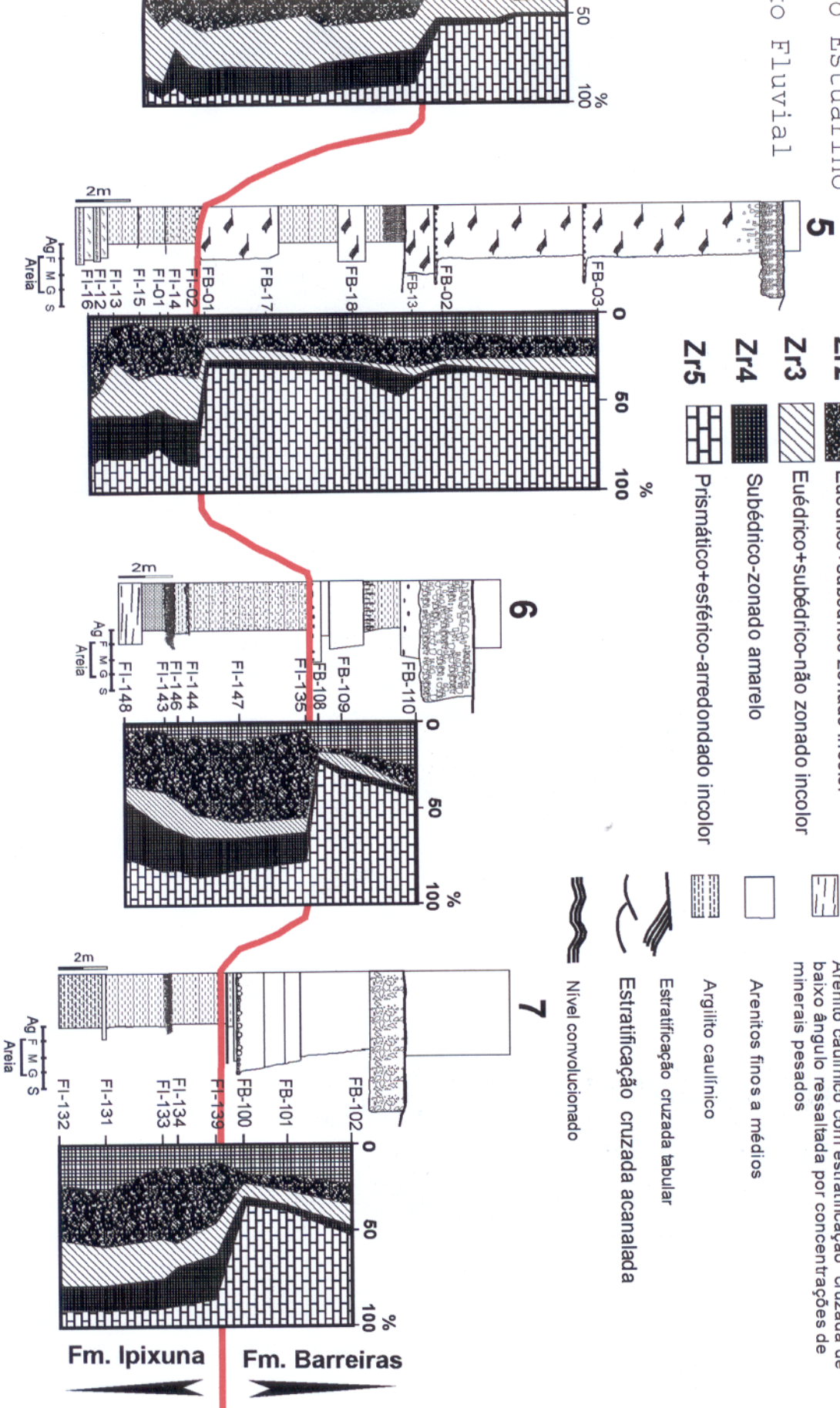
IES

o fluvial
o Estuarino
o Fluvial

VARIEDADES DE ZIRCÃO

- Zr1 Anédrico-zonado+não zonado incolor
- Zr2 Euédrico+subédrico-zonado incolor
- Zr3 Euédrico+subédrico-não zonado incolor
- Zr4 Subédrico-zonado amarelo
- Zr5 Prismático+esférico-arredondado incolor

- Nível conglomerático laterítico
- Paleossolo
- Leg de clastos de quartzo e argilito
- Arenito caulínico com estratificação cruzada de baixo ângulo ressaltada por concentrações de minerais pesados
- Arenitos finos a médios
- Argilito caulínico
- Estratificação cruzada tabular
- Estratificação cruzada acanalada
- Nível convolucionado



reiras e Ipixuna expostos nas minas de caulim da IRCC e PSSA, e na BR 010

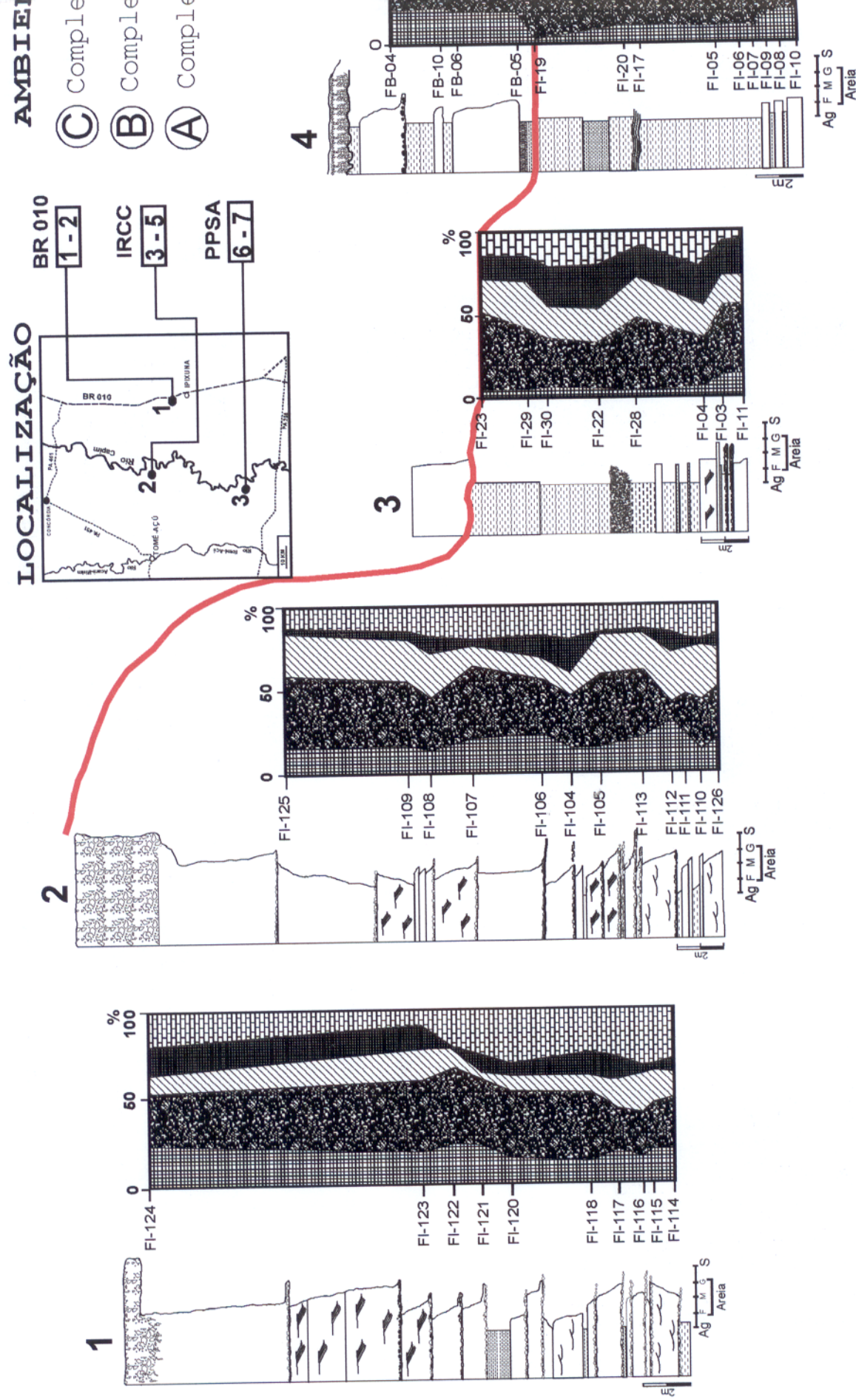


Figura 32 - Distribuição estratigráfica das variedades de zircão nos depósitos das formações B na região de Tomé-Açu/Ipixuna, NE do Pará.

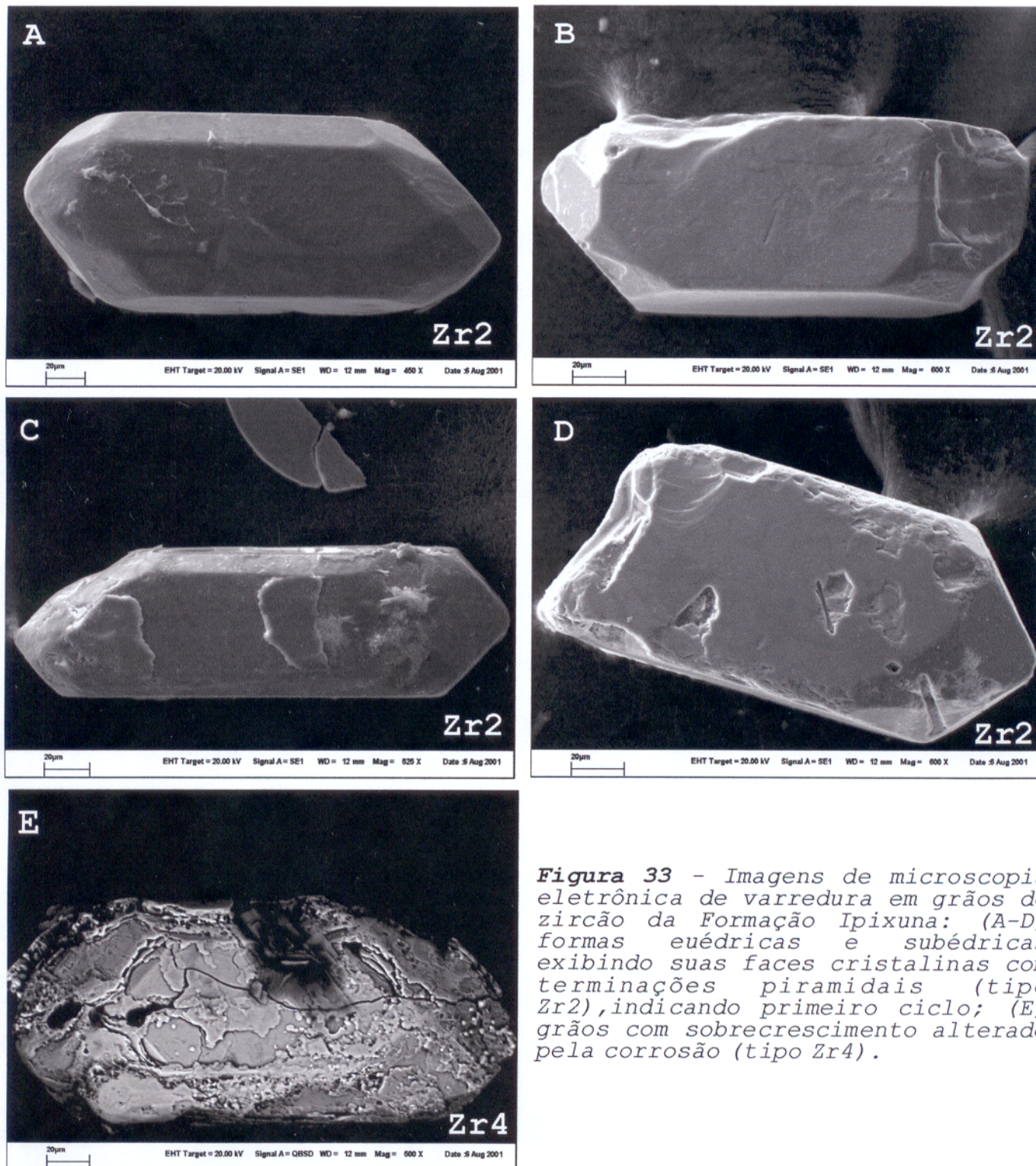


Figura 33 - Imagens de microscopia eletrônica de varredura em grãos de zircão da Formação Ipixuna: (A-D) formas euédricas e subédricas exibindo suas faces cristalinas com terminações piramidais (tipo Zr2), indicando primeiro ciclo; (E) grãos com sobrecrecimento alterado pela corrosão (tipo Zr4).

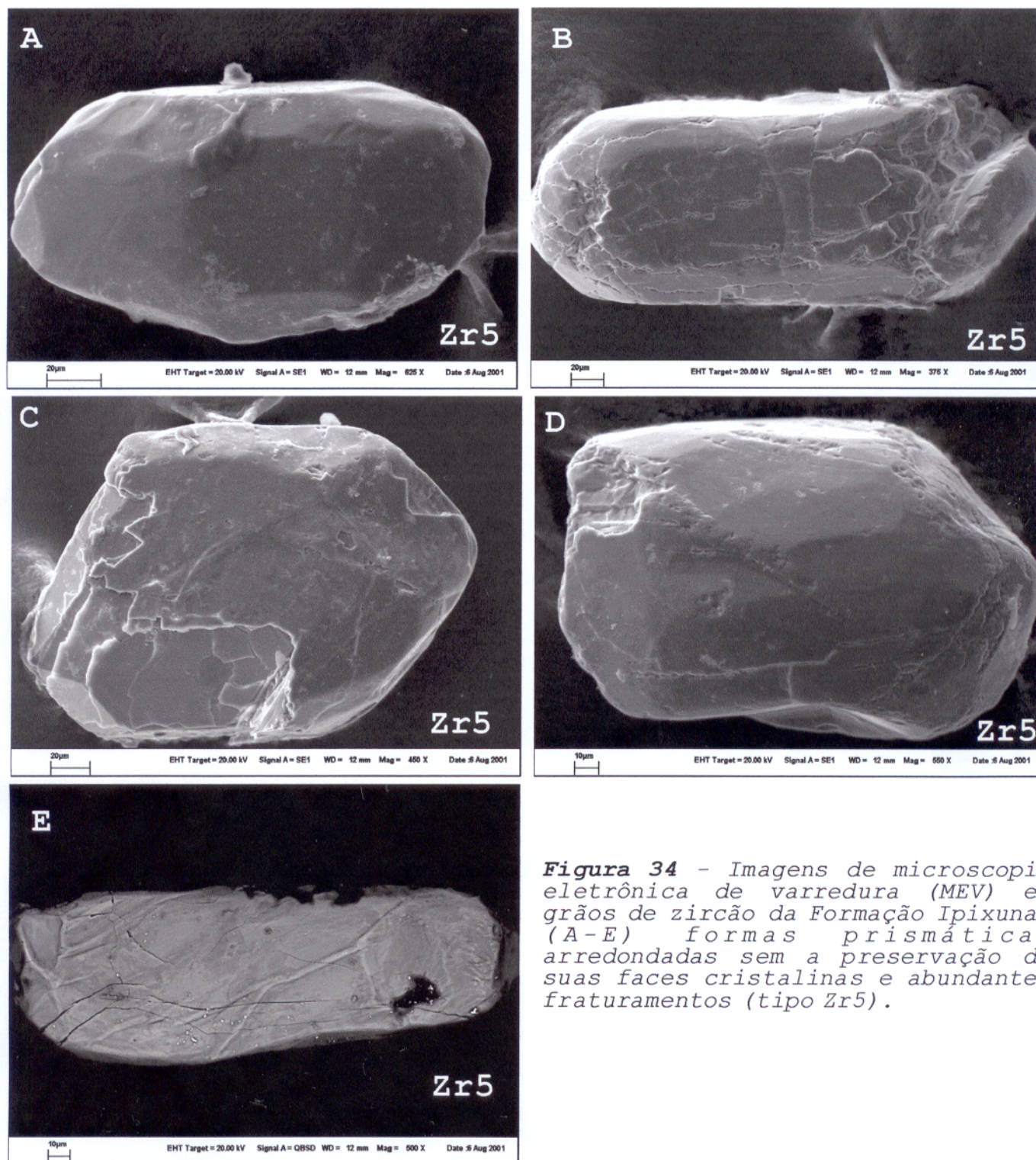


Figura 34 - Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em grãos de zircão da Formação Ipixuna: (A-E) formas prismáticas arredondadas sem a preservação de suas faces cristalinas e abundantes fraturamentos (tipo Zr5).

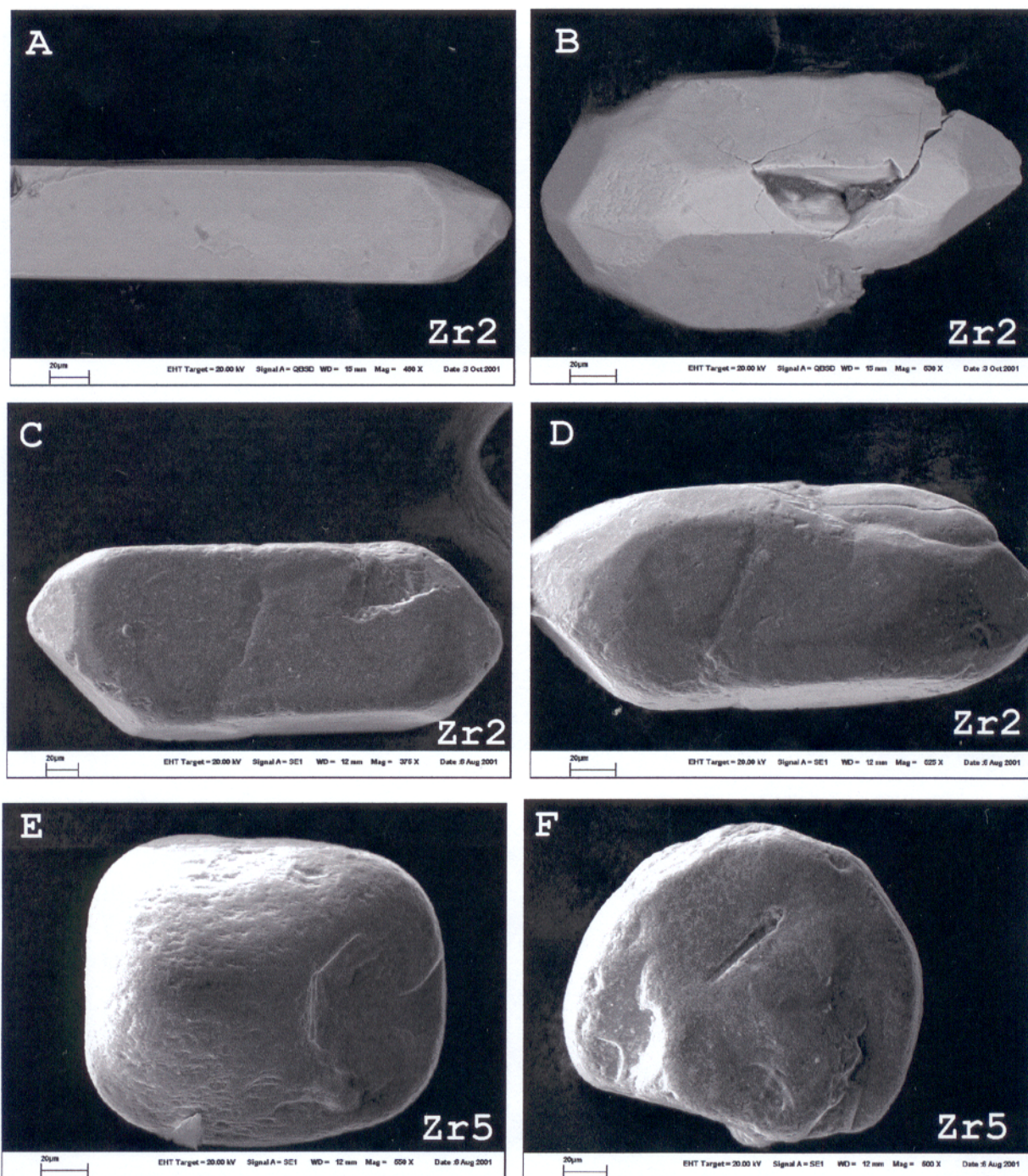


Figura 35- Imagens de microscopia eletrônica de varredura em zircões da Formação Barreiras: (A-B) formas euédrica exibindo faces cristalinhas (tipo Zr2); (C-D) formas subédricas com suas arestas suavemente arredondadas (tipo Zr2); (E-F) formas arredondado, indicando reciclagem de sedimento e/ou transporte prolongado (tipo Zr5).

9- DISCUSSÃO

A integração de dados de minerais pesados ao contexto faciológico e estratigráfico dos depósitos estudados permite tecer considerações referentes aos processos intempéricos e à proveniência relacionados aos seus sedimentos das formações Ipixuna (Cretáceo Superior) e Barreiras (Mioceno Médio/Superior) do leste da Sub-Bacia de Cametá.

A Formação Ipixuna caracteriza-se pela composição essencialmente caulínica de seus depósitos que a torna litologicamente diferente das demais unidades estratigráficas adjacentes. Os depósitos de caulim desta formação possuem origem relacionada, possivelmente, ao processo laterização paleogênica que afetou sedimentos arcoseanos (Kotshoubey, et al., 1996), produzidos no Cretáceo através do retrabalhamento físico de rochas feldspáticas, quando as condições climáticas áridas e a instabilidade tectônica favoreceram a preservação dos sedimentos (Rossetti et al. 2001). Na Formação Barreiras, a ausência deste tipo de sedimento nos seus depósitos siliciclásticos pode estar relacionada a fatores climáticos, tectônicos e fonte. No primeiro caso, o fato dos sedimentos Barreiras terem sido produzidos sob condições de clima tropical úmido, não foi favorável para a preservação de sedimentos arcoseanos, os quais podem ter sido alterados na própria rocha-fonte, antes mesmo de chegar na bacia de sedimentação (Rossetti 2001).

As formações Ipixuna e Barreiras possuem uma ampla ocorrência de minerais pesados, os quais são representados principalmente por zircão, turmalina, estaurolita, cianita e rutilo, além de ocorrências esporádicas de sillimanita, andaluzita, granada, topázio, anfibólio e anatásio (Tabela 3). As assembléias mineralógicas são composicionalmente semelhantes, ou seja, apresentam como destaque minerais pesados de alta

estabilidade. Entretanto, em termos de teores relativos destes minerais e índice de ZTR, estas assembléias podem ser claramente distinguidas (Figura 36). A Formação Ipixuna é enriquecida em zircão e turmalina, e empobrecida em estaurolita e cianita. Os valores do índice de ZTR são mantidos sempre acima de 80% (Figura 36F). Por outro lado, a assembléia da Formação Barreiras é enriquecida em estaurolita e cianita, e os valores de ZTR são relativamente menores. Já a distribuição da turmalina não deixa permite a separação entre estes dois depósitos (Figura 36C).

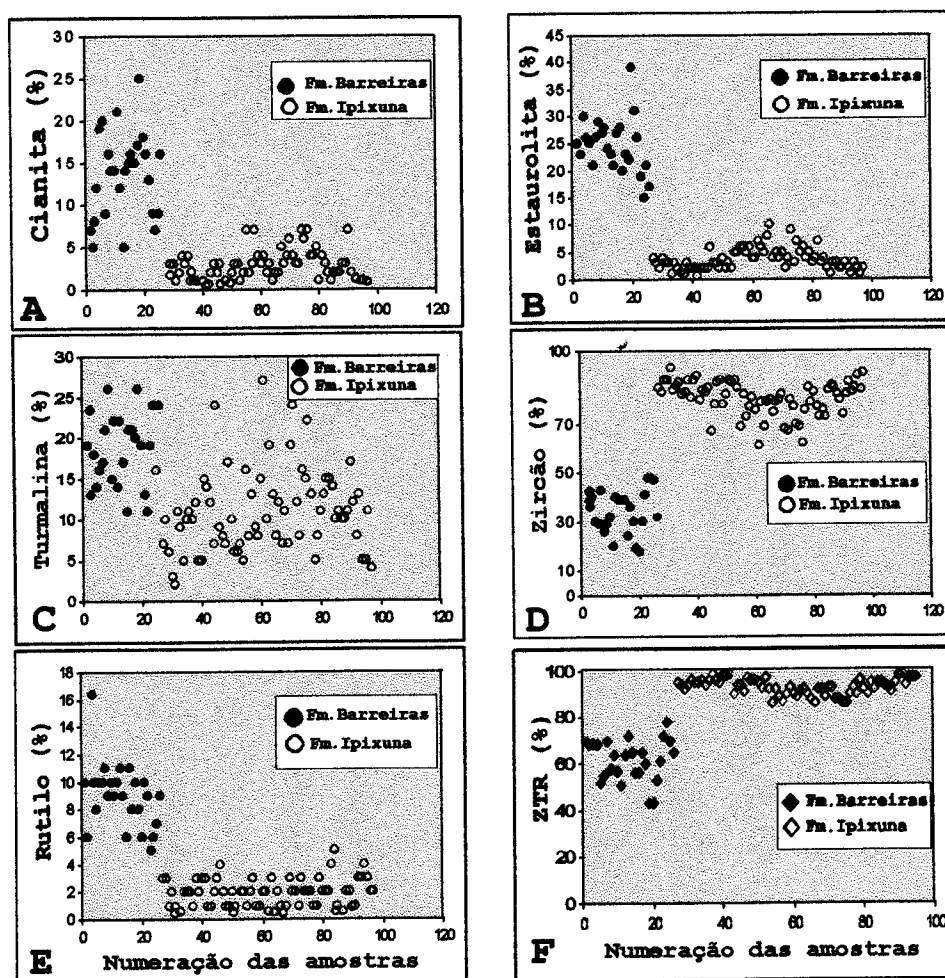


Figura 36 - Separação das formações Ipixuna e Barreiras através dos teores dos minerais pesados principais e do índice de ZTR.

Em média, a Formação Ipixuna apresenta uma associação de zircão (72%), turmalina (15%), estaurolita (6%) e cianita (3%), a Formação Barreiras por sua vez se destaca pela presença em média de zircão (35%), estaurolita (24%), turmalina (19%) e cianita (15%). Conseqüentemente, os valores de ZTR para estas formações são também em média 92% e 70%, respectivamente. As diferenças nas concentrações destes minerais entre estas unidades (Figura 8) podem ser atribuídas, principalmente, ao intemperismo químico, uma vez que, ao contrário dos depósitos terciários, os grãos de estaurolita, cianita e, também, da turmalina da Formação Ipixuna estão fortemente afetados pelo intemperismo químico (figuras 11-12b, 19, 27 e 28) ou mesmo proveniência. As abundantes feições de dissolução encontradas nos minerais da Formação Ipixuna foram produzidas por águas intersticiais ácidas (Kotshoubey et al., 1996) que promoveram a dissolução dos minerais menos estáveis e elevação do índice de ZTR.

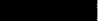
Dessa forma, fica estabelecido que o intemperismo químico desempenhou um importante papel na alteração das assembléias de minerais pesados dos sedimentos cretáceos e terciários. Como já admitido por Costa et al. (1991) e reforçado em Costa et al. (1997). À semelhança das unidades aqui estudadas, os depósitos sedimentares de outras áreas do NE do Pará e NW do Maranhão normalmente apresentam assembléias de minerais pesados com estas características (Dias Lima & Truckenbrodt 1997; Lima & Rossetti 1997; Leite & Rossetti 1999).

Além do intemperismo químico, os depósitos das formações Ipixuna e Barreiras pertencem a sistemas deposicionais estuarinos, cujo entendimento da interação dos processos que controlam a deposição de sedimentos é bastante complexo. Dessa forma, a investigação da proveniência utilizando as composições de assembléias mineralógicas nesta região fica seriamente comprometida, sabendo-se que os processos ambientais e

intempéricos influenciam fortemente na assinatura da proveniência (Morton & Hallsworth, 1994). Assim, o estudo dos minerais pesados das formações Ipixuna e Barreiras foi conduzido preferencialmente com base nas variedades de turmalina e zircão, e no índice de RuZi.

A análise das populações de zircões das formações Ipixuna e Barreiras, segundo Pupin (1976) e Caironi *et al.*, (1996), permitiu obter informações sobre as rochas-fontes destes minerais. A Formação Ipixuna é caracterizada (por ordem decrescente de abundância) por zircões de rochas graníticas calcioalcalinas ou ortognaisses (Zr2 e Zr4/grupo A); migmatitos, granulitos (Zr3/grupos C₁, C₂ e C₃); rochas sedimentares (Zr5/grupo E); e riolitos alcalinos (Zr1/grupo D). A presença de grãos de zircão com sobrecrecimento indica eventos metamórficos e/ou de granitização da rocha-mãe (Speer, 1980). Na Formação Barreiras são mais freqüentes os zircões reciclados (Zr5/grupo E:); de granitos e gnaisses (Zr2 e Zr4/grupo A); migmatitos e granulitos (Zr3/grupos C₁, C₂ e C₃); e riolitos (Zr1/grupo D) (Tabela 3). As descrições baseadas no trabalho de Krynine (1946) permitiram identificar e atribuir os tipos de turmalinas aos seus ambientes de formação. Na Formação Ipixuna os tipos de turmalinas são atribuídos a pegmatitos (Tu2), granitos (Tu5), e rochas metamórficas (Tu4). Na Formação Barreiras as principais variedades são de rochas metamórficas, graníticas (Tu3 e Tu4) e pegmatíticas (Tu2).

Tabela 4 - Grupos de zircão das formações Ipixuna e Barreiras. O comprimento das tarjas em negrito mostra a ordem crescente de abundância.

TIPOS DE ZIRCÃO			Características Petrográficas			Rocha-Fonte
Caironi et al. (1996)	Neste Trabalho		Zoneamento	Cor	Arredondamento	
A	Fm. Ipixuna	Fm. Barreiras				
	Zr2 	Zr2 	Pouco bastante	Incolor róseo pálido	Euédrico sub- arredondado	granitóides calcioalcalinos ou ortognaisses
	Zr4 	Zr4 				
C1 C2 C3	Zr3 	Zr3 	Raro	Incolor róseo pálido	Euédrico sub- arredondado	migmatitos granulitos
D	Zr1 	Zr1 	Raro	Incolor	Anguloso	riolitos alcalinos
E	Zr5 	Zr5 	Raro	Incolor	Arredondado	rochas sedimentares

As rochas-fontes que foram definidas a partir dos tipos de turmalina e zircão encontrados nas formações Ipixuna e Barreiras podem ser associadas, em grande parte, às litologias que compõem o embasamento cristalino dessa região. Estas rochas plutônicas e metamórficas podem ser encontradas aflorando em áreas circundantes aos depósitos estudados e envolvem o Escudo Brasil-Central, Cráton de São Luís e as faixas de dobramentos Araguaia-Tocantins e Gurupi (Figura 37). A aquisição de amostras deste embasamento para estudos mineralógicos, finalizando uma possível correlação com os dados de minerais pesados aqui apresentados, não foi possível durante a realização deste trabalho. No entanto, as interpretações sobre as possíveis áreas-fontes para estas unidades estratigráficas foram suportadas por medidas de paleocorrentes.

Embora o número de medidas de paleocorrentes nos depósitos da Formação Ipixuna tenham sido insuficiente para uma análise estatística mais segura, a orientação dessas estruturas indica transporte principal para NE e secundário para SE, sugerindo assim como fonte de sedimentos áreas localizadas a S ou SW, que

envolvem parte do Escudo Brasil-Central e da Faixa Araguaia-Tocantins. Considerando as limitações de dados de paleocorrentes desta formação, a ausência de dados de minerais pesados do embasamento para efeito comparativo e a proximidade geográfica, não se descarta a possibilidade de contribuições oriundas do Cráton de São Luís e da Faixa Gurupi (Figura 37). Na Formação Barreiras, com um maior número de medidas paleocorrentes nos depósitos de centro de canal fluvial, as estruturas indicam transporte sedimentar preferencial para NW, permitindo atribuir como área-fonte o Cráton de São Luís e da Faixa Gurupi localizados a NE ou SE, que englobam rochas plutônicas e metamórficas (Figura 37).

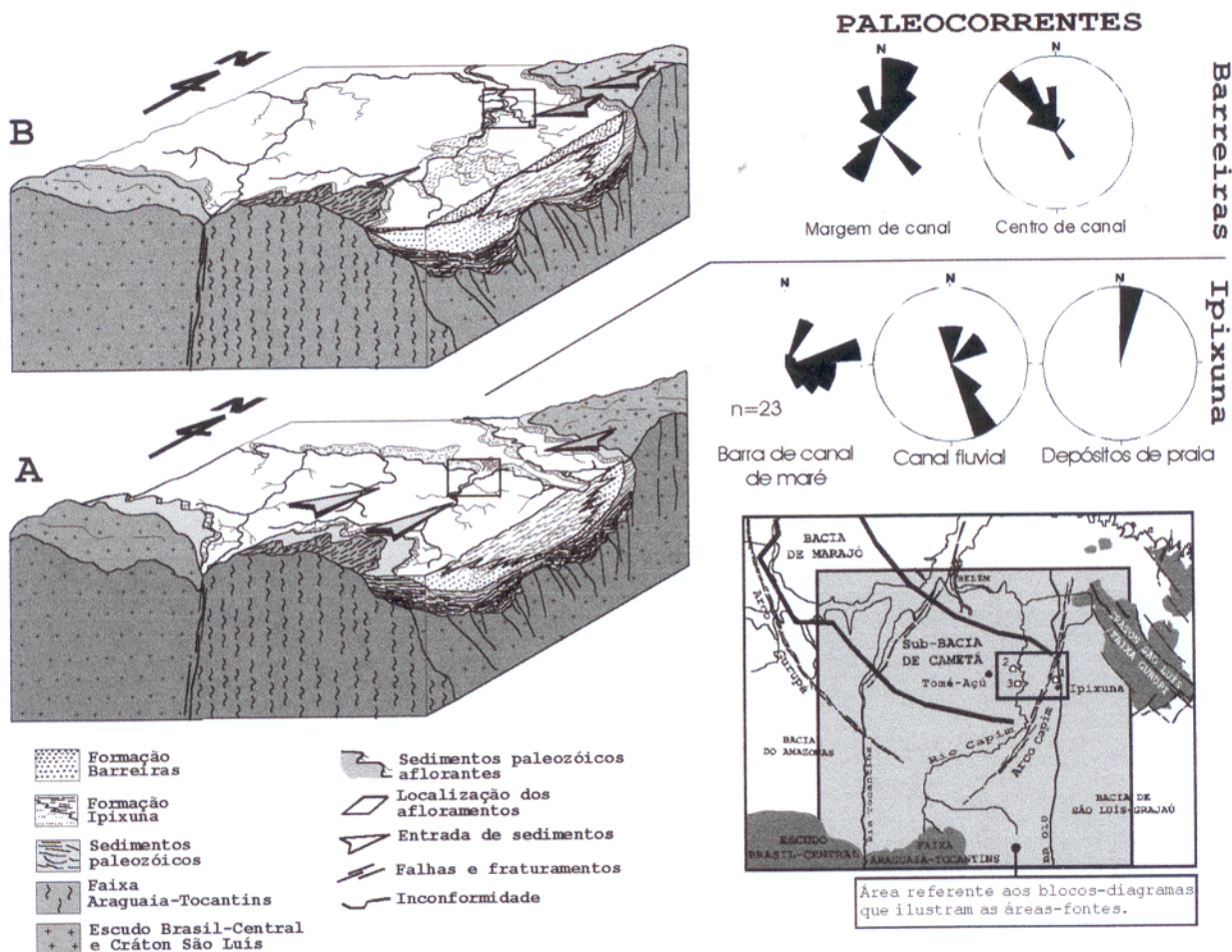


Figura 37 - Modelo ilustrando as possíveis áreas-fontes para as formações Ipixuna (A) e Barreiras (B).

A ocorrência conjunta de grãos euédricos e arredondados de turmalina e zircão em todas as amostras de ambas formações (Figura 38), sugere uma clássica mistura entre sedimentos de primeiro ciclo sedimentar (do embasamento cristalino) e reciclados (de coberturas sedimentares paleozóicas), as quais são, possivelmente, relacionadas aos sedimentos de mesma idade que compõem a seqüência pré-rifte da Sub-Bacia de Cametá. Entretanto, os sedimentos da Formação Ipixuna foram preferencialmente fornecidos por fontes primárias de sedimentos, dada a ocorrência principal de zircão euédricos ou subédricos. Contribuições menos significativas de coberturas sedimentares são refletidas pela presença de turmalina arredondada e ocorrência esporádica de zircão arredondado. Por outro lado, na Formação Barreiras a ocorrência preferencial de zircões arredondados indica maiores contribuições de rochas sedimentares, uma vez que as formas euédricas deste mineral são menos freqüentes. As fontes primárias de sedimentos para esta formação são marcadas pela ocorrência de formas euédricas de turmalina e zircão (Figura 38).

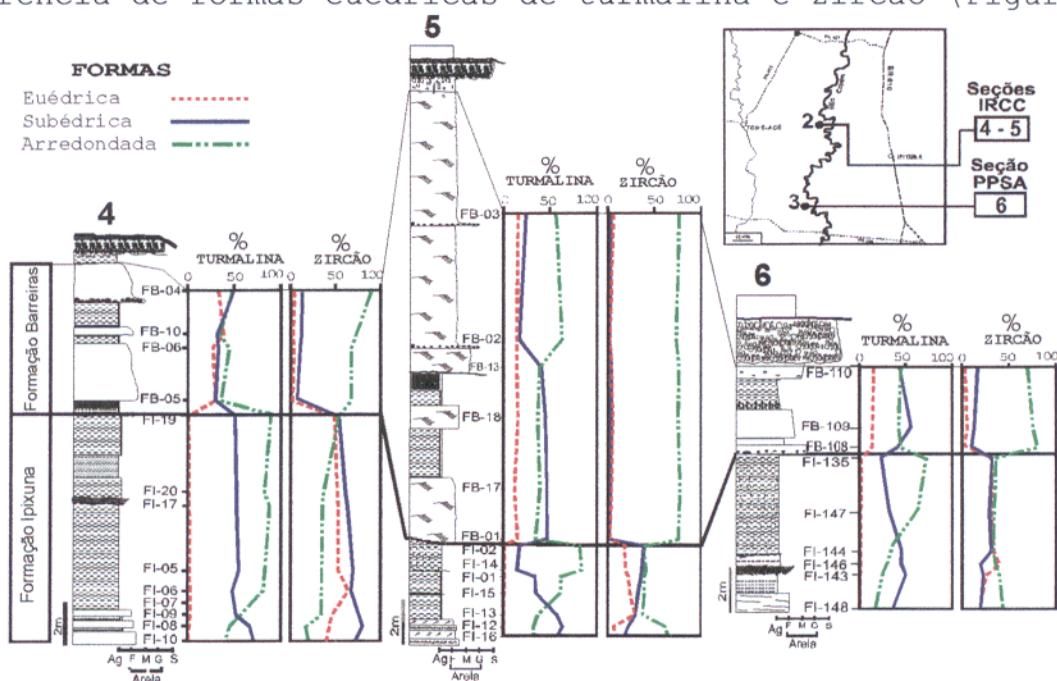


Figura 38 - Distribuição estratigráfica dos grãos euédricos, subédricos e arredondados de turmalina e zircão para formações Ipixuna e Barreiras.

As mudanças na proveniência entre as formações Ipixuna e Barreiras são refletidas pelo comportamento estratigráfico do índice RuZi. Ao contrário dos depósitos cretáceos, que possuem valores de RuZi sempre inferior a 10, os sedimentos terciários apresentam índice de RuZi com valores superiores a 10 (Figura 8). São observadas pequenas variações, nos valores deste índice, que coincidem com superfícies de descontinuidades, localizadas internamente aos depósitos estudados. Estas pequenas oscilações podem indicar mudanças sutis de proveniência corridas e durante a deposição sedimentar. Os valores do índice RuZi poderiam ser influenciadas pela natureza granulométrica e/ou ambiente sedimentação dos depósitos relacionados, entretanto observou-se que os sedimentos fluviais (mais grossos), posicionados na base da Formação Ipixuna apresentam valores de RuZi aproximadamente semelhantes com relação aos sedimentos estuarinos (areno-argiloso) do seu topo. Entretanto, os depósitos fluviais representativos da Formação Barreiras possuem valores de RuZi geralmente superiores, aos sedimentos fluviais da porção basal da Formação Ipixuna, cuja natureza granulométrico é semelhante. Sendo assim, conclui-se que as mudanças nos valores de RuZi reflete as variações na proveniência dos sedimentos aqui estudados, uma vez que a influência do comportamento hidráulico e dos processos intempéricos também podem ser descartados.

Os resultados alcançados a partir do estudo (convencional e de variedade) de minerais pesados nas formações Ipixuna e Barreiras mostram que estas formações podem ser facilmente separadas através dos teores relativos de seus pesados principais, feições texturais de processo de dissolução, tipos de zircão e turmalina, e os índices de ZTR e RuZi. Deixando evidente a importância desta técnica, não somente para investigação de proveniência sedimentar, mas, sobretudo, em investigações estratigráficas que visem a distinção e/ou correlação entre depósitos sedimentares.

10- CONCLUSÕES

Os dados de minerais pesados reunidos na presente dissertação, obtidos num contexto faciológico e estratigráfico, permitem chegar às seguintes conclusões:

- Os principais minerais pesados dos depósitos caulínicos da Formação Ipixuna incluem em média 72% (zircão), 15% (turmalina), 65% (estauroлита) e 3% (cianita). Nos depósitos quartzosos da Formação Barreiras estes minerais perfazem em média 35% (zircão), 19% (turmalina), 24% (estauroлита) e 15% (cianita); os valores de ZTR atingem 98 e 70%, respectivamente. Estas diferenças são relacionadas a intensidade do intemperismo químico que demonstrou, através do grau de corrosão dos grãos de estauroлита, cianita e turmalina, ser mais expressivo nos depósitos cretáceos do que nos depósitos terciários;
- A corrosão dos grãos de cianita, estauroлита e turmalina, e o conseqüente aumento do índice de ZTR na Formação Ipixuna relacionam-se à laterização paleogênica de sedimentos arcoseanos, que deu origem aos depósitos de caulim desta formação. O intemperismo foi menos importante sobre os sedimentos da Formação Barreiras uma vez que estes mesmos minerais não as mesmas feições de corrosão.
- Baseado nas variedades de turmalina e zircão, e nos dados de paleocorrentes, admite-se que os sedimentos da Formação Ipixuna foram supridos preferencialmente de áreas que incluem as rochas do Escudo Brasil-Central e da Faixa Araguaia-Tocantins. Para os depósitos da Formação Barreiras os sedimentos foram fornecidos, preferencialmente, de áreas que envolvem as rochas do Cráton de

São Luís e da Faixa Gurupi. Coberturas sedimentares paleozóicas podem ter suprido os sedimentos reciclados.

- As mudanças de fontes sedimentares para as formações Ipixuna e Barreiras são claramente reforçadas pelos valores índice de RuZi, que possuem valores menores que 10 para os depósitos cretáceos e maiores que este valor para os sedimentos terciários. Este índice não demonstrou ser influenciado pelo intemperismo químico ou pelas diferenças granulometrias entre os depósitos.

- Os minerais pesados, além de funcionarem como excelentes traçadores de proveniência sedimentar, podem auxiliar na distinção e/ou correlação estratigráfica entre unidades sedimentares. Isto fica comprovado pelos resultados aqui alcançados através do estudo destes minerais contidos nas formações Ipixuna e Barreiras, aflorantes na borda leste da Sub-Bacia de Cametá (região de Ipixuna).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, F.A.M.; LESQUER, A. 1985. Considerações sobre o Pré-Cambriano da região sul-sudoeste do Cráton São Luís. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 2. Belém. Anais. SBG. V.1: 7-21.
- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y. 1984. *O Pré-Cambriano do Brasil*. São Paulo. Ed. Edgard Blücher, 378p.
- ANAISSE JR, J., 1999. *Fácies costeiras dos Depósitos Itapecuru (Cretáceo), região de Açailândia, Bacia do Grajaú*. Belém: Universidade Federal do Pará. 86p (Dissertação de Mestrado).
- ANAND, R.R.; GILKES, R.J. 1984. Weathering of the hornblende, plagioclase and chlorite in meta-diorite, Australia. *Geoderma*, 34: 261-280.
- AZEVEDO, R.P. 1991. *Tectonic evolution of Brazilian equatorial continental margin basins*. London: Imperial College, University of London. (Doctor of Philosophy Thesis).
- BASU, A.; MOLINAROLI, E. 1991. Reliability and application of detrital opaque Fe-Ti oxide minerals in provenance determination. In: A.C. MORTON; S.P. TOOD; P.D.W. HAUGHTON (ed.) *Developments in Sedimentary Provenance Studies*: 55-65 (Geological Society Special Publication. 57)
- BERNER, R.A. 1978. Rate control of mineral dissolution under earth surface conditions. *American Journal Science*, 218: 1235-1252.
- BERNER, R.A.; SCHOTT J. 1982. Mechanism of pyroxene and amphibole weathering. II. Observations of soil grains. *American Journal Science*, 282: 1214-1231.
- BRADLEY, R.S. 1999. *Paleoclimatology, reconstruction climates of the Quaternary*. Academic Press: 613p. (International Geophysics Series, 68).

- CAIRONI, V.; GARZANTI, E.; SCIUNNACH, D. 1996. Typology of detrital zircon as a key to unraveling provenance in rift siliciclastic sequences (Permo-Carboniferous of Spiti, N India). *Geodinamica Acta*, 9: 101-113.
- CAPUTO, M.V. 1984. Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basin of Brazil. Santa Barbara. University of California. 586p (Tese de Doutorado).
- CORDANI, U.G.; BRITO NEVES, B.B.; FUCK, R.A.; PORTO, R.; THOMAZ, F.A.; CUNHA, F.M. 1984. Estudo preliminar da integração do Pré-Cambriano com eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras. *Série Ciência-Técnica-Petróleo*. Seção Exploração de Petróleo, 15: 70p.
- COSTA, J.B.S.; BEMERGUY, R.L.; HASUI, Y.; BORGES, M.S.; FERREIRA JR., C.R.P.; BEZERRA, P.E.L.; FERNANDES, J.M.G.; COSTA, M.L. 1996. Neotectônica da região amazônica: aspectos estruturais, tectônicos, geomorfológicos e estratigráficos. *Geonomos-Revista de Geociências*, 4 (2): 23-44.
- COSTA, M.L. 1991. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências*, 21 (2): 146-160.
- COSTA, M.L.; HORBE, A.M.C.; MORAES, E.L. 1997. Laterização imatura sobreposta a lateritos maduros em Mãe do Rio, Pará. In.: COSTA, M.L. & ANGÉLICA, R.S. (eds.). *Contribuições à Geologia da Amazônia*. Belém, FINEP/SBG-NO: 339-347.
- DABARD, M.P.; LOI, A.; PEUCAT, J.J. 1996. Zircon typology combined with Sm-Nd whole-rock isotope analysis to study Brioverian sediments from the Armorican Massif. *Sedimentary Geology*, 101: 243-260.
- DIAS LIMA, R.; TRUCKENBRODT, W. 1997. Análise de minerais pesados de depósitos da Formação Itapecuru (Neocretáceo), Bacia de São Luís. Relatório Final de Bolsa de Iniciação Científica (PIBIC/UFPa). 50p.

- DIETZ, V. 1973. Experiments on the influence of transport on shape and roundness of heavy minerals. *Contributions to Sedimentology*, 1: 103-125.
- DILL, H.G. 1995. Heavy mineral response to the progradation of an alluvial fan: implications concerning unroofing of source area, chemical weathering and palaeo-relief, Upper Cretaceous Parkstein fan complex, SE Germany. *Sedimentary Geology*, 95: 39-56.
- EHRMAN, W.; POLOZEK, K. 1999. The heavy mineral record in the Pliocene to Quaternary sediments on the CIROS-2 drill core, McMurdo Sound, Antarctica. *Sedimentary Geology*, 128: 223-244.
- FLORES, R.M., SHIDELER, G.L. 1978. Factors controlling heavy mineral variations on the south Texas outer continental shelf. *Journal of Sedimentary Petrology*, 48: 269-280.
- FREISE, F.W. 1931. Untersuchung von mineralen auf abnutzbarkeit bei verfrachtung im Wasser. *Tschermaks Mineral. Petrogr. Mitt.* 41: 1-7.
- GALVÃO, M.V.G. 1991. *Evolução termomecânica da Bacia de Marajó, Estado do Pará, Brasil*. Minas Gerais: Universidade Federal de Ouro Preto. 193p. (Dissertação de Mestrado).
- GAUTIER, D.L. 1979. Preliminary report of authigenic, euhedral tourmaline crystals in a productive gas reservoir of the Tiger Ridge Field, north-central Montana. *Journal of Sedimentary Petrology*, 49: 911-916.
- GÓES, A.M. & ROSSETTI, D.F. 2001. Gênese da Bacia de Grajaú, Meio-Norte do Brasil. In: ROSSETTI, GÓES E TRUCKENBRODT (eds.) *O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú*. Belém, Museu Paraense Emílio Goeldi: 15-29 (Coleção F. Katzer).
- GRIGSBY, J.D. 1990. Chemical fingerprint of detrital ilmenite: a alternative in provenance research. *Journal of Sedimentary Petrology*, 62: 331-337.

- HASUI, Y.; HARALYL, N.L.; SCHOBENHAUS, C. 1984. Elementos geofísicos e geológicos da região amazônica: subsídios para o modelo geotectônico. In: SYMPOSIUM AMAZONICO, 2. Manaus. Anais. Brasília, DNPM, (1): 129-147.
- HASUI, Y.; COSTA, J.B.S 1990. O Cinturão Araguaia: um novo enfoque estrutural e estratigráfico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36, Natal. Anais. SBG. (6): 2535-2543.
- HENRY, D.J.; GUIDOTTI, C.V. 1985. Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine. *American Mineralogist*, 70: 1-15.
- HUANG, W.H.; KELLER, W.D. 1970. Dissolution of rock-forming silicate minerals in organic acids: simulated first-stage weathering of fresh mineral surfaces. *America Mineral*: 2076-2094.
- HUANG, W.H.; KELLER, W.D. 1972. Organic acids as agents of chemical weathering of silicate mineral. *Nature*, 239: 149-151.
- HUBERT, J.E. A zircon-tourmaline-rutile maturity index and the interdependence of the composition of heavy mineral assemblages with the cross composition and texture of sandstones. *Journal of Sedimentary Petrology*, 32 (3): 440-450.
- HURST, V.J.; BOSIO, N.J. 1975. Rio Capim Kaolin deposits, Brazil. *Economic Geology*, 70: 990-992.
- IGREJA, H.L.S. 1992. Aspectos tectono-sedimentares do Fanerozóico do nordeste do Estado do Pará e noroeste do Maranhão, Brasil. Belém: Universidade Federal do Pará. 192p. (Tese de Doutorado).
- KOMAR, P.D.; WANG, C. 1984. Processes of selective grain transport and the formation of placers on beach. *Journal of Geology*, 92: 637-655.
- KOMAR, P.D.; CLEMENS, K.E. 1986. The relationship between grain's settling velocity and threshold motion under unidirectional currents. *Journal of Sedimentary Petrology*, 56: 258-266.

- KOTSCHOUBEY, B.; DUARTE, A.L.S.; TRUCKENBRODT, W. 1999. Cobertura bauxítica e origem do caulim do Morro do Felipe, baixo Rio Jarí, Estado do Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, 29 (3): 331-338.
- KRYNINE, P.D. 1946. The tourmaline group in sediments. *The Journal of Geology*, 54: 65-87.
- LIHOU, J.C., MANGE-RAJETZKY, M.A. 1996. Provenance of the Sardona Flysch, eastern Swiss Alps: example of high-resolution heavy mineral analysis applied to an ultrastable assemblage. *Sedimentary Geology*, 105: 141-157.
- LEITE, A.S.; ROSSETTI, D.F. 1999. Análise de minerais pesados de depósitos cretáceos e terciários na borda norte da Bacia de Grajaú, Maranhão. Relatório Final de Bolsa de Iniciação Científica (MPEG/CNPq). 38p.
- LIMA, F.D.; ROSSETTI, D.F. 1997. Análise de minerais pesados de depósitos da Formação Itapecuru (Cretáceo Superior), Bacia de São Luís. Perfis CU-1, CU-2, CU-3, CU-4 e CU-5. Relatório Final de Bolsa de Iniciação Científica (PIBIC/UFGA). 50p.
- DIAS LIMA, R.; ROSSETTI, D.F. 2001. Análise faciológica e seqüencial de depósitos de delta de baía (Neocretáceo), leste da Bacia de Grajaú, MA. In: ROSSETTI, GÓES E TRUCKENBRODT (eds.) *O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú*. Belém, Museu Paraense Emílio Goeldi: 151-174 (Coleção F. Katzer).
- LOI, A.; DABARD, M.P. 1997. Zircon typology and geochemistry in the palaeogeographic reconstruction of the Late Ordovician of Sardinia (Italy). *Sedimentary Geology*, 112: 263-279.
- MANGE, M.A.; MAURER, H.F.W. 1992. *Heavy mineral in colour*. Chapman & Hall. 147p.
- MORTON, A.C. 1985. Heavy minerals in provenance studies. In: G.G.ZUFFA (ed.). *Provenance of Arenites*: 249-277.

- MORTON, A.C. 1991. Geochemical studies of detrital heavy minerals and their application to provenance research. In: A.C.MORTON; S.P. TODD; P.D.W.HAUGHTON (eds.). *Developments in Sedimentary Provenance Studies*. (Geological Society Special Publication, 57): 31-45.
- MORTON, A.C.; HALLSWORTH, C. 1994. Identifying provenience-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology*, 90: 241-256.
- MORTON, A.C.; HALLSWORTH, C. 1999. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology*, 124: 3-29.
- NAHON, D.B.; COLIN, F. 1982. Chemical weatering of orthopyroxenes under lateritic conditions. *American Journal Science*, 282: 1213-1243.
- PASSOS, E.; BIGARELLA, J.J. 1998. Superfícies de erosão. In: S.B. CUNHA E A.J.T. GUERRA (eds.), *Geomorfologia do Brasil*. Bertrandt Brasil: 107-141.
- PERREIRA, R.M. 2001. *Caracterização geocronológica, geoquímica, geofísica e metalogênica de alguns plutons graníticos da região do médio Rio Paraíba do Sul e alto Rio Grande, segmento central da Faixa Ribeira*. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto de Geociências. 214p. (Tese de Doutorado).
- PETERSON, C.D.; KOMAR, P.D.; SCHNEIDEGGER, K.F. 1986. Distribution, geometry and origin of heavy mineral placer deposits on Oregon beach. *Journal of Sedimentary Petrology*, 56: 67-77.
- PUPIN, J.P. 1976. *Signification des caractères morphologiques du zircon commun des roches en pétrologie: base de la méthode typologique. Applications*. Université de Nice. Laboratoire de Pétrologie-Minéralogie. 394p. (These de Doctorat).

- PUPIN, J.P. 1980. Zircon and granite petrology. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 73: 207-220.
- PUPIN, J.P. 1985. Magmatic zoning of Hercynian granitoids in France based on zircon typology. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 65: 29-56.
- REASIDE, J.D. 1959. Stability of index minerals in soils with particular reference to quartz, zircon and garnet. *Journal of Sedimentary Petrology*, 29: 493-509.
- ROSSETTI, D.F. 1999. Soft-sediment deformational structures in late Albian to Cenomanian deposits, São Luís Basin, northern Brazil: evidences for paleosismicity. *Sementology*, 46: 1065-1081.
- ROSSETTI, D.F. 2000. Influence of low amplitude/high frequency relative sea-level changes in a wave-dominated estuary (Miocene), São Luís Basin, northern Brazil. *Sedimentary Geology*, 133: 295-324.
- ROSSETTI, D.F. 2001. Late Cenozoic sedimentary evolution in northeastern Para, Brazil, within the context of sea level changes. *Journal of South American Earth Sciences*, 14: 77-89.
- ROSSETTI, D.F., & TRUCKENBRODT, W. 1997. Revisão estratigráfica para os depósitos do albian-terciário inferior (?) na Bacia de São Luís (MA). *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra*, 9: 29-41.
- ROSSETTI, D.F.; GÓES, A.M.; TRUCKENBRODT, W. 1989. Estudo paleoambiental e estratigráfico dos sedimentos Barreiras e Pós-Barreiras na região Bragantina, nordeste do Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra* 1: 25-74.
- ROSSETTI, D.F.; GÓES, A.M.; TRUCKENBRODT, W., 1990. A influência marinha nos sedimentos Barreiras. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra*, 2: 17-29.

- SALLENGER, A.H.Jr. 1979. Inverse grading and hydraulic equivalence in grain flow deposits. *Journal of Sedimentary Petrology*, 49: 553-562.
- SANTOS JR., A.E. (2002). *Reconstrução paleoambiental e estratigráfica de depósitos cretáceos e terciários expostos na borda sudeste da sub-bacia de Cametá, norte no Brasil*. Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. (Dissertação de Mestrado).
- SCHÄFER, J.; DÖRR, W. 1997. Heavy mineral analysis and typology of detrital zircons: a new approach to provenance study (Saxothuringian Flysch, Germany). *Journal of Sedimentary Research*, 67(3): 451-461.
- SCHALLER, H.; VASCONCELOS, D.N.; CASTRO, J.C. 1971. Estratigrafia preliminar da Bacia Sedimentar da Foz do Rio Amazonas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25. V.3: 189-202.
- SCHOTT, J; BERNER, R.A.; SJÖBERG, E.L. 1981. Mechanism of pyroxene and amphibole weathering, I: experimental studies of iron-free minerals. *Geochemical Cosmochemical Acta*. 45: 2123-2135.
- SLINGERLAND, R.L. 1977. The effect of entrainment on the hydraulic equivalence relationships of light and heavy minerals in sands. *Journal of Sedimentary Petrology*. 47: 753-770.
- SOUSA, D.J.L. 2000. *Caracterização geológica, mineralógica, química e física do caulim da mina da RCC - Rio Capim Caulim (PA)*. Belém: Universidade Federal do Pará. 116p. (Dissertação de Mestrado).
- SPEER, J.A. 1980. Zircon. In: P.H. RIBBE (ed.). *Orthosilicates*. Washington DC: Miner. Soc. Am. 67-112 (Reviews in mineralogy, 5).

- TAYLOR, K.C; ALLEY, R.B; DOYLE, G.A.; GROOTES, P.M.; MAYEWSKI, P.A; LAMOREY, G.W.; WHITE, J.W.C; BARLOW, L.K. 1993. The 'flickering switch' of Late Pleistocene climate change. *Nature*, 361: 432-436.
- THIEL, G.A. 1940. The relative resistance to abrasion of mineral grains of sand size. *Journal Sedimentary Petrology*, 10: 103-124.
- THIEL, G.A. 1945. Mechanical affects of stream transportation in mineral grains of sand size. *Bulletin of Geological Society American*, 56: 1207.
- VAUGHN BARRIE, J.; EMORY-MOOR, M. 1994. Development of marine placers, northeastern Queen Charlotte Islands, British Columbia, Canada. *Marine Georesources and Geotecnology*, 12: 143-158.
- VELBEL, M.A. 1984. Natural weathering mechanism of almandine garnet. *Geology*, 12: 631-634.
- VILLEGAS, J.M. 1994. *Geologia estrutural da Bacia de Marajó*. Belém: Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências. 119p. (Dissertação de Mestrado).
- WILSON, M.J. 1975. Chemical weathering of some primary rock-forming minerals. *Soil Science*, 119: 349-355.