

O COMPLEXO CARBONATÍTICO DE JACUPIRANGA, SP: INFORMAÇÕES GERAIS

E. Ruberti¹
R.L. Margutti²
C.B. Gomes¹

INTRODUÇÃO

O complexo ultramáfico-carbonatítico de Jacupiranga dista cerca de 240 km, rumo SW, da cidade de São Paulo e cobre área aproximada de 65 km².

A estrutura foi descoberta por Bauer (1877) e investigada preliminarmente, em fins do século passado, por Derby (1891) e Hussak (1892, 1895, 1904). Contudo, sua notoriedade mundial somente foi alcançada com os trabalhos de Melcher (1954, 1966), com esse autor se ocupando do estudo em detalhes do complexo no seu todo, bem como sugerindo uma origem magmática para os carbonatitos intrusivos nos jacupirangitos.

Novas investigações sobre o maciço viram-se facilitadas com o desmatamento regional para fins de cultivo e pela remoção do manto intempérico sobre o corpo carbonatítico, como resultado de atividades de mineração a céu aberto na área. Além disso, centenas de metros de testemunhos de sondagem efetuadas, particularmente sobre os dunitos e com a finalidade de prospecção de níquel, tornaram-se disponíveis nos últimos anos.

Mais recentemente, Gaspar & Wyllie (1983a, b; 1987), em trabalho minucioso sobre a geologia estrutural e mineralogia dos carbonatitos, e com base em suas características petrográficas e dados de química mineral, relataram a ocorrência de cinco fases intrusivas distintas dessas rochas. Adicionalmente, Roden et al. (1985), Morikyo et al. (1987), Nelson et al. (1988) e Gaspar (1989) forneceram dados sobre a composição isotópica de minerais dos carbonatitos, enquanto que Ruberti et al. (1988) apresentaram uma primeira síntese das informações disponíveis sobre o complexo. Por outro lado, Morbidelli et al. (1986) conduziram, pela primeira vez, estudo focalizando os efeitos metassomáticos observados na região de contato entre os carbonatitos e os piroxenitos encabantes. Uma nova versão sobre a geologia do complexo de Jacupiranga foi oferecida por Germann et al. (1987) (Fig.1), mostrando, em linhas gerais, concordância com aquela de Melcher (1954, 1966).

O complexo de Jacupiranga acha-se localizado no vale do rio Ribeira, próximo às bordas da Bacia do Paraná, numa região de intensa atividade magmática alcalina e que inclui diversas ocorrências de material carbonatítico. Determinações radiométricas K/Ar e Rb/Sr (Amaral, 1978; Roden et al., 1985) indicam para as rochas que o compõem idade aproximada de 131 ± 3 Ma. Ele foi interpretado por Herz (1977) como correspondendo ao local de um difuso "hot spot" em uma série de

¹Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

²Serrana S/A de Mineração.

junções triplíceis, formadas por ocasião da abertura inicial do Atlântico Sul.

O condicionamento tectônico da intrusão ao Arco de Ponta Grossa, uma estrutura de direção NW-SE e ativa, muito possivelmente, desde os tempos paleozóicos, vem sendo admitida por vários autores (Almeida, 1971; Algarte, 1972, entre outros). Mais recentemente, Ferreira & Algarte (1979) propuseram a sua associação a um dos quatro lineamentos relacionados àquela estrutura, o de Guapiara.

Em trabalho sistemático voltado para a caracterização preliminar das numerosas ocorrências de rochas alcalinas do país, Ulbrich & Gomes (1981) definiram nove províncias geográficas distintas com base em evidências geológicas, petrográficas e geocronológicas. A ocorrência de Jacupiranga foi por eles enquadrada na província homônima. Posteriormente, Almeida (1983), acrescentando o controle tectônico aos elementos acima, expandiu a classificação para doze províncias, incluindo aí as intrusões bordejando a Bacia do Paraná e localizadas junto aos países vizinhos (Paraguai, Uruguai). Segundo esse autor, o complexo de Jacupiranga pertenceria à província do Arco de Ponta Grossa, reunindo as diversas ocorrências do Vale do Ribeira. Finalmente, coube a Berbert (1984) propor a existência de nove províncias, enquadrando Jacupiranga dentro da chamada subprovíncia Sul São Paulo-Paraná.

ASPECTOS GEOLÓGICOS E PETROGRÁFICOS

O complexo de Jacupiranga exhibe forma ovalada (10,5 x 6,7 km) segundo NNW e acha-se inteiramente encaixado em rochas precambrianas do Grupo Açungui (550 Ma): granodioritos a norte e mica xistos ao centro e sul (Fig.1).

A estrutura compõe-se basicamente de dois corpos intrusivos principais, dunitos na região setentrional e jacupiranguitos na meridional. Rochas de composição insaturada ocupam geograficamente duas áreas expressivas dentro dos jacupiranguitos: na porção SW, ijolitos na forma de meia-lua e, mais ao centro, carbonatitos ocorrendo como um corpo alongado aproximadamente segundo NNW. Conforme Germann et al. (1987), rochas de natureza gabróide, incluindo desde gabros alcalinos e melagabros a quartzo monzonitos e quartzo sienitos, afloram na parte ocidental do complexo, enquanto que um enxame de diques (essexitos, teralitos) é encontrado junto à zona de transição entre dunitos e jacupiranguitos; estas rochas são também cortadas por diques sieníticos. Adicionalmente, velos pegmatíticos de nefelina sienito aparecem dispersos nas margens do complexo. Além dessas variedades, Melcher (1966) menciona a existência de diques ijolíticos, monchiquíticos e tinguaíticos, assim como a presença de material proveniente de processos de fenitização nas encaixantes regionais próximo às bordas da intrusão.

Os tipos litológicos que compõem o complexo exibem grande diversidade textural e mineralógica. Em trabalho mais recente, Gaspar (1989) procedeu à reclassificação dessas rochas em conformidade com as sugestões da IUGS (Streckeisen, 1973). Como resultado, propôs a eliminação do termo "jacupiranguito", considerando-o genericamente um clinopiroxenito.

Dunitos

Essas rochas ocupam toda a porção norte da estrutura, cobrindo área cerca de 8,5 km². São maciças, faneríticas de granulação fina, e formadas sobretudo de olivina (Fo₉₀) parcialmente alterada, além de quantidades menores de espinélio ferrocrômico com Al e Ti e hidróxidos de ferro e, às vezes, de carbonatos. Localmente, podem ocorrer variedades com clinopiroxênios e, mais

raramente, wehrilitos. O grau de serpentinização do material varia de 10 a 90%.

Clinopiroxenitos (jacupiranguitos)

Os piroxenitos são as rochas dominantes das porções centro-sul do complexo. Possuem coloração preta e textura fanerítica equigranular. A granulação é fina a média e a estrutura invariavelmente orientada em razão do alinhamento dos cristais de piroxênio.

As rochas piroxeníticas são indicadas em mapas geológicos do complexo sob a denominação geral de jacupiranguitos, termo definido por Derby (1891), e, posteriormente, modificado por Johannsen (1938) e Sorensen (1974). Segundo o primeiro autor, elas correspondem a tipos diversificados de piroxenitos, tais como: magnetita clinopiroxenitos, flogopita clinopiroxenitos, clinopiroxenitos com nefelina, olivina-flogopita clinopiroxenitos com nefelina e flogopita clinopiroxenitos com nefelina e flogopita clinopiroxenitos com andesina. Dentre eles, os magnetita clinopiroxenitos representam a variedade mais abundante, podendo conter também perovskita, kaersutita e flogopita. Os demais tipos concentram-se ao longo de uma faixa na porção NW do corpo piroxenítico: flogopita clinopiroxenitos com ou sem nefelina (sempre com magnetita, por vezes kaersutita) é a litologia mais comum, ocupando a parte meio-norte dessa zona; clinopiroxenitos com nefelina e melteigitos (clinopiroxenitos com mais de 10% de nefelina) ocorrem principalmente na parte meio-sul como pequenos diques e "sills" nos flogopita clinopiroxenitos; flogopita clinopiroxenitos com andesina (como acessórios, magnetita, anfíbólio kaersutítico e apatita), a variedade menos freqüente, concordam estruturalmente com os magnetita e flogopita clinopiroxenitos.

Ijolitos e melteigitos

Os ijolitos (30-70% de nefelina) constituem um corpo único na forma de meia-lua junto à porção SW de estrutura. São rochas de coloração cinza escuro e textura fanerítica de granulação fina a média, exibindo estrutura fortemente orientada. Mineralogicamente, consistem em clinopiroxênios e nefelina, além de quantidades menores de magnetita, perovskita, biotita, apatita e, ocasionalmente, kalsilita. Contudo, existem tipos que se diferenciam localmente por mostrarem variações importantes nas porcentagens dos seus constituintes minerais, como os melteigitos (aumento de clinopiroxênios) e os melilita ijolitos (aparecimento de melilita), estes últimos mais raros. Veios e diques

Veios de nefelina sienito, de textura pegmatítica e dimensões centimétricas a decimétricas, ocorrem principalmente na região marginal do complexo, cortando as diversas variedades de rochas. Os minerais essenciais em ordem de abundância são ortoclásio, nefelina, clinopiroxênios (egirina-augita e augita), titanita e biotita; às vezes, aparecem também magnetita, melanita e cancrinita.

Dentre as litologias que ocorrem como diques, os piroxenitos e as variedades portadoras de plagioclásio são, de longe, as mais freqüentes. No entanto, fonolitos e raros lamprófiros foram também reconhecidos. Além dessas rochas, Germann et al. (1987) fazem referência à existência de enxame de diques de composição essexítica e teralítica junto à porção oriental da zona de transição.

As rochas trazendo plagioclásio em sua composição estão presentes na forma de veios, enxame de diques e pequenas intrusões. Mineralogicamente, são bem diversificadas e constituem material de natureza gabróide, monzonítica e sienítica.

As variedades gabróides incluem apenas duas ocorrências de gabros (melagabros) propriamente ditos: uma na zona de contato entre dunitos e piroxenitos e outra na parte SE do corpo piroxenítico (kaersutita gabro). Todas as demais ocorrências dessa natureza apresentam caráter mais

diorítico (plagioclásio com $An < 50$).

As rochas monzoníticas possuem composição mineralógica variável, permitindo distinguir os seguintes tipos: olivina monzonitos, melamonzonitos, monzonitos porfíricos, monzonitos e quartzo monzonitos. Olivina monzonitos acham-se representados na porção norte do complexo e consistem em clinopiroxênios, andesina, feldspato potássico, biotita, olivina (For_{55-45}), magnetita e apatita; variações modais desses minerais possibilitam a caracterização de variedades como monzossienitos e monzodioritos. Monzonitos e os demais tipos petrográficos compõem-se essencialmente de plagioclásios (às vezes, como fenocristais), feldspato potássico (perítico), clinopiroxênios, magnetita e biotita; ocasionalmente, contêm anfibólio e quartzo. Como acessórios estão presentes apatita e zircão. O caráter textural peculiar de todas as rochas monzoníticas e sieníticas reside na presença de uma auréola ou manto de feldspato potássico (perita) junto às bordas dos cristais de plagioclásio (andesina); por vezes, os clinopiroxênios acham-se substituídos simplectitamente (clinopiroxênio mais verde e nefelina).

As rochas sieníticas consistem basicamente em feldspato potássico perítico, oligoclásio, clinopiroxênios, biotita, anfibólios, quartzo, magnetita, mirmekita, titanita e apatita. As variações nos teores modais desses minerais e na textura permitem definir os tipos: sienitos alcalinos, quartzo sienitos, sienitos, melassienitos e sienitos porfíricos. Dentre eles, os sienitos alcalinos são os mais abundantes. Apresentam textura variável, geralmente porfírica, e, por vezes, contêm inclusões de agregados máfico-ultramáficos.

Fenitos

Em Jacupiranga, alguns aspectos ligados ao fenômeno de fenitização podem ser observados seja no interior do complexo, seja fora dele. As encaixantes regionais (rochas do embasamento) exibem sinais evidentes de transformação metassomática em toda a periferia do complexo. A intensidade do processo, porém, varia de ponto a ponto, crescendo, aparentemente, de maneira irregular em direção ao contato. No geral, as rochas piroxeníticas e ijolíticas também sofreram fenitização em grau maior ou menor, tanto nas partes marginais do complexo, como mais internamente.

Por outro lado, os magnetita clinopiroxenitos apresentam no contato com os carbonatitos, que lhes são visivelmente intrusivos, uma estreita auréola de alteração metassomática representada por bandas mineralogicamente distintas e bem definidas, as chamadas "bandas de reação" da Figura 2.

Contudo, apesar de sua significância geológica e petrológica, os fenitos em geral e rochas afins de Jacupiranga contam com poucos estudos, os existentes de caráter preliminar e reunindo algumas observações de campo e descrições mineralógicas sucintas de pontos aleatórios. Dentro desse quadro, exclui-se a faixa de reação referida acima, que foi minuciosamente pesquisada por Morbidelli et al. (1986). As limitações impostas pela falta de estudos sistemáticos detalhados das rochas fenitizadas em geral e pela abrangência do processo, modificando rochas distantes dos carbonatitos, impossibilitaram até o momento uma caracterização mais precisa do processo e, por consequência, a definição da proveniência das soluções fenitizantes.

Fenitização em encaixantes regionais

Na região de contato com as encaixantes regionais, registra-se a presença de uma

estreita e complexa zona de fenitização. Nesses locais, foram encontrados fenitos sieníticos e encaixantes inalteradas à distância de poucos metros de contato. Entretanto, efeitos incipientes de fenitização se estendem externamente até 2 km como assinalado por Gaspar (1989). A fenitização nas margens do complexo tem caráter eminentemente sódico, sendo marcada pela formação de rochas constituídas essencialmente de albita, clinopiroxênio sódico, anfibólio sódico e mesoperitita; biotita, quartzo e muscovita podem ocorrer como relictos, enquanto que rutilo é a única fase óxido presente. Veios de albita e clinopiroxênio sódico são vistos cortando rochas piroxeníticas inalteradas na parte norte do complexo. Esses veios fazem contato brusco com os piroxenitos e, provavelmente, representam material de composição fenítica que sofreu fusão e mobilização. Por outro lado, algumas rochas leucocráticas sieníticas e nefelina sienitos (contato oeste e leste) poderiam representar também produtos de movimentação reomórfica de fenitos.

Fenitização em piroxenitos e ijolitos

A fenitização de caráter potássico mostra-se mais efetiva junto aos ijolitos e piroxenitos. Ela caracteriza-se pela substituição de nefelina por feldspato potássico (mesoperitita), pela formação de titanita ao redor de magnetita e pelo aparecimento de simplectita (agregados de nefelina e clinopiroxênio verde enriquecido no componente hedenbergita) nas bordas dos cristais de clinopiroxênio. Também como produto de fenitização ocorrem associados sienitos alcalinos leucocráticos; ortoclasitos não foram ainda reconhecidos.

Fenitização no contato piroxenitos-carbonatitos

Na zona limítrofe dos magnetita clinopiroxenitos com os carbonatitos, tem-se a formação de "bandas de reação" caracterizadas pela alternância de níveis silicáticos de composição diversa e carbonáticos. Segundo Morbidelli et al. (1986), blocos de mais de 50 m³ de clinopiroxenitos inclusos nos carbonatitos acham-se envolvidos por bandas variando em largura de poucos centímetros a mais de 1 m. Por vezes, as suas porções externas apresentam deformações plásticas devido às intrusões de veios carbonatíticos.

A seqüência normal das bandas, a partir do clinopiroxenito para o carbonatito, é a seguinte: **banda A** (anfibólica), **banda F** (flogopítica) e **banda O** (olivínica).

Banda A: esta faz contato com o clinopiroxenito preto e inalterado. A sua coloração é verde escuro, a granulação fina e a largura das faixas variável entre 1 a 5 cm, atingindo ocasionalmente até 20 cm. A estrutura se mostra regularmente estratificada a partir de poucos centímetros do contato (brusco) com o clinopiroxenito (zona de transição), intercalando-se sucessivamente faixas brancas milimétricas de carbonatos e subcentimétricas de minerais escuros, notadamente anfibólios. A passagem do clinopiroxenito é marcada pela mudança brusca da mineralogia, mantida no entanto a textura original. Piroxênios são pseudomorficamente substituídos por anfibólios (richterita, predominante, além de Mg-arfvedsonita, pargasita e Mg-hastingsita) e agregados subordinados de flogopita, de formação tardia relativamente ao anfibólio; o mineral micáceo é comumente zonado e de pleocroísmo invertido.

Magnetita é uma fase remanescente do clinopiroxenito, perdendo, contudo, sua identidade nas porções mais afastadas da zona de transição. Adicionalmente, reconhece-se a presença de grãos difusos de ilmenita e aglomerados de titanita.

As faixas ricas em carbonatos são bastante regulares, com calcita xenomórfica incluindo richterita acicular e "ripas" de flogopita. Apatita do magma carbonatítico encontra-se

comumente associada aos carbonatos.

Banda F: esta caracteriza-se pela cor vermelho vinho e configuração similar à banda anterior, com a amplitude das faixas variando de poucos centímetros a cerca de 1 m. A estrutura é bandada, porém, não tão regular, formando os carbonatos manchas ou linhas oblíquas às bordas da faixa.

Ela tem como mineral mais abundante a flogopita. O seu pleocroísmo é invertido, a estrutura zonada e a granulação similar àquela da interface entre as duas bandas. À flogopita associam-se grãos de ilmenita, de dimensões menores e em número maior que o presente nos agregados de anfibólio da **banda A**.

A magnetita é pouco desenvolvida, ainda assim mais que a ilmenita, e encontra-se parcial ou completamente transformada; titanita está totalmente ausente.

Os anfibólios restringem-se a grande cristais aciculares de richterita, abundantes junto às bordas de cristais de protoclinopiroxênios ou associados a calcita. Apatita é bem desenvolvida nos níveis mais carbonáticos.

Banda O: é a mais externa e de dimensões centimétricas a decimétricas. Exibe coloração muito escura, quase preta, e uma configuração menos regular que as demais face à freqüente deformação causada por veios carbonáticos. Enquanto a **banda F** é, de longe, a mais bem desenvolvida, a **O** pode estar ausente, particularmente à vista da inexistência de veios entre dois xenólitos.

Mineralogicamente, ela é caracterizada pela abundância de olivina, geralmente apresentando finas inclusões de opacos, concentrados ao redor dos cristais ou dispostos no seu interior; essas inclusões, provavelmente, correlacionam-se às de ilmenita da **banda F**. Alguns cristais bem desenvolvidos de olivina são certamente de segunda geração. Ao lado dessas duas fases do mineral, podem, ainda, aparecer relictos de olivina, estes em geral livres de inclusões e fortemente afetados por processos de serpentinização.

A clinohumita, às vezes de natureza titanífera, ocorre na forma de grandes cristais com pleocroísmo em tons de amarelo claro e dourado.

As flogopitas representam duas gerações: a primeira, na forma de agregados finos associados a opacos; a segunda, apresentando desenvolvimento poiquilítico e com inclusões, de segunda geração, de opacos e olivina. Nas porções mais externas dessas bandas, onde se registra maior influência do carbonatito, essas flogopitas tornam-se menos coloridas (amarelo claro a verde, incolor nas bordas) e se mostram raramente zonadas.

Magnetita e ilmenita ocorrem como grãos irregulares bem desenvolvidos, com dimensões entre 0,5 e 1 mm.

Carbonatos encontram-se individualizados segundo formas alongadas, ou então, em veios, em geral acompanhados de apatita, incluindo cristais raros de anfibólio acicular no contato das fases carbonáticas com as bandas silicáticas.

As feições petrográficas dessas bandas de reação e suas relações de campo permitem inferir que anfibólios e, posteriormente, flogopitas derivaram-se da interação de fluidos do(s) magma(s) carbonáticos(s) com os magnetita clinopiroxenitos protolitos. Esses fluidos provocaram inicialmente a transformação dos clinopiroxênios em anfibólios (**banda A**); sucessivamente mais tarde, com o crescimento da influência de K nesses fluidos aquosos, teve lugar a formação de flogopita (**banda F**), cristalizando a variedade tetraferroflogopita concomitantemente com richterita em ambiente de fO_2 elevada e alguma deficiência em alumina. Por outro lado, a formação da **banda O** (com

grandes cristais de flogópita) possivelmente ocorreu em condições de fO_2 relativamente mais baixa (decrecente), conforme indicado pelo atenuado pleocroísmo da flogopita e pelos dados químicos. A julgar pela ocorrência de flogopita e olivina na **banda O**, o teor em água das soluções fenitizantes não deve ter permanecido constante durante a formação das faixas de reação.

O quimimismo das bandas de reação (Morbiddelli et al., 1986) indica para alguns componentes (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , FeO , V e Y), como era de se esperar, teores intermediários em relação aos carbonatitos intrusivos e magnetita clinopiroxenitos; contudo, para outros (K_2O , Na_2O , MgO , MnO , Rb e Ba) os teores encontrados são bem mais altos, sugerindo, assim, a presença de fluidos reagentes mais enriquecidos nesses últimos elementos. A correspondência entre as bandas de reação e os possíveis fluidos dos carbonatitos é também admitida a partir do padrão de terras raras, que se mostra similar, porém, com teores intermediários às rochas adjacentes (carbonatitos e magnetita clinopiroxenitos).

Ainda segundo Morbiddelli et al. (1986), a anfibolitização e a flogopitização podem ser tomadas como um produto do processo de fenitização dos magnetita clinopiroxenitos. A presença de velos carbonáticos é interpretada, em parte, como um evento de carbonatização nas áreas fenitizadas. As evidências mineralógicas e petrográficas sugerem que as transformações metassomáticas ocorrem sob a ação de forte atividade de elementos alcalinos (essencialmente Na , K e Rb) e H_2O das soluções fenitizantes, contudo, o seu alcance parece ter se limitado a uma área pequena. Nesse sentido, as bandas de reação representam os únicos fenitos que, com certeza, resultaram de processos conectados diretamente à atividade de magmas carbonatíticos.

A calibração de geotermômetro com base na coexistência de magnetita e ilmenita (com baixo MgO e MnO) das bandas de reação indica equilíbrio em temperaturas da ordem de 570-595°C e fugacidade de oxigênio de $10^{-18,5}$ a $10^{-19,5}$ atm (Gaspar & Wyllie, 1983b).

ASSOCIAÇÕES CARBONATÍTIAS

Os carbonatitos de Jacupiranga formam um corpo alongado aflorando em uma elevação chamada "Morro da Mina", cujo cume alcançava inicialmente 225 m. Com o tempo, a topografia do corpo viu-se bastante alterada devido à mineração e lavra a céu aberto, levando à remoção do minério de apatita residual formado pelo intemperismo da massa carbonatítica e estabelecimento de gigantesco "open-pit" em rocha totalmente inalterada, que atinge hoje profundidade de 10 m abaixo do nível do mar. Disso resulta, que as relações de contato entre as fases diversas de carbonatitos e suas encaixantes apresentam-se em geral bem visíveis. A estrutura carbonatítica é nitidamente intrusiva em magnetita clinopiroxenitos (jacupirangitos), mostrando contatos íngremes que mergulham para fora.

Investigando os carbonatitos de Jacupiranga, Melcher (1966) definiu dois "plugs" independentes, um pequeno, a norte, e outro bem maior, a sul. Por sua vez, Gaspar & Wyllie (1983a) identificaram cinco fases de intrusões carbonatíticas (Fig.2), guardando a seguinte sequência cronológica (partindo da mais velha): C_1 (sövito), C_2 (sövito dolomítico) e C_3 (sövito), formando o corpo sul; C_4 (sövito) e C_5 (rauhaugito), o norte. Essas rochas acham-se cortadas por diques praticamente monominerálicos de alvikitos e beforsitos. Além disso, eles constataram localmente a presença de efeitos metassomáticos de dolomitização. Conforme relatado por Gaspar (1989), esses efeitos são observados em C_2 , C_3 e C_4 . A intrusão de rauhaugito (C_5) resultou no metassomatismo da

porção norte de C_4 , com a preservação da estrutura original em diversos locais. O contato entre C_2 e C_3 é marcado por uma perda de foliação e aumento na concentração de dolomita.

As feições mineralógicas e petrológicas das intrusões carbonatíticas identificadas por Gaspar & Wyllie (1983a) encontram-se resumidas na Tabela 1. Por outro lado, Hirano et al. (1987), com base em critérios mineralógicos, reuniram os carbonatitos de Jacupiranga em quatro grupos: calcita carbonatito (CC), calcita carbonatito rico em magnetita (CCmt), calcita carbonatito rico em apatita (CCap) e dolomita carbonatito (DC). As principais feições dessas rochas são fornecidas na Tabela 2. Segundo Hirano et al. (1987), as fases C_1 e C_3 de Gaspar & Wyllie (1983a) exibem as mesmas características mineralógicas, podendo, assim, pertencer a uma única fase intrusiva.

O "plug" sul compõe-se principalmente de carbonatito do tipo CC com bandas de CCmt, além de xenólitos e bandas de CCap nas porções marginais, com o conjunto formando uma estrutura semi-concêntrica. Um enxame de pequenos diques, localizado na sua porção NE, exhibe composição do tipo DC. Nas bordas do "plug", são abundantes os xenólitos de clinopiroxenito envolvidos por bandas de reação; por sua vez, os carbonatitos CC penetram os clinopiroxenitos na forma de enxame de pequenos diques. Estruturas de bandamento mineral (CC e CCmt) devidas ao alinhamento de concentrações de magnetita são interpretadas como estrutura de fluxo (Melcher, 1966).

O "plug" norte é constituído por uma intrusão cilíndrica principal de carbonatito CC com um núcleo de DC. Bandas de CCmt, conjuntamente com de CC, formam um padrão concêntrico distinto com mergulho vertical. A mineralogia de CC e CCmt é essencialmente a mesma daquela do corpo sul, exceção feita à olivina e ao tipo CCap que estão ausentes.

O controle químico e geológico efetuado durante as atividades de mineração dos corpos carbonatíticos proporcionou a produção de mapas de superfície de detalhe (Figs. 3-5), mostrando uma nova visão da geologia da mina aliada à distribuição esquemática para P205 e MgO, obtida a partir de centenas de análises de amostras de pó de perfuratrizas, geradas diariamente de acordo com a metodologia corrente de controle de qualidade da lavra. Da mesma forma, o mapa de tipos de minério expressa a distribuição das variações petrográficas e/ou mineralógicas definidas através de controles diários em escala detalhada da evolução das frentes de lavra.

Esses mapas, associados a estudos variográficos desenvolvidos ao longo de diversas direções de espaço, corroboram a idéia de estruturação química de alto ângulo em todos os corpos.

A delimitação feita nos últimos anos do alinhamento de xenólitos presentes no contato de C_1 e C_2 parece assumir importante conotação genética. Embora não reconhecidos no início dos trabalhos da mina, a frequência desses xenólitos aumentou com o alargamento e aprofundamento da cava e, hoje, nota-se a sua existência no centro da chaminé a profundidades acima de 200 m da cota topográfica original.

Mais ultimamente, Gaspar (1989) forneceu mapa detalhado de feições estruturais (foliação e lineação mineral) das cinco fases intrusivas anteriormente definidas (Fig. 6). A lineação mineral é marcada pelo alinhamento dos prismas e agregados de apatita, que, de modo geral, têm a mesma orientação. O acamamento (layering) em C_2 e C_4 é vertical; em C_1 e C_5 é subvertical, mergulhando para norte; C_3 apresenta nas porções centrais mergulho de 20 a 40° para norte, tornando-se progressivamente mais íngreme nas partes laterais e, localmente, até vertical. A lineação da apatita é subhorizontal em C_1 , C_2 e C_4 , além de paralela ao mergulho em C_3 e C_5 .

Em recentes trabalhos na Mina de Jacupiranga, Hasui et al. (1989) desenvolveram o

modelo estrutural do maciço rochoso em termos geométrico e evolutivo.

Geometricamente, tanto o carbonatito quanto o Jacupiranguito adjacente, acham-se segmentados por redes de falhas e zonas de falhas de extensões decamétricas. Contudo, apenas a de direção WNW-ESE, na porção mediana da cava, exibe maior extensão, terminando em ambos os lados no Jacupiranguito.

As discontinuidades foram geradas durante o esfriamento da chaminé carbonatítica, um evento tectônico posterior, e o alívio de carga mais recente. Tal multiplicidade de origem, a par da não-uniformidade de formação, explica a inexistência de padrão definido para todo o maciço exposto pela cava ou parte dele.

O tectonismo verificado foi do tipo transcorrente dextral, com o binário dispondo-se de E-W a NW-SE. No final do evento, a compressão principal orientou-se segundo N10W, subhorizontal, enquanto que a distensão segundo N80E, subhorizontal. Essas tensões podem ser ainda residuais no maciço, desde que um novo regime, que as informações geológicas impedem discenir, não tenha sobrevindo.

Os valores de 0,70494-0,70510 e 0,70558-0,70535 para a razão inicial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, respectivamente, dos carbonatitos dos "plugs" sul (C_1 , C_2 , C_3) e norte (C_4 , C_5) são interpretados como compatíveis com uma origem mantélica para essas rochas (Roden et al., 1985). Ainda segundo esses autores, os últimos corpos exibem evidências de maior contaminação crustal.

Os estudos isotópicos de ^{13}C e ^{18}O indicam claramente uma origem ígnea para os carbonatitos de Jacupiranga. Segundo Morikiyo et al. (1987), Nelson et al. (1988) e Gaspar (1989), essas rochas têm, respectivamente, uma composição isotópica de carbono (-5,6 a -6,4 ‰; -5,6 a -6,1 ‰; -6,09 a -6,45 ‰) e oxigênio (+7,1 a +8,1 ‰; +7,1 a +7,3 ‰; 6,78 a +7,0 ‰) muito uniforme, com os valores situados no intervalo previsto para carbonatitos primários.

A aplicação de geotermômetro com base no fracionamento isotópico de oxigênio entre calcita e magnetita indica equilíbrio em temperaturas de 660° a 740°C (Gaspar, 1989) para a formação dos minerais dos carbonatitos.

RECURSOS MINERAIS

A produção da mina foi iniciada a partir de 1943 com a lavra de minério residual de teores elevados ($> 20\% \text{P}_2\text{O}_5$), que se constituía basicamente de apatita, magnetita e alguns argilo-minerais, produtos esses provenientes da dissolução e lixiviação dos minerais carbonatados da rocha.

A base econômica da mina, centrada na apatita como principal e praticamente único mineral de minério, começou a sofrer transformação no início da década de 60, com a perspectiva de exaurimento do material residual. Abaixo deste, encontrava-se o que, até então, era tido apenas como protominério, material constituído pelo carbonatito-são mineralizado a apatita, com teores médios ao redor de 5,5% de P_2O_5 .

A partir de 1969, a massa carbonática e a apatita assumiram a condição de minério, viabilizados pelo processo tecnológico, que permitiu a separação física dos minerais, e consubstanciados pela existência de um mercado (apatita) e potencialização de outro (calcário). Em posição secundária mantinha-se a magnetita, já obtida desde o princípio de exploração da jazida.

Em 1972, o rejeito calcário da usina de flotação passou a ser aproveitado economicamente, transformando-se em matéria prima para a fabricação de cimento no próprio Parque

Industrial de Jacupiranga.

Em 1985, foram executados estudos de reavaliação de reservas, que possibilitaram a sua elevação para mais de 300 milhões de toneladas de carbonatito até a cota 400.

A partir do final da década de 80 com o agravamento da crise na indústria de fertilizantes, procedeu-se à adequação dos chamados subprodutos através do desenvolvimento de aplicações industriais para os mesmos. Assim, foram desenvolvidos mercados para os diferentes produtos oriundos da exploração e beneficiamento do carbonatito, a saber: calcário para "filler", argamassas, corretivos agrícolas, bicálcio para alimentação animal, magnetita e brita para construção civil, a partir de áreas extremamente contaminadas com piroxenitos.

Os demais acessórios como flogopita, sulfetos e olivina apresentam potencial restrito de aplicabilidade e viabilização econômica. Não obstante, serão levados a efeito estudos pormenorizados para a sua utilização futura.

AGRADECIMENTOS

Estes são devidos às agências FINEP (Convênio 43.88.0690.00) e FAPESP (Proc. 89/2551-3) pelo apoio financeiro dispensado à realização das pesquisas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALGARTE, J.P. (1972) A influência dos arqueamentos cratônicos no condicionamento das alcalinas nos Estados de São Paulo e Paraná. XXVI Congr.Bras.Geol., Belém, PA, *Anais*, 1:65-69.
- ALMEIDA, F.F.M. (1971) Condicionamento tectônico do magmatismo alcalino mesozóico do Sul do Brasil e Paraguai Oriental. *An.Acad.bras.Ciênc.*, 43:835-836.
- ALMEIDA, F.F.M. (1983) Relações tectônicas das rochas alcalinas mesozóicas da região meridional da plataforma sul-americana. *Rev.Bras.Geoc.*, 13:139-158.
- AMARAL, G. (1978) Potassium-argon age studies on the Jacupiranga alkaline district, State of São Paulo, Brazil. *Proc. First Int. Symp. Carbonatites, Poços de Caldas, Brazil*, p.297-302.
- BAUER, H.E. (1877) As minas de ferro de Jacupiranga. *Rev.Eng.*, Rio de Janeiro, p.213.
- BERBERT, C.O. (1984) Carbonatites and associated mineral deposits in Brazil. *Geol.Surv.Japan, Report* 263:269-290.
- BOCTOR, N.Z. & SVISERO, D.P. (1978) Iron-titanium oxide and sulphide minerals in carbonatite from Jacupiranga, Brazil. *Annual Rep. Dir. Geoph. Lab., Yearbook*, 77:876-880.
- DERBY, O.A. (1891) On the magnetite ore districts of Jacupiranga and Ipanema, São Paulo, Brazil. *Amer. J.Sci.*, 41:311-321.

- FERREIRA, F.J.F. & ALGARTE, J.P. (1979) O comportamento aeromagnetométrico-cintilométrico das principais rochas alcalinas dos Estados de São Paulo e Paraná. 2^o Simp.Reg.Geol., Rio Claro, SP, *Atas*, 2:195-208.
- GASPAR, J.C. (1989) Geologie et mineralogie du complexe carbonatique de Jacupiranga, Brésil. Tese de Doutorado. U.E.R. de Sciences Fondamentales et Appliquées, Université d'Orleans, França (Inédito). 344p.
- GASPAR, J.C. & WYLLIE, P.J. (1983a) Magnetite in the carbonatites from the Jacupiranga complex, Brazil. *Amer. Mineral.*, 68:195-213.
- GASPAR, J.C. & WYLLIE, P.J. (1983b) Ilmenite (high Mg, Mn, Nb) in the carbonatites from the Jacupiranga complex, Brazil. *Amer. Mineral.*, 68:960-971.
- GASPAR, J.C. & WYLLIE, P.J. (1987) The phlogopites from the Jacupiranga carbonatite intrusions. *Contr.Mineral. Petrol.*, 36:121-134.
- GERMANN, A.; MARKER, A.; FRIEDRICH, G. (1987) The alkaline complex of Jacupiranga, São Paulo, Brazil. Petrology and genetic considerations. *Zbl. Geol. Paleont.*, 1 (7/8):807-818.
- HERZ, N. (1977) Timing of spreading in the South Atlantic: information from Brazilian alkalic rocks. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 88:101-112.
- HIRANO, H.; KAMITANI, M.; DAITX, E.C. (1987) Jacupiranga carbonatites in the São Paulo State, Brazil: their mode of occurrence. ITIT Project 8316, Rep.Int.Res.Rev. Coop., Japan, p.74-95.
- HUSSAK, E. (1982) Ueber Brazilit, ein neues Tantal (Niob) mineral von der eisenmine Jacupiranga. *Neues Jb.Min.Geol.Pal.*, 2:141-159.
- HUSSAK, E. (1985) Ueber den Baddeleyt (syn. Brazilit) von der eisenmine in Jacupiranga in São Paulo. *Tschermaks Min.Petr.Mitt.*, p.395-411.
- JOHANNSEN, A. (1938) A descriptive petrography of igneous rocks. Vol. IV. University of Chicago Press, 523p.
- MELCHER, G.C. (1954) Nota sobre o distrito alcalino de Jacupiranga, São Paulo. *Div. Geol. Min., Notas Prelim.*, 84.
- MELCHER, G.C. (1966) The carbonatites of Jacupiranga, São Paulo, Brazil, In: Carbonatites (Tuttle, O.F. & Gittins, J., Eds.), p.169-181. Intersciences Publishers.
- MITCHELL, R.H. (1978) Manganoan magnesian ilmenite and clinohumite from the Jacupiranga carbonatite, São Paulo, Brazil. *Amer.Mineral.*, 63:544-547.

- MORBIDELLI, L.; BECCALUVA, L.; BROTZU, P.; CONTE, A.; GARBARINO, C.; GOMES, C.B.; MACIOTTA, G.; RUBERTI, E.; SCHEIBE, L.F.; TRAVERSA, G. (1986) Petrological and geochemical studies of alkaline rocks from continental Brazil, 3. Fenitization of jacupirangite by carbonatite magmas in the Jacupiranga Complex, SP. *Per.Mineral.*, **55**:261-295.
- MORIKIYO, T.; HIRANO, H.; MATSUHISA, Y. (1987) Carbon and oxygen isotopic composition of the carbonates from the Jacupiranga and Catalão I carbonatite complexes. Brazil. ITIT Project 8316, Rep. Int. Res. Div. Coop. Japan, p.96-111.
- NELSON, D.R.; CHIVAS, A.R.; CHAPPELL, B.W.; McCULLOCH, M.T. (1988) Geochemical and isotopic systematics in carbonatites and implications for the evolution of ocean-island sources. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **52**:1-17.
- RODEN, M.F.; MURTHY, V.R.; GASPAR, J.C. (1985) Sr and Nd isotopic composition of the Jacupiranga carbonatite. *J.Geol.*, **93**:212-220.
- RUBERTI, E.; SCHEIBE, L.F.; GOMES, C.B. (1988) The Jacupiranga Alkaline Complex. Int. Conf. "Geochemical Evolution of the Continental Crust", Poços de Caldas, Brazil, Guidebook, p.11-25.
- SÖRENSEN, H. (1974) The alkaline rocks. John Wiley, London.
- STRECKEISEN, A. (1973) Plutonic rocks. Classification and nomenclature recommended by the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. *Geotimes*, **18**(10):26-30.
- ULBRICH, H.H.G.J. & GOMES, C.B. (1981) Alkaline rocks from continental Brazil. *Earth Sci. Rev.*, **17**:135-154.

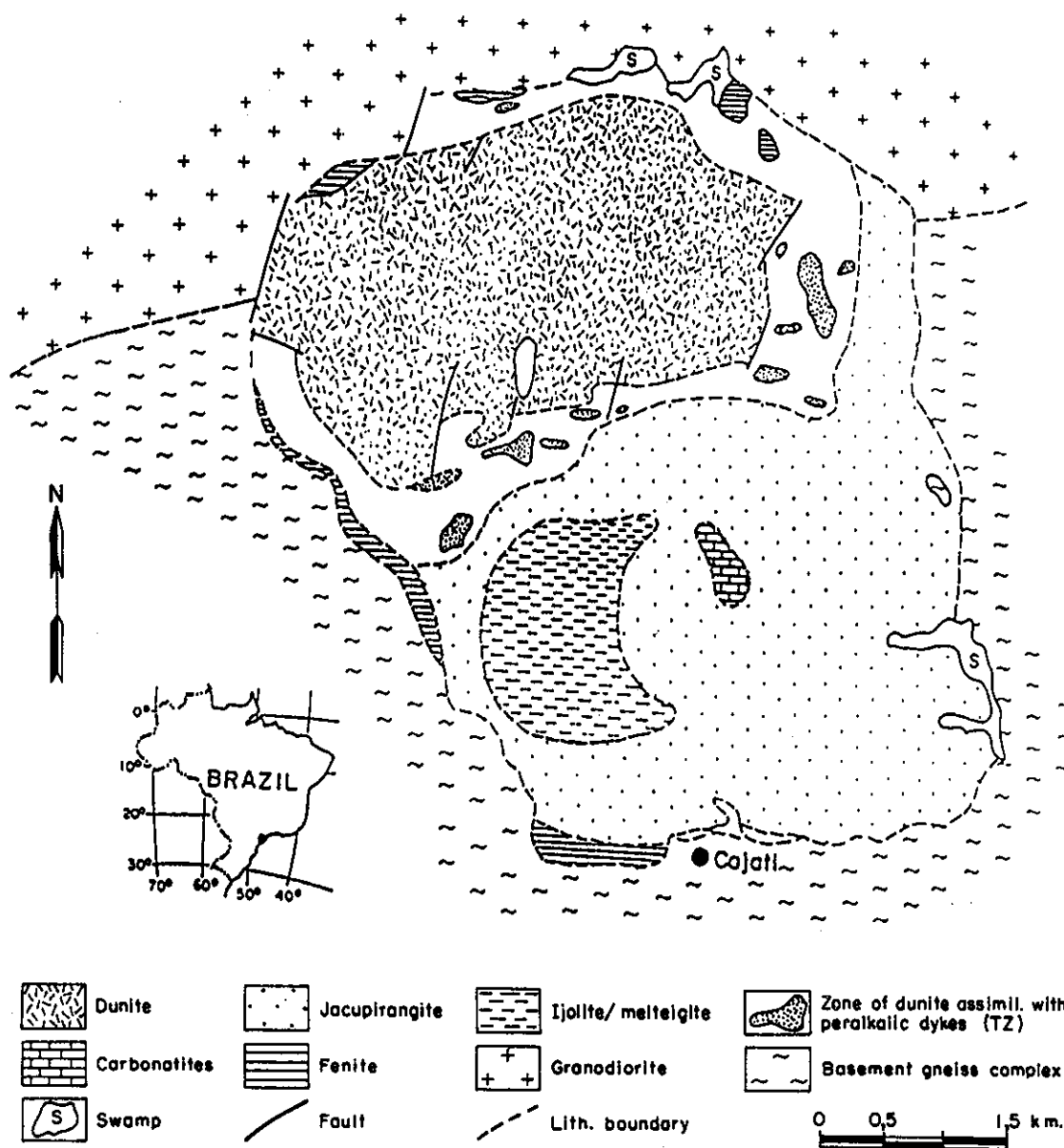


Figura 1 - Mapa geológico do complexo alcalino de Jacupiranga (Germann et al., 1987).

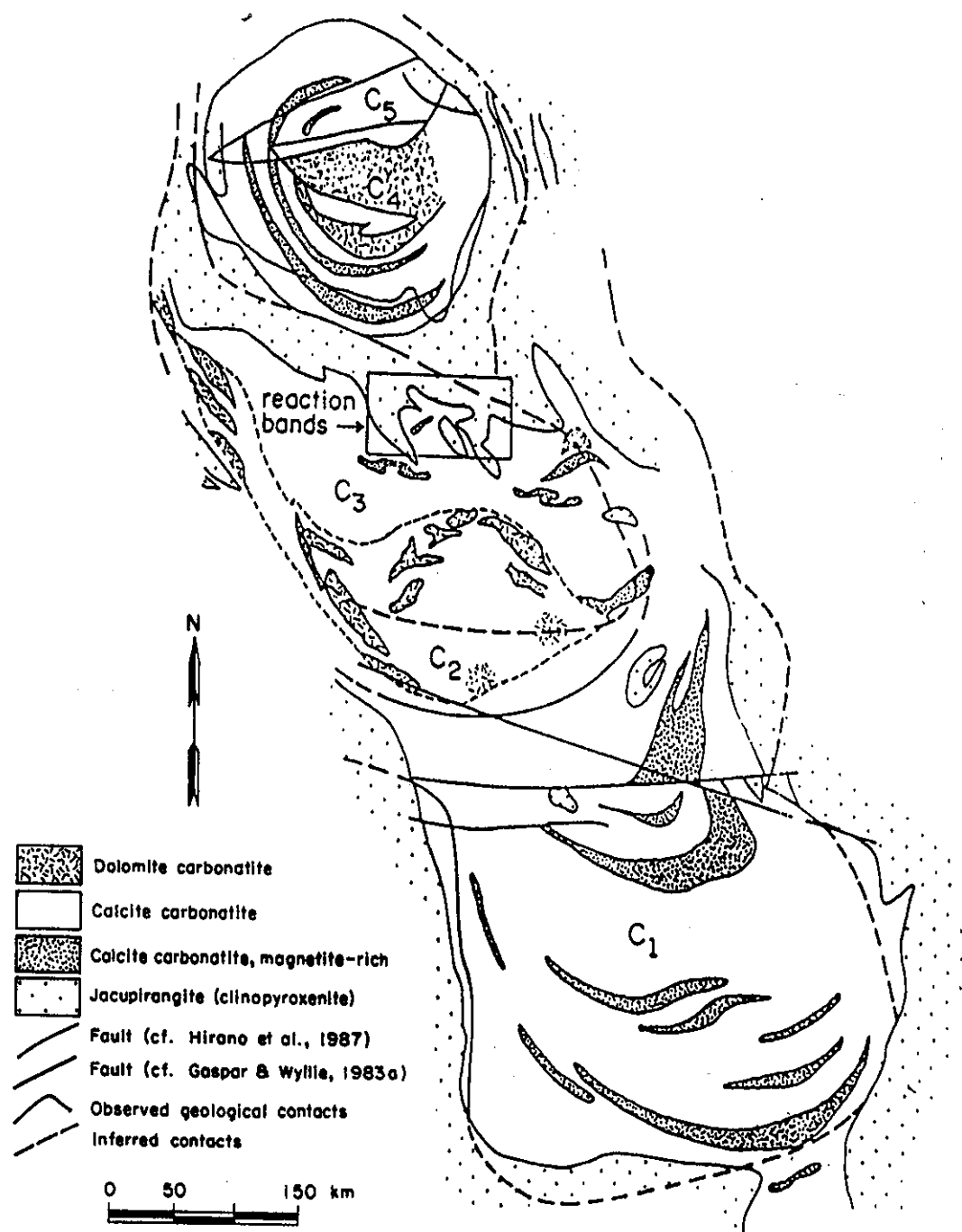


Figura 2 -Mapa geológico dos carbonatitos de Jacupiranga (Hirano et al., 1987). Contornos dos corpos C1, C2, C3, C4 e C5 segundo Gaspar & Wyllie (1983a).

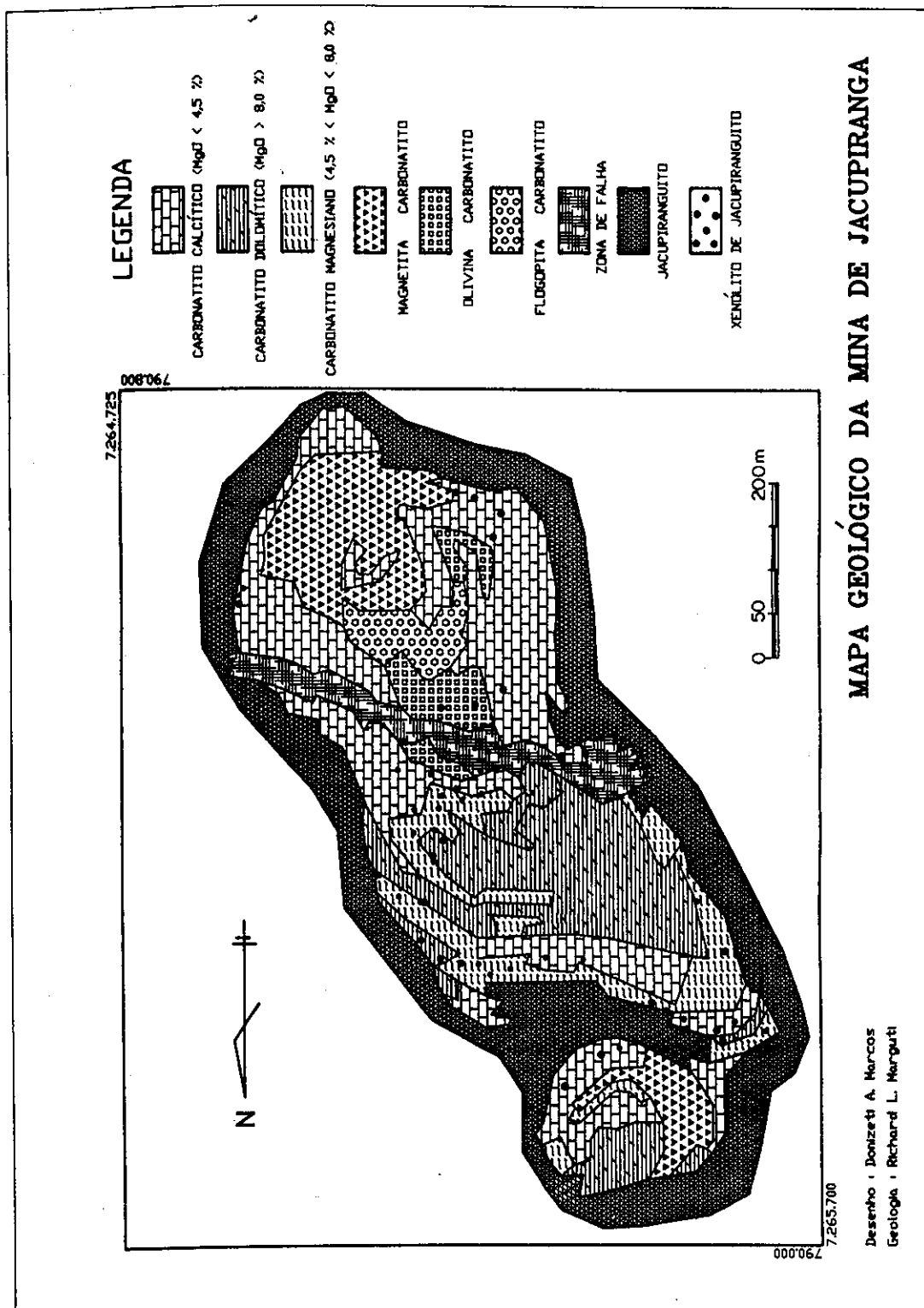


Figura 3 - Mapa geológico da Mina de Jacupiranga.

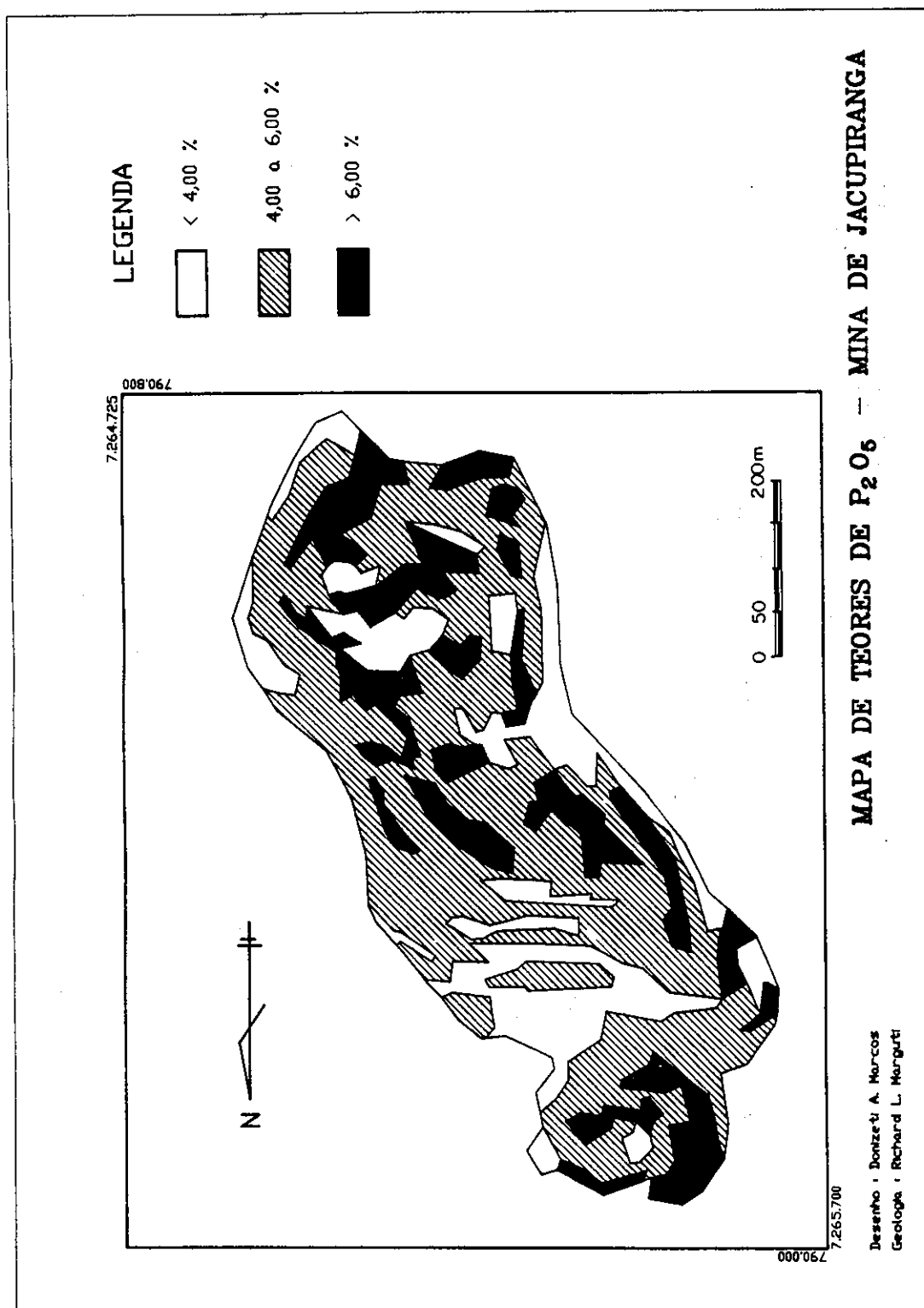


Figura 4 - Mapa de distribuição dos teores de P_2O_5 na Mina de Jacupiranga.

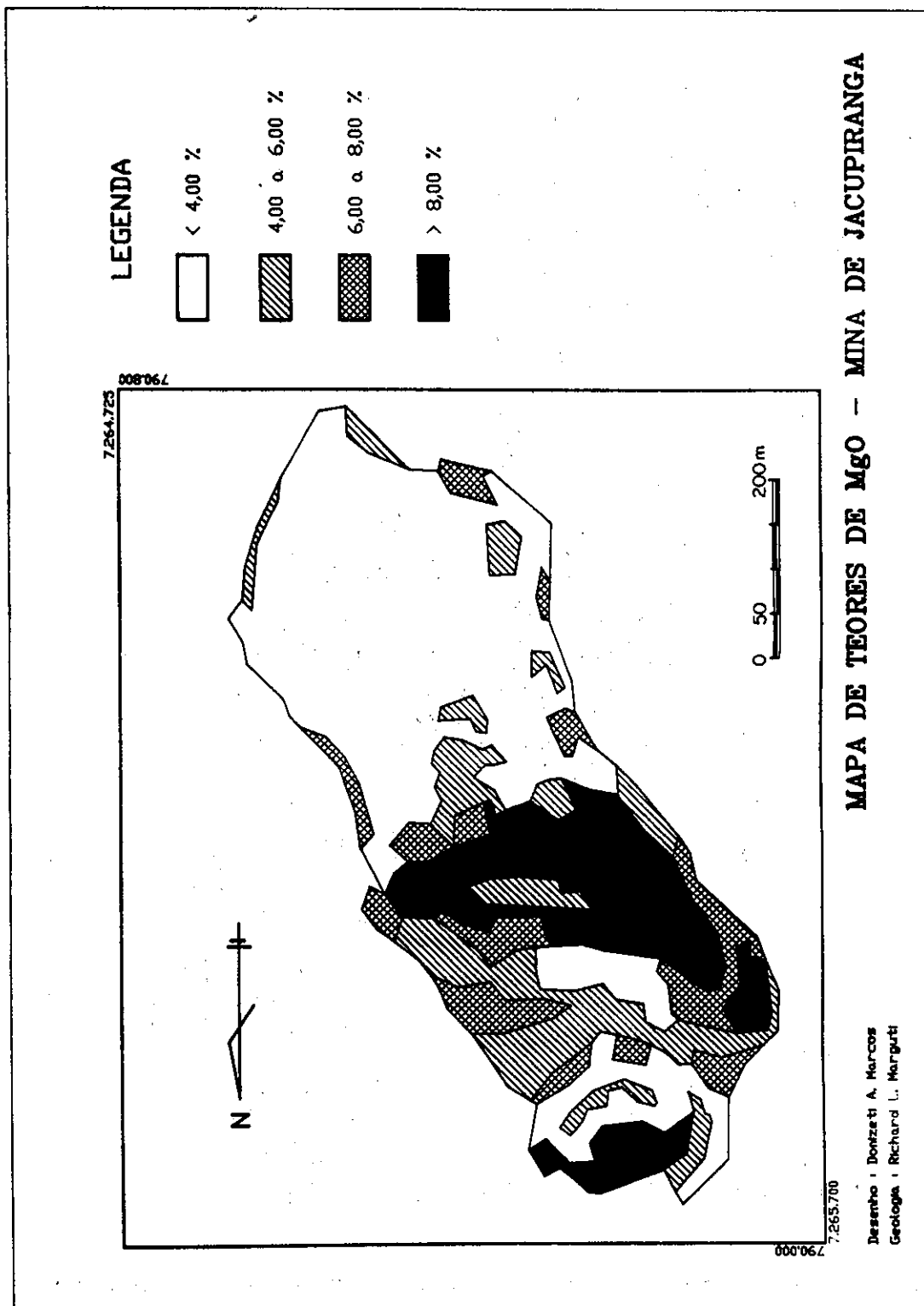


Figura 5 - Mapa de distribuição dos teores de MgO na Mina de Jacupiranga.

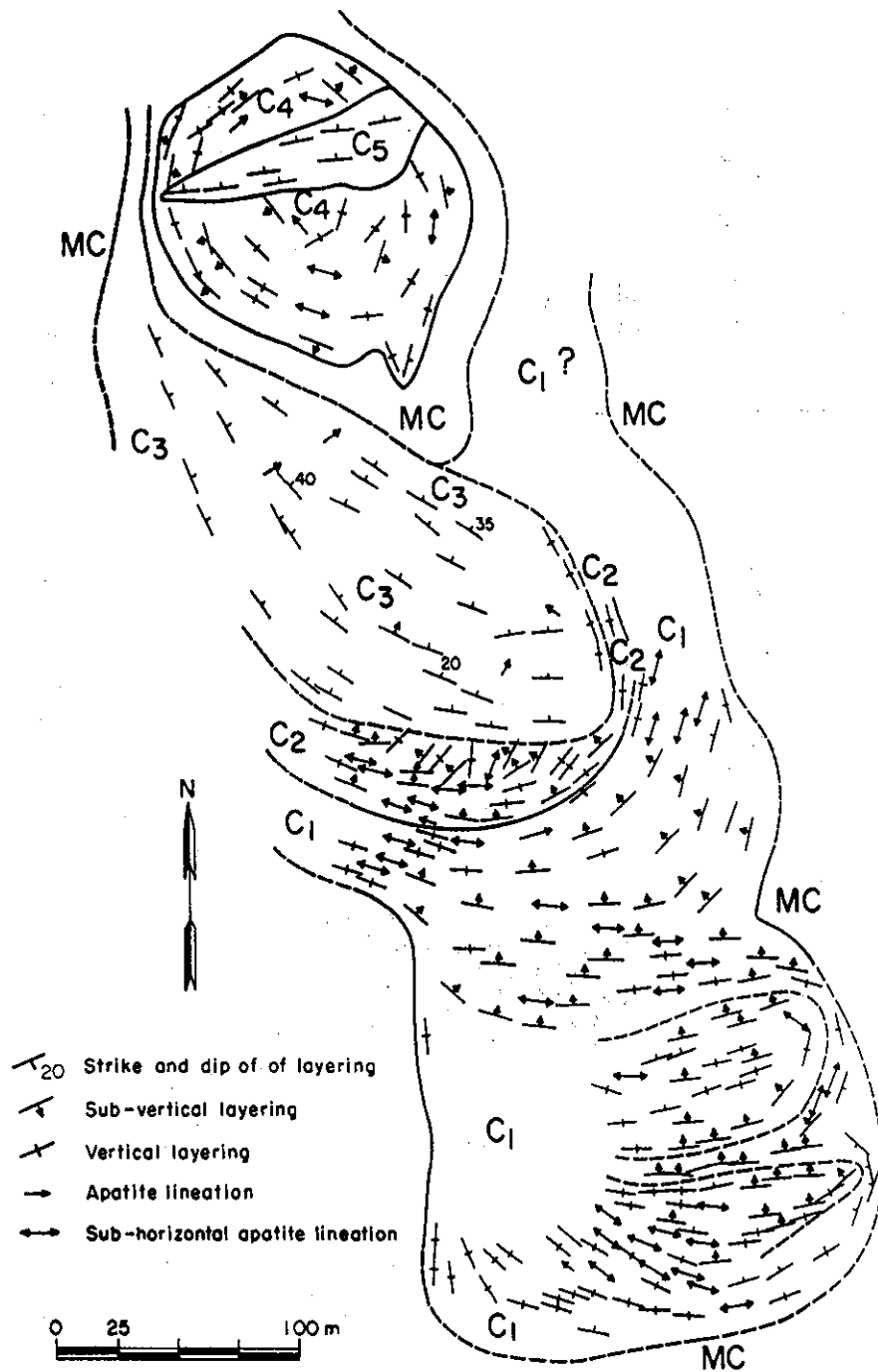


Figura 6 - Mapa geológico e estrutural dos carbonatitos de Jacupiranga em 1979 (Gaspar, 1989). C1, sövito; C2, rauhaugito calcítico; C3, sövito; C4, sövito; C5, rauhaugito; MC, magnetita clinopiroxenito.

Tabela 1 - Petrografia dos carbonatitos e Jacupiranguito (segundo Gaspar & Wyllie, 1983a).

	Tipo de rocha ¹	Mineralogia principal ²	Granulação	Outras feições
Intrusões Sul	C ₁ Sólito	Calcita, apatita, magnetita, olivina, flogopita, dolomita, sulfetos	Grossa	Grosseiramente bandada.
	C ₂ Sólito dolomítico	Calcita, dolomita, apatita, magnetita, flogopita, sulfetos	Fina a média	Finamente bandada.
	C ₃ Sólito	Calcita, apatita, magnetita, flogopita, dolomita, olivina, sulfetos	Média a grossa	Menor quantidade de minerais não-silicatos relativamente aos outros sólitos. Bandamento menos evidente.
Intrusões Norte	C ₄ Sólito	Calcita, apatita, magnetita, olivina, flogopita, dolomita, sulfetos	Média	
	C ₅ Rauhaugito	Dolomita, apatita, flogopita, magnetita, sulfetos, calcita	Média a grossa	Porcentagem pequena de silicatos, óxidos e sulfetos.
Diques ³	B ₄ Beforsito	Dolomita, flogopita, magnetita, calcita	Fina	Intrusivo no sólito C ₄ .
	B ₅ Beforsito	Dolomita, calcita, apatita, magnetita, flogopita, sulfetos	Média a fina	Ramificação do rauhaugito no sólito C ₄ .
Rochas de contato: carbonatitos intrusivos C ₂ e C ₃	S Sólito	Calcita, dolomita, apatita, flogopita, magnetita, sulfetos	Média a grossa	Bandamento difuso.
	B Beforsito	Dolomita, calcita, apatita, magnetita, sulfetos	Média	Bandamento difuso.
Zona de reação: intrusões C ₁ , C ₃ e C ₅ e Jacupiranguito	Material de alteração	Flogopita, anfibólio sódico, calcita, magnetita, apatita, sulfetos, ilmenita, clinohumita	Fina a grossa	Alterância de bandas ricas em silicatos e em carbonatos (magnetita presente apenas nas primeiras).
	JAC Jacupiranguito	Titanogaugita, titanomagnetita	Média	

¹ Outros tipos de rochas citadas no texto: aivikito (calcita, apatita, dolomita, flogopita) e iljolito (clinopiroxênios e nefelina).

² Minerais listados em ordem decrescente de abundância.

³ As características mencionadas referem-se especificamente a esse tipo de material e não aos diques em geral, ocorrendo nos corpos carbonatíticos.

Tabela 2 - Classificação e principais feições dos carbonatitos de Jacupiranga.

Nome da rocha	Ocorrência	Mineral carbonático principal	Outros minerais maiores e acessórios (ordem decrescente de abundância)
Calcita carbonatito (CC)	Constituinte principal dos "plugs" norte e sul. Alguns CC cortam também o CC como diques e "sheets".	Calcita	Apatita, magnetita, dolomita, como acessórios flogopita (com mais que 10% de BaO; Gaspar & Wyllie, 1987), olivina coróida (Fogg; Mitchell, 1978), pirrotita anedral, calcoprita e valierita (Böcher & Svisero, 1978). Clinohumita está também presente como bordas de reação em olivina.
Calcita carbonatito rico em magnetita (CCmt)	CCmt ocorre como bandas rítmicas em associação com CC dos "plugs" norte e sul.	Calcita	Magnetita (3 a 15 mm, freqüentemente zonada), dolomita, flogopita, apatita e, como constituintes menores, olivina e sulfetos.
Calcita carbonatito rico em apatita (CCap)	CCap aparece como xenólitos e bandas em CC, particularmente nas zonas marginais do "plug" carbonatítico sul.	Calcita	Apatita (3 mm, euhedral a subhedral, com teor modal superior a 40%), olivina (anedral, com inclusões de apatita), magnetita, dolomita e, como menores, flogopita e sulfetos. CCap pode representar fácies primitiva da série dos magmas carbonatíticos, sendo mineralogicamente correspondente a foscoritos.
Dolomita carbonatito de granulação média a fina (DCfg) e grossa (DCCg)	DCfg penetra o centro dos "plugs" carbonatíticos norte e sul. DCCg ocupa principalmente o centro do "plug" norte, como bandas rítmicas com DCfg. No contato de DCfg desenvolvem-se grandes cristais de dolomita.	Dolomita	Apatita (acicular e colunar, 10-30% de teor modal), quantidades menores de magnetita (anedral e subhedral), flogopita e calcita anedral (2-8%), sulfetos e, às vezes, olivina com bordas flogopíticas.