

FFCLUSP

FACULDADE DE FILOSOFIA, CIÊNCIAS E LETRAS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

BOLETIM N.º 282

GEOLOGIA N.º 21

SÃO PAULO

BRASIL

1965

GERALDO CONRADO MELCHER

O CARBONATITO
DE
JACUPIRANGA

BOLETIM N.º 282
GEOLOGIA N.º 21
SÃO PAULO
BRASIL
1965



GERALDO CONRADO MELCHER

**O CARBONATITO
DE
JACUPIRANGA**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Reitor: — Prof. Dr. Luís Antônio da Gama e Silva

Vice-Reitor: — Prof. Dr. Mário Guimarães Ferri

FACULDADE DE FILOSOFIA, CIÊNCIAS E LETRAS

Diretor: — Prof. Dr. Mário Guimarães Ferri

Vice-Diretor: — Prof. Dr. Rui Ribeiro Franco

Secretário: — Lic. Eduardo Marques da Silva Ayrosa

SECÇÃO GRÁFICA imprimiu 1965.

RESUMO

O distrito alcalino de Jacupiranga constitui ocorrência brasileira clássica de rochas alcalinas e ultrabásicas. Descrito pela primeira vez por Derby e Hussak, muitas outras referências foram depois feitas à ocorrência, principalmente por Daly e Shand. A geologia geral das rochas alcalinas e ultrabásicas foi resumida por Melcher (1954). No presente trabalho os carbonatitos do morro da Mina são estudados em detalhe.

A figura 1 mostra a localização de Cajati, pequena vila no município de Jacupiranga. A posição do morro da Mina, 2 km ao norte de Cajati, e suas relações com as rochas alcalinas do distrito são mostradas na figura 2.

As rochas encaixantes dos carbonatitos são exclusivamente jacupiranguitos, descritos pela primeira vez por Derby (1891). Em sua descrição original, Derby referiu-se a rochas ígneas alcalinas constituídas essencialmente de titano-augita, magnetita, nefelina e biotita. A conveniência de restringir o termo original a rochas com êsses minerais em proporções definidas foi discutidas por Melcher (1954).

Os carbonatitos ocupam a parte elevada do morro da Mina, aflorando em área ovalada com diâmetros de 1 000 m e 400 m, respectivamente (figura 3). A elevação máxima da ocorrência é 225 m. Sondagens a diamante revelaram que os carbonatitos estendem-se a profundidade superior a 60 m abaixo do nível do mar.

A superfície do corpo de carbonatitos apresenta-se extremamente irregular, como consequência da dissolução diferencial dos carbonatos, principalmente ao longo de juntas radiais e concêntricas. O contacto entre jacupiranguitos e carbonatitos não mostra quaisquer indícios de metamorfismo ou metasomatismo. Nenhuma das rochas exhibe modificações da composição mineralógica ou texturais nas proximidades do con-

tacto. No interior do corpo carbonatítico são encontrados alguns xenólitos de jacupiranguito com diâmetros de um a dez metros. Ocorrem numerosos diques, constituídos essencialmente por carbonatos, apatita e magnetita, que em alguns casos exibem textura orientada e mais fina do que suas encaixantes.

Os principais elementos estruturais do carbonatito são juntas, falhas, diques e texturas fluidais. Em seu conjunto, êsses elementos dispõem-se de maneira nitidamente radial e concêntrica. Possivelmente essas estruturas correspondem a um corpo intrusivo com centro na parte sul da ocorrência (ponto A, figura 3), cortado por sua vez por intrusão posterior com centro na parte norte (ponto B). Algumas falhas foram observadas, porém seu rejeito não pôde ser verificado.

O carbonatito é uma rocha branca, de granulação média a grossa. Em alguns afloramentos exhibe textura orientada, mostrada pelo alinhamento dos acessórios escuros (fotos 5 e 6). Também a dolomita e a apatita podem estar alinhadas, sugerindo textura fluidal.

Os minerais constituintes do carbonatito são calcita, dolomita, apatita, magnetita, forsterita, serpentina, clinohumita, flogopita, pirita, calcopirita, galena, ilmenita, espinélio, pirocloro, baddeleyita, barita e perovskita. A apatita ocorre em pequenos cristais de forma ovóide, inclusos em indivíduos de carbonato, ou em agregados de cristais alongados, subparalelos (fotos 9 e 10). Provavelmente trata-se de duas gerações. Magnetita e ilmenita encontram-se sempre intercrescidas, formando esta delgadas lamelas de exsolução ou indivíduos de formas irregulares. A magnetita contém teores relativamente elevados de MgO , Al_2O_3 e MnO_2 . Flogopita, forsterita e clinohumita ocorrem em cristais de alguns milímetros e formam concentrações locais no carbonatito. Foi observado um sulfeto não identificado, de estrutura semelhante à da pirrotita, contendo Fe, Mg, Ca e U. O pirocloro ocorre em octaédros ou rombododecaédros amarelos a marron escuros com diâmetros de 0.1 a 1.0 mm. Sua densidade é 4.8, sendo elevado o

teor em Ta (Nb: Ta = 4.5:1). Baddeleyita constitui acessório raro e encontra-se sempre em delgadas placas, intercrescido com pirocloro. A figura 5 mostra a composição mineralógica de 25 amostras típicas de carbonatito. Cêrca de 80% das amostras da superfície do carbonatito contêm 5 a 15% de apatita e 1 a 4% de magnetita. A soma de todos outros acessórios raramente ultrapassa 1%. A distribuição de traços de pirocloro é mostrada na figura 6.

Para a determinação da composição química foi estabelecida uma malha quadrática e colhidas mais de 400 amostras representativas na superfície do carbonatito. Os teores dos óxidos mais importantes, com exceção de CaO, são mostrados nas figuras 7, 8 e 9. Em comparação a outros carbonatitos, Jacupiranga é uma ocorrência relativamente pequena, de composição homogênea, com alta proporção de carbonatos e apatita, sendo excepcionalmente baixo o teor de outros acessórios.

Numerosas feições, principalmente as estruturas e a constituição química e mineralógica, indicam que os carbonatitos são intrusivos nos jacupiranguitos encaixantes. Possivelmente trata-se de duas intrusões separadas, sendo a mais antiga, na parte sul, mais rica em fósforo e com teores mais baixos de magnésio do que a intrusão norte. Também as estruturas indicam que parte da primeira intrusão foi cortada posteriormente, ao norte.

A lixiviação superficial dos carbonatos deu origem a um manto de minério apatítico residual com 22% P_2O_5 e 26% Fe_2O_3 . As formas irregulares de superfície, resultantes da dissolução ao longo de juntas e falhas, controlaram em parte a acumulação desse minério residual (fotos 1, 2 e 3). O minério é beneficiado por lavagem e separação magnética, obtendo-se concentrados com 39-40% P_2O_5 e um máximo de 2,5% Fe_2O_3 , que são utilizados na fabricação de fertilizantes. A recuperação da apatita do carbonatito não intemperizado está sendo investigada.

ABSTRACT

The alkaline district of Jacupiranga is the classical Brazilian occurrence of alkaline and ultrabasic rocks. Derby and Hussak first described the district, and later many other references have been made to it, especially by Daly and Shand. The general geology of the alkaline and ultrabasic rocks was described briefly by Melcher (1954). The present paper describes the Morro da Mina carbonatite in detail.

Figure 1 shows the location of Cajati, a small village in the county of Jacupiranga. The position of Morro da Mina, 2 kilometers North of Cajati, and its relationship to the alkaline rocks of the district is shown on figure 2.

The rocks surrounding the carbonatites are exclusively jacupiranguites, first described by Derby (1891). His original description referred to igneous alkalic rocks composed essentially of titanite, magnetite, nepheline and biotite. The convenience of restricting the name to rocks composed of the above mentioned minerals with specific proportions was discussed by Melcher (1954).

The carbonatites crop out on an oval shaped hill, 1,000 by 400 meters, called Morro da Mina, which has a maximum elevation of 225 m above sea level (figure 3). Diamond drilling shows that the carbonatite body extends to at least 60 m below sea level.

The highly irregular topography of the carbonatite body results from differential leaching of the carbonates, particularly along radial and concentric joints. The contact between carbonatites and jacupiranguites shows no evidence of metamorphism or metasomatism. Both rocks have the same mineralogy and texture away from as well as adjacent to the

contact. The only xenoliths in the carbonatite are blocks of jacupiranguite with diameters from one to ten meters. The carbonatite is cut by numerous dikes made up by carbonates, apatite and magnetite. In some places the dike minerals are oriented parallel to the walls of the dikes. Due to very subtle differences in grain size and proportion of accessory minerals, these dikes are usually difficult to distinguish from their wall rocks.

The main structural features of the carbonatite are joints, faults, dikes and flow structures. The overall arrangement of these structural features shows a well defined concentric and radial pattern. This pattern may be interpreted as corresponding to a intrusive body which has its center in the Southern part of the carbonatite (figure 3, point A), which in turn is intersected by a later intrusion with a center located in the Northern part (point B). Some faults have been mapped but their displacement cannot be determined.

The carbonatite is a medium to coarse grained white rock, and in some outcrops exhibits a oriented texture (photos 5 and 6), shown by the alignment of dark minerals. Also dolomite and apatite may exhibit a oriented texture which may be interpreted as flow structure.

The minerals occurring in the carbonatite are calcite, dolomite, apatite, magnetite, forsterite, serpentine, clinohumite, phlogopite, pyrite, calcopyrite, galena, ilmenite, spinel, pyrochlore, baddeleyite, barite and perovskite. Apatite occurs in small oval shaped crystals within the carbonate grains and also as aggregates of larger subparallel prisms along the boundaries of carbonate grains. This mode of occurrence probably corresponds to two different generations of apatite (photos 9 and 10). Magnetite and ilmenite are always intergrown, the latter occurring as exsolution lamella or as irregular shaped grains within the magnetite. The magnetite contains unusually high proportions of MgO , Al_2O_3 and MnO_2 . Grains of phlogopite, forsterite and clinohumite commonly a few millimeters in dia-

meter, are concentrated in some parts of the carbonatite. A unidentified sulfide, containing Fe, Mg, Ca and U, has a structure similar but not identical to pyrrhotite and is strongly radioactive. Dark brown to dark yellow pyrochlore is a rare accessory and occurs in octahedrons or rhombododecahedrons 0.1 to 1.0 millimeters in diameter. The specific gravity is 4.8, the tantalum content unusually high (Nb: Ta= 3.5:1). Baddeleyite also is a rare accessory and always occurs in small plates, intergrown with pyrochlore, parallel to the cubic planes. Figure 5 shows the mineralogic composition of 25 typical carbonatite samples. Eighty percent of representative surface samples from the carbonatite contain 5% to 15% apatite and 1% to 4% magnetite. The total of all other accessories rarely exceeds 1%. Distribution of pyrochlore is shown on figure 6.

For the purpose of determining the chemical composition, a grid was established and more than 400 representative samples were taken. The content of the more important oxides, with the exception of CaO, are shown on figures 7, 8 and 9.

Compared to other carbonatites, the Jacupiranga occurrence is relatively small. It is comparatively homogeneous, containing high proportion of carbonates and apatite, and unusually few other accessories.

Many features, such as the chemical and mineralogical characteristics, as well as the structure, indicate that the carbonatites are intrusive in the surrounding jacupiranguites. Possibly two separate intrusions took place. The Southern carbonatite is high in phosphorus and low in magnesia compared to the Northern intrusion. Structural evidence also indicates that the Southern carbonatite is intersected by the Northern intrusion.

Surficial leaching of the carbonates left a residual mantle of apatite ore containing 22% P_2O_5 and 26% Fe_2O_3 . Preferential leaching, especially along joints and faults, produced the irregular surface features which controlled the accumu-

lation of the residual ore (Photos 1, 2 and 3). The ore is concentrated by washing and magnetic separation. Concentrates average 39-40% P_2O_5 , with a maximum of 2.5% Fe_2O_3 , and are being utilized for the manufacture of fertilizers. The recovery of apatite from the unweathered carbonatite by flotation is being investigated.

I — INTRODUÇÃO

O distrito magmático alcalino de Jacupiranga constitui ocorrência brasileira clássica de rochas alcalinas e ultrabásicas. Mencionado pela primeira vez por Bauer (1877) como jazida de minério de ferro, tornou-se conhecido através da descrição de Derby (1891), que propôs o termo jacupiranguito para as rochas alcalinas piroxeníticas aí ocorrentes. Na mesma época, Hussak (1892, 1895, 1904) publicou descrições de minerais associados ao minério de ferro.

Numerosas referências a Jacupiranga são encontradas na literatura especializada e de acordo com as preferências dos diversos autores e as tendências de cada época, o distrito foi citado como exemplo das mais variadas teorias petrogenéticas, principalmente da hipótese de Daly e Shand. Entretanto, a região nunca foi objeto de investigação realmente minuciosa.

Por várias razões justifica-se um reexame e a descrição detalhada do carbonatito de Jacupiranga. Sob ponto de vista petrológico, as concepções sobre a gênese de rochas carbonáticas associadas a alcalinas evoluíram consideravelmente nos últimos anos. Numerosos estudos tendem a demonstrar o caráter magmático desses carbonatos, porém muitas de suas feições ainda permanecem sem explicação satisfatória. A descrição da localidade em questão visa contribuir para o acúmulo de observações necessárias à elaboração de hipóteses petrogenéticas, embora o estado atual de nossos conhecimentos sobre a evolução dos magmas alcalinos ainda não permite a formulação de interpretações definitivas.

Sob ponto de vista industrial e econômico, um levantamento exato do carbonatito e dos minerais a ele associados é essencial. A interpretação correta da origem dos fosfatos residuais permite sua pesquisa e lavra racionais. Além disso, ocorre vultosa reserva de carbonato de cálcio, fosfatos, óxi-

dos de ferro e de titânio. O aproveitamento dessas matérias primas depende de sua caracterização geológica e mineralógica, tanto para a comprovação de tonelagens exploráveis, como para o desenvolvimento de processos tecnológicos de concentração.

No presente trabalho são apresentadas as observações que pareceram de maior interesse geológico e econômico. Durante vários anos o autor teve oportunidade de realizar numerosas visitas à jazida de Jacupiranga e acompanhar o seu desenvolvimento. Recentemente, a lavra do minério residual e eluvial permitiu observações mais detalhadas do calcário não intemperizado, revelando sua extensão e riqueza em apatita. Pareceu então justificado sugerir à **Serrana Sociedade Anônima de Mineração**, concessionária do depósito, uma pesquisa preliminar da massa de carbonatito.

Esse trabalho vem sendo executado de acôrdo com as recomendações do autor e consta de um levantamento a prancheta em escala 1:500 com intervalo de 1 metro entre curvas de nível, coleta de aproximadamente 400 amostras na superfície do carbonatito, abertura de galerias de pesquisa e sondagens. Muitas centenas de análises químicas permitem a determinação exata dos teôres dos principais elementos constituintes. Para os estudos mineralógicos foi examinada uma centena de lâminas delgadas e o resíduo insolúvel de 200 amostras de calcário. A granulação e a textura da rocha foi observada em algumas dezenas de amostras coloridas diferencialmente. Numerosos ensaios de cominuição, determinação dos teôres nas frações granulométricas, de separação magnética e por líquidos pesados foram ainda realizados para a obtenção de elementos necessários aos estudos sôbre processos de concentração industrial da apatita.

Embora a pesquisa ainda não esteja concluída, seus resultados parciais são promissores. Verificou-se a existência de concentrações de apatita com dimensões de muitas dezenas de metros e teôres acima de 15% de fosfato. Comprovou-se ainda grande tonelagem de calcário praticamente isento de sílica, com teor de magnésia inferior a 1.5%. Simultânea-

mente as informações obtidas através dessa pesquisa permitem a caracterização da constituição química e litológica do carbonatito com precisão provavelmente superior à de qualquer ocorrência congênere.

AGRADECIMENTOS — A elaboração desta tese somente foi possível graças à colaboração de numerosas pessoas e entidades. A seu orientador, Prof. Dr. Viktor Leinz, o autor deve o estímulo para o início deste trabalho e valiosas críticas e sugestões durante sua realização. A Diretoria da Serana S. A. de Mineração, representada pelo sr. Ernesto E. M. F. Bunge demonstrou invulgar espírito de cooperação, desde a fase dos estudos em que ainda não era possível prever quaisquer resultados econômicos, pondo à disposição do autor tôdas as facilidades de suas instalações em Jacupiranga e de seu laboratório químico em Utinga. Em muitas ocasiões, o autor teve oportunidade de discutir problemas relacionados à jazida com os engenheiros Alfredo Federico Aufranc, Pierre Geisweiller, Paulo Abib Andery, Darcy Germani e José do Valle Nogueira Filho, recebendo dêles a melhor colaboração nos trabalhos de pesquisa. O Dr. José Moacyr V. Coutinho muito nos auxiliou com determinações ópticas de minerais e aos colegas do Departamento de Mineralogia devemos identificações por meio de roentgenogramas. A Companhia de Desenvolvimento de Indústrias Mineraias forneceu análises dos minerais raros, executados nos laboratórios da Union Carbide Corporation.

A obtenção das informações contidas nesta tese exigiu considerável volume de trabalhos de campo e no laboratório, incluindo a confecção de mapa topográfico detalhado, levantamento geológico, coleta e preparação de mais de 400 amostras de carbonatito. Grande parte dessas tarefas foi executada sob a orientação do autor pelos ex-alunos do Curso de Geologia da Universidade de São Paulo, C. Weyler, H. Born, J. S. Bettencourt, B. W. Ramos, C. H. G. Azuaga, O. Utsumi, R. Porto e K. Fusikawa.

A tôdas as pessoas e entidades mencionadas, o autor apresenta seus mais sinceros agradecimentos.

II — SITUAÇÃO GEOGRÁFICA

O carbonatito de Jacupiranga situa-se no centro sul do distrito de rochas alcalinas, 3 km ao norte da vila de Cajati, sede do acampamento e da usina de beneficiamento de minério da Companhia Serrana de Mineração S. A., 12 km a oeste da cidade de Jacupiranga. Cajati dista 220 km de São Paulo pela nova rodovia federal São Paulo-Curitiba (BR-2).

O morro da Mina, constituído em sua parte superior pelos carbonatitos, eleva-se 220 m acima do nível do mar e 180 m acima do nível de base local, representado pelo vale do córrego Areia Preta, afluente à margem esquerda do rio Jacupiranguinha. As coordenadas da ocorrência são: 48° 09' Long. W.; 24° 42' Lat. S.

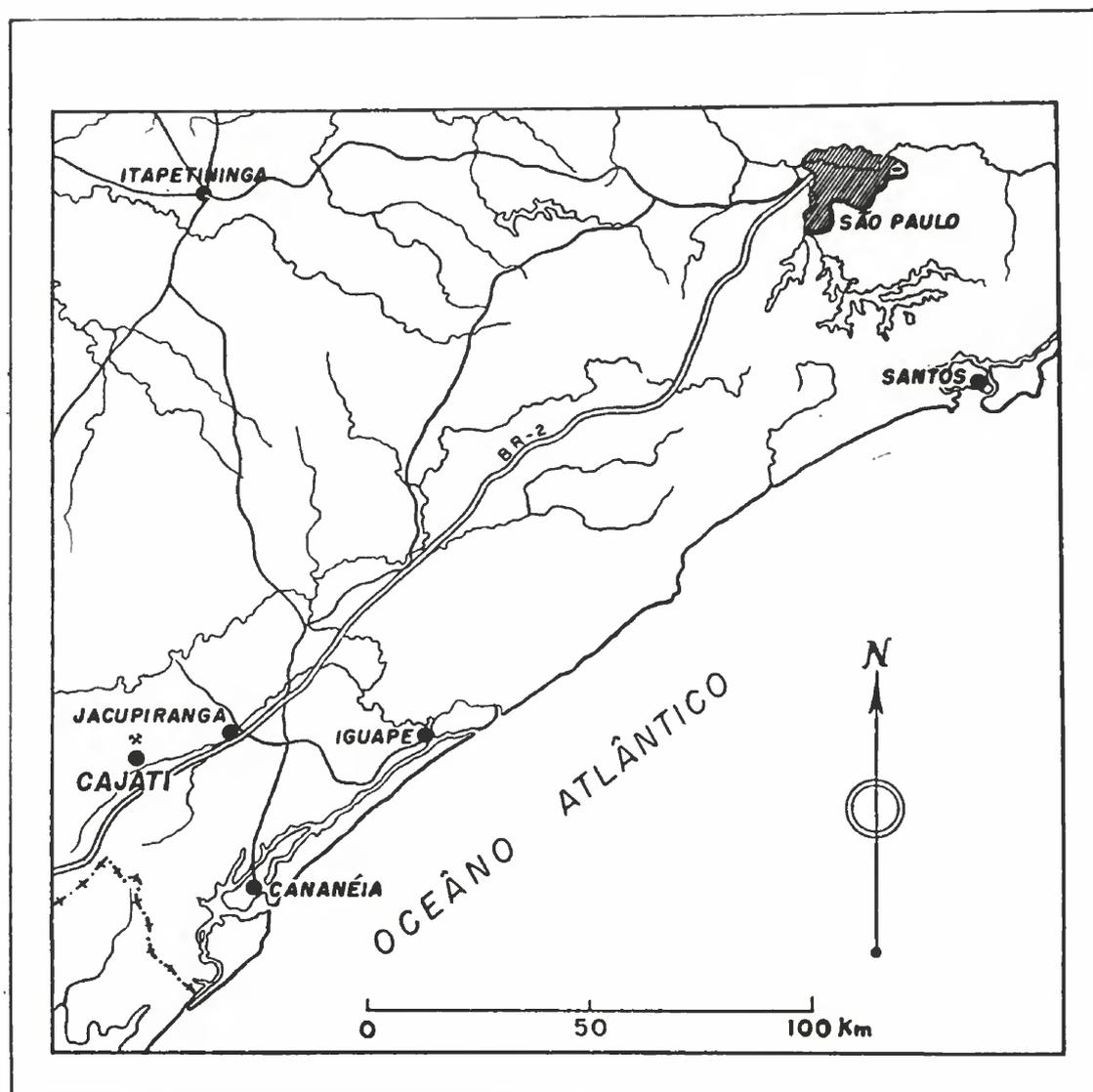


Fig. 1 — Localização da ocorrência de carbonatito de Jacupiranga.

III — HISTÓRICO

Os primeiros estudos mineralógicos na área alcalina de Jacupiranga são de Hussak (1892, 1895, 1904), que examinou os minerais pesados do solo residual na zona de contacto entre jacupiranguitos e calcários do morro da Mina. Em seu primeiro trabalho, êsse autor (1892) identificou apatita, magnetita, perovskita, ilmenita, hidrobiotita, espinélio e um mineral novo, para o qual propôs o nome brazilita, admitindo ser um tântalo-niobato monoclínico. Posteriormente, obtendo análise química, Hussak (1895) verificou tratar-se de baddeleyita e descreveu detalhadamente êste mineral, retirando o nome brazilita. Na mesma ocasião reexaminou ainda o mineral anteriormente identificado como espinélio, concluindo tratar-se provavelmente de um mineral novo contendo zircônio. Além disso, o novo estudo dos solos residuais do jacupiranguito conduziu à identificação de octaédros de microlita e de raríssimos cristais de zircão e de granada. O minério de ferro de Jacupiranga também foi examinado por Hussak (1904), que descreveu os intercrescimentos lamelares de magnetita e ilmenita, e no resíduo insolúvel reconheceu octaédros de espinélio, um mineral do grupo do pirocloro, perovskita, baddeleyita, anatósio e biotita. Derby (1891) descreveu o distrito e propôs o termo jacupiranguito para as rochas ricas em titanoaugita, com magnetita, biotita, nefelina e olivina como acessórios em quantidade variável. Examinando o calcário do morro da Mina, que admitiu ser de idade cambriana duvidosa, êsse autor atribuiu sua constituição peculiar a metamorfismo de contacto com as rochas alcalinas encaixantes. Knecht (1934, 1939, 1940) referiu-se novamente à ocorrência e em 1948 publicou breve descrição do calcário do morro da Mina. Na época, as concentrações de apatita encontradas próximo ao contacto com os jacupiranguitos foram consideradas como produto de reação do magma alcalino rico em voláteis com os calcários metamórficos. O presente autor reexaminou a jazida de apatita em 1953, concluindo por sua origem residual e sugerindo a origem magmática dos carbonatitos como hipótese de trabalho (Melcher, 1954).

IV — NOMENCLATURA

A maioria dos nomes de rochas constituídas predominantemente por carbonatos de origem não sedimentar ou biogênica foi introduzida por Brögger (1921) em seu clássico trabalho sobre o distrito de Fen na Noruega. A nomenclatura de Brögger foi depois revista por von Eckermann (1948) e as definições deste autor são hoje geralmente aceitas e aplicadas na maioria das descrições de carbonatitos. São também seguidas no presente trabalho.

O termo carbonatito ainda não foi definido de maneira satisfatória sob ponto de vista formal, por isso que na quase totalidade dos trabalhos a sua utilização implica em conceitos genéticos entre os quais, por sua vez, há divergências flagrantes entre os diversos autores.

A composição química e mineralógica dos chamados carbonatitos em muitos casos não é suficientemente característica para permitir sua distinção rigorosa de calcários metamórficos, e mesmo quando ocorrem os acessórios típicos das rochas carbonáticas associadas a ígneas alcalinas (apatita, magnetita, flo-gopita, olivina, aegirina-augita, baddeleyita, pirocloro, monazita, etc.), sua quantidade é extremamente variável, não se sabendo ainda quais e em que parte são constituintes originais ou foram introduzidos metassomàticamente.

Assim sendo, encontra-se na literatura geológica o caso singular de um nome atualmente utilizado em tôdas descrições, sem poder-se precisar por definição se a rocha é ígnea, sedimentar, metamórfica ou metassomática e, por outro lado, sem característicos mineralógicos ou texturais que a distingam de mármore, afetados ou não por metassomatismo.

No estado atual dos conhecimentos e do uso corrente, parece mais adequado aplicar o nome carbonatito de maneira genérica a rochas que satisfaçam a algumas, porém não necessariamente a tôdas, das seguintes condições: predominância de carbonatos, textura sacaróide, ausência de verdadeira estratificação, minerais acessórios característicos (apatita, magnetita,

olivina, pirita, flogopita, monazita, pirocloro, columbita, baddeleyita, fluorita), associação de campo e genética a rochas alcalinas.

A subdivisão dos carbonatitos baseia-se nas proporções relativas de carbonatos de cálcio e de magnésio e em seu modo de ocorrência no campo. Sövitos são carbonatitos ricos em CaCO_3 , com baixo teor de MgO , ocorrendo em massas com formas semelhantes a "stocks" ou "plugs". Alviqritos são os correspondentes hipoabissais dos sövitos, com composição análoga, porém ocorrendo em diques. Quando é mais elevado o teor em magnésio, as rochas intrusivas são denominadas rauhaugito e as hipoabissais beforsito.

Ainda não existem limites de composição quantitativos para distinguir entre êsses termos e sua aplicação não têm sido rigorosa. Assim, por exemplo, Von Eckermann (1948) propõe que sejam designados como carbonatitos apenas as rochas com mais de 50% de carbonatos, porém em suas descrições classifica como sövitos ou beforsitos muitas amostras com apenas 30-40% CaCO_3 . Também a distinção entre sövitos e rauhaugitos não é rigorosa, admitindo-se que êstes devem conter mais de 5-6% de MgO .

Uma rocha peculiar, descrita em Fen (Brögger, 1921), é o "rödberg", constituído por calcita de granulação fina e colorida de vermelho por hematita finamente dispersa no carbonato. Outros nomes, como kaesinito, holaíto e ringito, têm sido empregados localmente para designar carbonatitos ricos em nefelina, piroxênio ou olivina, respectivamente, porém foram depois abandonados.

Brögger introduziu ainda o termo fenito, hoje universalmente usado. Segundo a definição original, os fenitos são rochas alteradas por metassomatismo devido a intrusão alcalina, contendo no mínimo 52% de sílica e até 25% de aegirinaugito. Tveitositos seriam os equivalentes mais básicos. Von Eckermann (1948) e todos autores subseqüentes abandonaram o nome tveitosito, incluindo essas rochas entre os fenitos.

V — GEOLOGIA

Rochas alcalinas encaixantes. O carbonatito de Jacupiranga situa-se pouco ao sul do centro do distrito alcalino de mesmo nome, que ocupa área ovalada com diâmetros de 7 km e 10 km, respectivamente (figura 2). As principais rochas alcalinas dessa região já foram descritas resumidamente pelo autor do presente trabalho (Melcher, 1954).

Verifica-se portanto que os calcários são circundados exclusivamente por jacupiranguitos, o que constitui exceção, uma vez que nas outras localidades descritas na literatura os carbonatitos geralmente estão associados a grande variedade de rochas alcalinas intermediaárias e leucocráticas, inclusive tufos, aglomerados e outros piroclastos.

Os jacupiranguitos que ocorrem nas fraldas do morro da Mina, junto ao contacto com o carbonatito, foram descritos pela primeira vez por Derby (1891), que propôs esse nome para as rochas ígneas alcalinas constituídas essencialmente por titanio-augita, magnetita, nefelina e biotita. A posterior ampliação dessa definição dos jacupiranguitos por outros autores e a conveniência de manter o conceito original com limitações quantitativas já foram discutidas (Melcher, 1954).

Nas vizinhanças do morro da Mina os jacupiranguitos estão quase sempre profundamente decompostos, faltando afloramentos de rocha fresca. Os blocos mais resistentes encontrados são sempre excepcionalmente ricos em magnetita e provavelmente não representam a composição média do corpo ígneo. Uma das características dessa rocha nas proximidades do contacto com os carbonatitos é a orientação planar de seus constituintes, que ressalta especialmente quando ela está em parte intemperizada. Provavelmente por essa razão, jacupiranguitos têm sido confundidos com xistos em descrições anteriores. Nos poucos pontos em que essa orientação pôde ser medida, sua direção é aproximadamente concordante ao contacto, com mergulhos que dêle se afastam.

Morfologia. Os carbonatitos afloram numa faixa alongada na direção norte-sul em extensão de 1.000 m e com largura

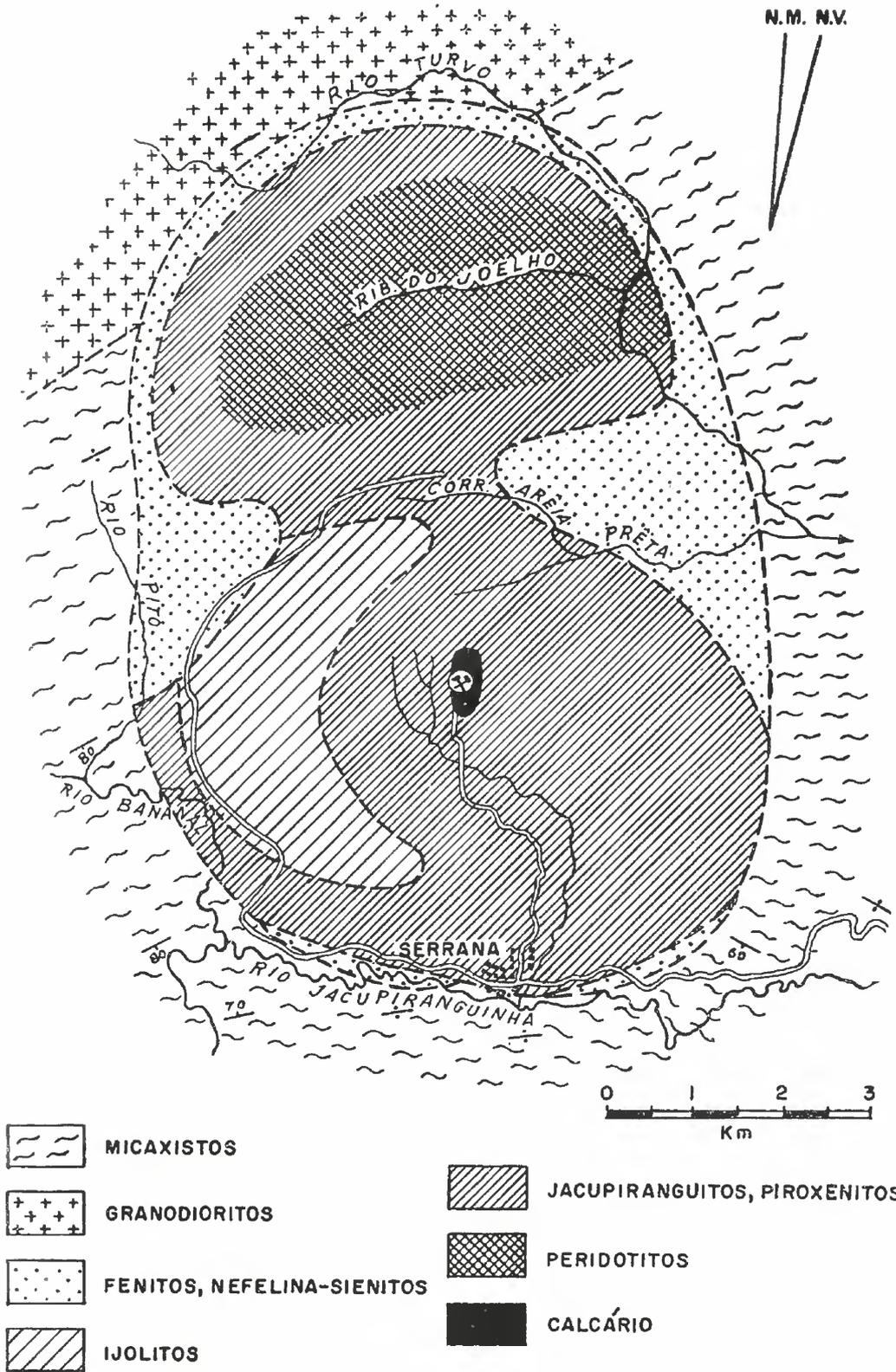


Fig. 2 — Mapa geológico esquemático do distrito alcalino de Jacupiranga (Melcher, 1954).

máxima de 400 m (fig. 3). Muito provavelmente os contornos atuais na superfície de erosão não correspondem à verdadeira forma da massa de carbonatos em secção horizontal, por exemplo ao nível da base do morro da Mina. Nota-se que na extremidade sul, onde a ocorrência se alarga e parece penetrar nos jacupiranguitos, as cotas do contacto são da ordem de apenas 70 m. Na zona central, onde a faixa é mais estreita, os jacupiranguitos alcançam nos contactos cotas de 150 m e 190 m a oeste e a leste, respectivamente. Conclui-se que com certa probabilidade o corpo carbonatítico possuía forma cônica com base ovalada, de diâmetro transversal muito superior ao atualmente exposto (fig. 4).

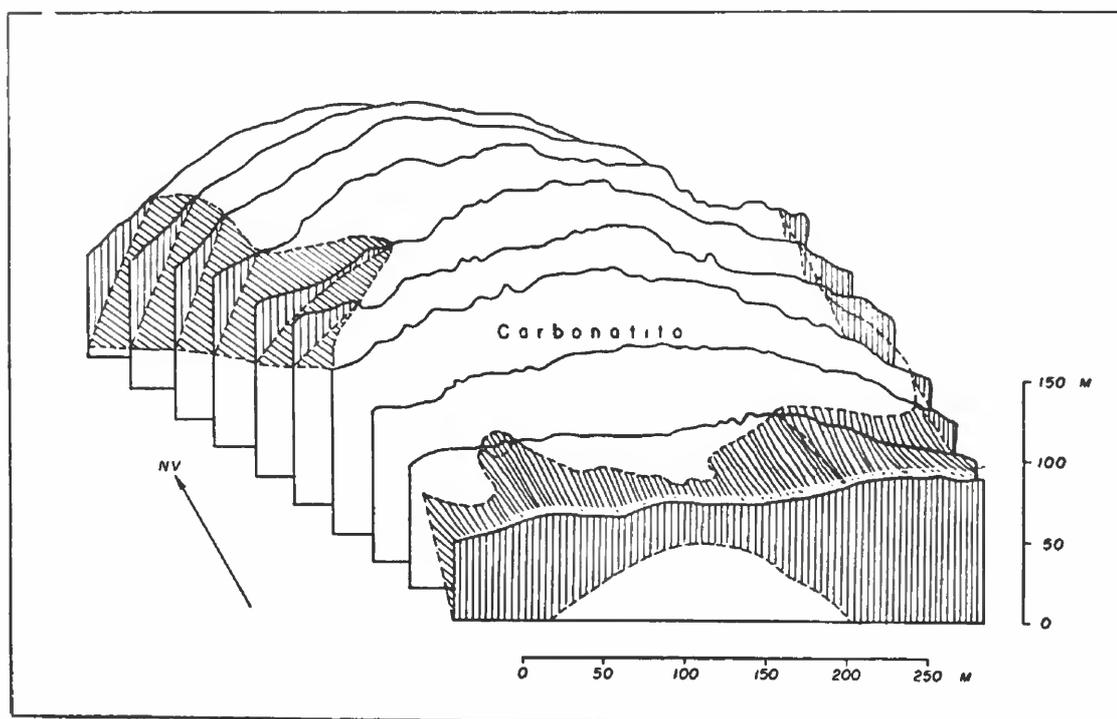
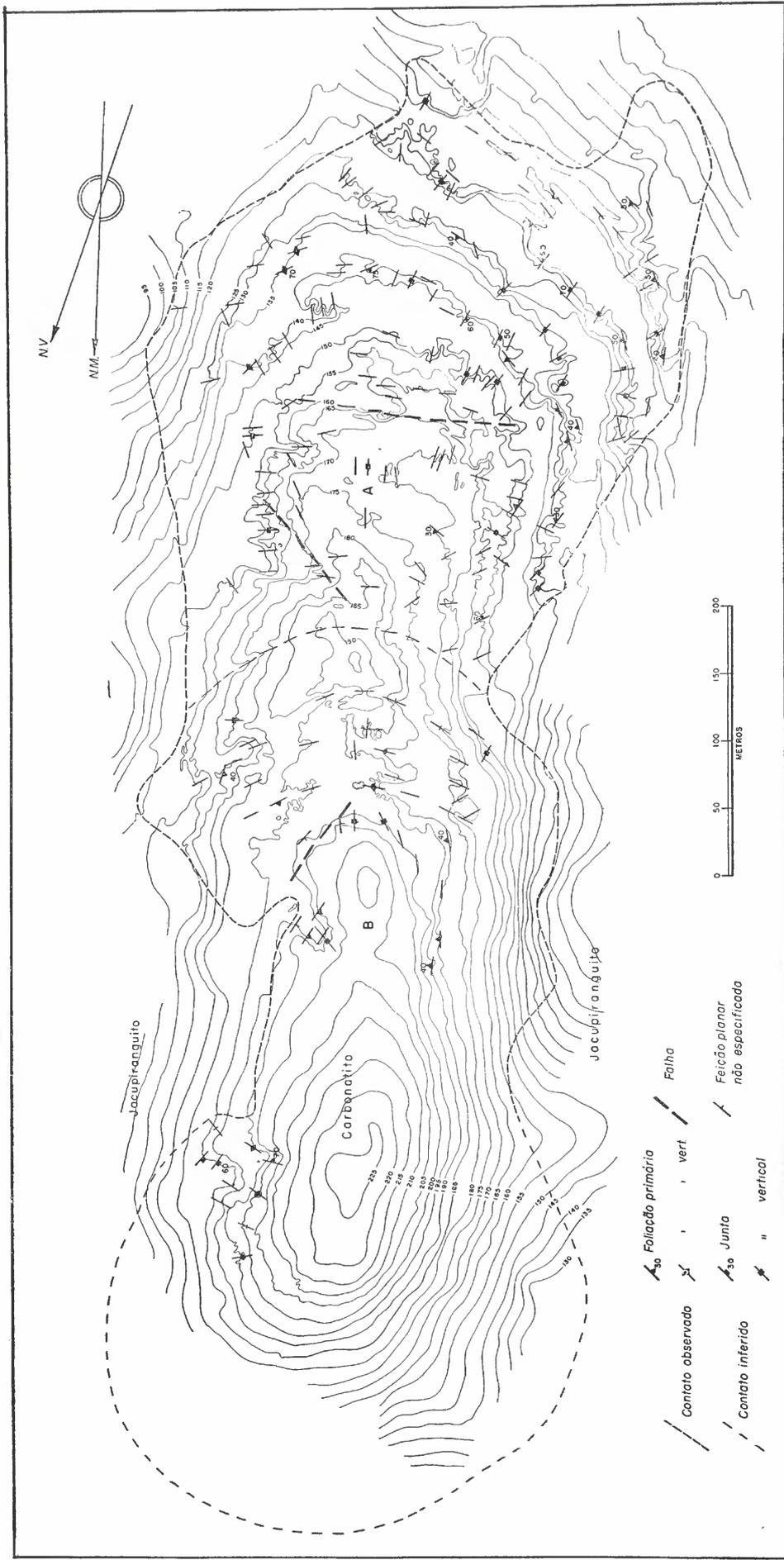


Fig. 4 — Bloco-diagrama do morro da Mina.

O tópo do morro da Mina é constituído exclusivamente pelos carbonatitos. Embora os carbonatos sejam mais solúveis do que os piroxênios e a magnetita das rochas alcalinas básicas, a ação conjunta de intemperismo químico e erosão física tem efeitos maiores sobre estas do que sobre os carbonatitos. Mesmo um intemperismo incipiente, que afeta apenas os contactos entre os minerais do jacupiranguito até profun-



didade de algumas dezenas de metros, já torna a rocha muito friável e facilmente removível pelos agentes físicos. Ao contrário disso, os carbonatos são simplesmente dissolvidos na superfície, encontrando-se rocha sem indícios de alteração a poucos centímetros de profundidade. Acresce que o resíduo de apatita e magnetita resultante da lixiviação do carbonatito tem densidade maior e granulação mais grosseira do que as finíssimas argilas produzidas pelo intemperismo dos jacupiranguitos, que por isso são mais facilmente removidas.

As formas de superfície do carbonatito abaixo do manto residual de minério apatítico, resultantes de lixiviação diferencial, têm especial interesse, tanto geológico quanto econômico, uma vez que condicionaram a acumulação e a retenção das massas maiores de minério eluvial de apatita. Na parte elevada do morro, a superfície é relativamente pouco acidentada, sendo cortada apenas por fendas subverticais, com profundidades que podem atingir duas dezenas de metros e cuja orientação predominante é concêntrica em relação ao pico do morro. Nas encostas, observam-se em quase tôdas as exposições, séries de prismas de carbonatito, justapostos e alinhados também de maneira grosseiramente concêntrica, estando separados entre si por fendas com disposição radial (fotografias 1 e 2, figura 3).

Contactos. Na parte sul e central do carbonatito, os seus contactos puderam ser localizados no campo com precisão de poucos metros (fig. 3). Na extremidade norte, a superfície ainda está coberta por manto de solo residual, porém os resultados das sondagens a trado realizadas para a pesquisa do minério de apatita e o tipo de solo permitem inferir a linha divisória com erros que não devem ultrapassar 30 m. Nas frentes de trabalho em que as operações de mineração puseram a descoberto os contactos, o jacupiranguito está sempre parcialmente alterado, mostrando porém aspecto idêntico ao de pontos mais afastados, com exceção da orientação planar acima referida. Por sua vez, o carbonatito também não apresenta qualquer indício de metamorfismo de contacto, sendo sua textura



Fotografia 1 -- Vista da parte sudoeste do morro da Mina. Nas bancadas de lavra do minério observam-se as juntas radiais lixiviadas no carbonatito, ainda parcialmente preenchidas e recobertas pelo minério residual. A linha tracejada assinala parte do contacto com os jacupirangitos, situados na parte inferior da encosta.



Fotografia 2 — Frente de desmonte de minério residual de apatita. Notam-se as juntas radiais subparalelas, alargadas por dissolução e preenchidas por minério de apatita.

e composição mineralógica sempre muito semelhantes às observadas no centro do corpo de carbonatos. Em estudos anteriores (Derby, 1891; Knecht, 1948), admitiu-se metamorfismo e metassomatismo de contacto dos calcários pré-existentes por ação do magma alcalino básico, do que teria resultado enriquecimento local de magnetita e apatita. Entretanto, as observações agora possíveis e os resultados da amostragem do carbonatito não intemperizado (vide capítulo IX), demonstram não haver concentrações substanciais desses minerais junto aos contactos.

Xenólitos. No interior da área calcária foram observados vários xenólitos de formas arredondadas, com diâmetros de um a dez metros. Enquanto nas inclusões maiores as observações nas exposições talhadas pela erosão não permitem afirmar com segurança absoluta tratar-se de xenólitos sem comunicação com qualquer conduto magmático, existem blocos menores que sem dúvida estavam inteiramente envolvidos pelos carbonatitos. Esses blocos estão sempre bastante decompostos, porém os restos de titano-augita e os grãos de magnetita ainda reconhecíveis mostram serem constituídos por jacupiranguito idêntico à encaixante dos carbonatitos.

Na maioria dos carbonatitos descritos na literatura encontram-se numerosos xenólitos de rochas alcalinas que apresentam evidências de corrosão ou assimilação parcial pelos carbonatitos (Davies, 1956; Williams, 1952). Em alguns casos têm sido observadas texturas fluidais nos carbonatitos envolventes (Garson, 1955). Geralmente esses xenólitos são constituídos por diversos tipos de rochas encontradas entre as encaixantes alcalinas dos carbonatitos.

Em Jacupiranga, a uniformidade da composição dos xenólitos é explicada pelo fato de ocorrerem apenas jacupiranguitos em toda a periferia da intrusão de carbonatos.

Diques. A ocorrência de numerosos diques ou veios constituídos por carbonatos, apatita e magnetita, cortando os próprios carbonatitos, é uma das feições mais interessantes, porém de mais difícil observação, da localidade em estudo. Na

maioria dos casos êsses diques não podem ser distinguidos nos afloramentos de rocha viva e apenas ressaltam por efeito de lixiviação seletiva, quando possuem solubilidade menor do que suas encaixantes. Por outro lado, parece certo que muitas das fendas abertas por lixiviação diferencial correspondem a diques mais solúveis, ou cujos contactos com as paredes favoreceram a penetração de água. Acresce ainda que o próprio carbonatito tem composição muito variável e localmente exhibe estruturas que parecem fluidais, com arranjo planar de seus componentes e segregações tabulares ou lenticulares de apatita. As razões acima e a escassez de afloramentos extensos com superfícies regulares, explicam porque os diques de carbonatito passaram despercebidos durante anos. Uma vez identificados, sua existência torna-se óbvia para o observador. Entretanto, ainda não foi feita nenhuma tentativa de mapeá-los sistematicamente.

Na extremidade sudoeste da ocorrência foram observados vários diques aproximadamente verticais, de direção N20°E, com espessuras de até um metro. Distinguem-se de suas encaixantes por possuírem granulação mais fina e pela quase total ausência de flogopita e magnetita, que constituem acessórios abundantes nos carbonatitos das paredes. Junto à entrada da galeria de pesquisa da cota 86 ocorre dique vertical, com espessura de 1.0 m, também quase isento de minerais fêmicos. Diques ou veios perfeitamente tabulares, com possanças de 0.2 m a 0.6 m, constituídos quase exclusivamente por apatita, podem ser observados em alguns pontos em extensão de uma dezena de metros e localmente têm sido lavrados na sua parte superficial.

Williams (1952) refere-se a numerosos diques concêntricos em Tororo, onde constituem um dos aspectos mais conspícuos do carbonatito. Nessa ocorrência possuem espessuras desde fração de centímetro até 30 cm e estrutura fluidal lamelar. Von Eckermann (1958) descreveu os diques carbonatíticos e alcalinos de Alnö, comprovando sua forma cônica e concluindo que os alviquitos emanaram de um centro de ex-

plosão situado 2 km abaixo da superfície, enquanto o foco dos beforritos estava a 6.5 km de profundidade. Em tôdas as localidades referidas na literatura, os diques possuem composição muito variável, quase sempre contendo proporções relativamente elevadas de feldspatos, biotita, piroxênios e olivina.

Nos diques carbonatíticos observados em Jacupiranga não parecem ocorrer minerais diferentes dos observados no corpo de carbonatito, variando apenas as proporções dos principais minerais: carbonatos, apatita e magnetita. Uma possível explicação para essa monotonia de constituição mineralógica é a extensão, uniformidade e baixa reatividade dos jacupiranguitos nos arredores do carbonatito.

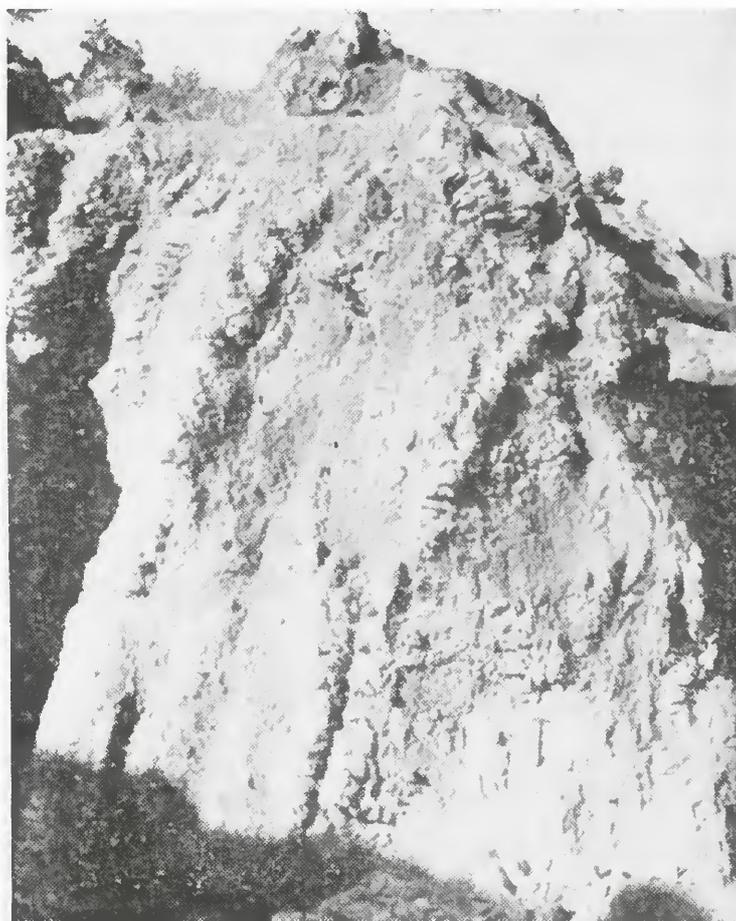
Estruturas. Os elementos estruturais do carbonatito são juntas, falhas, diques e a orientação fluidal. Os grandes traços geométricos da estrutura da intrusão carbonatítica são facilmente reconhecíveis através da própria topografia (fig. 3) que nesse tipo de rocha reflete e de certo modo amplia os efeitos de pequenas variações litológicas ou descontinuidades físicas. Entretanto, em detalhe, a identificação dos acidentes geológicos que deram motivo à lixiviação diferencial segundo determinadas direções nem sempre é possível. As diferenças de composição mineral e de textura entre as diversas variedades de carbonatito são pequenas e muitas vêzes apenas determináveis através de análises químicas. Além disso, podem estar completamente obliteradas por variações primárias de composição, resultantes de segregação.

Ocorrem pelo menos três falhas, porém seu rejeito é desconhecido. Numerosíssimas juntas cortam o carbonatito e certamente constituem a feição estrutural mais notável. Na figura 3 as juntas mais evidentes e extensas foram assinaladas. Seus mergulhos são próximos da vertical na maioria dos casos, porém raramente podem ser medidos com precisão porque na superfície elas estão sempre alargadas pela dissolução das paredes e ainda parcialmente preenchidas por minerais detríticos (fotografias 1 e 2). Observa-se nitidamente um siste-

ma concêntrico e outro radial, tendo ambos como centro aproximado o pico do morro da Mina.

A orientação dos minerais acessórios do carbonatito segundo faixas ou planos definidos é visível em muitos afloramentos e foi assinalada na figura 3.

As estruturas de diversos carbonatitos africanos foram investigadas nos últimos anos (Williams, 1952; Garson, 1955; Davies, 1956). Os referidos autores observaram estruturas anelares, cônicas e em colar (collar structure), admitindo resultarem da intrusão sucessiva de diques de carbonatito com forma cônica ou anelar cilíndrica, a partir de focos situados em profundidade nas chaminés condutoras dos carbonatos.



Fotografia 3 — Remanescente de carbonatito em frente de desmonte, mostrando a parede de uma junta lixiviada. Notam-se as faixas de solubilidade diferente com mergulho para o centro do Morro, correspondendo à estrutura cônica do carbonatito.

Em Jacupiranga os dados estruturais obtidos até o presente ainda não são suficientes para uma interpretação definitiva da estrutura. Entretanto, o arranjo radial e concêntrico das juntas e dos diques certamente é muito sugestivo de um corpo intrusivo. Dificilmente essas orientações poderiam ser interpretadas como resultantes de qualquer fenômeno puramente tectônico. As texturas fluidais, com direção tangencial e mergulhos para o interior da intrusão, indicam a existência de estruturas cônicas. A interrupção das orientações concêntricas pelos contactos com o jacupiranguito a este e a oeste da massa alongada de carbonatito permite inferir que esta possui conformação mais arredondada em secção horizontal. Essa hipótese é corroborada pela morfologia (vide página 18).

Examinando o mapa geológico (figura 3) e a distribuição dos teores dos principais elementos na superfície do carbonatito, o prof. Fernando F. M. de Almeida sugeriu tratar-se de duas intrusões carbonatíticas distintas, das quais uma ocupa a parte sul da área, com foco aproximado no ponto A (figura 3). Essa região é mais rica em CaO e Fe_2O_3 do que a intrusão ao norte, cujo centro localiza-se no ponto B e que se distingue por teores mais elevados de MgO.

Posteriormente, o presente autor teve oportunidade de reexaminar as estruturas no campo e de verificar a interpretação acima. Com toda probabilidade, trata-se realmente de duas intrusões. A primeira, mais calcítica e mais rica em apatita e magnetita ocupou a parte sul da área e foi depois cortada, em parte, pela segunda intrusão. Esta contém maior proporção de dolomita, porém menos acessórios. Em diversos pontos da provável zona de contacto observa-se carbonatito brechoide, parcialmente recimentado por carbonatitos secundários.

VI — PETROGRAFIA

O carbonatito de Jacupiranga é constituído essencialmente por carbonatos brancos de aspecto sacaróide e granulação média a grosseira. Macroscopicamente distingue-se dos calcários metamórficos do sul do estado de São Paulo pela ausên-

cia de quartzo e freqüência de cristais de magnetita, flogopita e olivina. A apatita geralmente não pode ser reconhecida a olho nu, salvo quando cristais de tamanho excepcional ressaltam de superfícies ligeiramente lixiviadas, ou quando forma agregados de muitos cristais pequenos em manchas verde claro. Próximo à superfície, a pirita encontra-se parcialmente oxidada, sendo então facilmente reconhecível pelas manchas marrons que tingem os carbonatos vizinhos. Via de regra, os minerais escuros, flogopita e olivina, concentram-se em faixas paralelas, alternadas com zonas constituídas essencialmente por



Fotografia 4 — Bloco de sövito com concentração de grandes cristais de forsterita (cinza) e alguns indivíduos de magnetita (preta).

carbonatos. Em outros afloramentos, concentrações de magnetita e olivina formam manchas de contornos irregulares em que não há qualquer orientação visível.

A subdivisão dos sövitos em variedades distintas, de acordo com a granulação, natureza e abundância dos acessórios, se-

ria possível, porém o significado geológico de uma classificação segundo esse critério, único possível, parece limitado. A distribuição das concentrações de magnetita ou olivina, por exemplo, é tão errática que mesmo sua localização exata através de um mapeamento dificilmente permitiria conclusões de ordem petrológica. Também os enriquecimentos de apatita, localizados pelas análises químicas, não definem qualquer tipo litológico característico. A única variedade que merece menção especial é o “rödberg”, rocha raríssima, descrita apenas em Fen (Saether, 1956) e constituída quase exclusivamente por calcita de granulação média (2-3 mm), contendo óxidos de ferro finamente dispersos no interior dos carbonatos. Na localidade norueguesa esse tipo de carbonatito possui radioatividade elevada, o que não se verifica em Jacupiranga.



Fotografia 5 — Estrutura fluidal de carbonatito excepcionalmente rico em forsterita (cinza).

A textura macroscópica do carbonatito, resultante das formas de associação dos carbonatos, somente é reconhecível me-



Fotografia 6 — Estrutura planar, provavelmente fluidal, de sôvito rico em magnetita (preta) e flogopita (cinza). À direita do martelo vê-se pequeno dique de carbonatito preenchendo falha, também exibindo textura fluidal.

diante coloração diferencial. Os vários métodos descritos na literatura foram experimentados, obtendo-se os melhores resultados com ataque por nitrato de prata, seguido de lavagem e reação com cromato de potássio. Dessa maneira a calcita adquire coloração vermelha, enquanto a dolomita permanece branca. As texturas observadas são curiosas e certamente diferentes das normais em calcários metamórficos. Em algumas amostras nota-se peculiar textura granular, semelhante à ofítica, em que a calcita ocupa o lugar do piroxênio e a dolomita, o dos plagioclásios (Foto 7). Frequentemente as ripas de dolomita apresentam-se ainda orientadas, produzindo aspecto de textura fluidal ou traquítica (Foto 8). Muito característicos são os agregados orientados de apatita, que podem formar bol-



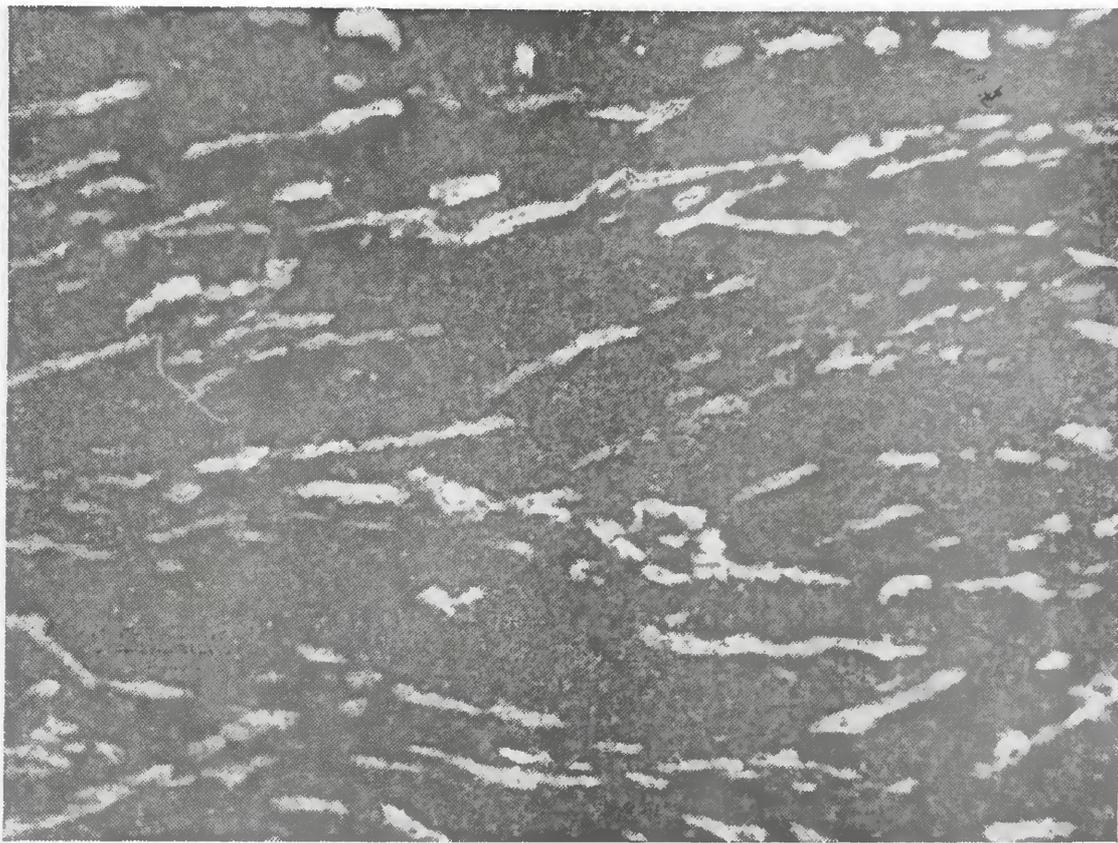
Fotografia 7 — Carbonatito colorido com nitrato de prata e cromato de potássio. Nota-se a textura ofítica (vide página 32). Calcita — preto, dolomita — branco. Aumento três vêzes..

sas ou “schlieren” com extensão de alguns metros e espessura de poucos decímetros.

Durante o presente trabalho foram identificados os seguintes minerais constituintes do carbonatito, em ordem aproximada de sua freqüência:

Calcita, Dolomita, Apatita, Magnetita, Forsterita, Serpentina, Clinohumita, Flogopita, Pirita, Pirrotita, Calcopirita, Calena, Ilmenita, Espinélio, Pirocloro, Baddeleyita, Barita, Perovskita e Quartzo.

Carbonatos. Calcita perfaz 34% a 91% da rocha. Apresenta-se em cristais xenomórficos com diâmetros de 1 a 5 mm, freqüentemente exibindo geminação polissintética. Eckermann (1948) já notou os indícios de deformação da calcita do cone

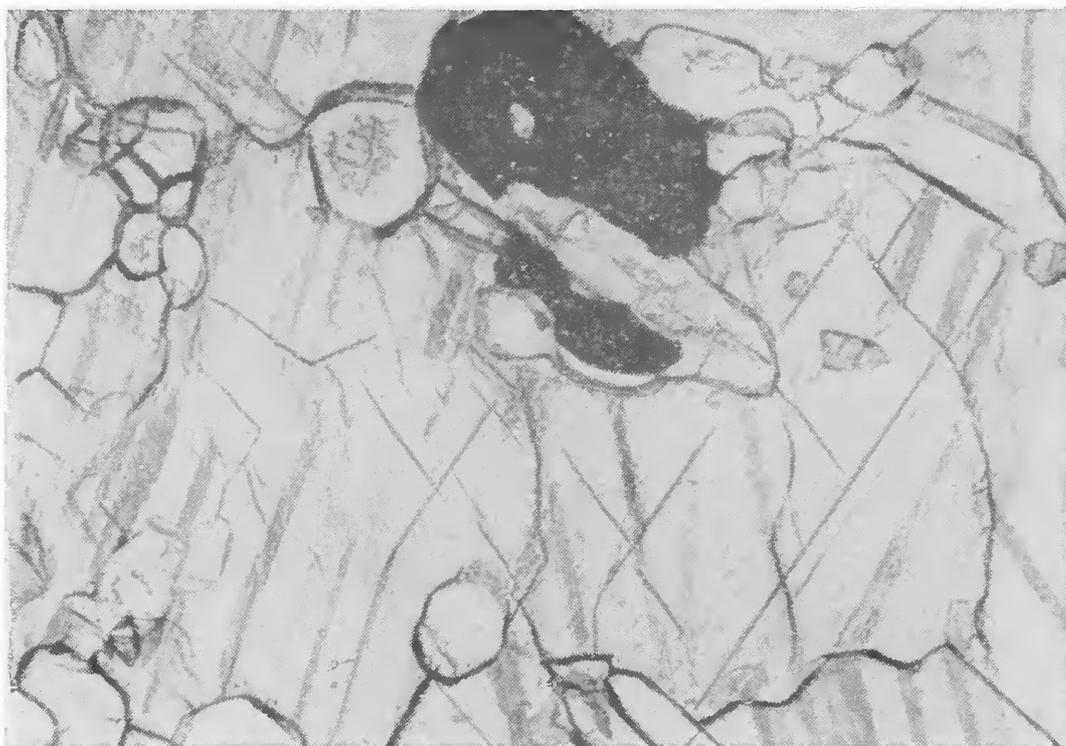


Fotografia 8 — Carbonatito colorido diferencialmente, exibindo textura fluidal (vide página 32). Calcita — preto, dolomita e alguns prismas de apatita — branco. Aumento cinco vezes.

central de Alnö. A remobilização parcial dos carbonatos é evidente, observando-se indivíduos com lamelas de geminação, cimentados por calcita homogênea. A dolomita ocorre geralmente em cristais idiomórficos alongados. Em algumas amostras os carbonatos exibem curiosos arranjos de pequenos canais subparalelos (foto 11). Provavelmente trata-se de dedolomitização.

Apatita. Constitui o acessório mais abundante e o mineral de maior importância econômica. Ocorre com dois hábitos distintos: 1 — Em pequenos cristais isolados de forma ovóide, com diâmetros entre 0.05 mm e 1 cm, inclusos em indivíduos de carbonato. Essa forma de apatita parece ser característica de carbonatitos e já foi notada em Tororo e Sukulu na Uganda por Davies (1956), sendo atribuída a reabsorção parcial; 2 — Em prismas idiomórficos com diâmetros

de 0.1 cm a 0.5 cm e comprimento que pode atingir 5 cm, ocorrendo sempre em agregados com orientação linear e geralmente associados à magnetita. Com certa frequência os prismas apresentam-se quebrados segundo o plano basal, ficando os fragmentos ligeiramente afastados e os interstícios cimen-



Fotografia 9 — Carbonatito com apatita e magnetita. Nota-se o ligeiro arredondamento dos cristais de apatita e pequenas inclusões Nícois descruzados, aumento 60 vêzes.

tados por calcita. A maior parte da apatita contida no carbonatito ocorre nessas segregações, que são muito friáveis. Por êsse motivo a análise modal de lâminas de rocha consistente invariavelmente acusa resultados muito inferiores aos obtidos através da análise química de amostras representativas.

As características físicas das duas variedades são idênticas. A maioria dos cristais é quase incolor; às vêzes mostram pálidas tonalidades amarelo citrino ou esverdeadas. Em amostras ligeiramente intemperizadas, a superfície dos grãos adquire coloração avermelhada ou marron, devida a revestimento com delgada película de óxidos de ferro. Em muitos cristais

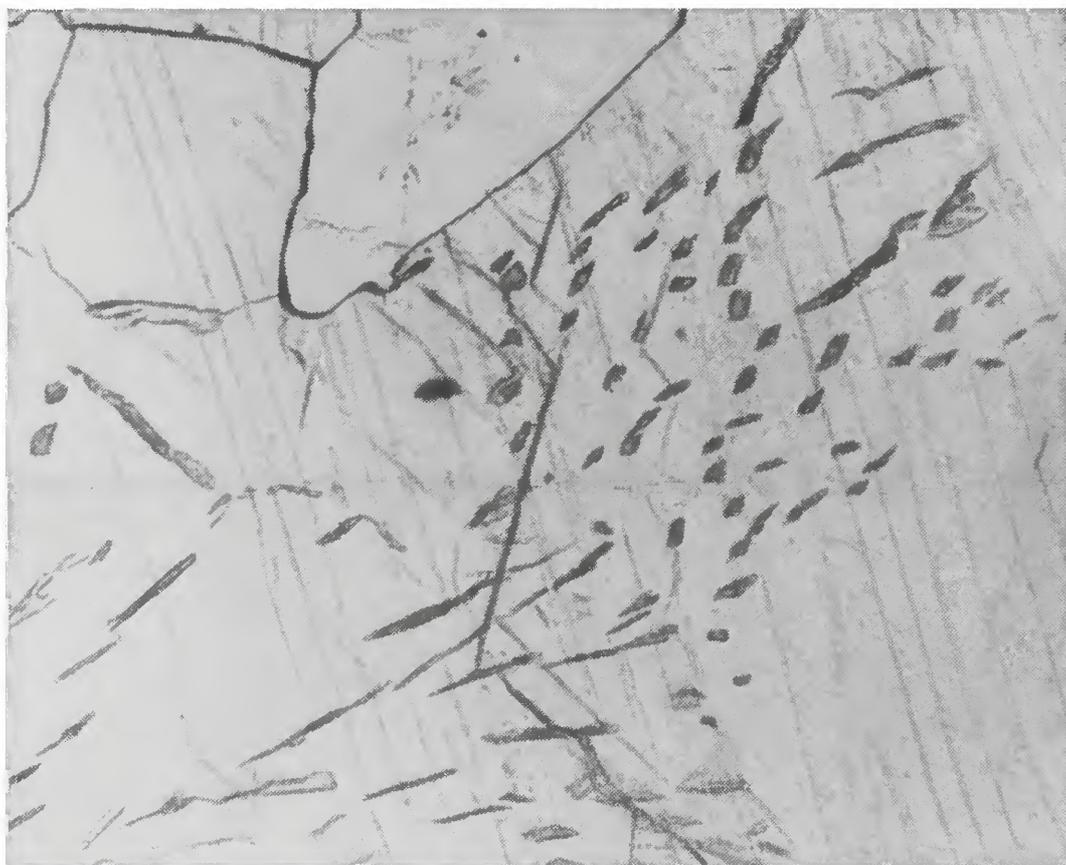


Fotografia 10 — Carbonatito com apatita em agregado de prismas paralelos. Nicois cruzados, aumento 20 vêzes.

ocorrem inclusões esféricas, líquidas ou gasosas. Os índices são $N_e = 1.635$ e $N_o = 1.638$. A densidade é 3.11. Uma análise química de concentrado puro, obtido por separação magnética, em líquidos pesados e lavagem em ácido clorídrico diluído, revelou 42.2% P_2O_5 e 55.3% CaO . Segundo Tröger (1952), os índices correspondem a cerca de 85% de fluorapatita, porém os dados ópticos não permitem precisar a proporção de hidroxilapatita e carbonatoapatita. A densidade observada, inferior a $d = 3.18$ da fluorapatita pura e a composição química indicam pequena contribuição de $Ca(OH)_2$.

Magnetita e ilmenita. A quase totalidade dos minerais opacos é constituída por óxidos de ferro e de titânio. A "titanomagnetita" ocorre em indivíduos com dimensões de 0.1 mm a 5 cm, situando-se cerca de 80% do material entre 0.2 e 4.0 mm. A maioria dos cristais tem formas irregulares, raramen-

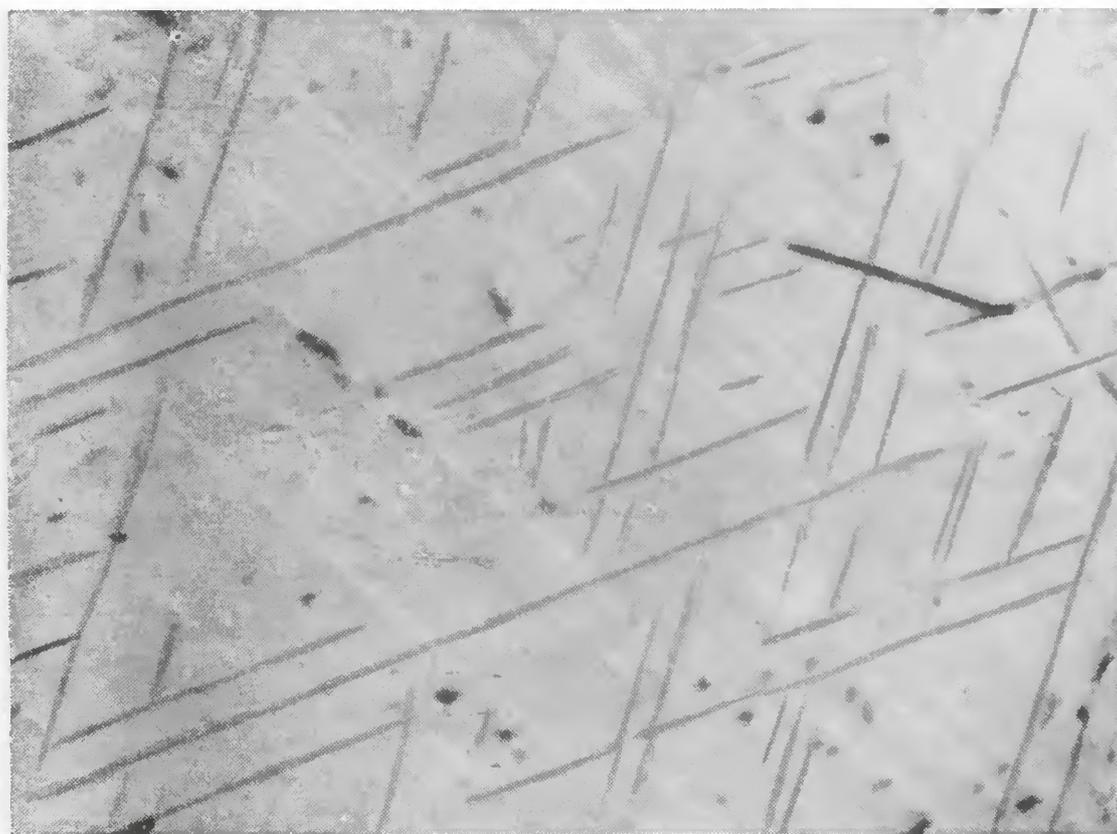
te distinguindo-se faces octaédricas. São comuns intercrescimentos com apatita, que se localiza na periferia dos grãos de magnetita, penetrando-os ocasionalmente ou ficando inteiramente envolvida. Inclusões de minúsculos octaédros de espinelio também são observados com certa frequência.



Fotografia 11 — Dedolomitização de carbonato. As pequenas manchas e linhas no interior dos cristais de calcita são vazias (vide página 34). Nícois paralelos, aumento 25 vezes.

Em secções polidas distinguem-se vários constituintes, sendo predominante a magnetita, em parte possivelmente substituída por maghemita (Fe_2O_3 , cúbico), em manchas com contornos irregulares e reconhecida por reflexos ligeiramente mais claros e azulados. A ilmenita ocorre em quase todos cristais de magnetita, em proporção que varia desde traços até cerca de 15%, não se observando qualquer relação sistemática entre teor em ilmenita e diâmetro ou qualquer outro caracte-

terístico da magnetita. Os intercrescimentos ocorrem sob duas formas: lamelas finíssimas de exsolução com espessuras entre 0.005 mm e 0.2 mm e comprimento de alguns milímetros, e grãos irregulares, em parte idiomórficos, em parte com contornos arredondados côncavos, indicando reabsorção. Pequena parte da ilmenita, especialmente quando se situa nos bordos dos grãos de magnetita, está transformada em leucoxênio. Raros grãos de um mineral não identificado, provavelmente ülvoespínélio (Fe_2TiO_4), formam minúsculos glóbulos arredondados sempre no contacto entre lamelas de exsolução e sua matriz.



Fotografia 12 — Magnetita com lamelas de exsolução de ilmenita orientadas segundo as direções cristalográficas da magnetita. Luz refletida, aumento 60 vêzes.

A análise de um concentrado magnético, recalculada para excluir a contaminação das inclusões de apatita, acusou a seguinte composição:

Fe ₂ O ₃	90.4%
MgO	1.8
Al ₂ O ₃	1.3
MnO ₂	0.7
CaO	0.4
TiO ₂	2.5
Insolúvel em HCl	2.3

Observa-se portanto contribuição relativamente elevada de MgO, Al₂O₃ e MnO₂. Enquanto a alumina provavelmente é devida aos espinélios, é possível que parte do magnésio e manganês ocorram na série isomórfica da ilmenita como geikielita (MgTiO₃) e pirofanita (MnTiO₃). Entretanto, a identificação destes minerais não é possível pelos meios comuns. Von Ecker-mann (1948) já notou a proporção elevada (cêrca de 15%) de outros espinélios na magnetita do carbonatito de Alnö. Também Russel, Hiemstra e Groeneveld (1954) publicam análise da magnetita de Palabora, que contém 2.5% MgO e 0.75% Al₂O₃, além de 0.55% V₂O₅.

Flogopita. Ocorre em cristais com dimensões de alguns milímetros, excepcionalmente até 1 cm, coloração verde claro a escuro. Uma peculiaridade dessa mica é a freqüência de indivíduos prismáticos alongados, em que a dimensão paralela a c pode atingir o dôbro do diâmetro do plano basal.

Os dados ópticos são os seguintes: $a = 1.573$, $\beta = 1.604$, $\gamma = 1.604$, $\gamma - a = 0.031$, $2V_x = 5 - 10^\circ$, pleocroísmo X — incolor, Y e Z — esverdeado claro. Segundo Tröger (1952) trata-se de mica intermediária entre flogopita e biotita, que pode ser classificada como flogopita por apresentar absorção de côr relativamente fraca.

Forsterita. Ocorre em indivíduos isolados com diâmetros de 2 mm a 5 cm, de contornos arredondados, às vêzes mostrando nitidamente reabsorção parcial. Os índices são $a = 1.639$, $\beta = 1.653$, $\gamma = 1.671$, com $\gamma - a = 0.032$ e $2V_z = 85^\circ$. Segundo Tröger (1952) êstes dados correspondem a forsterita Fo₉₈Fa₂. Um

diagrama de pó também apresentou as características típicas de forsterita.

Clinohumita. Associado à olivina é freqüente um mineral do grupo da humita em pequenos indivíduos (2-3 mm) geminados em lamelas ou por interpenetração. Apresenta cor amarelo avermelhada, com ligeiro pleocroísmo x — amarelo, y e z — incolor. Os índices são os seguintes:

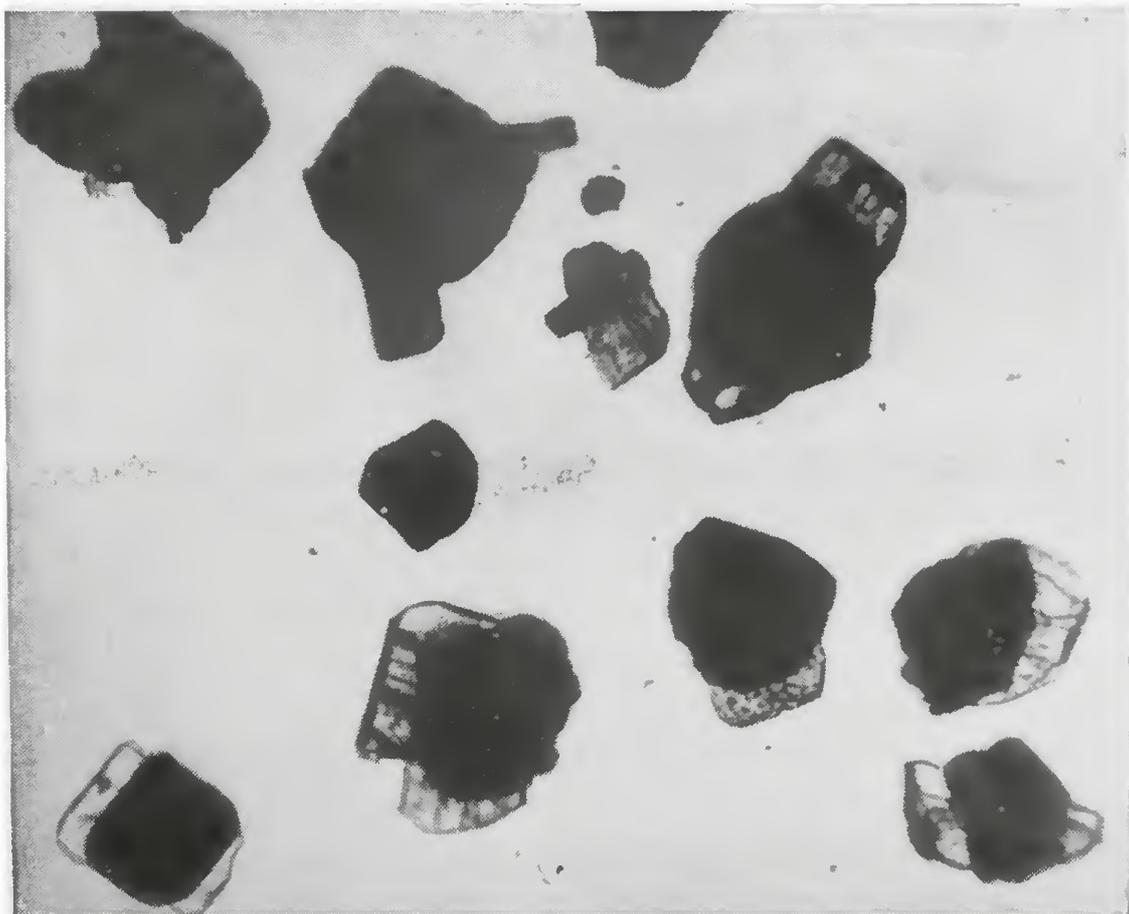
$a = 1.634$, $\beta = 1.646$, $\gamma = 1.664$, com $\gamma - a = 0.030$ e $2V_z = 60^\circ$. Trata-se portanto de clinohumita.

Sulfetos. O carbonatito contém pequena proporção de sulfetos, sempre associados à magnetita. A separação quantitativa não foi possível pelo método de lixiviação por ácido clorídrico empregado, porém em média seu total não deve ultrapassar 0,2% da rocha. Também análises químicas acusaram apenas traços de enxôfre, devido ainda em parte à barita. Os mais freqüentes são pirita e pirrotita, quase sempre parcialmente alteradas. Calcopirita pôde ser identificada em raríssimas amostras graças às pequenas manchas de malaquita resultantes de sua oxidação. Galena, em cubos característicos com arestas de 0.2 mm a 0.3 mm, foi notada em raros resíduos pesados. Constituinte subordinado é ainda um curioso sulfeto de ferro amarelo pardo, muito pouco solúvel em ácido clorídrico, que ocorre com hábito tabular em cristais de 0.5 a 1.0 mm. Seu diagrama de difração de raios X mostra estrutura semelhante, porém não idêntica, à da pirrotita. Um espectrograma de concentrado desse material, obtido a partir do resíduo insolúvel do carbonatito por separação magnética e líquidos pesados, acusou a presença de Fe, Mg, Ca, P, Al, Ba, Nb, Co, Mn, Pb, Si, Zr e U. Entretanto, parte desses elementos provavelmente é devida a contaminações de apatita, flogopita e olivina. A identificação segura do mineral em questão ainda exigirá estudos adicionais.

Pirocloro. Constitui acessório raro em pequenas áreas do carbonatito, que apresentam radioatividade ligeiramente superior à normal na região. Os indivíduos apresentam-se com for-

mas octaédricas e rombododecaédricas associadas, com diâmetros de 0.1 mm a 1.0 mm, de coloração marron escura a amarelo parda. Muitos cristais mostram pequenas cavidades prismáticas, provavelmente devidas a intercrescimentos com apatita que foi dissolvida durante a lixiviação. A análise de um concentrado parcial, contendo ainda algumas contaminações de apatita, flogopita, goethita e baddeleyita, revelou 11,2% Nb_2O_5 , 2,7% Ta_2O_5 , 0,5% TiO_2 e 0,5% ZrO_2 . Sendo a relação Nb:Ta = 3,5:1, trata-se portanto de um pirocloro tantalífero ou micro-lita, o que constitui fato singular, uma vez que o teor em tântalo de pirocloros associados a carbonatitos via de regra é muito baixo. A densidade do mineral é 4,8, aproximadamente, superior aos valores normais de 4,2 a 4,4 e provavelmente devida ao alto teor em tântalo ou à parcial transformação em columbita, como é freqüente em outras localidades congêneres. As amostras isoladas são metamictas, recristalizando quando aquecidas a 600°C durante um hora, obtendo-se então diagrama de raios X típico. Durante o aquecimento o mineral produz nítida termoluminescência alaranjada a vermelha, visível desde temperaturas de 250°C, aproximadamente. Após a recristalização adquire cor creme. Em muitos grãos podem ser observadas numerosas pequenas fraturas de contornos irregulares, provavelmente devidas à metamictização, o que torna êsses cristais muito frágeis e dificultaria sua liberação e concentração industrial.

Baddeleyita. A baddeleyita de Jucupiranga foi descoberta por Hussak (1892) que descreveu suas formas cristalográficas, admitindo porém ser um mineral de nióbio ou tântalo para o qual propôs o nome brazilita. Posteriormente êsse autor recebeu análise química que mostrou tratar-se de óxido de zircônio, que no entretempo tinha sido descrito como baddeleyta. No carbonatito ocorre quase invariavelmente associada ao pirocloro, formando curiosos tipos de intercrescimento, em que placas de baddeleyita interseptam os octaédros de niobato segundo os planos 100, 010 e 001, às vezes simultaneamente. Os cristais individuais raramente ultrapassam 1 mm e exi-



Fotografia 13 — Cristais de pirocloro intercrescidos com placas de badeleyita (transparente). Aumento 25 vêzes.

bem faces bem desenvolvidas com ligeira estriação, sendo frequentes geminações. A côr é cinza ou parda, o brilho graxo característico. O mineral também foi identificado por difração de raios X. Hussak (1895) publica a seguinte análise: ZrO_2 — 96.52%, CaO — 0.55%, Fe_2O_3 — 0.41%, SiO_2 — 0.70% e p.p.c. — 0.39%.

VII — COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

De modo geral, a composição mineralógica do carbonatito é notavelmente homogênea, embora em afloramentos isolados por vêzes podem ser observadas concentrações de um ou outro acessório. Enriquecimentos locais de apatita com dimensões de alguns decímetros e formas irregulares acusam teores de até 30%

de P_2O_5 , correspondendo a mais de 70% de apatita. Também a magnetita ocorre em proporção de até 30% em trechos não superiores a 2-3 metros. Entretanto, nas amostras médias correspondentes a quadrículas de 20 metros de lado e portanto representativas de áreas de 400 m², êsses valores extremos já são compensados. Na tabela abaixo são indicadas as proporções máximas e mínimas dos principais acessórios, calculadas a partir das análises químicas.

	Mínimo	Máximo
Calcita	34.5%	91.6%
Dolomita	0.6	15.0
Apatita	1.8	49.5
Magnetita	0.5	9.7

A fig. 5 mostra gráficamente a composição mineralógica de 25 amostras típicas de carbonatito. A relativa uniformidade da ocorrência dos principais acessórios é demonstrada pela distribuição percentual dos valores de apatita e magnetita no total das amostras analisadas:

Teor de apatita	Frequência das amostras
Menos de 5.0%	10.9%
5.0 a 7.5%	12.7%
7.5 a 10.0%	19.7%
10.0 a 12.5%	28.1%
12.5 a 15.0%	13.8%
15.0 a 17.5%	8.6%
Mais de 17.5%	6.2%
	<hr/> 100.0%

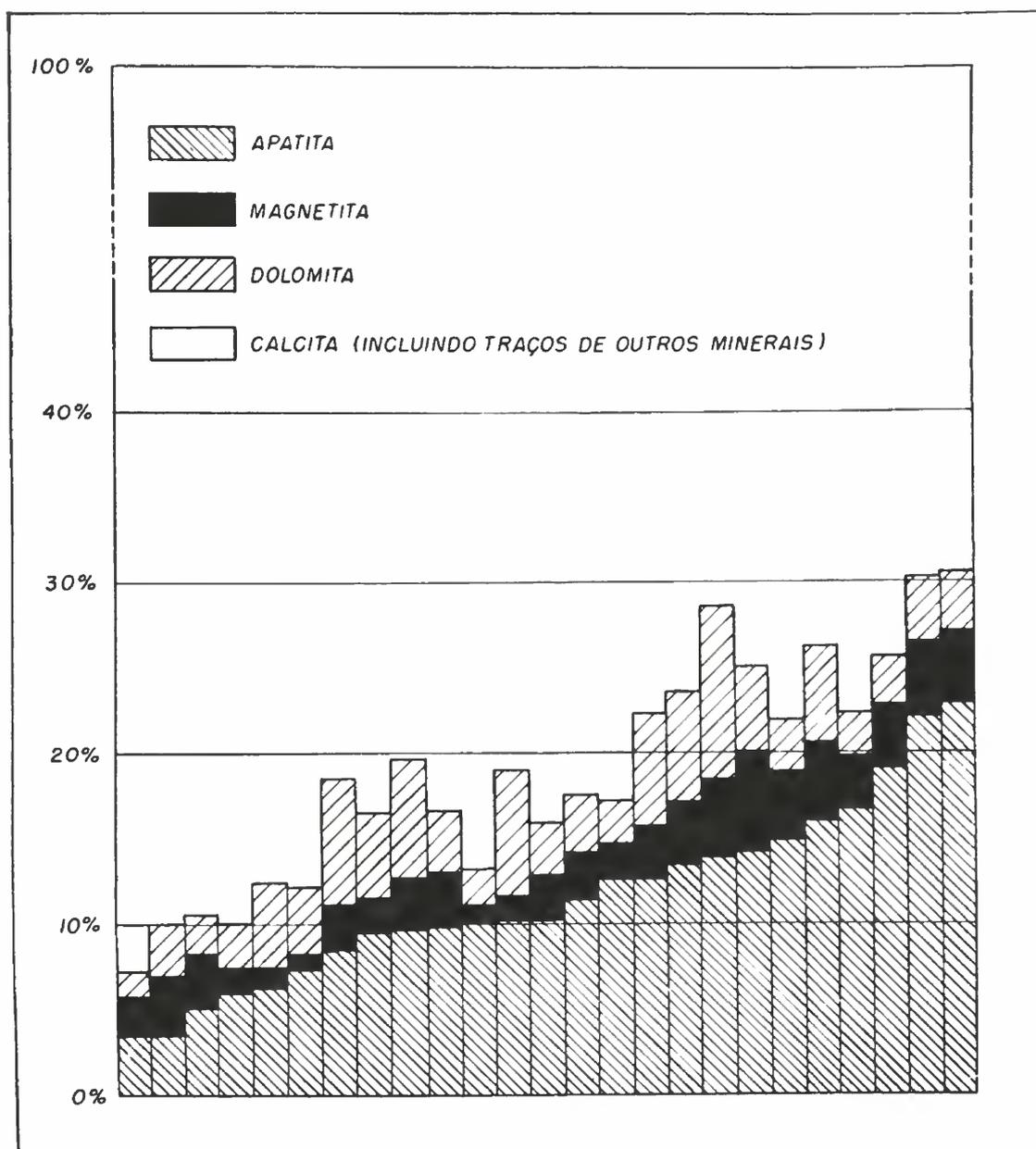


Fig. 5 — Composição mineralógica de 25 amostras típicas de carbonato, calculada a partir da análise química.

Teor de magnetita	Frequência das amostras
Menos de 1.0%	3.1%
1.0 a 2.0%	24.7%
2.0 a 3.0%	38.3%
3.0 a 4.0%	21.6%
4.0 a 5.0%	7.0%
Mais de 5.0%	5.3%
	<hr/> 100.0%

Verifica-se portanto que em 74.3% da área correspondente à superfície atual de erosão o carbonatito contém entre 5% e 15% de apatita, enquanto em 84.6% da área magnetita perfaz entre 1% e 4% da rocha. A soma de todos os outros acessórios, que em ordem decrescente de frequência são: pirita e pirrotita, flogopita, forsterita, serpentina e clinohumita, pirocloro, baddeleyita e barita, além da ilmenita sempre associada à magnetita, raramente ultrapassa 1%. A quantidade ilmenita, calculada a partir do teor em TiO_2 da "titanomagnetita", constitui 3 a 6% desta e portanto situa-se em ordens de grandeza de 0.1 a 0.2% da rocha.

De especial interesse é o teor em pirocloro e baddeleyita, por tratar-se de minerais raros e de possível aproveitamento econômico. Para sua determinação semi-quantitativa foi examinado o resíduo insolúvel de aproximadamente 200 amostras de 100 g, provenientes de quadrículas alternadas da amostragem de superfície, após retirada dos minerais magnéticos. Em cerca da metade desses resíduos verificou-se a existência de pirocloro e baddeleyita, geralmente apenas poucas miligramas. Notando-se teores mais elevados, esses minerais foram separados de restos de ilmenita, flogopita e vestígios de calcedônia em separador magnético isodinâmico e líquido pesado (diiodometano, $d = 3.3$). Na fig. 6 estão representadas as zonas de maior frequência de pirocloro, que coincidem com as de baddeleyita por ocorrerem ambos quase sempre inter-crescidos.

VIII — COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A caracterização precisa da composição química do carbonatito de Jacupiranga foi possível através dos resultados de um programa de pesquisa da jazida com objetivos econômicos (vide pág. 13).

Para a amostragem da rocha na superfície, a área foi dividida em quadrados com lados de 20 m, delimitando-se dessa maneira cerca de 700 quadrículas, das quais 300 ainda estão cobertas por minério residual, enquanto em 400 a lavra

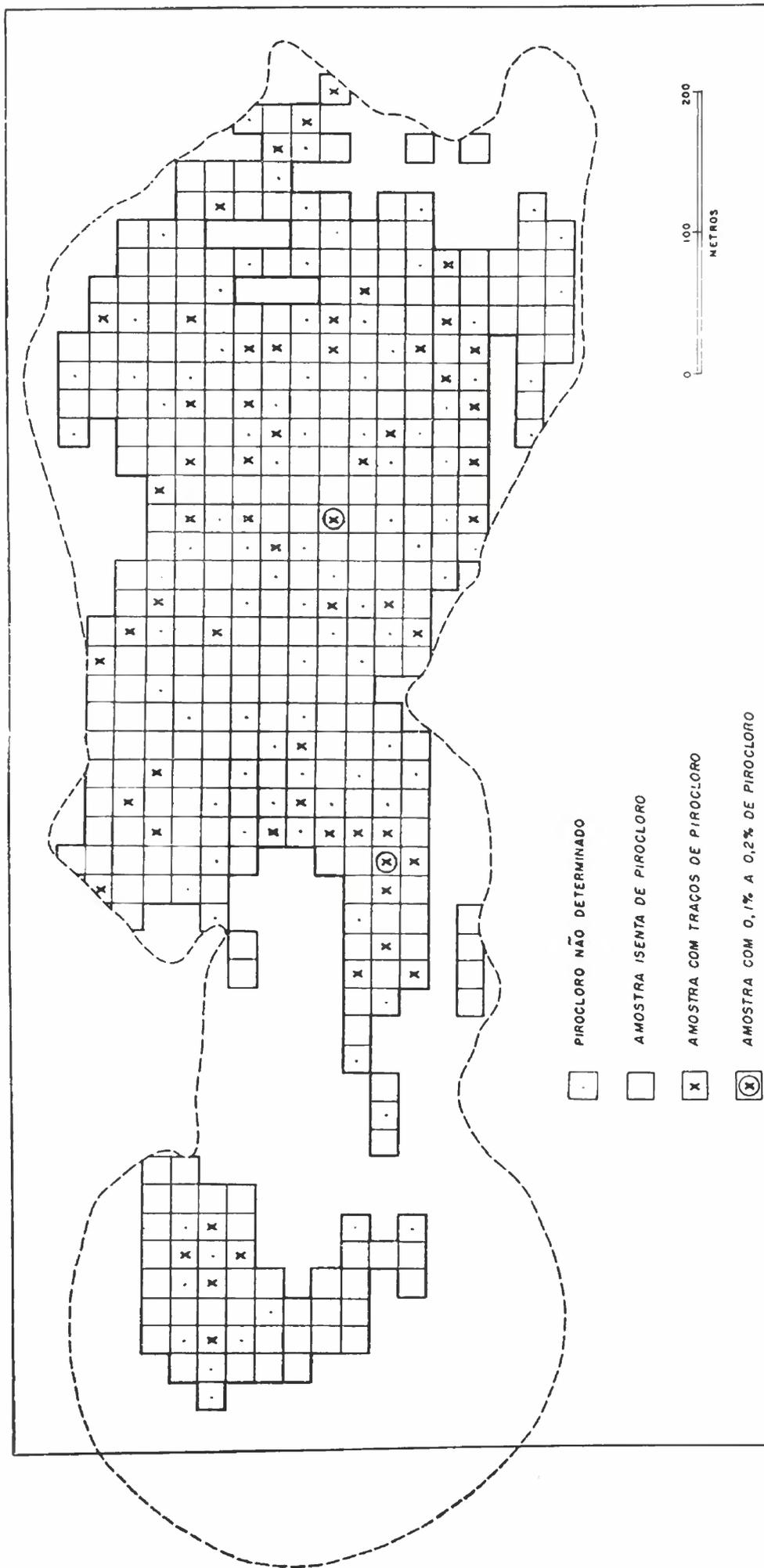


Fig. 6 — Distribuição de traços de pirocloro na superfície do carbonatito.

do minério já descobriu o carbonatito subjacente. Esse sistema, necessariamente arbitrário, foi escolhido tendo em vista a determinação da composição química com detalhe suficiente para orientar a eventual lavra do carbonatito, mediante um número de amostras razoável e a custo em proporção com o de outras fases dos estudos de aproveitamento econômico industrial.

Em cada quadrícula foram colhidos cerca de 20 fragmentos de carbonatito, procurando-se obter um número de amostras de cada variedade litológica proporcional à área de ocorrência dessa variedade, sem muito rigor no espaçamento igual entre pontos de amostragem. Os valores obtidos não têm peso exatamente igual para fins de cálculo de médias, uma vez que muitas das quadrículas amostradas ainda estavam parcialmente cobertas por elúvio.

A repetição da amostragem de 20 quadrículas forneceu resultados que divergiam dos anteriores de 0.5% P_2O_5 em média e de mais de 1.0% P_2O_5 em apenas duas. Concluindo-se portanto que os erros relativos normalmente não ultrapassam 10-12% dos resultados e que erros acidentais maiores são compensados pelo grande número de determinações, a precisão da amostragem pode ser considerada satisfatória para fins técnicos. De maneira geral, os valores obtidos são provavelmente pouco inferiores aos reais porque os trechos que não puderam ser amostrados correspondem geralmente a aberturas no carbonatito, alargadas por dissolução e preenchidas por apatita e magnetita. Verificou-se que a dissolução é justamente mais rápida em pontos de elevado teor em apatita. Em cinco pontos onde ocorrem frentes de carbonatito com superfícies contínuas de uma centena de metros quadrados, foram desmontadas várias dezenas de toneladas de material, obtendo-se amostras representativas por quarteação. Suas análises mostraram valores ligeiramente superiores aos obtidos em alguns fragmentos retirados das mesmas frentes.

Para determinar as variações dos teores em profundidade, especialmente de MgO em vista de possível dedolomitização

na superfície, estão sendo abertas quatro galerias de pesquisa. Esse trabalho tem ainda o objetivo de verificar a eventual existência de segregações primárias de apatita na massa de carbonatito. Os primeiros resultados obtidos mostram valores aproximadamente proporcionais aos obtidos na superfície.

Os teores em P_2O_5 , Fe_2O_3 e MgO das amostras de superfície são representados gráficamente nas figuras 7, 8 e 9, respectivamente. Os teores médios de toda a área amostrada são os seguintes:

P_2O_5	—	4.58%
Fe_2O_3	—	2.89%
MgO	—	1.24%

Os outros elementos importantes do carbonatito, cálcio e magnésio, não foram dosados de maneira sistemática. O conteúdo em CaO pode ser calculado a partir dos valores de CO_2 (perda por calcinação) e MgO , acrescentando-se o CaO correspondente a apatita. A dosagem de controle de CaO em algumas dezenas de amostras mostrou boa concordância com os resultados calculados, verificando-se também dessa maneira a ausência de outros carbonatos que calcita e dolomita. Perfazendo TiO_2 aproximadamente 2.7% da magnetita, seu teor médio no carbonatito é de 0.07%.

Nas representações gráficas da distribuição dos teores, verifica-se que não há sistema aparente nas concentrações de qualquer elemento, que pudesse ser interpretado como devido a estratificação do corpo de carbonatito ou dependente das distâncias do contacto com os jacupiranguitos. As diferenças de teores que certamente existem em função de variações litológicas, por sua vez relacionadas às estruturas, não podem ser caracterizadas pelo método de amostragem adotado.

Sob ponto de vista econômico e técnico, verifica-se que ocorrem várias concentrações com dimensões suficientes para permitir a lavra seletiva de material com mais de 6% P_2O_5 , ou seja 15% de apatita.

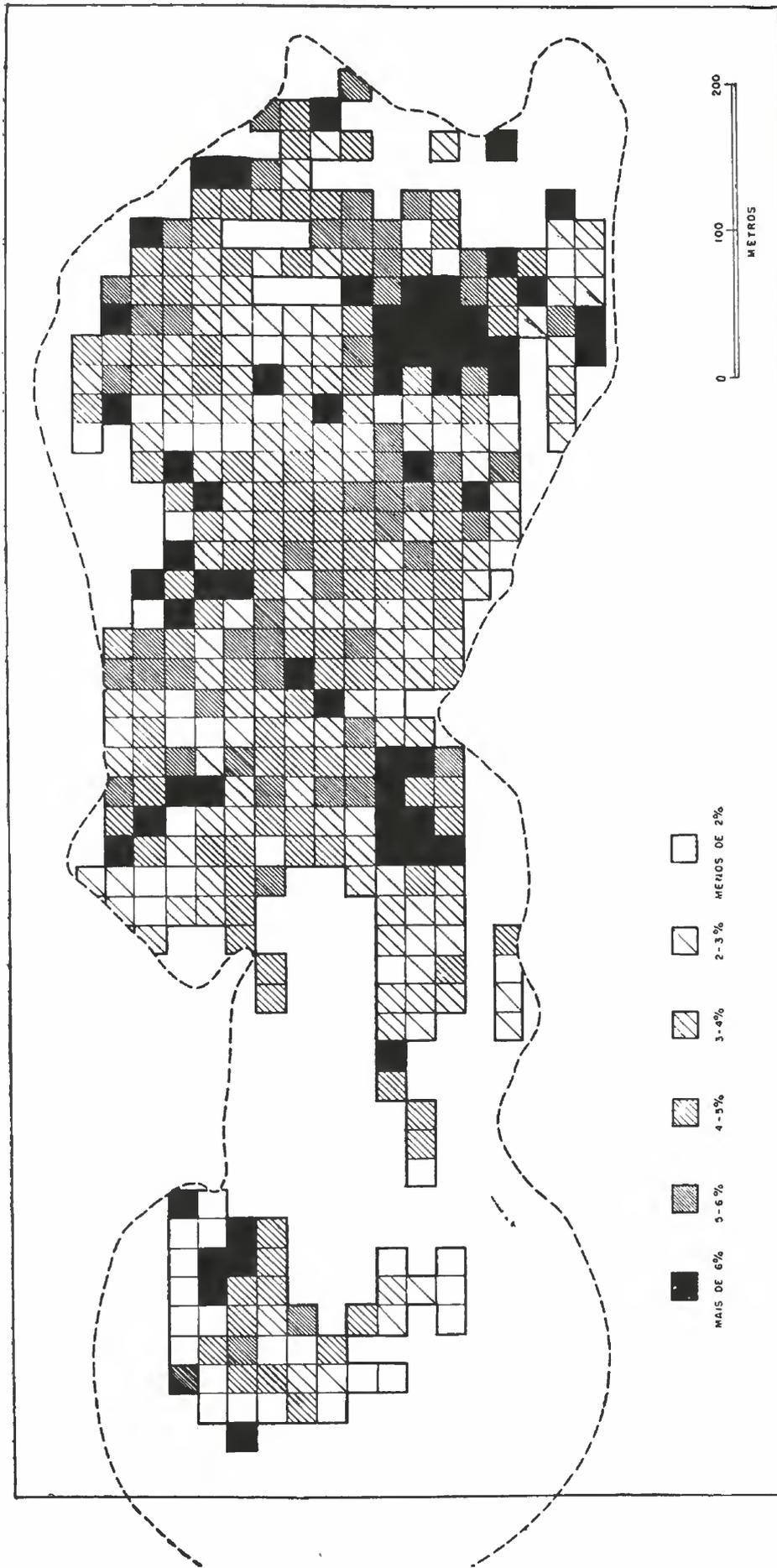


Fig. 7 — Distribuição dos teores de P_2O_5 na superfície do carbonato.

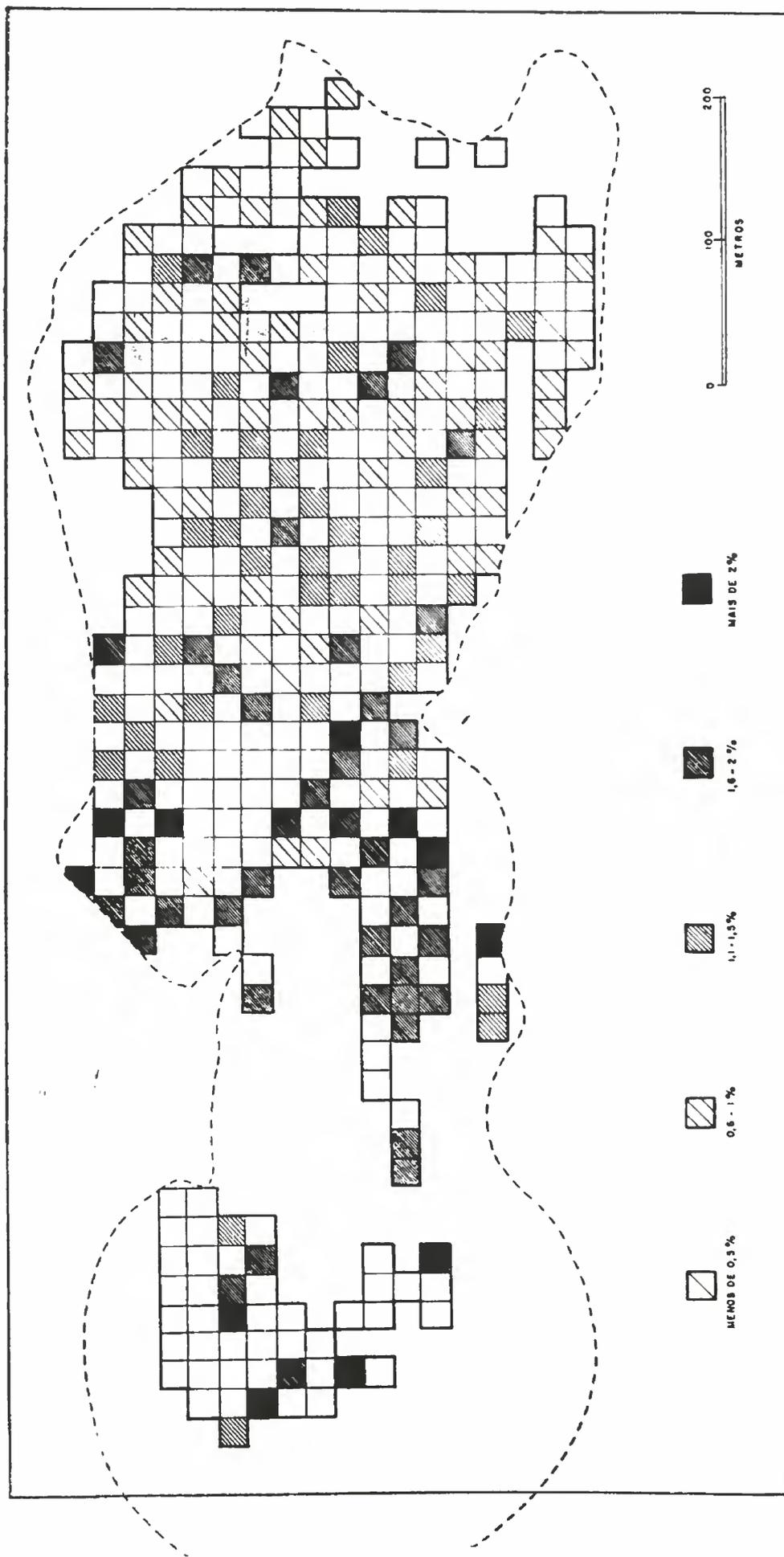


Fig. 8 — Distribuição dos teores de Fe_2O_3 na superfície do carbono.
natito.

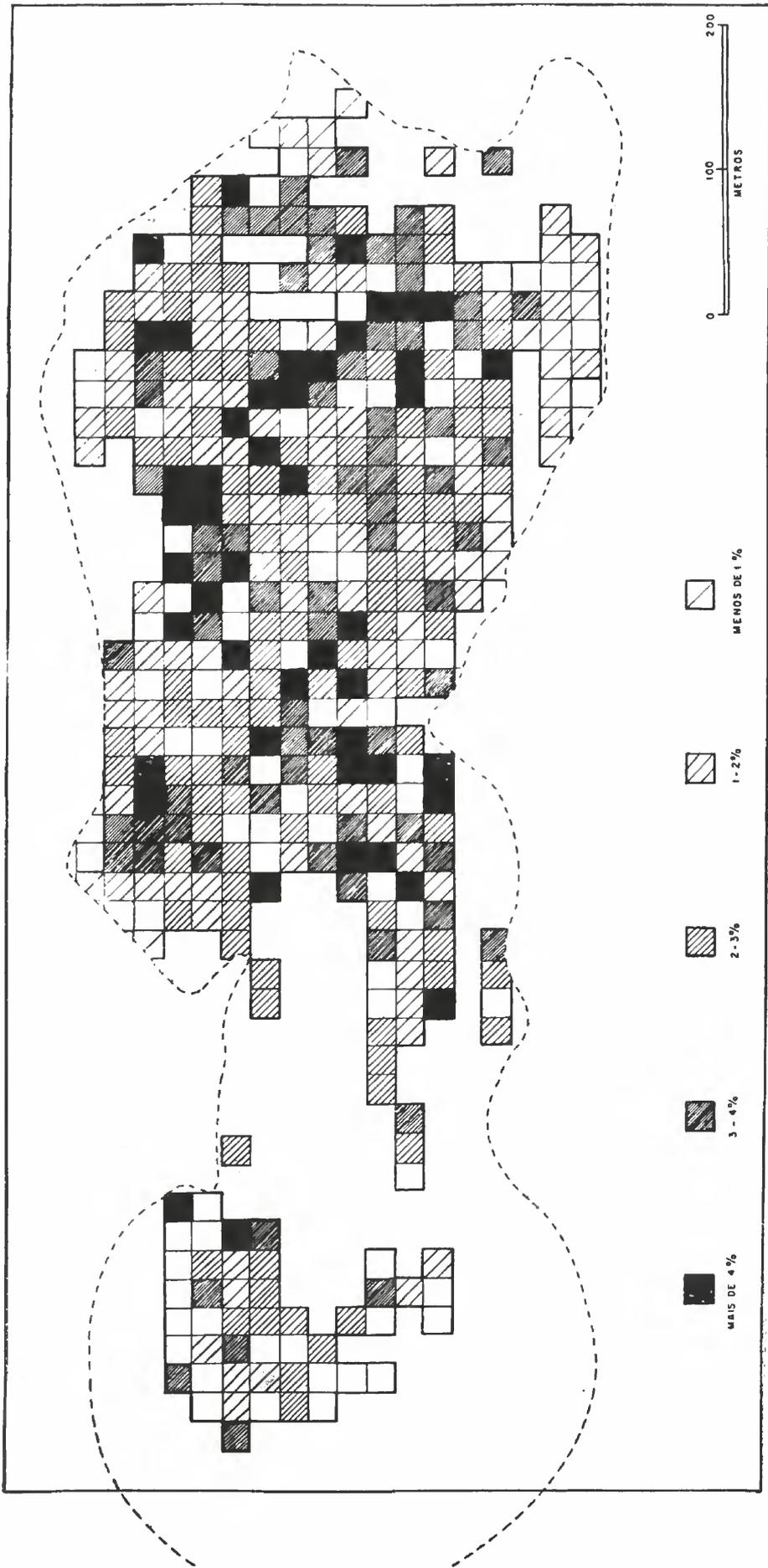


Fig. 9 — Distribuição dos teores de MgO na superfície do carbonato natro,

Os teores em elementos raros: zircônio, nióbio e tântalo, somente foram determinados de maneira qualitativa (vide capítulo XIII). Seu estudo não é objeto do presente trabalho. Entretanto, é de interesse notar que a associação sistemática desses elementos em rochas ígneas já foi mencionada por Goldschmidt (1954). No caso do carbonatito em estudo, essa associação de zircônio com nióbio manifesta-se pelos intercrescimentos de pirocloro com baddeleyita.

IX — COMPARAÇÃO COM OUTRAS LOCALIDADES

Atualmente é conhecida quase uma centena de ocorrências de carbonatitos associados a rochas alcalinas. Entretanto, ainda são escassos mapas geológicos precisos e descrições mineralógicas quantitativas. Os distritos melhor estudados são Fen, conhecido através do clássico trabalho de Bröger (1921) e investigações posteriores de Bowen (1924) e Saether (1957), e Alnö, descrito por Von Eckermann (1948). As numerosas ocorrências da África do Sul, Kênia, Uganda, Tanganica, Rodésia e Congo foram objeto de trabalhos visando principalmente suas possibilidades econômicas.

Para comparação das dimensões e formas dos principais carbonatitos com as de Jacupiranga, seus mapas geológicos simplificados foram reduzidos a escala 1:50 000 e reproduzidos na figura 10. As maiores ocorrências conhecidas provavelmente são Sukulu e Oka, além de Bukusu (Davies, 1956) que possui forma anelar com diâmetro superior a 6 km. Fen, Alnö e Lueshe são distritos de dimensões médias, enquanto os diâmetros da grande maioria dos carbonatitos descritos na literatura situam-se em ordens de grandeza de 0.5 a 1.5 km. Jacupiranga constitui portanto uma localidade média a pequena.

As relações com as rochas alcalinas associadas e encaixantes são, via de regra, complexas e variáveis. Normalmente os carbonatitos penetram sienitos e ijolitos ou metassedimentos mais ou menos fenitizados de maneira irregular, emitindo apófises e diques, sendo por sua vez cortados por diques, brechas e chaminés de composição variável. Jacupiranga representa

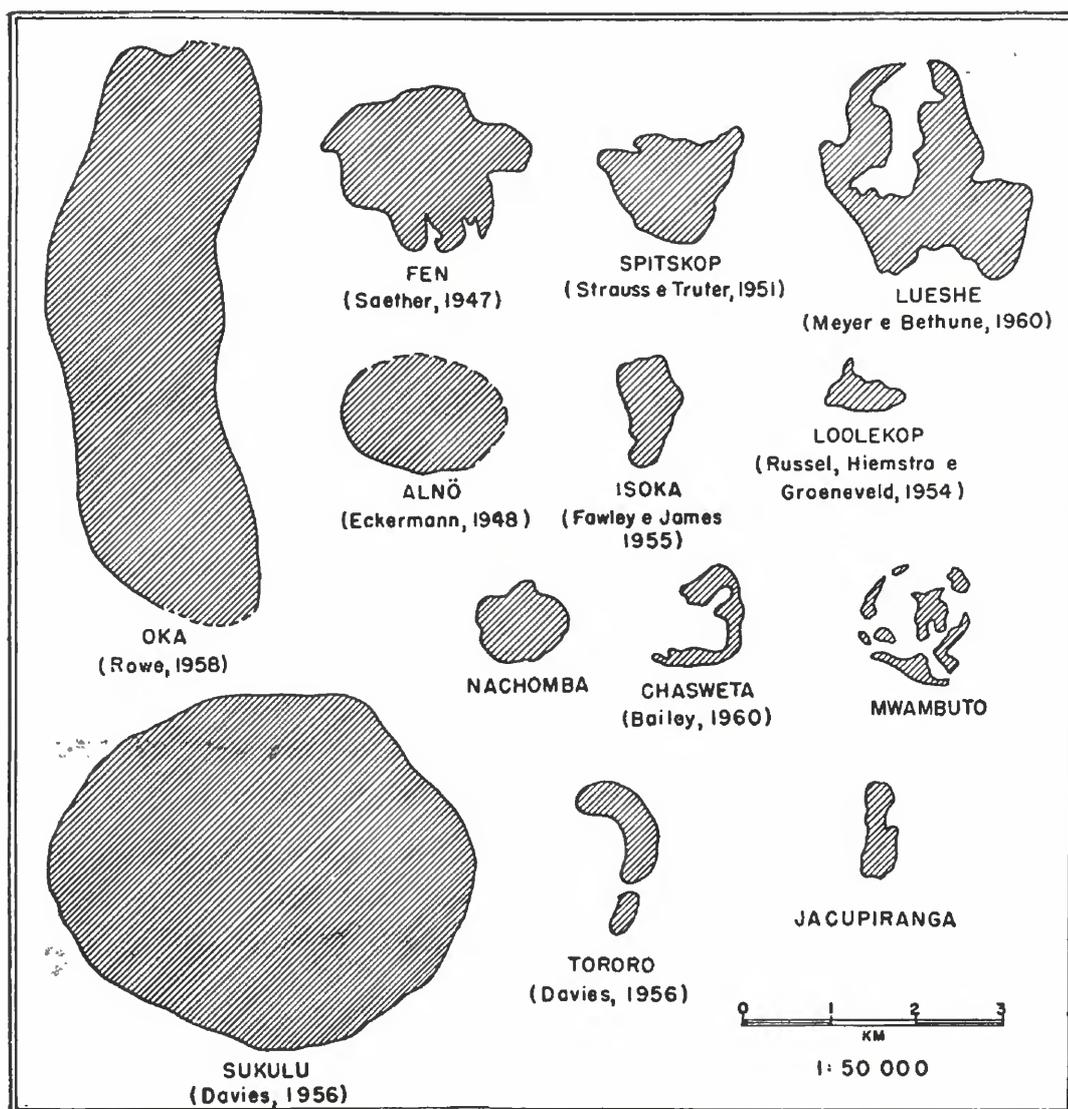


Fig. 10 — Comparação das áreas de diversos carbonatitos.

exceção, por ser encaixado exclusivamente em jacupiranguitos muito homogêneos, encerrando a massa de carbonatito apenas alguns xenólitos de jacupiranguito com diâmetros de poucos metros.

Tôdas as descrições petrográficas acentuam as variações intensivas e irregulares de textura e composição mineralógica dos carbonatitos. A distribuição de sövitos e rauhaugitos foi estudada em Spitskop (Strauss e Truter, 1951), Fen (Saether, 1957), Lueshe (Meyer e Bethune, 1960) e em Rufunsa (Bailey, 1960). Ao que parece, não existe passagem gradual dos tipos

calcíticos para os dolomíticos, predominando sempre um ou outro mineral. Em Alnö, como em Jacupiranga, não ocorrem rauhaugitos no cone carbonatítico central, porém nas raras amostras ricas em magnésio encontradas verificou-se ocorrer mais de 60% de dolomita, faltando tipos intermediários com 20% a 60% de carbonato misto. No seu conjunto, a localidade em estudo distingue-se pelo seu baixo e uniforme teor em magnésio.

Os elevados teores em apatita de muitos carbonatitos foram notados por diversos autores. Em Alnö e em Fen as rochas podem conter até 16.4% e 11.5%, respectivamente, de fosfato. Pecora (1956) resume as variações da composição química de 80 análises de diversas localidades. Os valores extremos são os seguintes:

Alnö (49 análises)	0.6 — 4.8% P_2O_5
Fen (10 análises)	0.95 — 6.92 P_2O_5
Localidades africanas (21 análises)	0.13 — 5.5 P_2O_5 .

Uma vez que os autores geralmente não indicam que volumes de rocha são representados pelas análises, as proporções médias de apatita nessas ocorrências são de difícil avaliação, porém devem situar-se entre 5% e 7% na maioria dos carbonatitos. Apenas em Tororo e Sukulu foram executadas amostragens minuciosas com objetivos econômicos (Davies, 1954), obtendo-se os seguintes resultados representativos de grandes massas:

Tororo (640 análises) — 1.725% P_2O_5 correspondendo a 4.1% de apatita.

Sukulu (961 análises) — 3.68% P_2O_5 correspondendo a 8.9% de apatita.

Em Jacupiranga a média total é de 11% de apatita, com áreas de algumas dezenas de metros contendo mais de 15%, sendo portanto excepcional a abundância desse mineral. Também os teores de magnetita são relativamente elevados, faltando porém na literatura elementos precisos para comparação.

O característico mais flagrante da região em estudo é sua pobreza em silicatos. Em quase tôdas outras localidades são descritos carbonatitos com proporções variáveis de biotita, olivina, aegirina-augta e aegirina, que geralmente perfazem mais de 10% da rocha, além de ortósio, micropertita, albita, nefelina, diopsídio, monticelita, granada, chondrodita e melilita. Em Alnö, por exemplo, as análises publicadas por Von Eckermann indicam as seguintes proporções de carbonatos:

sövitos (médias de 10 análises)	61%
beforsitos (média de 20 análises)	57%
alviquitos (média de 18 análises)	37%,

sendo o restante constituído principalmente por piroxênios e biotita. Ressalta o contraste com Jacupiranga, onde olivina e flogopita ocorrem em concentrações locais, porém não alcançam 1% da rocha, em média.

A silicificação supérgena, descrita na maioria das localidades africanas e considerada em parte responsável pela maior resistência dos carbonatitos à erosão, falta em Jacupiranga. Apenas em alguns pontos do morro da Mina foram encontrados delgados veios de quartzo, nitidamente secundários. Sua escassez provávelmente é devida à pobreza em silicatos cuja decomposição pudesse fornecer sílica.

Os outros minerais observados: pirita, pirrotita, pirocloro e baddeleyita são acessórios comuns de carbonatitos, onde ocorrem geralmente de alguns centésimos a poucos décimos de percento, com exceção de concentrações econômicas de pirocloro que podem ultrapassar 1% e constituir jazidas exploráveis, como em Fen, Isoka, Lueshe e Oka. Entretanto, os curiosos intercrescimentos de baddeleyita com pirocloro (vide página 41) e o alto teor em tântalo dêste constituem feições singulares, ainda não descritas alhures.

Von Eckermann (1948) afirma que zircônio não ocorre em Alnö e que êste elemento não pertence às paragêneses típicas dos carbonatitos. Entretanto, outros autores (vide Pecora, 1956) identificaram zircão e baddeleyita em diversas localidades congêneres.

O carbonatito de Jacupiranga distingue-se ainda pela quase ausência de barita, de que somente traços foram identificados em raríssimas amostras, enquanto bário e estrôncio geralmente se concentram em quantidades anormais nas ocorrências similares.

X — PETROGÊNESE

As mais variadas teorias têm sido propostas para explicar a origem e o modo de intrusão dos carbonatitos. Os principais conceitos clássicos sobre processos de assimilação e diferenciação magmática, fenômenos hidrotermais e pneumatolíticos, foram aplicados por diferentes autores às rochas alcalinas e aos carbonatos associados. Pecora (1956) apresenta excelente análise dos principais problemas relacionados aos carbonatitos.

Não é objetivo do presente trabalho discutir em detalhe todas as variantes das hipóteses genéticas, algumas de interesse apenas histórico, porém justifica-se uma revisão das concepções básicas e de suas aplicações, em vista das informações atualmente disponíveis.

A associação de carbonatitos a rochas alcalinas, no tempo e no espaço, indica claramente as suas relações genéticas. Embora este fato fôsse reconhecido por todos os autores, a natureza exata dessas relações ainda permanece desconhecida e conclusões radicalmente opostas foram obtidas por diferentes geólogos. Assim, para alguns autores, as rochas alcalinas formaram-se pela reação de um magma ácido ou intermediário com calcários de origem sedimentar, enquanto para outros, os calcários são magmáticos e resultam da diferenciação de rochas ígneas. O simples confronto de concepções tão discrepantes demonstra que o estado atual das informações obtidas pelas observações de campo e através dos métodos normais de laboratório, não permite ainda a elaboração de qualquer teoria genética definitiva, aplicável a todos carbonatitos. As diversas ordens de questões relacionadas à origem dessas rochas nem sempre foram distinguidas com muita clareza.

A maneira pela qual os carbonatitos ocuparam sua posição atual constitui talvez o problema de solução mais próxima, uma vez que as atuais relações de campo fornecem numerosas indicações. As hipóteses aventadas por diferentes autores podem ser classificadas em seis grupos: 1 — Xenólitos, 2 — Metamorfismo de contacto, 3 — Intrusão em estado plástico, 4 — Verdadeiro magma, 5 — Soluções hidrotermais, 6 — Processos pneumatolíticos.

Xenólitos. Daly (1910, 1918, 1933) e Shand (1910, 1922, 1931, 1945) em numerosas publicações defenderam o ponto de vista de que os calcários associados a rochas alcalinas constituem xenólitos em magma dessilicificado por reação com os carbonatos. Os argumentos a favor ou contra esta hipótese basearam-se, em grande parte, na presença ou ausência de calcários sedimentares ou metamórficos nas imediações das ocorrências. Atualmente, a aplicação generalizada dêsse conceito a todos os carbonatitos não é mais sustentável. Em Alnö, por exemplo, Von Eckermann (1958) descreveu minuciosamente numerosos diques de alviquito e beforsito cortando o embasamento cristalino, que não poderiam constituir xenólitos. Em outras localidades, como Sukulu na Uganda (Davies, 1956), Nkumbwa (Reeve e Deans, 1954) e Nachomba (Bailey, 1960) na Rodésia do Norte, ou Lueshe no Congo Belga (Meyer e Bethune, 1960) as massas centrais de sövito ou rauhaugito ocupam áreas tão grandes em relação às rochas alcalinas circundantes, que estas dificilmente poderiam ter transportado xenólitos com volume várias vezes superior ao do magma fluido, sobretudo quando não afloram calcários nas encaixantes vizinhas e portanto o deslocamento vertical deveria ter sido considerável.

Por outro lado, em Alnö (Von Eckermann, 1948) e em Fen (Saether, 1957) ocorrem brechas com xenólitos carbonáticos em rochas alcalinas posteriores, porém êsse fenômeno é local e não extrapolável a tôdas as ocorrências.

Em Jacupiranga, citado por Shand (1945) como exemplo da ocorrência de calcários metamórficos, o volume de jacupi-

ranguitos e ijolitos seria suficiente para transportar os calcários do morro da Mina, se êstes proviessem de um nível mais profundo. Entretanto, os xenólitos de jacupiranguito no interior do carbonatito demonstram que a consolidação dêste é posterior, pelo menos em parte.

Convém observar ainda que xenólitos com volume de um ou mais quilômetros cúbicos, que deveriam ter sido transportados de pelo menos alguns milhares de metros, não são conhecidos em qualquer outro tipo de magmatismo.

Metamorfismo de contacto. As características litológicas peculiares a muitos carbonatitos foram interpretadas como resultado de metamorfismo de contacto, geralmente pelos mesmos autores que defendem a origem supracrustal (Daly, 1910, 1918 e Shand, 1931, 1945). Pecora (1956) examina algumas das diferenças mineralógicas entre escarnitos e carbonatitos.

Existindo em várias localidades carbonatos anteriores às ígneas alcalinas, parece natural ocorrer a formação de escarnitos com minerais característicos: diopsídio, tremolita, wollastonita, granadas, etc. Por outro lado, os carbonatitos distinguem-se por paragêneses típicas, com alguns minerais que dificilmente poderiam ser atribuídos a simples ação de contacto: apatita, monazita, barita, stroncianita, pirocloro, baddeleyita e zircão, além de variedade de carbonatos de terras raras.

Julgamos que metamorfismo de contacto somente desempenhou papel de importância muito subordinada na grande maioria dos carbonatitos. Em Jacupiranga, os principais acessórios do carbonatito: apatita, titanomagnetita, flogopita, clinohumita, forsterita, pirrotita e pirocloro, somente poderiam ter-se formado mediante adições metassomáticas muito substanciais. O principal argumento contra a hipótese de uma ação de contacto reside talvez na distribuição relativamente homogênea dos acessórios, sem enriquecimentos apreciáveis na zona de contacto.

Intrusão em estado plástico. As deformações plásticas de calcários são conhecidas desde há muito e grande parte dos tra-

balhos experimentais, visando demonstrar a deformação e recristalização de rochas foram realizados com corpos de prova de carbonatos. Por outro lado, existe certa semelhança de forma entre os núcleos carbonatíticos e domos de sal. Entretanto, não há elementos para julgar a intensidade das deformações sofridas pelos carbonatitos. As texturas e estruturas orientadas têm sido consideradas primárias por alguns autores (Menell, 1946; Williams, 1952; Davies, 1947), enquanto Sæther (1957) afirma indicarem intrusão em estado plástico. As encaixantes, alcalinas magmáticas ou fenitos reomórficos, geralmente não mostram indício seguro de deformação posterior à sua consolidação. Diversas outras feições também não podem ser explicadas por essa hipótese. Por exemplo, seria improvável que apenas calcários associados a rochas alcalinas sofressem mobilização deste tipo, enquanto calcários sedimentares simplesmente são metamorfoseados no contacto com rochas ácidas ou intermediárias, adquirindo certa plasticidade apenas em zonas afetadas por tectonismo regional.

Magma. Bröger (1921) propôs pela primeira vez a hipótese de que os sövitos de Fen constituíssem produtos da consolidação de um magma. Nos últimos anos, numerosos autores adotaram ponto de vista magmatista e o termo "carbonatito" adquiriu significado genético, indicando rochas de origem magmática constituídas essencialmente por carbonatos.

No estado atual de nossos conhecimentos das condições físico-químicas de rochas ígneas, a distinção rigorosa entre um verdadeiro magma, soluções hidrotermais e soluções pneumatolíticas ainda não é possível. Em vista dos largos intervalos de pressão, temperatura e composição química em que podem existir rochas ígneas parcial ou totalmente fundidas, não há limites que fixem, por exemplo, a transição de magma para solução hidrotermal em função do teor em água, ou de produtos hidrotermais para pneumatolíticos em função do conteúdo em gases. Cabe observar que as definições originais desses termos baseiam-se em concepções bastante empíricas e observações feitas em rochas silicatadas e seus diferenciados.

Assim sendo, a aplicação dessa nomenclatura aos carbonatitos não pode ser rigorosa, porque caso contrário um carbonatito como o de Jacupiranga, contendo 40% de CO_2 e 5% de P_2O_5 além de fluor e cloro, seria simplesmente considerado pneumatólitico.

Brögger (1921) concluiu pela probabilidade de fenômenos análogos dos considerados magmáticos na tomada de posição dos carbonatitos, por existirem em Fen numerosos diques de alviquito e beforsito, intrusivos nas encaixantes pré-cambrianas. Em Alnö, Von Eckermann (1948, 1958) descreveu minuciosamente algumas centenas de diques radiais e concêntricos, verificando emanarem os alviquitos de um centro de explosão situado atualmente a 2.000 metros de profundidade, enquanto o foco dos diques cônicos de beforsito está a 7.000 metros, aproximadamente.

A associação de carbonatitos a rochas vulcânicas alcalinas foi observada em muitas localidades na África (Dixey, 1935; King, 1949; Davies, 1952). Em Mount Elgon na Uganda, os sövitos preenchem a chaminé central de antigo vulcão (Davies, 1956). Recentemente, Bailey (1960) descreveu piroclastos carbonáticos associados aos carbonatitos de Rufunsa na Rodésia do Norte. Esses tufo e aglomerados, além de calcita e dolomita, contêm diversos minerais que formam paragênese típica de carbonatitos: apatita, barita, flogopita e pirocloro. Suas relações de campo demonstram tratar-se realmente de produtos vulcânicos. O mesmo autor menciona ainda a erupção do vulcão Oldonyo Lengai na Tanganica em 1954, quando foram ejetados tufo calcários.

Conclui-se que o modo de ocorrência no campo de muitos alviquitos e beforsitos torna provável tratar-se de rochas que introduziram-se em suas encaixantes de maneira semelhante à de hipoabissais silicatadas. No caso dos núcleos carbonáticos centrais de distritos alcalinos, as evidências diretas são menos conclusivas, porém parece razoável admitir que rochas com viscosidade adequada para a formação de diques também pudessem preencher as chaminés centrais, com diâ-

metros de algumas centenas de metros, em estado parcial ou totalmente fundido.

Os principais argumentos contra as hipóteses magmatistas basearam-se, até recentemente, nos escassos conhecimentos das condições físico-químicas necessárias à existência de magmas carbonatíticos. Sabendo-se que a temperatura de fusão do carbonato de cálcio a um bar é de 1390°C (Smith e Adams, 1923), concluiu-se que não poderia ocorrer magma constituído essencialmente por carbonatos alcalino-terrosos. Assim, por exemplo, Garson e Campbell Smith (1958) resumem o problema afirmando que, em vista dos dados experimentais disponíveis, o movimento em larga escala de carbonatitos fundidos é dificilmente aceitável, devendo-se procurar outra explicação para a sua tomada de posição.

Von Eckermann (1948) admite a existência de um magma constituído inicialmente por CO_3K_2 em proporção elevada, que teria sido enriquecido em cálcio e magnésio por trocas metasomáticas com suas encaixantes durante a ascensão. Esse líquido poderia existir a temperatura entre 400°C e 600°C. Outros autores preferiram assinalar papel preponderante na mobilização aos constituintes líquidos e gasosos, que naturalmente baixariam o ponto de fusão.

Recentemente, Willie e Tuttle (1960, 1960A) realizaram trabalhos experimentais relativos ao sistema $\text{CaO-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$, que consideram como de composição análoga à de um magma carbonatítico simplificado. Esses autores verificaram que um líquido com composição 65CaO, 19CO₂, 16H₂O coexiste com calcita, portlandita e vapor a 675°C. Entre pressões de 27 e 4.000 bars a temperatura mínima de líquido varia entre 685°C e 640°C. A adição de MgO ainda abaixa a temperatura mínima de líquido de 675°C para 625°C a 1000 bars. Outras observações importantes de Willie e Tuttle referem-se ao sistema $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{-CaCO}_3\text{-Ca(OH)}_2$, incluindo apatita e hidroxilapatita. Nessas experiências foi observada a deposição de cristais, demonstrando a facilidade com que os minerais formados podem separar-se do líquido residual.

A síntese de um magma carbonatítico demonstra a possibilidade de sua existência na natureza. Embora experiências de laboratório não possam comprovar definitivamente a natureza magmática de todas as ocorrências em questão, certamente invalidam os argumentos de ordem físico-química levantados contra as hipóteses magmatistas. Em seu conjunto, as observações experimentais e de campo são portanto altamente favoráveis à concepção de um magma carbonatítico, do qual os constituintes separaram-se por cristalização fracionada.

Soluções hidrotermais. Bowen (1924, 1926) admitiu a origem hidrotermal dos carbonatitos de Fen, baseado principalmente em observações petrográficas que indicam a formação do sövito por substituição metassomática de fenitos e melteigitos. Saether (1957) também acredita que os sövitos originaram-se por metassomatismo de vipetóide e melteigito, encontrando-se relitos parcialmente carbonatizados dessas rochas nos carbonatitos maciços. Evidências de ação metassomática são ainda citadas por Björlikke e Svinndal (1960), que observaram a associação do minério de pirocloro de Fen a zonas de carbonatito brechado e recimentado. Entretanto, as soluções hidrotermais são consideradas pós-magmáticas e penetraram parte do sövito somente após sua consolidação.

Provavelmente transformações metassomáticas também desempenharam papel de maior ou menor importância em outros carbonatitos. Em Jacupiranga não há quaisquer elementos que indiquem alteração metassomática do jacupiranguito e que conseqüentemente permitissem inferir a substituição em larga escala de rochas alcalinas por carbonatos.

Processos pneumatolíticos. Algumas características dos carbonatitos sugerem contribuição importante de uma fase gasosa durante sua formação e deposição. Sabe-se que vulcões com afinidade alcalina podem desprender grandes volumes de CO_2 . A mineralização de alguns elementos pouco voláteis como Zr, Nb e Ta, possivelmente seria atribuível a transporte pneumatolítico. Além disso, a presença de S, F, Cl, e P, B, além de CO_2 , é sugestiva da existência de gases durante a

evolução dos carbonatitos. Entretanto, todos êstes indícios são indiretos, não se dispondo ainda de dados experimentais ou de observações de campo comprovantes de transporte sob forma gasosa em larga escala dos constituintes dos carbonatitos.

Intrusão do carbonatito de Jacupiranga. A massa de carbonatos do morro da Mina possui as características de um corpo intrusivo e com tôda probabilidade comportou-se de maneira semelhante a uma rocha magmática durante a sua intrusão. Os indícios a favor dessa hipótese são diretos e indiretos.

As principais observações que corroboram diretamente a natureza magmática do carbonatito são: 1 — A forma da ocorrência em secção horizontal e sua extensão vertical. 2 — A existência de diques radiais e concêntricos. 3 — As juntas, também simétricas em relação ao centro. 4 — As texturas fluidais. 5 — A distribuição relativamente homogênea dos minerais no conjunto da massa do carbonatito. 6 — Os intercrescimentos de magnetita e ilmenita, mostrando lamelas de exsolução características de rochas magmáticas. 7 — A reabsorção parcial de muitos cristais de apatita e de olivina.

As indicações indiretas baseiam-se na impossibilidade de explicar as características do carbonatito por processos metamórficos ou metassomáticos e na semelhança da localidade em questão como outras ocorrências, onde a natureza magmática dos carbonatitos já foi estabelecida com segurança.

Numerosas objeções podem ser levantadas contra a suposição de uma camada sedimentar, metamorfoseada pelos jacupiranguitos. Seria estranho que outras rochas sedimentares ou metamórficas, que deveriam estar sôbre e sotopostas ou mesmo intercaladas, tivessem desaparecido por completo, restando apenas calcários. As transformações metamórficas e as trocas metassomáticas deveriam ter sido extraordinárias, afetando praticamente todos os componentes, exceto carbonato de cálcio. Normalmente os calcários da série Assungui

contém alguns percento de sílica, que ficaria combinada na forma de silicatos característicos, porém não poderia ocorrer dessilicificação por efeitos de contacto. Também a maior parte da alumina eventualmente existente deveria ter sido removida. Além disso, seria ainda necessário supor uma intensa dedolomitização.

Alguns dos minerais encontrados no carbonatito, incluindo a apatita, poderiam ser atribuídos a metamorfismo de contacto, porém as grandes quantidades existentes teriam exigido enorme contribuição metassomática e sua distribuição deveria relacionar-se às distâncias do contacto com os jacupirangitos, o que não ocorre.

Outras hipóteses, como a admissão de uma injeção em estado plástico, talvez poderiam harmonizar-se com o modo de ocorrência e a estrutura do carbonatito de Jacupiranga, porém permaneceria sem explicação a sua composição química. Concluimos que o carbonatito ocupou sua posição atual em estado fluido, parcial ou totalmente fundido.

A origem dos carbonatos e as condições físico-químicas prevaletentes durante a consolidação constituem os grandes problemas petrológicos que ainda aguardam solução. Demonstrada experimentalmente a possibilidade da existência de um magma carbonatítico (v. pág. 61), é provável que o curso de sua cristalização, as condições de pressão e temperatura e as possíveis reações com suas encaixantes sejam melhor esclarecidas em futuro próximo. As numerosas informações já disponíveis e as investigações de outros carbonatitos em curso, permitirão interpretar o seu modo de intrusão com segurança semelhante à alcançada no estudo de outras rochas magmáticas. A origem das grandes quantidades de anidrido carbônico, necessárias à formação dos carbonatos, por enquanto apenas pode ser objeto de especulações geológicas. Esse problema não poderá ser dissociado das questões relacionadas à gênese das rochas ígneas alcalinas em geral e sua análise ultrapassa os objetivos deste trabalho.

XI — JAZIDA DE APATITA

O manto residual e eluvial que capeia o carbonatito constitui considerável reserva de minério de apatita, que está sendo lavrada pela SERRANA Sociedade Anônima de Mineração. A extração de minério bruto e a produção de concentrados nos últimos anos foi a seguinte:

	Minério	Concentrado
	t.	t.
1952	47.500	18.000
1953	65.100	18.200
1954	80.100	21.800
1955	88.500	25.800
1956	110.800	33.100
1957	124.800	38.100
1958	111.700	36.100
1959	131.800	42.400
1960	196.500	69.100

O minério bruto contém em média 22% P_2O_5 , correspondendo a 53% de apatita, e 26% Fe_2O_3 . O teor dos concentrados é de 39% P_2O_5 , ou seja 94% de apatita, sendo tolerados até 2,5% Fe_2O_3 . O rendimento da produção de concentrados sobre o minério extraído é de 32%, o que equivale a 57% de recuperação de P_2O_5 contido.

A lavra do minério é manual. O tratamento consiste de lavagem, separação magnética úmida, classificação e deslamegem, secagem e separação magnética seca. Os concentrados são enviados por rodovia a Utinga e utilizados para a fabricação de superfosfato.

Em sua maior parte, o minério bruto de apatita tem aspecto terroso, não se reconhecendo os minerais constituintes, que estão sempre recobertos e misturados com argila finíssima. Cerca de 30% do material tem granulação inferior a 0,074 mm (200 malhas). Eliminadas as lamas, distinguem-se os minerais do

carbonatito resistentes ao intemperismo. A apatita ocorre com as mesmas formas ovóides encontradas quando ainda inclusa nos carbonatos e concentrações desses cristais receberam o nome local de “minério tipo arroz”, constituindo material rico e de fácil beneficiamento. Os indivíduos maiores de magnetita também conservam suas formas, apenas arredondando-se as arestas. Em seções polidas, exibem os mesmos intercrescimentos lamelares com ilmenita, observados na magnetita contida no carbonatito.

Em alguns pontos da mina ocorrem concreções formadas por núcleos de magnetita, envolvidos em limonita com elevado teor de P_2O_5 , possivelmente contendo fosfatos secundários. Também parte dos cristais de apatita reveste-se por delgada película de óxidos de ferro secundários de difícil remoção, o que constitui inconveniente para a concentração industrial porque sua eliminação nos separadores magnéticos acarreta considerável perda de fosfatos.

De maneira geral, a granulação do minério aumenta com a profundidade, decrescendo a proporção de argilas. Junto à superfície ocorre camada com espessura de 1 a 3 metros, constituída por material muito fino e de difícil recuperação, enquanto na parte inferior, próximo à base, a apatita é mais grossa. Em algumas das fendas do carbonatito observam-se blocos formados exclusivamente por prismas orientados de apatita, misturados com magnetita. Esses fragmentos recebem o nome local “caroço” e com toda probabilidade correspondem a segregações primárias no carbonatito, liberadas e incorporadas ao minério residual por dissolução dos carbonatos encaixantes.

A forma do depósito é extremamente irregular. A superfície do terreno, que corresponde ao tampo da camada de minério, apresenta relêvo relativamente uniforme, porém a base do manto eluvial molda-se sobre o carbonatito não dissolvido, em que diferenças de elevação superiores a 10 m são encontradas a distâncias horizontais de poucos metros. Assim a jazida assemelha-se a uma calota alongada com espessura de 1 a 5 me-

tros, de cuja face inferior projetam-se numerosos prismas e cunhas invertidas, com alturas que alcançam 20 m.

Sendo impossível definir trechos representativos da jazida como corpos geométricos, a avaliação precisa do volume de minério torna-se quase impraticável. Uma pesquisa realizada em 1953 por meio de furos de trado indicou reserva superior a 4 000 000t., porém provavelmente as reservas realmente existentes são inferiores a esta tonelagem.

Knecht (1948) admitiu que a jazida de apatita formou-se por ação metassomática de soluções hidrotermais originárias do jacupiranguito sobre os calcários pré-existentes. O presente autor (Melcher, 1954) já sugeriu que as concentrações de apatita e magnetita representam apenas o resíduo insolúvel do carbonatito. Os elementos agora disponíveis não deixam mais dúvida sobre a origem residual do depósito. Para a concentração das reservas conhecidas, seria necessária a dissolução de menos de 50 m de carbonatito, admitindo-se um teor de 11% de apatita neste.

XII — POSSIBILIDADES ECONÔMICAS DO CARBONATITO

Entre a cota mínima atualmente exposta (80 m sobre o nível do mar) e o topo do morro da Mina (220 m) ocorre reserva de calcário que pode ser avaliada em aproximadamente 50 000 000 t. Admitindo continuidade da rocha até o nível de base local (40 m), essa tonelagem seria duplicada. Algumas sondagens realizadas pela SERRANA S. A., dos quais uma atingiu a cota —60m, comprovaram efetivamente a extensão do carbonatito até profundidades maiores. Evidentemente, qualquer exploração seria ainda precedida de pesquisa para comprovação dos volumes e das características em profundidade. Entretanto, a existência de tão vultoso depósito em potencial, em situação geográfica favorável, constitui desafio ao desenvolvimento tecnológico para seu aproveitamento econômico. Várias possibilidades de industrialização vêm sendo objeto de estudos por parte da companhia concessionária da jazida.

A reserva de apatita contida no carbonatito pode ser avaliada em 11% dêste e será da ordem de grandeza de uma dezena de milhões de toneladas. Nos trechos mais ricos, poderia ser lavrado material com 12% a 15% de apatita sem dificuldades.

A obtenção de concentrados de fosfatos a partir do calcário constitui problema difícil e ainda pouco investigado. As diferenças de densidade entre apatita ($d = 3.11$) e dolomita ($d = 2.8$) ou calcita ($d = 2.7$) são tão pequenas que não permitem a aplicação de processos gravimétricos de concentração. Eckermann (1948) afirma ser possível a concentração por flotação. Numerosos ensaios foram realizados com minérios dos depósitos africanos, tratando-se porém aí de material misto, primário e secundário com elevada proporção de finos. Ensaios preliminares de flotação do carbonatito de Jacupiranga, executados pelo eng. Paulo Abib Andery demonstraram a possibilidade de obter-se concentrados com mais de 34% de P_2O_5 , que corresponde a cerca de 83% de apatita. Mediante reflotação, êsse teor ainda poderia ser elevado. Estão em curso estudos para verificar a viabilidade técnica e econômica da flotação de apatita em escala industrial.

A fabricação de cimento utilizando calcário rico em fosfatos também apresenta problemas peculiares. Ao que parece, somente em Tororo, na Uganda, carbonatitos são empregados como matéria prima para essa finalidade (Davies, 1954). A rocha contém aí pouco menos de 80% de carbonato de cálcio, 1% MgO e 1.725% P_2O_5 , correspondendo o restante a silicatos, principalmente de inclusões sieníticas. O efeito prejudicial do fósforo foi estudado cuidadosamente, concluindo-se que é permissível um máximo de 2.25% P_2O_5 no clínquer, correspondendo a aproximadamente 1.6% no calcário. Na prática, teores de até 3% foram tolerados no clínquer, satisfazendo êste ainda às especificações inglesas para cimento Portland B. S.-12. Para eliminar o excesso de apatita do carbonatito, parte dêste é calcinado em forno de cal, provocando-se em seguida hidratação. Resulta pó finíssimo de cal hidratada, da qual apa-

tita e silicatos, mais grosseiros, são separados em corrente de ar.

Em Jacupiranga os teores de dolomita e de silicatos estão muito abaixo dos máximos tolerados nas especificações de calcário para cimento. A proporção de carbonato de cálcio é elevada e a magnetita não constituiria inconveniente, porém o anidrido fosfórico ultrapassa de muito o limite de 1.6%. Entretanto, da concentração de apatita resultariam grandes quantidades de rejeitos carbonáticos, que poderiam ser utilizados na fabricação de cimento. Produzindo-se, por exemplo, concentrados com 38% P_2O_5 e 80% de recuperação de apatita, os rejeitos conteriam apenas 1.0% de pentóxido.

Os acessórios mais raros, pirocloro e baddeleyita, ocorrem em teores por demais baixos para permitir sua exploração econômica em separado. Possivelmente poderiam ser obtidos como subprodutos de um beneficiamento do calcário, porém sua granulagem parece excessivamente fina para poder-se prever boa recuperação, acrescentando ainda a friabilidade do pirocloro, que seria transformado em lamas finas por qualquer processo de cominuição.

XIII — CONCLUSÕES

1 — O carbonatito de Jacupiranga apresenta dimensões, estruturas, caracteres petrográficos, composição mineralógica e química típicos de ocorrências de carbonatitos associados a rochas alcalinas.

2 — Seus principais característicos peculiares são: alto teor em apatita, extrema pobreza em sílica e quase ausência de barita.

3 — O carbonatito exhibe texturas e estruturas de corpo intrusivo ígneo e comportou-se como rocha magmática durante a sua intrusão nos jacupiranguitos pré-existentes.

4 — A jazida de apatita que capeia o carbonatito representa parte do resíduo insolúvel deste, dissolvendo-se os carbonatos e restando apatita e magnetita parcialmente alterada.

5 — O modo de formação da jazida atualmente em exploração exclui a possibilidade da existência de maiores reservas de minério residual em profundidade.

6 — Acima da base do morro da Mina ocorrem cêrca de 100.000.000 t de carbonatito. A tonelagem de apatita é superior a 10.000.000 e representa vultosa reserva de fosfatos. Separando-se a apatita dos carbonatos, êstes constituem excelente calcário.

XIV — BIBLIOGRAFIA

- AGARD, J. (1956): Les gites minéraux associés aux roches alcalines et aux carbonatites. Sciences de la Terre, Univ. Nancy, V. 4, pp. 105-151.
- BACKLUND, H. G. (1932): On the mode of intrusion of deep-seated alkaline bodies. Uppsala Univ. Geol. Inst. Bull. 24, pp. 1-24.
- BAILEY, D. K. (1960): Carbonatites of the Rufunsa Valley, Peira District. Geol. Surv. Northern Rhodesia, Bull. 5. Lusaka.
- BETHUNE, P. de (1956): Caractères pétrographiques des carbonatites de la Lueshe (Kivu, Congo Belge). Ann. Soc. Géol. de Belgique, T. LXXX.
- BJÖRLIKKE, H. (1955): The Niobium deposits at Söve, Southern Norway. Min. Journ., Vol. 244, No. 6243, pp. 412-413.
- BÖRLIKKE, H. e SVINNDAL, S. (1960): The Carbonatite and peralkaline rocks of the Fen area. Mining and Exploration work. Norges Geol. Unders. No. 208, pp. 105-110.
- BOWEN, N. L. (1924): The Fen area in Telemark, Norway. Am. Journ. Sci., ser. 5, V. 8, pp. 1-11.
- BRÖGGER, W. C. (1921): Das Fengebiet in Telemark, Norwegen. Vindensk. sels k. skrifter, I, Mat. -Naturwiss. Klasse. No. 9.
- DALY, R. A. (1910): Origin of the Alkaline Rocks. Bull. Geol. Soc. America, Vol. 21, pp. 87-118.
- DALY, R. A. (1918): Genesis of the Alkaline Rocks. Journ. Geol., Vol. 26, pp. 97-134.
- DALY, R. A. (1933): Igneous Rocks and the Depths of the Earth. Mac Graw Hill, New York.
- DAVIES, K. A. (1947): The Phosphate Deposits of Eastern Uganda. Econ. Geol., Vol. 42, pp. 137-146.
- DAVIES, K. A. (1952): The Building of Mount Elgon. Geol. Survey Uganda, Bull. No. 7.

- DAVIES, K. A. (1954): Cement Manufacture in Uganda. Col. Geol. and Min. Res., Vol. 4, No. 4, pp. 366-372.
- DAVIES, K. A. (1956): The Geology of part of South-East Uganda. Geol. Surv. Uganda, Memoir No. VIII.
- DERBY, O. A. (1891): The Magnetite Ore Districts of Jacupiranga and Ipanema, São Paulo, Brazil. Am. Journ. Sci., Sér. 3, Vol. 41, pp. 311-321.
- DIXEY, F., CAMPBELL-SMITH, W. e BISSET, C. B. (1937): The Chilwa Series of Southern Nyasaland. Bull. Geol. Survey Nyasaland, No. 5.
- DIXEY, F. (1946): Carbonatite Pipes and Ring Structures. Geol. Mag., Vol. 83, pp. 289-291.
- ECKERMANN, H. von (1948): The alkaline district of Alnö Island. Sverges Geol. Unders., Ser. Ca, No. 36.
- ECKERMANN, H. von (1950): A comparison between the Paragenesis of Fennoscandian Limestone Contact Minerals and those of the Alnö Rocks associated with carbonates. Min. Mag., Vol. 29, pp. 304-312.
- ECKERMANN, H. von (1958): The Alkaline and Carbonatitic Dykes of the Alnö Formation on the Mainland North-west of Alnö Island. Kungl. Svensk. Vetensk. Handl. Vol. 7. No. 2.
- FAWLEY, A. P. e JAMES, T. C. (1955): A Pyrochlore (Columbium) Carbonatite, Southern Tanganyika. Econ. Geol. Vol. 50, No. 6, pp. 571-585.
- GARSON, M. S. (1955): Flow Phenomena in Carbonatites in Southern Nyasaland. Col. Geol. Min. Res. Vol. 5, No. 3, pp. 311-318.
- GOLDSCHMIDT, V. M. (1954): Geochemistry. Clarendon Press. Oxford.
- HUSSAK, E (1892): Ueber Brazilit, ein neues Tanta (Niob) Mineral von der Eisenmine Jacupiranga. Neues Jb. Min. Geol. Pal. vol. II, pp. 141-159.
- HUSSAK, E. (1895): Ueber den Baddeleyit (syn. Brazilit) von der Eisenmine Jacupiranga in São Paulo. Tschermaks Min. Petr. Mitt., pp. 395-411.
- HUSSAK, E. (1904): Ueber die Microstructur einiger brasilianischer Titanmagneteisensteine. Neues Jahrb. Min. Geol. Palaen. Jg. 1904, Vol. 1, pp. 94-113.
- JAMES, T. C. (1954): Preliminary report on the geological investigations at Panda Hill, Mbeya District. Report. No. T. C. J. 125. Geol. Surv. Tanganyika.
- JAMES, T. C. (1956): Carbonatites and rift valleys in East Africa. Int. Geol. Congr. Mexico (no prelo).

- KING, B. C. (1948): The Napak Area of Southern Karamoja, Uganda. Mem. Geol. Survey Uganda, No. 5.
- KNECHT, T. (1934): Os minerais e minérios do Estado de São Paulo. Boletim de Agricultura, ser. 32, No. único, pp. 237-323.
- KNECHT, T. (1939): As ocorrências de minérios de ferro e pirita no Estado de São Paulo. Bol. Inst. Geogr. Geol. No. 25. S. Paulo.
- KNECHT, T. (1940): Os minerais não metálicos do Estado de São Paulo. Bol. Inst. Geogr. Geol. No. 27. São Paulo.
- KNECHT, T. (1948): Novas ocorrências minerais nos municípios do Extremo Sudoeste Paulista. Min. e Met. Vol. 13, No. 73.
- MELCHER, G. C. (1954): Nota sobre o distrito alcalino de Jacupiranga, estado de São Paulo. Div. Geol. Min., Notas Prelim. No. 84.
- MENELL, F. P. (1946): Ring Structure with Carbonate Cores in Southern Rhodesia. Geol. Mag., Vol. 83, pp. 137-140.
- MEYER, A. e BETHUNE, P. de (1960): The Lueshe Carbonatite. (Kivu, Belgian Congo) Int. Geol. Congr., Part XIII, pp. 304-309.
- PECORA, W. T. (1956): Carbonatites: A review. Geol. Soc. America, Bull., Vol. 67, pp. 1537-1556.
- REEVE, W. H. e DEANS, T. (1954): An Occurrence of Carbonatite in the Isoka District of Northern Rhodesia. Colonial Geol. and Min. Res., Vol. 4, No. 3, pp. 171-181.
- RUSSEL, H. D., HIEMTRA, S. A., e GROENEVELD, D. (1954): The mineralogy and petrology of the carbonatite at Loolekop Eastern Transvaal. Geol. Soc. South Africa, Trans., Vol. 57, pp. 197-208.
- SAETHER, E. (1957): The Alkaline Rock Province of the Fen Area in Southern Norway. Kon. Nat. Wiss. Skr., No. 1.
- SAETHER, E. (1948): On the Genesis of Peralkaline Rock Provinces. Int. Geol. Congr. Rept., Part II, pp. 123-130.
- SHAND, S. J. (1921): The Nepheline Rocks of Sekukuniland. Geol. Soc. S. Africa, Trans., Vol. 24, pp. 11-149.
- SHAND, S. J. (1931): The Granite-Syenite-Limestone Complex of Palabora, Eastern Transvaal and the Associated Apatite Deposits. Geol. Soc. South Africa, Trans. Vol. 34, pp. 81-105.
- SHAND, S. J. (1945): The present status of Daly's hypothesis of the alkaline rocks. Am. Journ. Sci., Vol. 243A, pp. 495-507.
- SINCLAIR, W. E. (1955): The Sukulu Mineral Deposit. Min. Mag. Vol. 92, pp. 216-218.
- SMITH, W. C. (1953): Carbonatites of the Chilwa Series, Southern Nyasaland. British Museum, Bull., Mineral., Vol. 1, pp. 77-119.

- SMITH, W. C. (1956): A review of some problems of African carbonatites. *Geol. Soc. London, Quart. Jour.*, Vol. 112, pp. 189-219.
- SMYTH, F. H. e ADAMS, L. H. (1923): The system calcium oxide-carbon dioxide. *Amer. Chem. Soc. Jour.*, Vol. 45, pp. 1167-1184.
- STRAUSS, C. A. e TRUTER, F. C. (1951): The alkali complex at Spitzkop, Cekukuniland. *Geol. Soc. South Africa, Trans.*, Vol. 53, pp. 81-125.
- STRAUSS, C. A., e TRUTER, F. C. (1951A): Post Bushveld ultra-basic, alkali and carbonatitic eruptives at Magnet Heights, Sekukuniland, Eastern Transvaal. *Geol. Soc. South Africa, Trans.*, Vol. 53, pp. 169-190.
- TRÖGER, W. E. (1952): Tabellen zur optischen Bestimmung der gesteinsbildenden Minerale. Stuttgart, 1952.
- WINCHELL, A. N. (1951): *Elements of Optical Mineralogy*. New York.
- WYLLIE, P. J., e TUTTLE, O. F. (1960): The system CaO-CO₂-H₂O and the origin of carbonatites. *Jour. Petrology*, Vol. 1, pp. 1-46.
- WYLLIE, P. J., e TUTTLE, O. F. (1960-A): Experimental verification for the magmatic origin of carbonatites. *Int. Geol. Congr., Proc., Part XIII*, pp. 310-318.

Í N D I C E

Resumo	5
Abstract	9
I — Introdução	13
Agradecimentos	15
II — Situação geográfica	16
III — Histórico	17
IV — Nomenclatura	18
V — Geologia	20
Rochas alcalinas encaixantes	20
Morfologia	20
Contactos	23
Xenólitos	25
Diques	25
Estruturas	27
VI — Petrografia	29
Carbonatos	33
Apatita	34
Magnetita e ilmenita	36
Flogopita	39
Forsterita	39
Clinohumita	40
Sulfêtos	40
Pirocloro	40
Baddeleyita	41
VII — Composição mineralógica	42
VIII — Composição química	45
IX — Comparação com outras localidades	52
X — Petrogênese	56
Xenólitos	57
Metamorfismo de contacto	58
Intrusão em estado plástico	58
Magma	59
Soluções hidrotermais	62
Processos pneumatolíticos	62
Intrusão do carbonatito de Jacupiranga	63
XI — Jazida de apatita	64
XII — Possibilidades econômicas do carbonatito	67
XIII — Conclusões	69
XIV — Bibliografia	70

