

## ESTUDO MINERALÓGICO DOS ARENITOS DAS FORMAÇÕES PIRAMBÓIA E BOTUCATU NO CENTRO-LESTE DO ESTADO DE SÃO PAULO

Fu-Tai WU  
Maria Rita CAETANO-CHANG

### RESUMO

O estudo dos minerais leves e pesados dos arenitos das formações Pirambóia e Botucatu permitiu a identificação de associações mineralógicas, além de contribuir para a caracterização genética e para o conhecimento das áreas-fontes destas unidades.

Os subarcóseos da Formação Pirambóia são submaturos a maturos, enquanto a Formação Botucatu apresenta quartzo-arenitos e subarcóseos maturos a supermaturos. Duas províncias mineralógicas foram identificadas: a província A ocorre predominantemente na Formação Pirambóia e a província B na Formação Botucatu. Durante o transporte e deposição desses arenitos, os minerais sofreram fortemente a ação abrasiva eólica, eliminando os minerais de baixa dureza. Por sua vez, as condições eólicas de clima árido então vigentes propiciaram a preservação de minerais metaestáveis, pouco resistentes ao ataque químico, porém altamente resistentes à abrasão mecânica, como a estauroлита. Nestas condições os minerais não sofreram forte atuação de intemperismo químico na área-fonte e no sítio deposicional.

Os sedimentos dessas formações nas porções central e sudoeste da área foram derivados predominantemente de rochas cristalinas e parcialmente de rochas sedimentares preexistentes; os da porção nordeste, predominantemente de rochas sedimentares preexistentes e parcialmente de rochas cristalinas. Ao tempo da deposição da Formação Botucatu, teve lugar um vulcanismo básico na área-fonte, propiciando o fornecimento de magnetita e ilmenita angulares e eúédricas. As características texturais e composicionais dos minerais leves e pesados dos arenitos das formações estudadas permitem concluir que foram transportados e depositados sobretudo em condições eólicas.

### ABSTRACT

The sandstones of the Pirambóia Formation are submature to mature subarkoses and those of the Botucatu Formation are mature to supermature subarkoses and quartzarenites. The mineralogical provinces of these formations are two: the A province occurs predominantly in the Pirambóia Formation and the B province in the Botucatu Formation. These two provinces interdigitate. During the transportation and deposition of these sandstones, the minerals strongly suffered lengthy eolian abrasion and selective sorting, and were later modified by diagenesis and weathering. The sediments of these formations in the central and southwest parts of the studied area were chiefly derived from crystalline rocks, and partially from pre-existing sediments; those in the northeast part were chiefly derived from pre-existing sediments and partially from crystalline rocks. In the depositional period of the Botucatu Formation, a basic volcanism took place in the source area and supplied mostly angular, euhedral magnetite and ilmenite. The textural and compositional characteristics of the minerals from both units indicate that these sediments were primarily transported and deposited in eolian environments.

### 1 INTRODUÇÃO

Diversos trabalhos de cunho estratigráfico e sedimentológico têm sido feitos na faixa de afloramentos das formações Pirambóia e Botucatu no Estado de São Paulo. Estudos sobre a mineralogia desses arenitos, contudo, têm sido raros: CARVALHO (1954) analisou a petrografia e a origem da Formação Botucatu, coletando dados ao longo das rodovias Botucatu-Conchas e Piraju-Fartura; PARAGUASSU (1968) estudou a sedimentologia (texturas e estruturas) e os

processos de silicificação da Formação Botucatu na região de São Carlos; WU & SOARES (1974) desenvolveram um estudo nas formações Pirambóia e Botucatu que mostrou que as associações de minerais pesados, bem como as áreas-fontes destas formações são variáveis e WU (1981) estudou a composição mineralógica das seqüências arenosas paleozóicas e mesozóicas no Centro-Leste do Estado de São Paulo.

No presente trabalho foram estudados os minerais leves e pesados encontrados nos arenitos

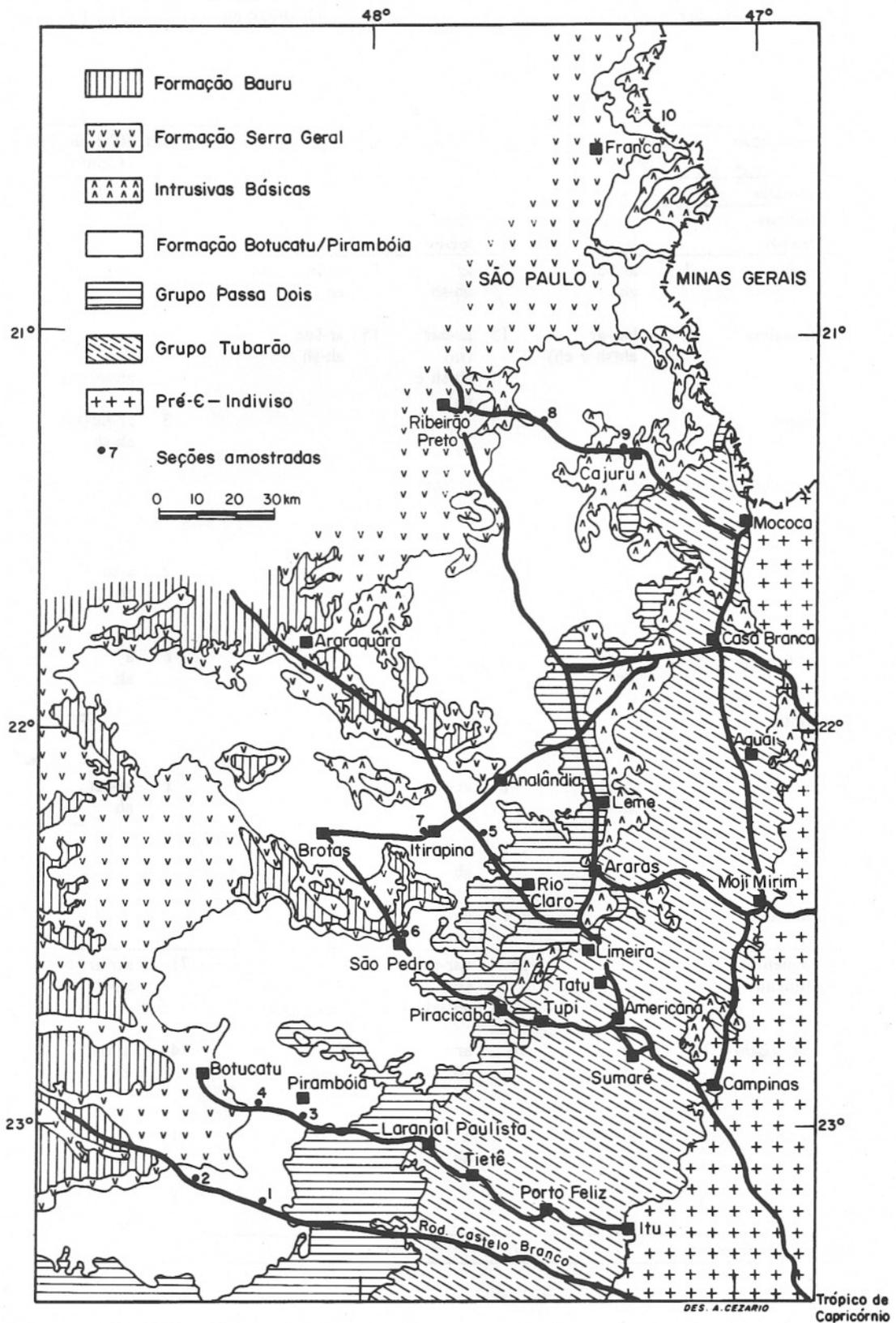


FIGURA 1 — Mapa geológico simplificado do Centro-Leste do Estado de São Paulo, mostrando a localização das amostras.

TABELA 1 — Composição percentual, arredondamento e hábito cristalino dos minerais pesados da Formação Pirambóia (t = traço; \* = ilmenita dominante; a = angular; sa = subangular; sar = subarredondado; ar = arredondado; bar = bem arredondado; ah = anédrico; sh = subédrico; eh = euédrico; (...)) = subordinado).

Localização	Rod. Castelo Branco		Rod. Mal. Rondon		Rod. Washington Luiz		Rod. Ribeirão Preto Cajuru	
Amostras	1		3		5		9	
Minerais Pesados	%	Arred. e hábito	%	Arred. e hábito	%	Arred. e hábito	%	Arred. e hábito
Zircão	2	ar-bar ah	2	ar ah-sh	1	ar-bar ah	11	ar-bar (sar) ah(sh)
Turmalina	10	bar-ar ah(sh e eh)	15	ar-bar (sa) ah(sh e eh)	15	ar-bar ah-sh	4	sar-ar (bar) ah-sh(eh)
Rutilo							3	ar-sar(sa) ah-sh
Granada	41	ar-bar (sa) ah	5	ar-bar ah				
N Ã O Estaurolita	18	a-sa (ar) ah(sh)	34	a-sa (ar) ah-sh	30	sar-ar (bar) ah-sh	2	a-sa ah
O P A C O S Moscovita	t	ar-bar ah	2	bar-ar ah	2	ar-bar ah	t	a ah
Cianita			t	sa-sar ah	t	sa sh		
Epídoto	2	ar-bar ah	8	ar-sar ah			t	sa-sar ah
Biotita			t	ar ah	t	ar ah		
Sillimanita			t	a ah	t	a ah		
Magnetita e Ilmenita	20*	sar-a sh-ah(eh)	25	bar-ar (sa) ah (eh)	29	ar-bar (a) ah-sh (eh)	71	sar-ar (bar) ah-sh
O P A C O S Leucoxênio	7	ar ah	6	ar ah	6	ar-bar (sa) ah	4	ar-bar ah
Hematita	t	a ah	3	a ah	16	a-sa ah	1	sa ah
Limonita	t	a ah					4	sa ah
índice ZTR (%)	16,4		26,5		34,8		90,0	

TABELA 2 — Composição mineralógica e características texturais dos arenitos das formações Pirambóia e Botucatu (mf = muito fino; f = fino; me = médio; g = grosso; m = má; r = regular; b = boa; a = angular; sa = subangular; sar = subarredondado; ar = arredondado; bar = bem arredondado; im = imaturo; sm = submaturo; ma = maturo; spm = supermaturo; s = sílex; o = outros; — = não encontrado; tr = traço; arg = argila; fe = óxido-hidróxido de ferro).

Localização	Amostras	Tamanhos dos grãos	Seleção	Arredondamento	Maturidade textual	Composição mineralógica						Maturidade mineralógica %	Nome das rochas	Formação	
						Quartzo	Feldspato	Fragmentos de Rochas S O		Mica	Matriz				Cimento
Rod. Castelo Branco	1	mf-g	r-m	a-sar	im-sm	85	15	-	-	-	6	arg	85	Subarcóseo	P I R A M B Ó I A
Rod. Marechal Rondon	3	f-g	r-b	sar-ar	sm-ma	93	7	-	-	tr	5	fe-arg	93	Subarcóseo	
Rod. Washington Luiz	5	mf-g	r	sa-sar	sm	92	5	2	-	1	5	fe-arg	94	Subarcóseo	
Rod. Ribeirão Preto-Cajuru	9	mf-me	r-b	sa-ar	sm-ma	88	11	tr	-	1	4	fe-arg	88	Subarcóseo	
Rod. Marechal Rondon	4	mf-me	b	ar-bar	ma-spm	96	4	tr	-	tr	tr	fe-arg	96	Quartzoarenito	B O T U C A T U
Serra de São Pedro	6	me-g mf-f	r	ar-bar sa-ar	sm-ma	93	7	tr	-	tr	tr	fe-arg	93	Subarcóseo	
Analândia/Itirapina/Brotas	7	me-g mf-f	r	ar-bar sar-ar	sm-ma	97	3	tr	-	-	tr	fe-arg	97	Quartzoarenito	
Rod. Ribeirão Preto-Cajuru	8	f-mf me-g	r-b	ar-bar	ma-spm	99	tr	tr	-	tr	tr	fe-arg	99	Quartzoarenito	
Serra de Franca	10	mf-g	r	sar-ar	sm	94	5	tr	-	1	tr	arg	94	Subarcóseo	

TABELA 3 — Composição percentual, arredondamento e hábito cristalino dos minerais pesados da Formação Botucatu (Abreviação conforme Tabela 1).

Localização	Rod. Castelo Branco		Rod. Mal. Rondon		Serra de São Pedro		Analândia-Brota		Rod. Ribeirão Preto-Cajuru		Serra de Franca	
Amostras	2		4		6		7		8		10	
Minerais Pesados	%	Arred. e hábito	%	Arred. e hábito	%	Arred. e hábito	%	Arred. e hábito	%	Arred. e hábito	%	Arred. e hábito
Zircão	1	bar-ar ah	t	ar sh			2	ar-bar ah	4	ar-bar (sar) ah (sh)	2	ar-bar ar (sh)
Turmalina	2	bar (ar) ah (sh)	14	bar-ar (sa)  ah (sh)	6	ar-bar ah-sh	28	ar-bar ah-sh	5	bar-ar ah (sh)	23	bar-ar ah-sh (eh)
Rutilo							t	a eh				
Granada			2	a-sa ah			3	a-sa ah-sh			t	ar ah
Estaurolita	2	a(sar) ah (sh)	23	a(ar-sar) ah	3	ar-sa ah	27	ar-sa ah-sh	t	a ah	5	a-sa ah (sh)
Moscovita			2	ar-sar ah							t	ar-bar ah
Cianita	t	a-sa ah	t	a ah							t	sa sh-ah
Epídoto			t	sa-sar ah								
Biotita			2	ar-sa ah								
Sillimanita			t	a ah							t	sa sh
Magnetita e Ilmenita	87	sa-sar e ar-bar eh-sh e ah	44	ar-bar (a-sa) ah-eh	56	a-ar eh-ah	25*	ar-bar ah(eh)	84	sa-sar (bar) sh-eh(ab)	63	ar-bar(sa) ah(sh)
Leucoxênio	2	ar ah	5	ar ah	4	ar ah	15	ar-bar ah	3	ar-sa ah	2	ar ah
Hematita	6	ar ah	3	a ah	5	a ah					1	a ah
Limonita			5	a-sa ah	26	a-sa ah			3	sa ah	3	ar-bar ah
índice ZTR (%)	60,0		34,2		66,6		50,0		98,9		83,3	

das formações Pirambóia e Botucatu, no Centro-Leste do Estado de São Paulo. A Figura 1 mostra o mapa geológico simplificado com a localização das amostras. O objetivo de tal estudo foi determinar as associações dos minerais desses arenitos, auxiliando na caracterização genética das unidades e no conhecimento das respectivas áreas-fontes.

## 2 ANÁLISE MINERALÓGICA DA FORMAÇÃO PIRAMBÓIA

### 2.1 Minerais pesados

Os minerais pesados encontrados na Formação Pirambóia são: zircão, turmalina, rutilo, granada, estaurolita, moscovita, cianita, epidoto, biotita, sillimanita, magnetita e ilmenita, hematita e limonita. A Tabela 1 mostra o conteúdo percentual em minerais pesados, o arredondamento, o hábito cristalino e o índice ZTR desses minerais nos arenitos desta formação. A escala nominativa de abundância de minerais, utilizada neste trabalho, resulta de modificação da proposição de WU (1981): ultrapredominante (40-80%), predominante (20-40%), muito abundante (10-20%), abundante (5-10%), muito freqüente (3-5%), freqüente (2-3%), escasso (1-2%) e traço (< 1%).

A suíte de minerais pesados dos arenitos desta formação mostrou variações em sua distribuição na área de estudo. Os minerais ultra-estáveis, como zircão e turmalina, são predominantemente arredondados a bem arredondados, com distribuição similar em toda unidade, sendo o zircão escasso e a turmalina muito abundante, exceto no extremo-nordeste da área (amostra 9), onde a presença de zircão é marcadamente mais elevada (muito abundante) e a turmalina muito freqüente, ocorrendo também rutilo (freqüente). Os minerais metaestáveis não opacos, como estaurolita, granada, moscovita e epidoto, são angulares a bem arredondados e ocorrem com maior freqüência (ultrapredominante a predominante) nas porções centro e sudoeste da área estudada, onde sillimanita, instável e angular, também está presente. Destes minerais, o que se encontra melhor representado em toda a área é a estaurolita (predominante a freqüente). Os minerais opacos, como magnetita e ilmenita, leucóxênio, hematita e limonita, são angulares a bem arredondados. O conteúdo de magnetita e ilmenita aumenta de sudoeste para nordeste (predominante para ultrapredominante) e de leucóxênio diminui (abundante para muito freqüente). A quantidade relativa de hematita decresce da porção central para nordeste e sudoeste (muito abundante para traço), enquanto a limonita se concentra na porção nordeste (muito freqüente).

### 2.2 Minerais leves

Os componentes principais dos arenitos da Formação Pirambóia são quartzo, feldspato, fragmentos das rochas, cimento e matriz. Seu tamanho médio, arredondamento, grau de seleção, maturidade e nome das rochas são apresentados na Tabela 2. Segundo a classificação de FOLK (1968), os arenitos da Formação Pirambóia são subarcóseos. Os componentes minerais leves são descritos abaixo.

*Quartzo* — Ultrapredominante componente mineralógico dos arenitos; muitas vezes apresenta sinais de recrescimento de sílica cristalina precipitada com a mesma orientação ótica do mineral; foi classificado em três variedades principais: quartzo comum, quartzo metamórfico e quartzo retrabalhado.

*Feldspato* — Constituinte muito freqüente a abundante, com tamanho menor que o do quartzo; consiste geralmente de ortoclásio, microclínio e plagioclásios alcalinos, intemperizados parcialmente e alterados a caulinita e/ou illita.

*Fragmentos de rochas* — Partículas finas a médias, bem arredondadas, principalmente de sílex; suas quantidades são traço a escasso.

*Mica* — Principalmente moscovita, em quantidade menor que 1%.

*Cimento* — Consiste de óxido-hidróxido de ferro e argila autigênica (muito freqüente) na superfície dos grãos de arcabouço e parcialmente nos vazios entre os grãos.

*Matriz* — Encontra-se apenas traço de matriz síltica original, sendo a matriz secundária de argilas infiltradas na superfície dos grãos e nos vazios entre grãos muito freqüente.

## 3 ANÁLISE MINERALÓGICA DA FORMAÇÃO BOTUCATU

### 3.1 Minerais pesados

Os minerais pesados encontrados na Formação Botucatu são os mesmos da Formação Pirambóia. A Tabela 3 apresenta o conteúdo percentual em minerais pesados, o arredondamento, o hábito cristalino e o índice ZTR dos minerais nesses arenitos.

A suíte dos minerais pesados da Formação Botucatu mostrou variações em sua distribuição na área de estudos. Os minerais ultra-estáveis, como zircão e turmalina, são bem arredondados e arredondados. As turmalinas apresentam freqüências variáveis, altas a baixas (predominante a freqüente), em toda área estudada; o zircão se distribui por toda área em pequenas quantidades (escasso a muito freqüente). Os minerais

metaestáveis não-opacos, como estaurolita, grana, moscovita, cianita e sillimanita, são angulares a arredondados. A estaurolita é encontrada em toda área estudada em frequências variáveis de predominante a traço, enquanto os demais minerais têm ocorrência acidental. Os minerais opacos, como magnetita e ilmenita, leucoxênio, hematita e limonita, são angulares a bem arredondados. As frequências de magnetita e ilmenita são bem elevadas em toda área, variando de ultrapredominante a predominante. A quantidade de leucoxênio é escassa a muito freqüente na maioria das regiões, enquanto a hematita e a limonita são acidentais.

### 3.2 Minerais leves

As características texturais e mineralógicas dos arenitos da Formação Botucatu, obtidas a partir da análise petrográfica, estão resumidas na Tabela 2. As principais são: a) as características dos grãos minerais de quartzo, feldspato e fragmentos de rocha são semelhantes às dos arenitos da Formação Pirambóia; b) em geral, a distribuição granulométrica dos arenitos é bimodal, com modas nas frações de areia média a grossa e muito fina a fina; c) os grãos são predominantemente arredondados a bem arredondados na fração grossa e subangulares a arredondados na fração fina; d) o feldspato é um componente traço a muito freqüente, ocorrendo em menor quantidade que nos arenitos da Formação Pirambóia; e) o cimento consiste de traço de óxido-hidróxido de ferro e poucas argilas autigênicas nas superfícies dos grãos; f) ocorrem apenas traços de matriz secundária de argilas infiltradas.

Segundo a classificação de FOLK (1968), os arenitos da Formação Botucatu são predominantemente quartzo-arenitos e subordinadamente subarcóseos.

## 4 PROVÍNCIAS MINERALÓGICAS

Província mineralógica ou petrológica sedimentar é definida como um conjunto de sedimentos que constitui uma unidade natural em termos de idade, origem e distribuição (EDELMAN, 1933), sendo caracterizada por associação mineralógica distintiva.

Os resultados obtidos da análise mineralógica foram colocados em um diagrama ternário, em cujos vértices estão representados os minerais pesados: a) ultra-estáveis, b) opacos e c) metaestáveis e instáveis. Estes três grupos minerais foram escolhidos por possuírem as maiores frequências e serem bons indicadores de proveniência.

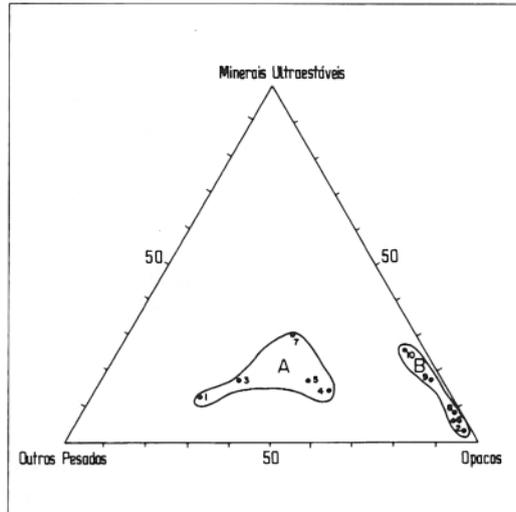


FIGURA 2 — Diagrama triangular delimitando a distribuição das províncias mineralógicas das formações Pirambóia e Botucatu em função da percentagem de minerais pesados ultra-estáveis, opacos e outros.

Com base nos dados das Tabelas 1 e 3 foi montada a Figura 2, onde cada ponto representa uma amostra definida pelas três variáveis consideradas, estabelecendo, desse modo, pela posição no diagrama, as províncias mineralógicas (A e B) das formações estudadas. A Figura 3 mostra o comportamento e distribuição lateral dessas províncias numa seção SW-NE da área estudada.

A província A (Figs. 2 e 3) apresenta uma assembléia composta de minerais metaestáveis, opacos e secundariamente ultra-estáveis. Diferencia-se pela alta a moderada percentagem de minerais metaestáveis, como estaurolita, grana, epídoto e mica. A estaurolita, subangular a arredondada, ocorre em porcentagens variando entre 18 e 34%; os grãos de grana, epídoto e mica, subangulares a bem arredondados, ocorrem em concentrações variáveis. Esta província apresenta de 9 a 15 espécies minerais e está distribuída na porção centro-sudoeste da área estudada.

A província B (Figs. 2 e 3) contém predominantemente minerais opacos e secundariamente minerais ultra-estáveis e metaestáveis. Caracteriza-se pela alta percentagem de minerais opacos como magnetita e ilmenita e subordinadamente leucoxênio, hematita e limonita. Os grãos de magnetita e ilmenita são bem arredondados a arredondados, subangulares e angulares e hábito cristalino anédrico, subédrico e euédrico, respectivamente. Esta província apresenta número de espécies minerais menor que a província A, em torno de 7 a 13, e se distribui por toda a área estudada.

### 5 MATURIDADE DOS ARENITOS

A maturidade pode ser expressa tanto em termos mineralógicos como em termos texturais. O índice de maturidade mineralógica pode ser representado pela proporção combinada de quartzo, sílex e metaquartzito (HUBERT, 1962). WU (1981) propôs quatro estágios de maturidade mineralógica: imaturo (índices < 75%); submaturo (índices entre 75 e 85%); maturo (índices entre 85 e 95%) e supermaturo (índices > 95%).

Os índices de maturidade mineralógica nos arenitos das formações Pirambóia e Botucatu estão entre 85% e 94% nos subarcóseos e acima de 96% nos quartzo-arenitos (Tab. 2).

A maturidade textural, segundo FOLK (1968), é subdividida em quatro estágios (imaturo, submaturo, maturo e supermaturo), com base no conteúdo em argila, seleção e arredondamento das areias.

Os subarcóseos da Formação Pirambóia são principalmente de granulometria muito fina a média, subangulares a arredondados, contendo argila infiltrada, ferruginosos, com grau de seleção predominantemente regular e texturalmente submaturos a maturos (Tab. 2).

Os quartzo-arenitos e subarcóseos da Formação Botucatu são predominantemente finos a médios, com pouca argila infiltrada, ferruginosos, arredondados a bem arredondados, com grau de seleção bom a muito bom e maturidade textural variando de maturo e supermaturo (Tab. 2).

As características de maturidade mineralógica e textural dos subarcóseos da Formação Pirambóia e dos quartzo-arenitos e subarcóseos da Formação Botucatu indicam que os materiais destes arenitos são derivados de áreas de relevo pouco acentuado, com transporte relativamente prolongado e fortemente retrabalhados.

Com relação à maturidade definida pelos minerais pesados transparentes não micáceos, o ín-

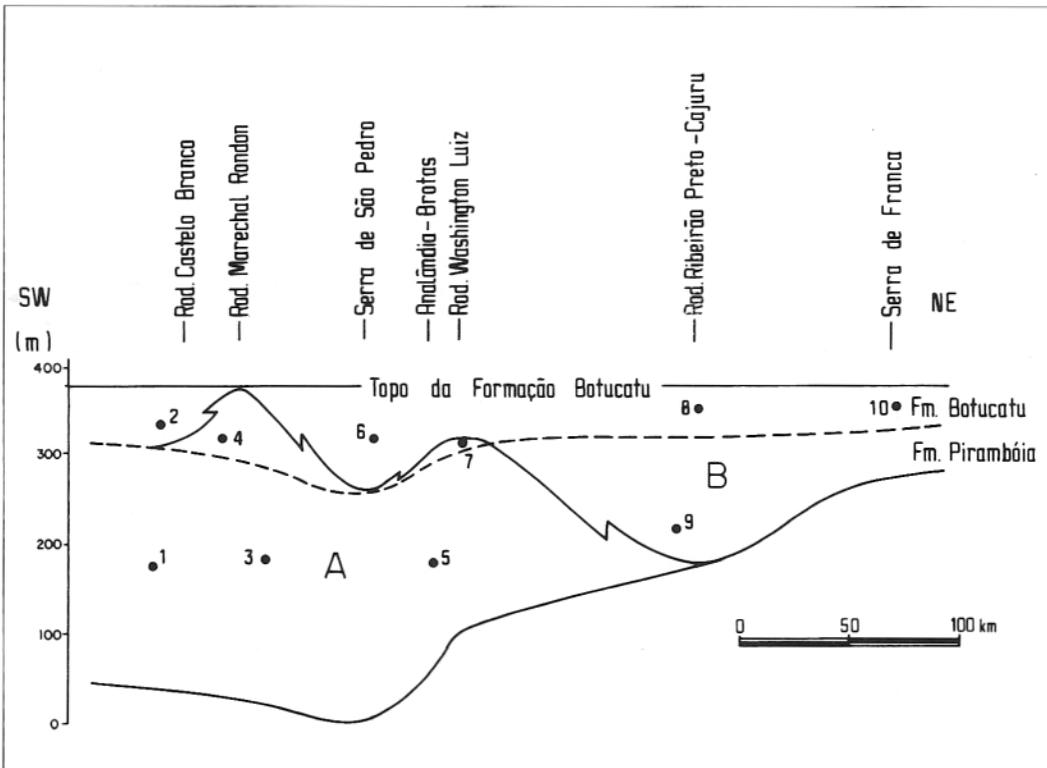


FIGURA 3 — Diagrama mostrando as relações entre as províncias A e B nas formações Pirambóia e Botucatu.

dice ZTR, referente à porcentagem combinada de zircão, turmalina e rutilo, foi proposto por HUBERT (1962) como índice do grau de modificação de toda a assembléia dos minerais pesados de arenitos.

Nos subarcóseos e quartzo-arenitos das formações Pirambóia e Botucatu, os índices ZTR

são muito baixos, com valores menores do que 66,6% em quase toda a área, e com valores maiores que 83,3% na porção nordeste (Tabs. 1 e 3). Os valores baixos não se correlacionam com as composições de minerais leves e texturas dos arenitos e, por outro lado, os valores altos mostram boa correlação. Isto sugere que os

materiais destes arenitos nas porções central e sudoeste da área foram predominantemente derivados das rochas cristalinas, enquanto os materiais na porção nordeste, mais próxima à borda da bacia, derivaram predominantemente de rochas sedimentares preexistentes. Todos os materiais destes arenitos foram fortemente trabalhados por abrasão seletiva em clima semi-árido e árido de ambiente desértico.

## 6 MINERAIS E ROCHAS-FONTES

Os minerais leves (incluindo fragmentos de rochas) e principalmente os minerais pesados têm sido usados como guias no estudo de proveniência.

Os minerais pesados ultra-estáveis arredondados, como zircão e turmalina, podem não ser diretamente oriundos de rochas sedimentares preexistentes, mas de rochas metamórficas (WU, 1982).

Os minerais leves dos subarcóseos e quartzo-arenitos das formações Pirambóia e Botucatu são caracterizados por moderada a baixa porcentagem de feldspatos, raros fragmentos de sílex e micas. Os grãos são predominantemente subangulares a arredondados na Formação Pirambóia e arredondados a bem arredondados na Formação Botucatu. As assembléias de minerais pesados são divididas em duas províncias que se interdigitam entre as duas formações (Fig. 3). A província A é caracterizada pela alta porcentagem de minerais metaestáveis, angulares e arredondados, como estauroilita, granada, epidoto e mica, ocorrendo sobretudo na Formação Pirambóia. Os minerais opacos e ultra-estáveis da província A são predominantemente arredondados a bem arredondados. A província B é caracterizada pela alta porcentagem de minerais opacos como magnetita e ilmenita, leucocênio, hematita e limonita, ocorrendo principalmente na Formação Botucatu. Os minerais ultra-estáveis da província B são predominantemente arredondados a bem arredondados e os opacos são subangulares a subarredondados. Os índices ZTR são baixos nas porções central e sudoeste da área e altos na porção nordeste, próxima à borda da bacia. Com base nessas características, os materiais dos arenitos das formações Pirambóia e Botucatu, das porções central e sudoeste da área, devem ter sido derivados sobretudo de rochas cristalinas e parcialmente de rochas sedimentares preexistentes e os da porção nordeste, predominantemente de rochas sedimentares preexistentes e parcialmente de rochas cristalinas. Embora os opacos, magnetita e ilmenita, tenham arredondamento similar nas duas unidades, os grãos minerais são preferencialmente euédricos na Formação Botucatu, diferentemente da

Formação Pirambóia. Este fato, associado às porcentagens elevadas desses minerais na Formação Botucatu, indica a contribuição do magmatismo jurocretáceo na deposição da unidade.

## 7 FATORES GOVERNANDO A OCORRÊNCIA DE MINERAIS

### 7.1 Abrasão seletiva

A intensidade de abrasão seletiva é largamente dependente dos meios de transporte e tamanho dos grãos. Os grãos maiores como seixos e areias grossas, transportados por quaisquer meios, mostram mudanças composicionais. As areias transportadas prolongadamente por águas correntes apresentam nenhuma ou poucas mudanças mineralógicas (RUSSEL, 1939; LANDIM *et al.*, 1983) e as transportadas pelo vento mostram grandes mudanças (FOLK, 1968).

Durante o transporte e deposição das formações Pirambóia e Botucatu, as partículas destes arenitos sofreram fortemente a ação abrasiva eólica, de tal sorte que os minerais de baixa dureza foram eliminados, permanecendo somente os minerais mais duros, como quartzo, microclínio, turmalina, estauroilita, magnetita e ilmenita, granada, epidoto e zircão.

A presença de estauroilita em todas as amostras analisadas, tanto da Formação Pirambóia, quanto da Formação Botucatu, é altamente significativa, tendo sido igualmente detectada em outros trabalhos (PARAGUASSU, 1968; WU & SOARES, 1974). Trata-se de um mineral de alta resistência à abrasão mecânica, porém de baixa resistência ao ataque químico, de tal sorte que não poderia ser preservado em sedimentos fluviais de climas amenos, à exceção de depósitos de rios temporários, em ambiente desértico.

### 7.2 Seleção hidráulica

Os minerais pesados transparentes não-micáceos compõem uma suíte hidráulica regularmente homogênea na fração de areia muito fina (HUBERT, 1971). Fatores pouco conhecidos afetam a ocorrência dos minerais pesados de densidade alta como zircão, magnetita e ilmenita, que se concentram na fração 0,062 a 0,125mm (RITTENHOUSE, 1943). Por esta razão, na fração muito fina de arenitos depositados em regime hidráulico, os grãos destes minerais são geralmente mais abundantes que de outros minerais pesados. WU (1982) constatou esse fato em arenitos do Subgrupo Itararé e Formação Aquidauana. No entanto, no caso das formações Pirambóia e Botucatu, o zircão ocorre em proporções menores que outros minerais pesados, tais como estauroilita e turmalinas, na fração de areias muito finas. Tal fato está provavelmente

relacionado ao meio de transporte eólico, responsável pelo transporte e deposição desses sedimentos.

### 7.3 Intemperismo

O intemperismo na área-fonte e no ambiente eogenético pode modificar consideravelmente a composição mineralógica de um sedimento. Sua influência depende das condições climáticas da área-fonte e do sítio deposicional.

Os sedimentos das formações Pirambóia e Botucatu foram derivados predominantemente de rochas do embasamento cristalino e rochas sedimentares preexistentes e depositados em bacia estável, em clima semi-árido a árido. Nestas condições climáticas, os materiais destes sedimentos não sofreram grande atuação de intemperismo químico. Os grãos dos arenitos dessas formações são comumente envolvidos por uma fina película de óxido-hidróxidos de ferro e argila, precipitados de águas capilares e infiltração por águas meteóricas, que dão a estes arenitos a coloração marrom-avermelhada.

Outro fator que não pode ser negligenciado é a atuação do intemperismo atual sobre os sedimentos aflorantes aqui estudados. Nesse sentido, a origem das películas de óxido-hidróxido de ferro e argila tanto pode ter sido em ambiente eogenético quanto em ambiente telogenético.

Embora a qualificação e a quantificação do fenômeno telogenético não seja simples, algumas características diagnosticadas podem servir de referencial nesta análise. Os grãos de feldspatos presentes estão em geral incipientemente alterados, sendo que apenas cerca de 5% encontram-se alterados em caulinita e illita, indicando que os processos de alteração nos ambientes eo e mesogenético não foram muito ativos. Parte destes grãos podem ter sido intemperizados ainda na área-fonte. Os minerais pesados metaestáveis apresentam angularidade produzida pelo ataque químico ocorrido em parte no ambiente intempérico telogenético. Esse processo é extensivo, atingindo a quase totalidade dos grãos, porém não é intensivo. Parte deste fenômeno pode ter ocorrido no ambiente diagenético de soterramento, porém são encontrados raros poros alargados ("oversized pores"), o que é um bom indicativo de que o processo de dissolução não foi intenso.

Localmente, pode ocorrer o acúmulo de argilas de infiltração, trazidas por águas superficiais.

### 7.4 Dissolução intra-estratal

Alguns grãos de minerais leves, como quartzo, feldspato e sílex, apresentam-se com início

de corrosão e com superfícies côncavas ou serrilhadas originadas por processo de dissolução por pressão. Os minerais pesados instáveis e metaestáveis, como sillimanita, estaurolita e granada, sempre mostram forma serrilhada e marcas de corrosão. Apesar destas evidências de atuação de soluções intra-estratais, a ocorrência dos minerais metaestáveis nas formações estudadas, como estaurolita e granada, mostra que a dissolução intra-estratal não foi um importante processo diagenético.

## 8 CONCLUSÕES

### 8.1 Tipos de rochas

Os arenitos da Formação Pirambóia são subarcóseos, mineralogicamente maduros e texturalmente submaturos a maduros, enquanto a Formação Botucatu apresenta predominantemente quartzo-arenitos e subordinadamente subarcóseos, mineralogicamente supermaturos e texturalmente maduros a supermaturos.

### 8.2 Províncias mineralógicas

Foram identificadas duas províncias mineralógicas nestas formações. A província A, dominante na Formação Pirambóia, diferencia-se pela alta a moderada porcentagem de minerais metaestáveis (estaurolita, granada, epidoto e mica), enquanto a província B, dominante na Formação Botucatu, caracteriza-se pela alta porcentagem de minerais opacos (magnetita e ilmenita).

### 8.3 Fatores governando a ocorrência de minerais

Durante o transporte e deposição das formações Pirambóia e Botucatu, os grãos destes arenitos sofreram fortemente a ação abrasiva eólica e os minerais de baixa dureza foram eliminados, permanecendo somente os minerais mais duros. A ocorrência generalizada de estaurolita nas duas formações é resultado da alta resistência à abrasão mecânica desse mineral, associado ao clima árido de ambiente desértico em que foram depositados esses arenitos inibindo o ataque químico. Como constatado por diversos autores, graças à seleção hidráulica os minerais de mais alta densidade (zircão, magnetita, ilmenita e leucoxênio) são mais abundantes na fração de areia muito fina. No caso das formações Pirambóia e Botucatu, entretanto, o zircão ocorre em menores proporções que estaurolita e turmalina, fenômeno que pode estar relacionado ao meio de transporte eólico. Graças a condições climáticas favoráveis, os minerais estudados não sofreram grande atuação de intemperismo químico na área-fonte e no sítio deposicional. O intemperismo atual, embora não tenha afetado intensamente os grãos, manifesta-se principalmente

através de alteração de minerais de feldspatos, corrosão de minerais pesados metaestáveis e infiltração de argilas superficiais. A ação de soluções intra-estratais, no ambiente diagenético de subsuperfície, não foi intensiva.

#### 8.4 Rochas-fontes dos arenitos e condições deposicionais

Durante a deposição das formações Pirambóia e Botucatu, as áreas-fontes foram os escudos estáveis de rochas cristalinas situadas a leste e sudeste da bacia e sedimentos preexistentes e rochas cristalinas situadas a nordeste. Os sedimentos depositados nas porções central e sudoes-

te da área devem ter sido derivados predominantemente das rochas cristalinas e parcialmente das rochas sedimentares preexistentes, e os da porção nordeste, predominantemente derivados das rochas sedimentares preexistentes e parcialmente das rochas cristalinas. Ao tempo da deposição da Formação Botucatu, teve lugar um vulcanismo básico na área-fonte, o que propiciou o fornecimento de magnetita e ilmenita angulares e euédricas. Os materiais dos arenitos das formações Pirambóia e Botucatu foram transportados e depositados predominantemente em condições eólicas, podendo ter sido depositados em ambiente desértico, cortados por rios principalmente temporários.

### 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CARVALHO, A.M.V. 1954. Contribuição ao estudo petrográfico do arenito Botucatu no Estado de São Paulo. Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia, São Paulo, 3(1): 51-72.
- EDELMAN, C.H. 1933. Petrologische provinzen in Het Nederlandse Kwartair. Amsterdam, Center Publishing Co., 104 p.
- FOLK, R.L. 1968. Petrology of sedimentary rocks. Austin, Hemphill's. 170 p.
- HUBERT, J.F. 1962. A zircon-tourmaline-rutile maturity index and the interdependence of the composition of heavy mineral assemblages with the gross composition and texture of sandstones. Journal of Sedimentary Petrology. 32(3): 440-450.
- \_\_\_\_\_. 1971. Analysis of heavy-mineral assemblages. In: CARVER, R.E. Procedures in sedimentary petrology. New York. Wiley Interscience. p. 453-476.
- LANDIM, P.M.B.; BÓRIO, N.J.; WU, F.T.; CASTRO, P.R.M. 1983. Minerais pesados provenientes do leito do Rio Amazonas. Acta Amazonica, Manaus, 13(1): 51-72.
- PARAGUASSU, A.B. 1968. Contribuição ao estudo da Formação Botucatu: Sedimentitos aquosos, estruturas sedimentares e silicificação. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos/USP. 131 p. (Tese de Doutorado). Inédita.
- RITTENHOUSE, G. 1943. The transportation and deposition of heavy minerals. Geological Society of America Bulletin, 54: 1725-1780.
- RUSSEL, R.D. 1939. Effects of transportation on sedimentary particles, in recent marine sediments. American Association of Petroleum Geologists. p. 32-47.
- WU, F.T. & SOARES, P.C. 1974. Minerais pesados nas formações Pirambóia e Botucatu. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, Porto Alegre, RS. Sociedade Brasileira de Geologia, v. 2, p. 119-127.
- \_\_\_\_\_. 1981. Minerais pesados das seqüências arenosas paleozóica e mesozóica no Centro-Leste do Estado de São Paulo. São Paulo, Instituto de Geociências/USP. 78 p. (Dissertação de Mestrado). Inédito.
- \_\_\_\_\_. 1982. Minerais nas rochas arenosas do Subgrupo Itararé e Formação Aquidauana no Centro-Leste do Estado de São Paulo. Geociências, São Paulo, 1: 7-27.

#### Endereço dos autores:

Fu-Tai Wu e Maria Rita Caetano-Chang — Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas — Caixa Postal 178 — 13.500-970 — Rio Claro, SP — Brasil.