

SÉRGIO ESTANISLAU DO AMARAL

*Do meu colega e  
amigo  
Lorotam,  
do mineral a base  
de Sérgio  
22/8/72*

GEOLOGIA E PETROLOGIA DA FORMAÇÃO IRATI  
(PERMIANO) NO ESTADO DE SÃO PAULO

Separata do Boletim IGA Nº 2

SÃO PAULO  
1971





GEOLOGIA E PETROLOGIA DA FORMAÇÃO IRATI (PERMIANO)  
NO ESTADO DE SÃO PAULO

SÉRGIO ESTANISLAU DO AMARAL

Tese apresentada em 1967 ao Concurso de Livre Docência da Cadeira de Geologia da  
Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo.





## RESUMO

No presente trabalho a Formação Irati é estudada sob o ponto de vista geológico, petrográfico e sedimentológico. Partindo dos estudos de gabinete e das observações de campo, foram eventadas algumas hipóteses sobre as condições gerais, inclusive climáticas, em que se teriam depositado os sedimentos desta formação geológica. Dedicamos especial atenção à faixa existente entre Rio Claro, Piracicaba e Laranjal onde o estudo do Irati é facilitado pela existência de diversas pedreiras que exploram as rochas calcárias da base da citada formação.

Foi feita a descrição macroscópica das rochas do Irati, desde as ocorrências do Estado de São Paulo até às do Rio Grande do Sul. A seguir foram descritos os traços gerais da estrutura desta formação, para depois nos determos nas pequenas feições estruturais e nos estudos petrográficos mais pormenorizados.

No Estado de São Paulo a Formação Irati costuma mostrar-se constituída por um banco dolomítico de 2,5 a 4 metros de espessura, ora junto à base da formação, ora próximo a ela, tendo por cima cerca de 20 a 30 metros de um pacote constituído de camadas decimétricas alternadas de folhelho preto e calcário, mais comumente dolomítico. O Irati existente nas partes centrais da bacia, conhecido através de sondagens, possui espessura heterogênea, variando de 10 a 50 metros, em média, segundo os relatórios da Petrobrás. Segundo estes mesmos relatórios, a litologia é muito semelhante à dos afloramentos, com exceção do banco basal, presente apenas na área correspondente à borda pouco profunda da bacia.

As camadas mergulham suavemente para o interior da bacia, indicando a existência pretérita de um único lago,

cujas margens correspondem aproximadamente aos locais onde atualmente aflora o Irati. No Estado de São Paulo, entre Limeira e Laranjal, as camadas do Irati têm direção N 35° E, com mergulho de 1° 20' para NW.

As principais estruturas tectônicas do Irati consistem em falhamentos, enquanto que as atectônicas consistem em pequenas e localizadas dobras produzidas por escorregamentos subaquáticos, que foram também responsáveis pela formação de brechas calcárias existentes ora em um, ora em três a quatro níveis pouco espessos de brecha calcária intraformacional, existente no banco da base da formação em estudo.

O sílex existente no Irati formou-se por vários processos e em diferentes tempos. Um deles se verificou antes da diagênese dos calcários, sendo portanto singenético. Acreditamos que o sílex singenético se formou a partir da dissolução de espículas silicosas de esponja.

A dolomitização foi em grande parte singenética, sendo provável ter-se dado também a dolomitização epigenética. A dolomitização primária é em parte provada por aspectos estruturais da brecha intraformacional, fato abordado no respectivo capítulo.

O metamorfismo térmico das rochas calcárias (decorrente da intrusão de corpos de diabásio) é evidenciado pela recristalização e conseqüente aumento da granulação. Os raros minerais metamórficos encontrados são os seguintes: diopsídio, grafita, apofilita e hidromagnesita. Foram pequenas as transformações sofridas pelos folhelhos, que unicamente perderam o caráter folheado e a coloração preta.

A textura mais comum das rochas calcárias do Irati é a microgranobástica em mosaico, sendo de 5 a 10 microns



o tamanho mais comum dos cristais de dolomita ou calcita. Ocorrem subordinadamente calcarenitos de grãos oo'íticos ou simplesmente ovóides ou esféricos, sem estrutura interna. Assim sendo, predominam largamente os tipos que caracterizam os ambientes de baixo grau de energia, fato compatível com o ambiente tectônico tranquilo durante toda a época de deposição do Irati.

O resíduo insolúvel dos calcários consiste mais comumente em calcedônia finamente disseminada, por vezes coalescida num esqueleto esponjoso. De um modo geral é rara a presença de argila no citado resíduo. São ocasionalmente encontrados, e às vezes abundantes, esporos alados de gimnospermas junto ao resíduo insolúvel dos calcários, bem como, no interior de certos nódulos de sílex associados aos folhelhos pirobetuminosos. Podem ser também encontra-

dos fragmentos de espículas silicosas monoaxônicas de esponjas, sendo contudo extremamente raros.

A Formação Irati originou-se da deposição de sedimentos finos, ora calcários ora argilosos, em um grande lago situado em região aplainada e tectonicamente estável. Graças à estagnação das águas gerou-se um ambiente redutor, conservando-se parcialmente a matéria orgânica. O teor de níquel das cinzas do betume, mais o teor de boro nos folhelhos, além da presença de espículas de esponja e ainda outros argumentos adicionais nos levaram à conclusão de que este lago se comunicava com o mar, não sabemos em que parte da bacia. O clima parece ter sido quente e pouco chuvoso durante a fase inicial do Irati no Estado de São Paulo, passando posteriormente a frio e chuvoso alternado com épocas quentes e secas.

#### ABSTRACT

The results of geological, petrographic and sedimentologic studies on the Irati Formation (Permian of the Paraná Basin, Brazil) are presented in this paper. It was possible to formulate some hypothesis concerning the environmental and climatic conditions of the formation, based on field and laboratory studies. The Rio Claro — Piracicaba — Laranjal region, State of São Paulo, afforded more detailed studies thanks to the occurrence of several dolomite quarries of Irati Formation.

Macroscopic descriptions of this formation are presented from outcrops of São Paulo, Paraná, Santa Catarina and Rio Grande do Sul States. Large and small structures were also studied. In São Paulo State the Irati Formation is commonly represented by a dolomitic bank at the base (or very near the base), with 2 — 3 meters thick. This bank is followed by a sequence of rhythmic layers of dolomite and black shale 20 — 30 meters thick. Each one of the individual layers has about 10 to 20 centimeters thick. In the southern part of Brazil the lithology is the same, but with irregular distribution and varied thick-

ness. Fine grained pyrite and chert nodules are present in the dolomites and black shales. The Irati Formation occurring in the central part of the Paraná Basin, as known from drilling cores, has also the same lithology, and the thickness is between 10 to 50 meters.

The beds dip slightly basinward, indicating the existence of one lake, whose former limits are not far from the outcrops of Irati Formation. This can be inferred by the abundance of Gymnosperm bisaccate spores in the calcareous rocks. Between Limeira and Laranjal (São Paulo State) the general strike of the beds is N 35° E, dipping 1° 20' to NW.

The main tectonic structures consist in normal faults, occurring however at tectonic structures represented by small and rare folds due to underwater slumping. These are also responsible by the formation of one to three layers (10 to 30 cm thick) of intraformational breccia in the basal dolomitic bank.

The chert of Irati Formation was originated by several processes in different occasions. One of the processes occurred at the time of the diagenesis of



limestones, so, it is syngenetic. It is probable that the origin of silica was related with dissolution and remobilization of spicules of sponges.

The dolomitization was in part probably early, soon after sedimentation. It is also possible that in other cases dolomitization also occurred as an epigenetic phenomena. Primary dolomitization was confirmed by some structural aspects of the intraformational breccia.

The optical metamorphism of carbonatic rocks, due to diabase intrusions, caused an increase of the granulation. The new formed minerals are: diopside, graphite, apophyllite and hydromagnesite. However, they are not common. The black shales changed the black color sometimes to greenish or to white colors and lost the fissibility.

The carbonatic rocks are generally a microgranoblastic in mosaic, and the crystals are commonly 5 to 10 microns large. Sometimes the texture is typical of calcarenites, with oolitic or semi-spherical grains without internal structures. So, it predominates by far the types which characterize the low grade energy environment. This agrees with the

tectonic tranquillity of the deposition of Irati Formation.

The insoluble residue of the carbonatic rocks consists mainly of fine grained chalcedony, sometimes coalesced in a spongy skeleton. Clay is very uncommon among the insoluble residue. Sometimes abundant bisaccate spores of Gymnospermae occur, sometimes inside some black nodules of syngenetic chert associated with black shale. Monaxonid spicules of silicisponge are extremely rare.

Irati Formation was formed by the deposition of fine grained calcareous or clayey sediments, in a lake established in a low plane, tectonically stable area. Due to the water stagnation an euxinic environment was developed. The nickel content in ashes of bituminous material and the boron of shales, plus the presence of spicules of sponge led the Author to conclude that the lake had somewhere connections with the sea. It is admitted that the climate was warm and dry during the first stages of the sedimentation, at least in the State of São Paulo. In the subsequent stages the climate changed to alternating phases of cold and rainy seasons to warm and dry ones.



## I — INTRODUÇÃO

### 1. *Definição do Irati* —

A Formação Irati, de idade permiana inferior, foi assim designada por I. C. White, quando estabeleceu a sua coluna das rochas gondwânicas do "Sistema de Santa Catarina", assunto publicado no seu Relatório Final de 1908. O primeiro a estudar o Irati, sem dar nome às formações, foi Auguste Collon, que em 1897 publicou um minucioso estudo sobre os hidrocarbonetos de várias localidades do interior de São Paulo, inclusive do Irati próximo de Tatuí. Na mesma época F. P. de Oliveira (1889) descreveu o Irati, dando a designação de Série de Itapeitinga aos sedimentos que constituem o atual Grupo Passa Dois. O nome Irati, que na língua tupi significa rio do mel, provém da cidade paranaense do mesmo nome, onde afloram os folhelhos pretos desta formação geológica.

Do ponto de vista estratigráfico a Formação Irati acha-se situada acima do Grupo Tubarão (Permocarbonífero) e abaixo da Formação Estrada Nova, ainda de idade permiana. No Estado de São Paulo o Irati mais o Estrada Nova constituem o Grupo Passa Dois, enquanto que nos Estados do Paraná e Santa Catarina a subdivisão estratigráfica do Permiano é bem mais complexa, assunto que não será discutido no presente trabalho. Limitar-nos-emos a situar o Irati, que se assenta sobre a Formação Palermo e sob o membro Serra Alta da Formação Estrada Nova.

Na orla ocidental da Bacia do Paraná o Irati é menos conhecido, pois, acha-se encoberto. Ao sul, no Paraguai, ocorrem folhelhos pirobetuminosos da citada formação, sendo contudo, relativamente raros. Harrington (1950) cita a ocorrência do *Mesosaurus* no topo do Tubarão, porém, em arenitos, rochas inexistentes no Irati.

No continente africano ocorre a Formação White Band, situada logo acima da chamada Série Dwyka, que corresponde ao Grupo Tubarão do Brasil. A citada Formação White Band equivale à Irati, graças à posição estratigráfica, semelhança litológica e paleontológica.

A espessura média do Irati no Estado de São Paulo, nos afloramentos, varia de 20 a 30 metros, aumentando para 40 a 50 e poucos metros nas sondagens situadas mais no meio da bacia. A espessura diminui nas ocorrências mais setentrionais, (Goiás e Mato Grosso), e aumenta nas ocorrências mais meridionais, ou seja, as do Uruguai, onde o Irati chega a 70 metros (Caorsi e Goñi, 1958). Como anormalidade citaremos o Irati da região sul de Santa Catarina, onde Putzer (1955) observou o adelgaçamento de norte para o sul, passando de 70 para 32 metros em menos de 40 km.

A característica mais notável da Formação Irati consiste na sua uniformidade litológica numa área tão grande, como se vê na fig. 1-1. Tanto a litologia observada nos afloramentos como a do meio da bacia, conhecida graças às sondagens da Petrobrás, mostram-se de uma uniformidade impressionante. Tal já fôra notado por Gonzaga de Campos, segundo citação de F. P. Oliveira (1889), que por sua vez, também estudou esta formação, sendo assim um dos pioneiros deste interessante estudo. A litologia do Irati constitui-se essencialmente de folhelhos pretos, por vezes pirobetuminosos, e dolomitos, ora mais, ora menos calcítico. É notável a constância do sílex, quer sob a forma de concreções, quer como leitos decimétricos de grande extensão na horizontal. Somente não observamos o sílex nos aflora-



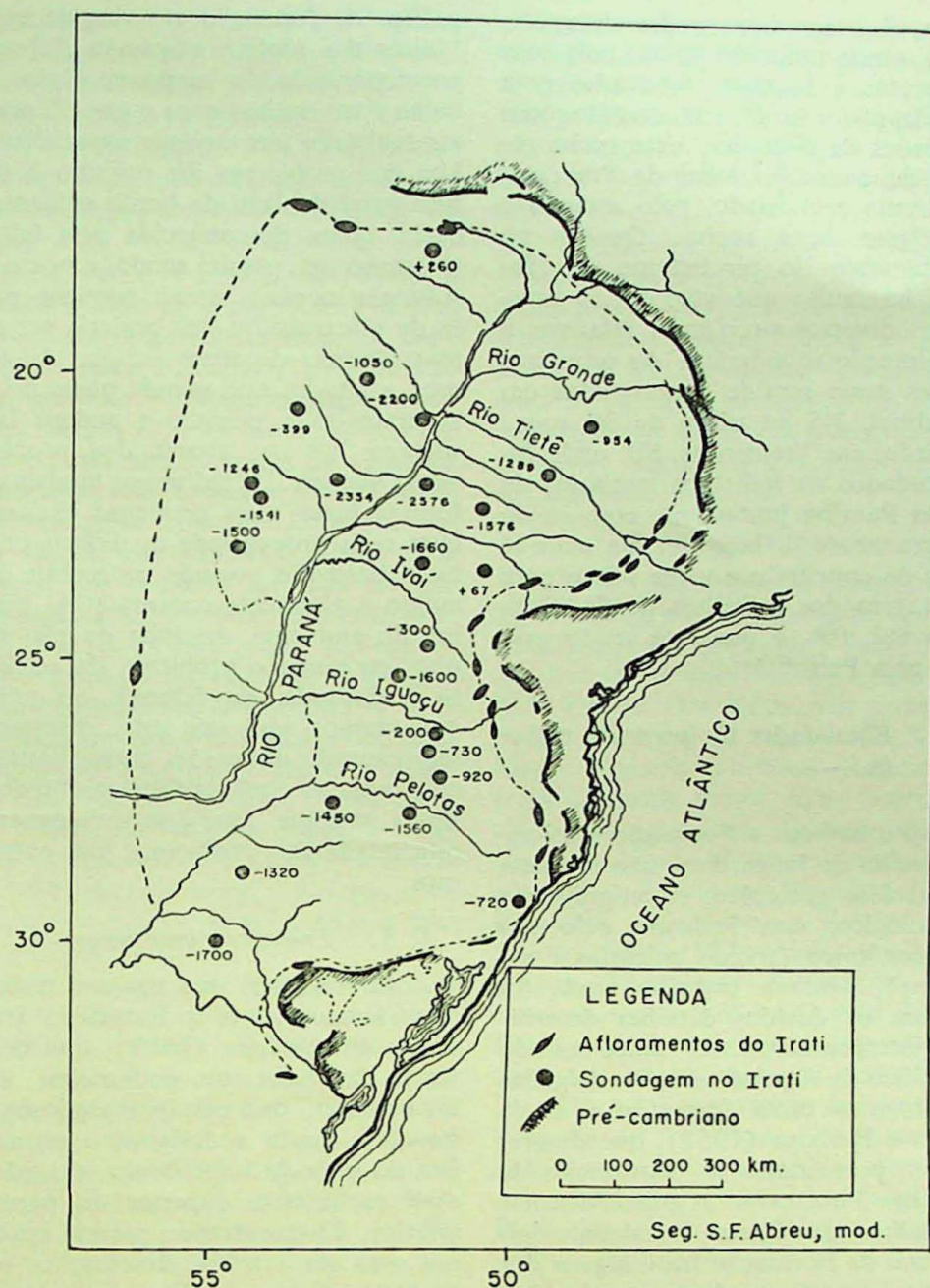


Fig. 1-1. — Distribuição dos afloramentos e das cotas do Irati. Os números representam os valores das cotas em metros (em relação ao nível do mar) das camadas testemunhadas no interior da bacia do Paraná.

mentos do Rio Grande do Sul. A maior variação observada na litologia do Irati reside nas proporções entre calcário e folhelho, mas as suas características são idênticas e inconfundíveis, motivo pelo qual trata-se de excelente formação chave para o estudo estratigráfico do Gondwana.

Sua importância econômica atual reside no aproveitamento das rochas calcárias, mormente no Estado de São Paulo. Faz poucos anos que aumentou consideravelmente a sua exploração para corretivo de solo, mas antigamente o principal uso era para o fabrico da cal. Em menor escala, dependendo do tipo de



calcário, é usado para pedra de revestimento, sendo muito apreciado pela suas cores pretas e brancas, motivadas pela recristalização quando em contáto com as intrusões de diabásio. Esta rocha recebe a denominação local de "marmorina", termo apropriado, pelo aspecto e pela origem desta rocha. Quanto ao aproveitamento do pirobetume dos folhelhos, há muito que vêm sendo estudados os diversos problemas relativos à sua exploração econômica. As primeiras tentativas neste sentido foram feitas em São Gabriel, RS há cerca de 30 anos. Mais tarde, em Tremembé, SP, onde foram estudados os folhelhos terciários da bacia do Paraíba juntamente com os do Irati paranaense, e hoje em dia acha-se em fase de conclusão a usina piloto para a retortagem dos folhelhos de São Mateus do Sul, PR, o que está sendo executado pela Petrobrás.

## 2. Finalidades do presente trabalho —

Muito embora a Formação Irati seja conhecida de longa data, não somente pelo interesse geológico, estratigráfico e paleontológico, mas inclusive pelo seu valor econômico (rochas calcárias e pirobetume), nenhum trabalho ainda foi feito com os devidos detalhes descritivos e interpretativos. O único estudo petrográfico de algumas secções delgadas dos dolomitos desta formação é o de Almeida e Barbosa (1953), que descrevem com pormenores as ocorrências de Rio Claro e Piracicaba. Algumas dezenas de trabalhos geológicos e paleontológicos tratam da Formação Irati, alguns dos quais citaremos no próximo parágrafo. Assim sendo, propuzemo-nos a encarar o problema um pouco mais de perto, adotando algumas técnicas inéditas, tendo em vista o conhecimento litológico mais acurado, sob o ponto de vista petrográfico, e ainda o estudo da sua estrutura geral, bem como, o referente ao intrincado e difícil problema da silicificação e condições gerais de sedimentação. Como era de se esperar, são muitos os pontos a serem resolvidos, tal a extensão geo-

gráfica da formação em vias de estudo. Muitos dos tópicos exigem a elaboração pormenorizada do mapa geológico, trabalho para muitos anos e que só poderia ser realizado por equipes especializadas. Um dos problemas diz respeito à estrutura geral do Irati da borda ocidental da bacia, quase desconhecida pela falta de afloramentos. Assim sendo, a nossa contribuição consiste numa pequena parcela de um trabalho que poderia ser algumas dezenas de vezes maior. Acreditamos, contudo, que grande parte do nosso trabalho é inédito, e poderá lançar alguma luz em alguns dos problemas ainda abertos. Acreditamos também, que futuras luzes mais profícuas esclareçam com mais propriedade os difíceis problemas abordados por nós, mormente o discutido e altamente controvertido problema do ambiente, marinho ou não marinho, ou ainda o problema da estrutura, se é dobrada, ou falhada, ou ambas. Adiantamos aqui que estas divergências têm causado discussões entre mestres de alto renome, conhecedores profundos da nossa geologia, fato que vem mostrar a dificuldade dos problemas que enfrentamos.

## 3. Trabalhos anteriores —

Já referimos que um dos trabalhos mais antigos sobre a Formação Irati é de F. P. Oliveira (1889), que descrevia os "schistos com pederneiras, schistos betuminosos e calcários argilosos com fósseis", dando a designação estratigráfica de série de Itapetininga, considerando-a carbonífera superior ou permiana inferior. Demonstrando grande acuidade nas suas observações, descreve os restos do *Stereosternum tumidum* (estudado por Cope em 1885), de madeiras fósseis, dentes, escamas, crustáceos e moluscos. É provável que estes tenham sido confundidos com carapaças de *Liocaris*. Poucos anos depois I. C. White (1908) adotou a designação "xistos do Irati", que mais tarde passou a Formação Irati. Seu maior mérito consistiu no estudo pormenorizado que fez sobre a composição química da fração betuminosa dos betumes desta formação.



Julgamos supérflua a citação de todos os trabalhos relacionados à Formação Irati, uma vez que Mezzalira (1964) apresenta minuciosa bibliografia a respeito. Por este motivo citaremos somente alguns deles, que nos pareceram de maior interesse para o conhecimento do Irati.

Duas décadas depois de White é publicada a obra de Washburne (1930), que descreve o Irati e dá ênfase à continuidade desta formação, interpretada como marinha. Nesta mesma época Moraes Rêgo (1930) descreve brevemente o Irati sob o ponto de vista de sua litologia, seus fósseis e suas possibilidades de gerar betume. Logo em seguida Oppenheim (1934a) estuda esta formação sob o ponto de vista da sua importância para petróleo, e noutro trabalho, em co-autoria com Malamphy (1936) estuda a estrutura geral das camadas gondwânicas, destacando o Irati como camada guia. Dos trabalhos mais antigos destaca-se o de Euzébio de Oliveira (1940, obra póstuma), que trata com muita propriedade e muita prudência o problema do ambiente de deposição, além de relacionar a litologia com a provável variação de salinidade e tipo de crustáceo fóssil.

Posteriormente o Irati é estudado por Fróes Abreu (1946), que abordou o problema da natureza e gênese das substâncias sapropélicas e do betume, apresentando o mapa da distribuição geográfica das ocorrências. Dos trabalhos mais modernos sobre a formação em estudo destacam-se os de Almeida e Barbosa (1953) e os de Mezzalira (1952, 1954 e 1957). Enquanto que este estudioso trabalhou principalmente com os crustáceos fósseis, aqueles apresentaram um estudo geológico, petrográfico e es-

trutural, o que representa valiosa contribuição ao conhecimento do Irati, muito embora não concordemos "in totum" com pequenos setores do mapa geológico e com algumas interpretações petrográficas, o que será referido no devido capítulo.

Finalmente, Beurlen (1954, 1955) e Mendes (1961, 1963, 1966 e 1967) tecem considerações sobre problemas estratigráficos, paleontológicos e sobre o ambiente de deposição, havendo entre ambos divergências quanto à natureza dos fósseis e quanto à interpretação do ambiente, assunto a ser tratado no último capítulo.

#### 4. *Agradecimentos* —

Somos imensamente gratos aos colegas e amigos que, de maneira cordial e desinteressada, prestaram valioso auxílio durante o decorrer do nosso trabalho. Dentre eles todos não poderíamos deixar de citar os nomes de Adolpho Melfi, Antonio Thomaz, Franco Levi, Irajá Damiani Pinto, João Bosco Ponciano Gomes, José Eduardo Siqueira Farjallat, José Moacyr Vianna Coutinho, José Camargo Mendes, Luciano Barzaghi, MacKenzie Keith, Maria Szikzay, Paulo Milton Barbosa Landim, Sérgio Mezzalira, Setembrino Petri, Viktor Leinz e William Gerson Rolim de Camargo. A estes prezados colegas e amigos, a minha profunda gratidão.

Devo à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo o auxílio financeiro, que muito me ajudou, sobretudo nos gastos de viagem. Ao Prof. Dr. Jayme Cavalcanti, amigo de muitos anos, e ao pessoal da Administração, que tão gentilmente me auxiliou, os meus profundos e sinceros agradecimentos.

## II — MÉTODOS DE TRABALHO

A obtenção dos dados de campo e a coleta de amostras para estudos de gabinete foram executadas de maneira mais intensiva nos arredores de Limeira, Rio Claro, entre Piracicaba e Tietê, e arredores de Laranjal, pelo fato de ser gran-

de o número de boas exposições, quer nos cortes das estradas de rodagem e de ferro, quer nas inúmeras pedreiras de calcário dolomítico. A seguir estendemos as nossas observações a várias outras ocorrências, ainda no nosso Estado,



bem como, nos estados sulinos até ao Rio Grande do Sul, tendo em vista a comparação das diversas ocorrências.

Com o auxílio das fotografias aéreas (escala 1:25.000) dos arredores de Piracicaba e Laranjal localizamos com exatidão os pontos estudados e as suas respectivas altitudes, o que permitiu confirmar a direção e ângulo de mergulho, previamente medidos no campo com teodolito. A altimetria dos afloramentos foi tomada com aneróide Short & Mason, cuja precisão é de 10 pés. Servimo-nos das altitudes das estações das linhas férreas (Estrada de Ferro Sorocabana e Companhia Paulista) para a correção das altitudes. Dedicamos atenção especial às pedreiras, pelo fato de ser muito rara uma exposição boa nas estradas, quer pela pequena profundidade dos cortes, quer pela facilidade com se alteram as camadas de calcários e folhelhos. Além disso, graças à remoção das camadas rítmicas estéreis, de dolomito e folhelho, para a exploração da camada basal, muito comumente a superfície superior desta camada fica exposta em áreas grandes. Nestas podíamos executar as medidas de direção e mergulho com muita facilidade e grande exatidão, fazendo uso do nível de mão e da trena, depois de se observar a direção de mergulho máximo.

Após a anotação dos dados referentes aos aspectos estruturais (diaclasses, dobras, eventuais falhas, e muitas vezes marcas de correnteza ou marcas de erosão muito bem conservadas sobre a superfície superior do banco basal), procedíamos à amostragem dos sedimentos em cada ocorrência observada. Em função das variações locais da litologia, que refletem as variações nas condições de sedimentação, foram coletados diferentes números de amostras de cada local estudado. Procedemos igualmente à observação e coleta parcial de amostras de sondagem, a maior parte pertencente à Petrobrás.

No laboratório examinamos sob o microscópio petrográfico grande número de secções delgadas, bem como, o resíduo insolúvel ao ácido clorídrico diluído

das rochas calcárias. Neste estudo tivemos como finalidade o conhecimento da composição mineralógica do resíduo e a procura de eventuais restos fósseis. Determinamos a porcentagem do resíduo, e neste, a porcentagem dos constituintes clásticos em relação à calcedônia, não clástica no presente caso. A fim de confirmar os dados ópticos procedemos à determinação ao raio X e à análise térmica diferencial. Para a obtenção de resultados significativos procedemos a uma verdadeira amostragem em cada amostra, retirando pequenas lascas no sentido da estratificação e quarteando-as antes da pesagem e ataque com ácido clorídrico diluído.

Submetemos ainda o resíduo insolúvel ao aquecimento ao rubro, por meio do maçarico de boca, a fim de se observar a ocasional presença de material argiloso, que ocasionaria o endurecimento parcial do resíduo, quase sempre de granulção extremamente fina.

No estudo da textura dos folhelhos friáveis conseguimos a obtenção de secções delgadas por meio de uma nova técnica, que consiste em cortar o material com navalha numa superfície lisa, sobre a qual se aplica uma delgada lâmina de cola-tudo de endurecimento rápido. Como a película se encurva ao ser cortada, torna-se necessário aplicar-se antes um pequeno fragmento de papel celofane, o que é um inconveniente graças à sua birrefringência. Para a desagregação dos folhelhos adotamos também uma técnica própria, eficaz e extremamente fácil. Usamos para isso uma escova comum de cerdas curtas e duras, que em seu movimento de vai-vém, ao serem comprimidas, pressionavam e desagregavam satisfatoriamente os fragmentos de folhelhos previamente umedecidos.

As substâncias betuminosas existentes nos calcários de Assistência e Piracicaba foram estudadas sob vários pontos de vista, a saber: conteúdo inorgânico (impurezas) e orgânico (restos fósseis conservados), em que porcentagem ocorrem e finalmente, o teor de níquel existente nas suas cinzas. Julgamos mais



viável descrever os pormenores deste estudo no devido capítulo, a fim de não alongar demais esta introdução.

Submetemos quase todas as amostras à radiação ultravioleta, bem como, o material betuminoso e pirobetuminoso, tanto extraído artificialmente pela dissolução ou pelo aquecimento, como também o betume existente sob a forma natural, encontrado nas fendas ou em vazios dentro dos calcários.

No estudo da dolomitização adotamos a técnica recomendada por Holmes (1921, p. 266). Consiste em aquecer a amostra durante 3 minutos a 70° numa solução de nitrato de prata a 10%. Depois adiciona-se cromato de potássio (solução a 10%), que dá uma coloração vermelho acastanhada na calcita, não reagindo com a dolomita, que permanece

inalterada na sua coloração. Posteriormente repetimos os ensaios usando a alisarina, segundo técnica recomendada por Warne (1962). Alguns calcários foram estudados na Universidade de Pensilvânia por MacKeith, sob o ponto de vista do teor dos isótopos do carbono ( $C^{13}$ ) e oxigênio ( $O^{18}$ ), assunto a ser tratado oportunamente.

Finalmente, estudamos os resíduos de alguns solos do Irati, fazendo uso da bateia, tendo em vista a sua comparação com as terras roxas, cujo aspecto é muito semelhante ao solo avermelhado do Irati, graças à decomposição da pirita. Na avaliação das porcentagens, de um modo geral, adotamos a técnica descrita por Niggli (1954), o que permite ótima exatidão para o presente estudo e rapidez nas determinações.

### III — CARACTERES LITOLÓGICOS MACROSCÓPICOS DA FORMAÇÃO IRATI

#### 1. *No Estado de São Paulo —*

Neste capítulo apresentamos a descrição dos afloramentos observados, iniciando com os do Estado de São Paulo, onde as observações foram mais minuciosas. De norte para sul, os estudos vão desde Ipeúna, bairro de Assistência (Mun. de Rio Claro), Limeira, Piracicaba, Laranjal, Guareí, arredores de Angatuba, Itai, Taquarituba e Taguaí (fig. 4-1).

#### a — *Zona de contato com o Grupo Tubarão —*

Iniciemos a descrição com a base do Irati e a natureza do substrato em que ela se assenta, ou seja, o topo do Grupo Tubarão. Não nos foi fácil a observação direta deste contato. Infelizmente são poucas as observações desta importante feição, pois as pedreiras estudadas em seus pormenores situam-se mais comumente em lugares de topografia baixa, não se exibindo as camadas inferiores. Nos cortes de estrada ou nas exposições naturais a alteração costuma ser intensa. Apesar desta dificuldade pudemos verificar que a base do Irati, quando situada mais próxima à antiga margem (hoje desaparecida pela erosão), ou

seja, nos contatos mais a leste, constitui-se de um banco calcário de 2,5 a 3,5 metros de espessura. Este banco aflora sempre, inclusive na região de Angatuba, com a mesma espessura e mesma litologia, o que será descrito adiante. O contato direto deste banco com o topo do Tubarão pode ser observado na rodovia São Paulo-Piracicaba (nas proximidades de Tupi) e na linha férrea, no km 116, próximo à estação de Taquaral, C. P. Trata-se da localidade onde Almeida e Barbosa (1953) estabeleceram e descreveram o Membro Taquaral, o último da Formação Itapetininga do Grupo Tubarão. Constitui-se de argilitos ligeiramente amarelados, pouco silteosos, e bem estratificados.

Tal sequência não se observa nos afloramentos situados em áreas mais distanciadas da antiga margem da bacia. Tanto o topo do Tubarão como a base do Irati são diferentes dos de Tupi. O primeiro é representado por clásticos mais grosseiros. Assim é que em Assistência ocorrem arenitos finos e siltitos com lentes irregulares, desde um palmo até um metro de espessura de um conglomerado atípico, chamado por muitos de "bone-bed". Caracteriza-se pela pre-



dominância de seixos de sílex, ocorrendo também escamas e dentes de peixes. Em Laranjal, no leito do Ribeirão das Onças, ocorre o Tubarão logo abaixo do Irati (não nos foi possível ver o contato direto), sendo representado por siltitos arenosos verdes quando molhados. Quando secos são cinzentos muito ligeiramente esverdeados.

Esta heterogeneidade para o topo do Tubarão sugere a existência de uma discordância erosiva com o Irati. Contudo, nada pode ser afirmado sem a elaboração de um mapa geológico. A ausência do citado membro Taquaral nas áreas citadas tanto pode ser interpretada como uma fase erosiva local, como pela ausência de condições para que se tenha depositado.

Do que acabamos de expor, conclui-se que não é fácil a caracterização da base do Irati, assunto já estudado pelo Autor, em co-autoria com Mendes et al. (1966). Deixando de lado as eventuais intercalações de sedimentos clásticos finos, característicos de um fácies oxigenado e de águas límpidas, podemos caracterizar a discutida base pela presença de rochas calcárias ou folhelho preto comumente betuminoso, ambos com nódulos de sílex. Muito embora possa ocasionalmente ocorrer o fácies oxigenado dentro da Formação Irati, deve-se dar ênfase a inexistência do fácies redutor dentro da Formação Itapetininga. Não se verifica, portanto, uma passagem gradual entre as citadas formações. Não há dúvida de que se deu uma radical mudança de ambiente no decorrer do tempo geológico, com algumas excessões (que são os fácies oxigenados do Irati) no espaço geográfico.

Voltando à descrição da base do Irati, já nos referimos ao banco basal calcário, uniforme na litologia e na sua espessura. Nem sempre, contudo, situa-se diretamente acima do Tubarão. Em Assistência, na pedreira do Sr. Anafraim Huppert, mais conhecida como pedreira do Fanico, pudemos medir com exatidão estas camadas intermediárias entre o banco calcário e o Tubarão. Extrapolando-se as observações pelos arre-

dores da referida pedreira obtivemos o seguinte perfil:

Espessura em metros	—	Litologia
30	—	camadas rítmicas de folhelho e rochas calcárias (descrição pormenorizada adiante)
3,5 a 4	—	banco de dolomito e calcário dolomítico (descrição pormenorizada adiante)
0,3	—	Calcário silicificado
1,2	—	folhelho preto com raros e pequenos nódulos de sílex na sua metade superior e lentes irregulares de até 10 cm de espessura de sílex na metade inferior
4	—	folhelhos pretos com grandes e irregulares nódulos de calcário dolomítico, descrito logo a seguir.

Esta última unidade litológica citada, logo acima do Tubarão, merece descrição mais pormenorizada, tendo sido objeto de estudos por Landim (1965), que estudou as deformações dos nódulos, que sofreram o efeito da compactação num estado ainda plástico. Além das deformações por compactação ocorre uma verdadeira intrusão calcária de cerca de meio metro de largura, de forma muito irregular, que corta quase verticalmente os leitos contorcidos de folhelho e calcário sem afetar a camada superior de folhelho. Esta ocorrência patenteia a plasticidade da lama calcária, praticamente isenta de impurezas argilosas, pois, possui 8% de resíduo insolúvel, do qual somente 1% é de origem clástica, principalmente siltosa, sendo o restante calcedônia. Mais pormenores poderão ser encontrados na obra citada de Landim.

As demais observações que temos sobre a parte inferior ao banco calcário de outras ocorrências são incompletas. Assim, ao norte de Laranjal, conseguimos coletar sob as águas do Tietê, logo abaixo do citado banco, o folhelho pirobetuminoso típico do Irati. Finalmente, em algumas das pedreiras si-



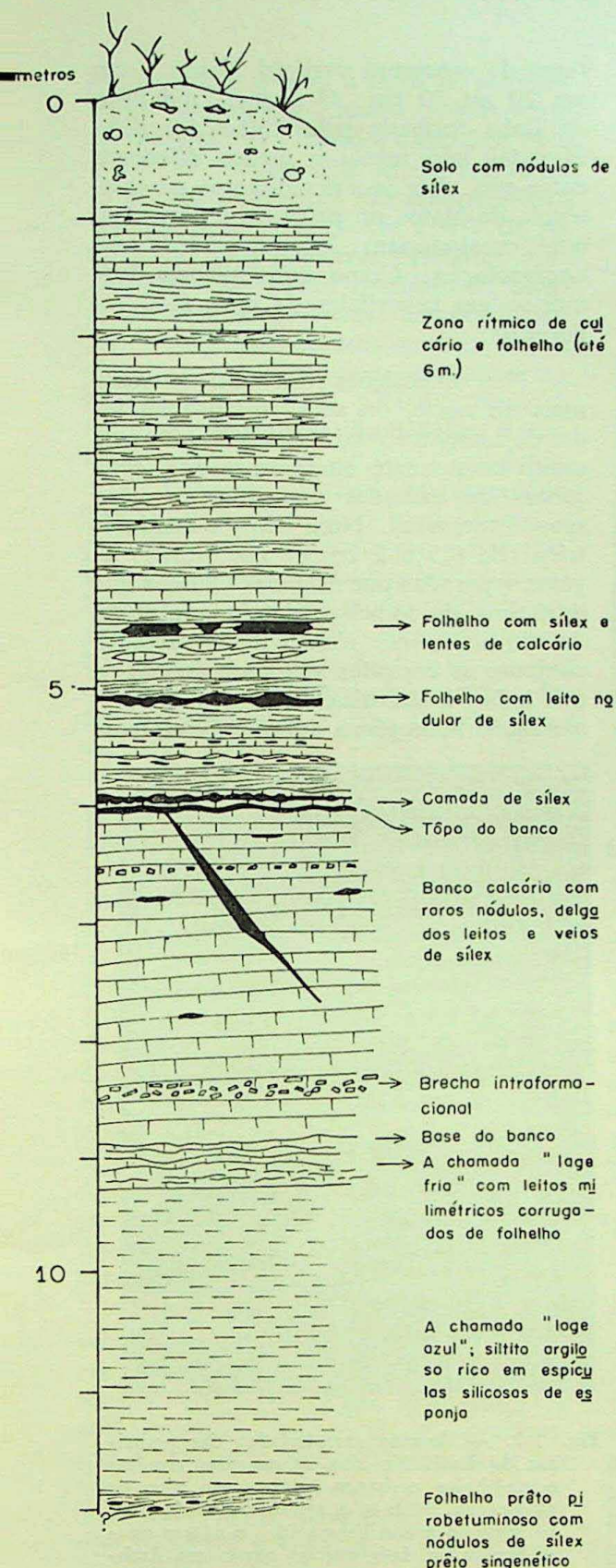


Fig. 3-1. — Seção geológica da pedreira do Sr. Maluf. Acha-se representada a parte inferior do Irati. Não sabemos até onde vai a base do Irati. Ocorrem no banco dois níveis da brecha intraformacional. A cor preta representa o sílex.

tuadas próximas à rodovia estadual Piracicaba-Tietê, pudemos em alguns casos observar até a quase 4 metros abaixo do banco, graças a algumas escavações abertas, que se destinam ao escoamento das águas (Fig. 3-1). Logo abaixo do banco ocorre quase meio metro de uma camada denominada localmente de "lage fria", pelo fato de não produzir cal, segundo informações dos que exploram as pedreiras. Trata-se de um dolomito quase isento de calcita, mas com teor anormalmente elevado de resíduo silicoso, que se aglomera com o calor e provavelmente impede a transformação nos respectivos óxidos. Abaixo seguem-se 3 metros de um siltito argiloso (ou talvez argilito siltoso), cinzento, ligeiramente azulado, sem a laminação fina que caracteriza os folhelhos do Irati. Muito embora em tudo se pareça às rochas do tôpo do Tubarão, deve ser considerado como Irati, pois, por baixo ainda ocorrem folhelhos bem laminados, pretos, cheios de pequenos nódulos de sílex e com elevado teor de pirotetume (chegam a arder sob o calor da chama), atributos exclusivos da Formação Irati. O citado siltito consiste numa das raras excessões quanto à litologia que observamos na Formação Irati no nosso estado. Outra excessão ocorre na zona rítmica acima do banco, entre Itapetininga e Angatuba, à qual faremos referência quando descrevermos a litologia da zona superior ao banco.

#### b — Descrição do banco basal —

Prosseguindo na descrição do Irati do Estado de São Paulo, passemos ao já citado banco, ora na base da formação, ora poucos metros acima da base. Graças à sua espessura constante (pelo menos nas ocorrências estudadas) e homogeneidade litológica, vem sendo intensamente explorado para o preparo da cal e para corretivo de solo. A litologia do banco consta de rochas calcárias em alta predominância, mais o sílex, que ocorre na proporção de 3 a 5%. Eventualmente encontram-se ainda lâminas milimétricas a submilimétricas de material argilo-siltoso preto, ora disposto em lâminas regularmente espaçadas (sendo



os espaços centimétricos), ora de modo irregular, sinuosas, interrompidas, às vezes concentradas e outras vezes muito esparsas. Quanto às rochas calcárias, notamos grande variação no que diz respeito ao teor em magnésio. Ocorre desde o dolomito quase puro até ao calcário quase puro, com todos os tipos intermediários. A grande predominância, contudo, é dos tipos mais magnesianos. De um modo geral são impuros, com um teor variável desde 2% até 30% de resíduo insolúvel. Este, por sua vez, constitui-se de calcedônia finamente subdividida e uma porcentagem variável (desde zero até 50%) de grãos clásticos siltosos de quartzo e feldspato.

Em Ipeúna observamos em certos horizontes do banco a presença de inúmeros poros milimétricos atapetados de calcita bem cristalizada. Muitos destes poros acham-se impregnados de betume, e em muitos deles reconhece-se o vazio causado pelo molde do *Liocaris*, crustáceo abundante nestas rochas.

#### Coloração —

A coloração das rochas carbonáticas do banco apresenta pouca variação. Em certos casos apresenta-se creme clara a quase branca em toda a sua extensão, como nas pedreiras do Arraial São Bento, localidade próxima a Saltinho, SP. Em outras pedreiras, situadas poucos quilômetros a nordeste, a cor costuma variar conforme as impurezas betuminosas, que determinam listas acastanhadas. Nestas ocorrências costuma predominar a cor cinzenta clara a quase branca. Faz exceção uma única pedreira estudada próxima a Limeira, situada a cerca de 3 km a NW desta cidade, onde predomina a cor cinza escura. No capítulo sobre o metamorfismo provocado pelos silos de diabásio trataremos da coloração das rochas calcárias marmorizadas.

#### Estratificação —

A estratificação é um caráter conspícuo do banco. Manifesta-se mais comumente como planos de mais fácil separação, o que faz com que se formem

lages de espessura variável, desde 1 cm até 20 ou 30 cm. O exame cuidadoso da linha formada pela união das duas camadas não revela a menor diferença entre elas. Por isso acreditamos na existência de hiatos no processo sedimentar, que ocasionariam heterogeneidade na compactação. Como consequência formar-se-iam superfícies de mais fácil separação.

Nas exposições do Irati situadas mais ao norte, ou seja, nas proximidades de Limeira e Assistência (Rio Claro), muito comumente alternam-se dois conjuntos de camadas que diferem pelas suas espessuras. Num deles é centimétrica (de 0,5 a 2 cm de espessura), às vezes separadas por delgadas lâminas milimétricas de folhelho, dando o aspecto de um sedimento rítmico. No segundo conjunto as camadas são decimétricas, o que indica a alternância de fases de sedimentação homogênea durante longo tem-

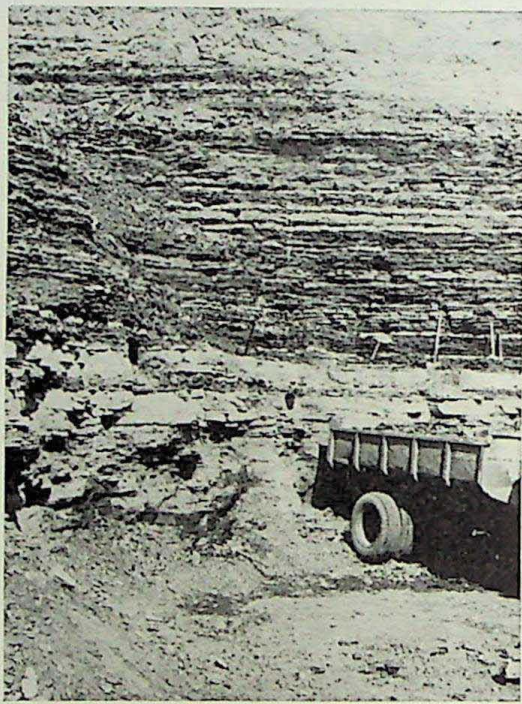


Fig. 3-2. — Aspecto característico das pedreiras do Irati. No alto, as camadas rítmicas e em baixo o banco calcário em vias de exploração. Note-se a estratificação do banco segundo zonas banqueadas e outras quase laminadas, fato que se repete em Assistência. (Pedreira do Sr. Abílio Pedro, Limeira).



po, passando depois a fases de sedimentação intermitente, muito provavelmente refletindo as variações climáticas (Fig. 3-2). O mesmo não se dá em outras localidades, como por exemplo, em Ipeúna, que se situa a 15 km a NW de Assistência. Nas pedreiras existentes nesta localidade as rochas calcárias do banco já são mais homogêneas. Chama a atenção a existência de uma zona de 1,5 m situada na parte superior do banco, zona esta caracterizada pela existência de lâminas milimétricas de folhelho distanciadas regularmente de 1 a 2 cm, dentro do calcário. É provável que estas diferenças entre ocorrências mais ou menos próximas resida no maior ou menor afastamento em relação às bordas da bacia. Nas partes mais centrais certamente imperaram condições de sedimentação mais homogêneas, mais uniformes do que as condições nas partes mais próximas das bordas, mais rasas e mais afetadas pelas variações climáticas.

No Arraial São Bento as rochas calcárias do banco são muito homogêneas. Os estratos diferem em parte pela coloração (creme a cinzenta ora mais ora menos carregada) e em parte pelo hiato na deposição. O mesmo não se dá nas pedreiras situadas a cerca de 8 km ao norte de Laranjal, próximas do Ribeirão das Onças. Nestas pedreiras chama a atenção a existência de camadas finas, centimétricas, que se diferenciam pela maior ou menor solubilidade, o que determina a formação de sulcos e respectivas saliências, uniformes e contínuas em toda a extensão do banco. A causa da maior ou menor resistência à dissolução reside na diferença de porosidade.

Além das lâminas milimétricas a submilimétricas de folhelho preto, às vezes irregulares por abaulamento ou anastomose (Fig. 3-3), que emprestam às rochas calcárias o caráter da estratificação, também o material betuminoso faz com que esta estrutura seja ressaltada. Formam-se desta maneira estratos castanho amarelados regulares, centimétricos, que se alternam com outros estratos, claros e sem betume. Outras vezes o ma-

terial betuminoso dispõe-se em muitas lâminas irregulares na forma e na espessura. Ainda voltaremos a este assunto quando discutirmos a origem do betume no capítulo oportuno (Fig. 8-2).

Estas feições que acabamos de descrever acham-se, de um modo geral, dispostas em nítido paralelismo, e aparentemente horizontais, quando observadas

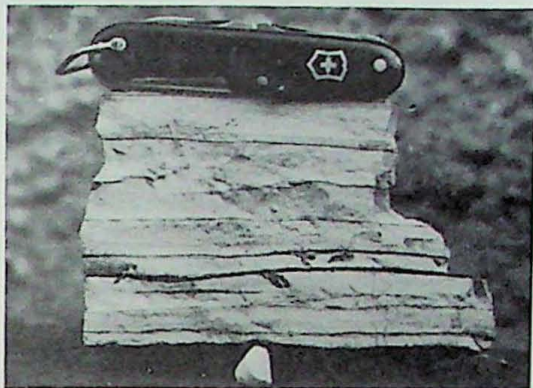


Fig. 3-3. — Lâminas irregulares, por vezes lenticulares e delgadas de folhelho preto calcítico no calcário claro. (Bairro Conceição, Piracicaba).

a distâncias maiores. Contudo, quando se observa o banco a uma distância de 30 centímetros, são muito comuns as estruturas irregulares pela ausência de paralelismo, pelas contorsões, lenticularidade de lâminas ou mesmo de camadas mais espessas. Tais irregularidades, que serão tratadas no capítulo das estruturas, ocorrem em níveis preferenciais e são muito abundantes nas pedreiras situadas próximas à rodovia estadual que liga Piracicaba a Tietê.

#### Brecha intraformacional —

Finalizando a descrição do banco basal da Formação Irati devemos citar a ocorrência de uma brecha calcária intraformacional, que ocorre mais comumente a 0,5 m, a 1 m e a 2 m abaixo do topo do banco (Fig. 3-4). Nem sempre a brecha acha-se presente nos três níveis. Mais comumente ocorre simultaneamente nos dois níveis inferiores. Na pedreira do Sr. Maluf e arredores, numa distância de mais de 2 km, a zona inferior da brecha parece ocorrer de ma-



neira contínua, sempre no mesmo horizonte do banco. Em outros casos a camada de brecha é nitidamente lenticular, caráter mais comum com as brechas mais próximas do topo. Sua espessura



Fig. 3-4. — Pormenores do banco calcário da pedreira do Sr. Maluf. De baixo para cima observa-se o calcário claro com lâminas corrugadas e irregulares de folhelho preto calcítico, tendo por cima a brecha. Esta exibe fragmentos de sílex singenético (pretos) e lâminas delgadas de folhelho preto. Finalmente, por cima, calcário cinzento claro com estratificação menos nítida.

é pequena, como sóe acontecer (Pet-tijohn, 1957, pág. 278). Varia de 5 cm a 30 cm, sendo geralmente a camada inferior a mais espessa. Os fragmentos, cujo tamanho médio varia de 1 a 3 cm, mantêm mais comumente a forma tabular, muitas vezes em disposição sub-paralela à estratificação, o que evidencia pequeno grau de deslocamento (Fig. 3-5). Constituem-se de calcário branco em matriz de calcário acinzentado muito homogêneo. Sob a lupa ainda se observam muitos fragmentos milimétricos a submilimétricos, além de pequenos fragmentos não muito abundantes de folhelho ligeiramente carbonático. Às vezes ocorre a camada de calcário branco intacta no topo da brecha, e aos poucos, num intervalo de 10 cm esta camada passa gradualmente aos fragmentos da brecha. Quando se segue a camada por uns 15 a 20 metros, nota-se a presença de trechos onde diminui a brechagem, predominando irregularidades e ligeiras contorções nos estratos. Este aspecto parece indicar que localmente faltavam condições favoráveis ao fraturamento da camada branca quebradiça. Ocasionalmente o leito brechado exibe em seu meio uma zona menos fraturada associada a delgadas lâminas submilimétricas de folhelho preto, ora intactas, sem a menor perturbação, ora toda esgarçada, interrompida (Fig. 3-4). O contato superior da camada brechada é quase sempre plano, ao passo que a

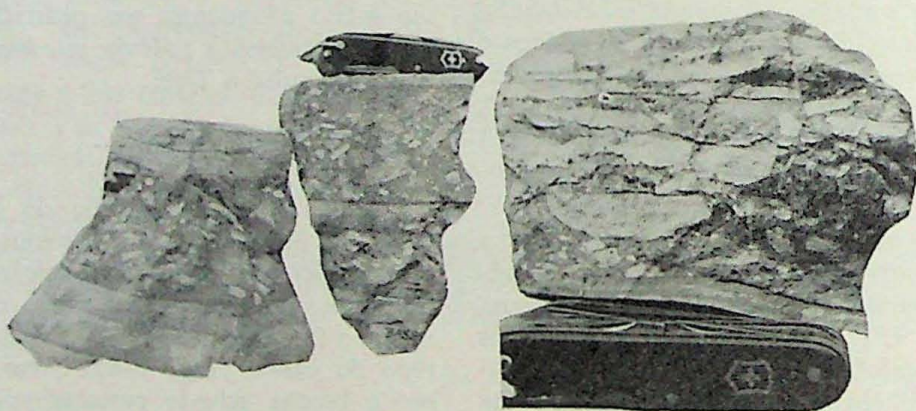


Fig. 3-5. — Três amostras da brecha intraformacional de três pedreiras, sendo todas as amostras do mesmo nível (meio metro acima da base do banco). A da esqda foi coletada 400 metros a SE da pedreira do Sr. Maluf, onde coletamos a do meio. A da direita provém do bairro Conceição. Note-se a presença das lâminas irregulares de folhelho preto e a forma tabular dos fragmentos.



parte basal muito comumente mostra ondulações, irregularidades, contorções desde centimétricas a decimétricas, indicando claramente a existência de fluxos, de deslizamentos, aos quais ainda faremos referências.

Sob a lupa os fragmentos se apresentam muito porosos, o que ocasiona a sua friabilidade, ao contrário da matriz, muito homogênea e bem mais compacta. Outra diferença ainda, que encontramos entre fragmentos e matriz reside na maior quantidade de resíduo insolúvel ao ácido clorídrico na matriz, sendo nesta de 14% e nos fragmentos de 5%. Contudo, não encontramos vestígio a'gum de material argiloso que pudesse explicar a maior plasticidade. Pelo contrário, é maior a quantidade de clásticos finos quartzosos na matriz, cujo tamanho varia do silte fino ao grosso. Outra diferença é que o calcário dos fragmentos é bem mais friável do que o da matriz.

Muito interessante é o comportamento das brechas sob as radiações ultravioletas. Quase que invariavelmente a matriz reage positivamente, exibindo uma coloração acastanhada pálida, enquanto que os fragmentos não reagem. No entanto, ambos exa'lam o odor característico do betume quando aquecidos. Segundo a opinião do geólogo Lawrence Frakes (informação verbal) a maior plasticidade da matriz poderia residir no conteúdo de matéria orgânica, fato que coaduna com a fluorescência. Sem uma análise dos teores em material betuminoso nada se pode afirmar de positivo, ficando assim aberto este problema.

Em secção delgada percebe-se a existência de faixas mais ricas em clásticos, faixas estas alinhadas em direção preferencial. Uma delas acha-se nitidamente encurvada em ângulo reto, o que indica a existência de fluxo no estado ainda plástico da lama calcária. A movimentação devia ter sido de pequena amplitude, pois, muito comumente observam-se fragmentos da mesma natureza muito próximos uns aos outros, mas separados pela matriz calcária, cuja textura será descrita no capítulo referente

aos aspectos microscópicos destes sedimentos. Além do aspecto microscópico, também o macroscópico evidencia claramente a formação da brecha por deslizamentos subaquáticos, e não por ressecamento, fato interpretado e fotografado pelo Prof. Dr. Josué C. Mendes, a quem devemos preciosos esclarecimentos sobre várias estruturas do Grupo Passa Dois, de um modo geral (Fig. 5-5).

O banco basal do Irati foi observado ainda em Angatuba, em adiantado estado de decomposição, mas perfeitamente reconhecível como tal. Mais adiante, ou seja, mais a oeste, não o vimos mais, por falta de boas exposições. Suspeitamos da sua existência na região de Taquai, onde observamos afloramentos esparsos de uma rocha completamente transformada pelo metamorfismo (a qual ainda faremos referência) que poderia ter sido o banco, juntamente com um calcário marmorizado semelhante aos de Assistência. Segundo informações fidedignas parece ser grande a espessura destas ocorrências, o que não nos foi possível observar diretamente.

Fomos encontrar novamente o banco calcário da base adiante de Joaquim Távora, PR, de aspecto bem diferente dos calcários de São Paulo, num Irati pouco espesso que será descrito oportunamente.

#### c — *Descrição das camadas rítmicas acima do banco* —

Constituem-se de estratos alternados de folhelhos pretos e de rochas calcárias, predominando as espessuras de 10 a 20 cm (Fig. 3-6). Muito comumente mostram-se irregulares quanto à superfície de separação, pelo efeito da compactação diferencial e pela sil'cifica'ção bem mais intensa do que no banco. São freqüentes as camadas calcárias totalmente substituídas pe'lo sílex. Apesar das irregularidades da superfície dos estratos, que ora se espessam, ora se adelgaçam ligeiramente, o caráter que chama a atenção é o da continuidade na horizontal. São relativamente raros os casos de lenticularidade. As perturbações conseqüentes do processo sedimentar



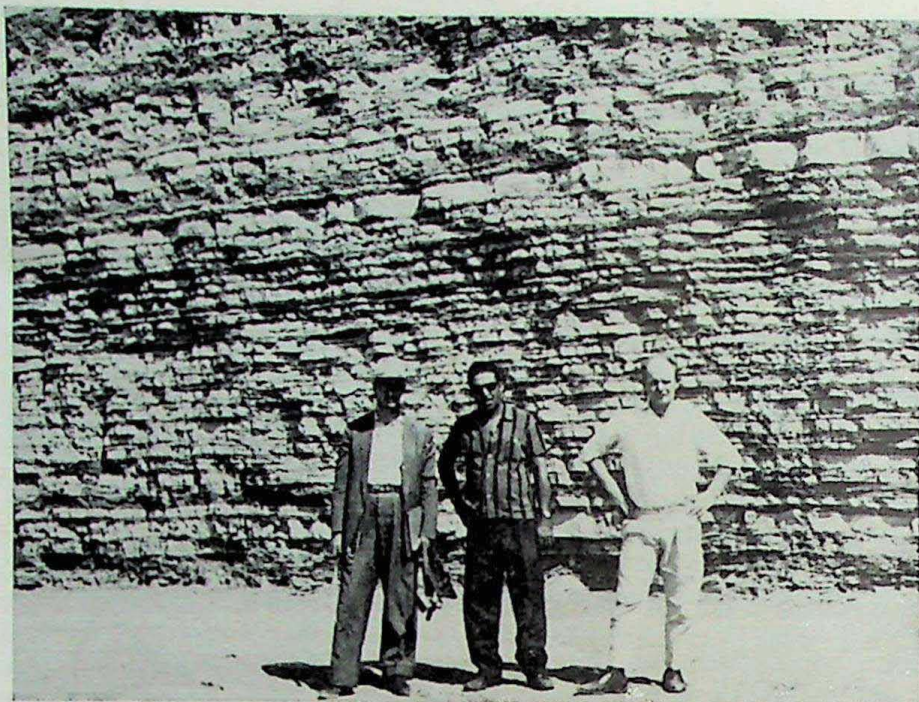


Fig. 3-6. — Aspecto típico das camadas rítmicas, tendo por baixo o banco. Note-se a regularidade da estratificação e a predominância de calcário em relação ao folhelho. (Pedreira situada 1 km ao sul da do Sr. Maluf).

são mais raras ainda. Observamos um único caso (em Assistência, Rio Claro) de um fragmento de calcário de 40 cm de comprimento por 5 cm de largura atravessado obliquamente numa camada de folhelho. Parece ter-se dado a fragmentação de uma camada calcária em meio ainda plástico, tendo depois um dos fragmentos se afundado na lama argilosa. Tal aspecto acha-se descrito e ilustrado no trabalho de Landim (1967), que faz minuciosa descrição destas interessantes ocorrências.

#### Folhelhos —

O folhelho costuma ser ligeiramente betuminoso, não chegando contudo, a arder sob a chama. Possui coloração preta a cinzenta escura. Algumas camadas apresentam lâminas lenticulares de calcário, de 0,5 a 1 cm de espessura. Outras apresentam intercalações de poucos milímetros a fração de milímetro de siltito cinzento claro. São muito abundantes os nódulos de sílex, de formato e tamanho muito irregulares, mas sempre obedecendo à direção da estratificação, o

que ainda será estudado no capítulo dedicado ao fenômeno da silicificação. A folheação é quase sempre perfeita, formando-se por vêzes lâminas bastante delgadas e facilmente destacáveis. Tal é o aspecto do folhelho existente acima das pedreiras de calcário dos arredores de Rio Claro, Piracicaba e Laranjal, em condições normais, ou seja, longe das intrusivas de diabásio.

A análise química de um dos folhelhos amostrados na pedreira do Sr. Maluf revelou os seguintes óxidos:

SiO <sub>2</sub>	—	52,0%	CaO	—	1,3%
TiO <sub>2</sub>	—	0,2	Na <sub>2</sub> O	—	2,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	12,4	K <sub>2</sub> O	—	2,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	3,3	H <sub>2</sub> O+	—	11,5
FeO	—	1,1	H <sub>2</sub> O-	—	7,8
MnO	—	tr.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	—	0,1
MgO	—	6,1			

O teor de MgO concorda com a natureza montmorilonítica dos minerais argilosos que predominam na maior parte dos folhelhos, o que foi confirmado pelo raio X após prévio tratamento com etilenoglicól. Devemos este teste ao colega



Adolpho José Melfi, a quem muito agradecemos. Outro teste positivo foi a coloração esverdeada nítida e intensa com a adição de benzedina, segundo técnica recomendada por Meilenz et al., (1950). A existência de montmorilonita no Irati já fôra referida por Delaney e Formoso (1960), que estudaram os folhelhos desta formação na área de São Gabriel.

#### Camadas calcárias —

As camadas calcárias, mais comumente muito dolomíticas (ou dolomitos calcíticos), são quase sempre maciças, de tonalidades claras (creme ou cinzentas), e muitas vezes totalmente substituídas pelo sílex, ora prêto ora amarelado. Outras vezes o sílex substitui de maneira irregular. Quanto aos caracteres microscópios, o que ainda será descrito, não difere essencialmente das rochas calcárias do banco.

A relação entre ambas as rochas é quase sempre ao redor de 1 parte de folhelho para 2 a 3 de calcário, o que foi avaliado pela observação das espessuras das camadas. Uma excessão foi observada a cerca de 500 metros a NW da estação de Paraíso (E. F. S., entre Piracicaba e São Pedro), na linha férrea. As camadas rítmicas apresentam variação horizontal apreciável, pois, em pouco menos de 20 metros, a relação 1 de folhelho para 2 de calcário passa para 1 de calcário para 4 de folhelho, relação esta anormal em toda a área estudada. Nesta ocorrência, certas camadas de folhelho chegam a atingir quase meio metro de espessura. Determinamos aí um mergulho de 4º para oeste, o que é outra anormalidade, certamente devida a um sil de diabásio que ocorre a poucos metros abaixo do citado afloramento.

#### Intercalações de siltitos —

Já nos referimos anteriormente à existência de siltitos intercalados no Irati, sem folheação, sem a cor preta característica das rochas pelíticas desta formação e com fratura concóide, muito semelhante às rochas da Formação Estra-

da Nova, inclusive na quantidade grande de espículas de esponja. Este afloramento atípico, que consiste numa verdadeira exceção, acha-se situado 15 km a leste de Angatuba. Tanto esta interessante ocorrência, como o achado das espículas, devemos à perspicaz observação do nosso colega e amigo Vicente Fúlfa-ro, que executou minucioso estudo geológico daquela área.

#### Comportamento do Irati no interior da bacia —

Fato interessante é o da ausência destes estratos alternados de calcário e folhelho nos testemunhos de sondagens, fato já referido por Barbosa e Gomes (1958). É provável que as perfurações tenham se localizado nos locais correspondentes a regiões de maior profundidade da antiga bacia onde se sedimentou o Irati. Seria um ambiente mais estável quanto à temperatura, e por conseguinte, determinaria maior homogeneidade nos sedimentos. Assim sendo, as partes hoje observadas devem corresponder às bordas mais rasas, cuja largura deveria ter sido considerável. A menor profundidade certamente determinou maior facilidade nas mudanças de temperatura, fator primordial na precipitação, ora das rochas calcárias, ora das pelíticas. Nem todos os afloramentos do Estado de São Paulo exibem esta estrutura alternada, que dá um aspecto de alta beleza às pedreiras e exposições da região central do Estado. A meio caminho da estrada Itapetininga e Angatuba (km 195), bem como nas exposições estudadas entre Taquarituba e Taguaí, ao invés das camadas rítmicas encontra-se o folhelho pirobetuminoso micáceo, compacto, com forte cheiro de asfalto (muito comumente arde sob a chama) e menor quantidade dos nódulos escuros de sílex, tão comuns no município de Piracicaba. Nas proximidades de Taguaí (vila dos Aleixos) as camadas calcárias são subordinadas, possuindo ao redor de 20 a 30 cm de espessura. Uma delas é muito rica em fragmentos de crustáceos e outros restos de difícil diagnose. Junto à zo-



na alterada amostramos um siltito argiloso anormalmente rico em feldspatos frescos junto à fração mais grosseira. Ocorrem com relativa frequência pequenos cristais idiomorfos de zircão. Tudo indica a existência de mudança climática durante a formação das camadas pelíticas (ora mais ora menos siltosa) e das camadas calcárias, assunto a ser discutido no último capítulo.

#### Tôpo do Irati —

A delimitação superior do Irati com o Estrada Nova nem sempre é fácil, fato já assinalado por Almeida e Barbosa (1953). A mudança do ambiente de sedimentação não foi tão drástica, comparada com a que se verificou na passagem Tubarão para o Irati. Naquela parece ter havido mais uma mudança nas condições de oxigenação da bacia. Não se observa a cor preta na formação seguinte, e as rochas pelíticas siltosas não se apresentam com a folheação que caracteriza os pelitos do Irati.

#### d — Descrição de testemunhos de sondagem do Irati —

Finalizando este subcapítulo descreveremos brevemente a testemunhagem de três perfurações da Petrobrás, sendo duas em Guareí e uma em Angatuba. O poço nº 4 de Guareí situa-se 8 km ao norte da cidade, tendo encontrado o Irati a 221 metros de profundidade. Isso se deve à existência de uma falha cujo plano é aproximadamente NS, que abateu o Irati. Entre os testemunhos desta perfuração observamos folhelhos pretos com muitos nódulos centimétricos de sílex, que também ocorre como leitos descontínuos de 3 a 5 mm de espessura. Sua cor é preta e brilhante, o que dá a aparência de um vitrênio. São abundantes os ossos de *Mesosaurus*, e a compacidade do folhelho provavelmente se deve à influência térmica de um sil de diabásio, cujas amostras acham-se testemunhadas e devidamente arquivadas na mesma caixa. Segundo o registro litológico da Petrobrás predominam as rochas calcárias, dispostas em espessos bancos

de mais de 5 metros de espessura no meio da formação. Não se acha registrado o banco basal na base da perfuração. Já o poço nº 3, situado 5 km a SSW do primeiro, apresenta-se, segundo o respectivo "log", bem diferente do primeiro. Nesta perfuração predominam largamente os folhelhos, sendo bastante restrito o calcário. A espessura é de 42 metros, e a profundidade do Irati vai de 263 a 221 metros (base e tôpo). Estranhamos esta variação lateral em tão curta distância, mormente pelo fato de termos observado o Irati em afloramentos próximos (menos de 20 km) de Guareí, a caminho de Angatuba e de Itapetininga. Não observamos anomalias que pudessem explicar as variações das perfurações, ficando sem explicação esta discrepância.

Vimos ainda a testemunhagem e a descrição litológica do poço de Carlota Prenz, em Angatuba. Muito embora exista o banco basal calcário, completamente decomposto, nos arredores de Angatuba, este não ocorre na base da perfuração citada. Não temos dúvida de que tudo indica ter-se o banco formado na região mais rasa da bacia, e que as perfurações atingiram as partes mais profundas, provavelmente de águas mais frias. Esta perfuração, que atingiu o cristalino a 1.545 metros (na cota 857 abaixo do nível do mar), atravessou 44 metros da formação Irati, entre 288 a 244 metros de profundidade. Entre os testemunhos por nós observados predominam os folhelhos, quase sempre micáceos, cinzentos escuros, contendo inúmeros e delgados leitos de sílex preto. A pirita é abundante em algumas amostras. Segundo a leitura da descrição das amostras de calha do Relatório do Conselho Nacional do Petróleo, da autoria de Sayão Lobato, predominam igualmente os folhelhos, perfazendo os calcários menos de 30% da totalidade amostrada. Em praticamente todas as amostras descritas ocorre apreciável quantidade de sílex (entre 15 e 30%), que provavelmente correspondam aos calcários agora substituídos. O sílex descrito é ora preto, ora cor de fígado, e o folhelho quase



sempre preto a cinzento escuro, e muito comumente betuminoso e piritoso, atributos bem típicos da Formação Irati.

e — *O solo do Irati no Estado de São Paulo* —

Nossas observações sobre este assunto são perfunctórias, pois, fogem do tema do nosso trabalho. Visamos principalmente a distinção do solo do Irati do solo proveniente do diabásio, pois, muita confusão tem sido feita neste sentido, tal a semelhança entre ambos.

Quando a maturidade do solo não é grande, não há problema, pois, a existência de magnetita cristalina abundante ou de nódulos de sílex é suficiente para distinguir um do outro. Contudo, em certas regiões onde o intemperismo foi mais acentuado, imprimindo ao solo um maior grau de maturidade, o problema se torna difícil, pelo menos numa análise rotineira do resíduo obtido pela batéia, analisado ao microscópio petrográfico. Tal foi executado em solos situados na rodovia estadual entre Tupi e Piracicaba, a 11 km da Escola Superior de Agricultura, onde aflora o Irati muito decomposto e onde ocorre nas proximidades a terra roxa originada do grande sil de diabásio que ocorre naquela área. Em ambos os resíduos encontramos a magnetita de aspecto tipicamente secundário, pelo formato globoso. Pensando ter havido contaminação, o que se dá com regular intensidade nestes solos, examinamos o resíduo de outras terras roxas, bem como, do calcário Irati decomposto mas não transformado em solo. Em ambos os casos encontramos a magnetita de aspecto secundário, motivo pelo qual não se pode distinguir um e outro solo pela sua presença. A magnetita como mineral secundário em rochas calcárias não é novidade, sendo descrita por Friedman (1954), que interpreta a sua existência nos calcários (do Carbonífero Inferior de Ohio, E. U. A.) como sendo devida a um processo autógeno, sendo formada pela percolação de água vadosa de infiltração. O autor citado descreve magnetitas com formas

octaédricas ocasionais, o que não foi observado no nosso caso.

Além da magnetita ocorrem também a limonita, areia quartzosa muito fina, raros grãos de zirconita e material semelhante à calcedônia finamente subdividida, de índice de refração próximo ao do quartzo. A fração argilosa (sob o ponto de vista granulométrico) constitui-se de grãos avermelhados de mais ou menos um micron de tamanho. Acreditamos que a quantidade de minerais argilosos seja pequena nesta fração, pois, submetida à secagem não se endurece como as argilas comuns. No entanto, com o aquecimento ao rubro adquire um certo endurecimento. Não nos detivemos noutros exames, mas supomos que predomine material silíceo extremamente fino, que tenha penetrado graças ao fenômeno da iluviação, que teria ocorrido durante a decomposição das rochas. Assim, à medida que os carbonatos de cálcio e magnésio fossem sendo lixiviados, o espaço seria ocupado por este material fino trazido pelas águas descendentes. Em certas ocorrências, como na via férrea em Taquaral, o banco calcário acha-se presente, com uma espessura de 2 metros, e completamente decomposto, sem o menor traço de carbonato, assemelhando-se a um material argiloso muito plástico, com uma bela coloração avermelhada escura, cor de vinho. Material análogo coletamos em Angatuba, onde determinamos uma porosidade de 33%, em base das densidades, real (2,5) e aparente (1,68).

A cor avermelhada do solo do Irati deve-se à decomposição da pirita, que ocorre finamente disseminada, tanto nos calcários como nos folhelhos. Trata-se de um solo fértil. Tivemos a oportunidade de observar matas virgens de alta exuberância há cerca de 25 anos atrás, nas proximidades do Arraial São Bento, a 23 km ao sul de Piracicaba, onde aflora o Irati. Em toda esta região parece haver preferência por parte dos plantadores de fumo pelo solo do Irati, onde é produzido o famoso fumo de corda tipo Tietê.



## 2. Nos demais estados —

### a — No Estado do Paraná —

Nossas observações neste Estado limitaram-se às ocorrências da região nordeste, nas imediações de Joaquim Távora e Carlópolis, e na região sul, entre Irati e São Mateus do Sul. Mais pormenores sobre o Irati paranaense são encontrados em Oliveira (1927), que apresenta minuciosas descrições de diversas ocorrências da formação em estudo naquele Estado.

#### Região norte —

Iniciando os nossos estudos com os afloramentos mais setentrionais, encontramos o Irati a 5,5 km da fronteira de São Paulo na estrada Fartura-Carlópolis. Apesar de muito decomposto é facilmente reconhecível pela abundância de sílex sob a forma de bonecas centimétricas e placas delgadas, junto a um saprólito de cor vermelha, bem típica do Irati. A seguir, a 1,3 km de Joaquim Távora, rumo a Santo Antonio da Platina, ocorre belo afloramento do Irati, deslocado por uma falha que coincide com um dique de diabásio de 20 metros de espessura, vertical, de direção N60°E, praticamente a 90° da grande maioria dos diques registrados no mapa geológico do referido Estado. Ao sul do dique ocorre um arenito, notável pela sua pureza, seleção e arredondamento dos grãos de quartzo bem hialino, provavelmente do Tubarão. Do lado norte ocorre a Formação Irati com apenas 12 metros de espessura. Inicia-se por uma camada calcária de pouco mais de 3 metros de espessura, tendo no centro delgados e irregulares leitos de folhelho. É um calcário intensamente dolomitizado, noduloso, rijo, mal estratificado, cinzento e de aspecto bem diferente dos calcários explorados em São Paulo. Próximo à base apresenta-se nitidamente brechado, com fragmentos heterogêneos, ora bem arredondados ora angulosos, de calcário dolomítico castanho escuro e ocasionalmente claro. Acima deste banco descrito

observam-se leitos irregularmente ondulados, às vezes lenticulares, de espessura entre 20 e 40 cm, de folhelho cinzento escuro e calcário pouco dolomitizado e bem recristalizado (certamente graças ao dique) onde a estratificação fina é evidenciada pelo efeito da dissolução. O sílex é abundante junto ao folhelho, sob a forma de nódulos irregulares, e menos freqüente no calcário, quer do banco basal, quer das camadas de cima.

Por baixo deste delgado Irati ocorrem siltitos com raras concreções calcárias, num aspecto semelhante à litologia da formação supra Irati, denominada Serra Alta nos estados sulinos. Quem nos chamou a atenção a este interessante fato foi o Prof. Josué C. Mendes, que posteriormente verificou que esta disposição se repete em vários outros locais, sobretudo em Santa Catarina, onde fez estudos mais acurados. Lembremos que em São Paulo, na pedreira do Sr. Maluf, ocorrem siltitos na base, mas certamente dentro do Irati, completamente diferentes quando à litologia, em nada se parecendo com as rochas desta formação. Sem dúvida alguma trata-se de zonas localizadas de condições diferentes de aeração e de suprimento sedimentar, zonas estas que em determinadas regiões geográficas, acham-se interdigitadas com o Irati "sensu strictu", tal como o siltito de Angatuba e o de São Mateus, ao qual faremos referência logo adiante.

Ainda na estrada que liga Joaquim Távora a Santo Antonio da Platina, a pouco mais de um quilômetro do afloramento descrito, ocorre novo dique de diabásio (direção N70°W) tendo ao lado o Irati, igualmente deslocado por nova falha junto a outro dique. A litologia deste afloramento difere do primeiro, lembrando a zona rítmica das ocorrências de São Paulo. Alternam-se leitos de 20 a 30 cm de espessura de folhelho preto e calcário cinzento escuro (quase preto) muito compacto, com nódulos achatados centimétricos de sílex preto e muito rico em carapaças de *Liocaris*. Ocasionalmente ocorrem costelas esparsas de *Mesosaurus*.



Em prosseguimento às nossas observações de campo visitamos as ocorrências situadas mais ao sul, nas cidades de Irati e Eng. Gutierrez. Nestas localidades pudemos observar com mais atenção somente as partes superiores da formação. Não encontramos afloramentos bons na base do Irati, o que lamentamos, por não podermos comparar com a base pouco mais ao sul, ou seja, em São Mateus. Predominam largamente os folhelhos pretos. Observamos um único e delgado leito lenticular de calcário completamente decomposto. O sílex é igualmente muito raro. A cêrca de 10 metros acima do nível da estação férrea (cuja altitude é de 818 m) acha-se o contato com a Formação Serra Alta. Na estação próxima, Eng. Gutierrez, situada 6 km a SSW de Irati, ocorre belo afloramento junto à estação. O contato se situa praticamente na mesma cota do anterior, obedecendo à direção geral das camadas naquela área. Os poucos metros de Irati que se observa são representados unicamente por folhelhos bem pretos, micáceos e sem o menor traço de material pirobetuminoso. A passagem para o Serra Alta é gradual. Em menos de meio metro a folheação do Irati vai diminuindo, ao mesmo tempo que as côres vão se tornando mais claras e ligeiramente variegadas, passando assim ao siltito mais permeável e mais facilmente alterável pelas águas de percolação.

Prosseguindo os nossos estudos de campo fomos observar os arredores de São Mateus do Sul, onde visitamos diversas ocorrências. Uma delas será explorada pela Petrobrás para o aproveitamento do pirobetume. Nesta localidade, que se situa estratigráficamente perto do tôpo da formação, predominam largamente os folhelhos pretos. Observamos um único e delgado leito de menos de um palmo de espessura de calcário, de aspecto bem diferente dos de São Paulo. É cinzento escuro, maciço, muito compacto e muito raramente silicificado. Junto à cidade, nas imediações da Usi-

na Elétrica, o Irati aflora numa exposição de 20 m de espessura. Constitui-se essencialmente de folhelhos pretos com algumas intercalações esparsas de 5 a 20 cm de calcário completamente decomposto. A pirita é abundante e o sílex bastante raro. Junto à ponte sobre o rio Iguaçu, ainda na mesma cidade, ocorre um belo afloramento do Irati, em parte semelhante ao de São Paulo, pela alternância de folhelhos e calcários, na proporção aproximada de 1 de folhelho para 3 de calcário. Este se acha sob a forma de nódulos de 30 a 40 cm de espessura, bem como, sob a forma de lentes muito simétricas, de quase 2 metros por 15 cm de espessura máxima. O calcário é cinzento claro, homogêneo, muito compacto e cheio de pequenas vênulas milimétricas de pirita e algumas ocasionais de opala em vias de recristalização. Esta zona de calcário nodular tem 8,5 metros de espessura. A pouco mais de 1 km da cidade, na rodovia em fase de construção para Curitiba, tivemos o ensejo de observar anomalias na litologia do Irati. Os folhelhos perdem não só a coloração preta, como diminuem na folheação, passando para siltitos cinzentos, parecidos com os do Serra Alta, que se situa logo acima, tudo indicando mudanças faciológicas locais e temporárias, tal como ocorre em São Paulo, entre Itapetininga e Angatuba.

Como não pudemos observar as camadas inferiores do Irati transcreveremos os dados de sondagens do minucioso Relatório Final da autoria de Joaquim Maia, (1961). Segundo as observações deste estudioso o Irati se inicia com 5 metros de calcário cinzento escuro com forte cheiro de betume, muito compacto e com três de'gadas intercalações de folhelho. Seguem 3,2 metros de folhelho castanho escuro a prêto, com delgadas intercalações de calcário escuro mais abundantes na base. Acima deste folhelho ocorrem 8,5 metros de uma sucessão de calcários e folhelhos. Pela descrição de Maia, certamente correspondem ao afloramento descrito junto à ponte do rio Iguaçu. Finalmente ocorrem 6,5 metros de folhelho pirobetuminoso prêto e



compacto. Provavelmente seja o mesmo que observamos junto à Usina Elétrica, bem como, em Irati e em Eng. Gutierrez. Maack (1947) dá ênfase ao caráter lenticular destes calcários, que, segundo suas meticolosas observações, destacam-se na morfologia da paisagem em certas áreas, do que se conclui tratar-se de lentes de grandes dimensões. Ao contrário do que se verifica no nosso Estado, tais bancos calcários ora se localizam na base, ora no meio da formação.

b — *No Estado de Santa Catarina* —

Região central —

Tivemos a oportunidade de observar o Irati deste Estado em duas ocorrências. Uma delas situa-se nas imediações do km 155 da rodovia Mafra-Lages. Não pudemos observar a base da formação em estudo, pelo fato de achar-se encoberta. Acreditamos, contudo, que os três metros observados estejam próximos à base, caso não haja perturbações locais. De baixo para cima ocorre uma zona de 1,5 m de camadas regulares de folhelho e calcário, de espessuras variáveis entre 20 e 40 cm. O calcário acha-se completamente decomposto e o folhelho ainda mostra a sua cor escura característica. É micáceo e contém pirobetume, apesar de ligeiramente decomposto. Sua cor é acastanhada, provavelmente pelo efeito da decomposição. Acima ocorre ainda 1 metro de folhelho, mais 20 cm de calcário com sílex, e por fim, mais um metro de folhelho. Numa destas camadas observamos o maior nódulo de sílex até agora visto, de forma bem regular, tendo pouco mais de 1 metro no sentido horizontal por 60 cm de altura. Não observamos os pequenos nódulos tão comuns no Irati de São Paulo. 3 km adiante aflora o Serra Alta e pouco além, o Serrinha, caminhando-se para o rumo sul. As duas formações citadas mantêm o mesmo mergulho que medimos para o Irati, ou seja, praticamente 1° para oeste.

Região sudeste —

A segunda ocorrência do Irati, observada em Santa Catarina, foi a do fa-

moso perfil de White, entre Orleans e Novo Horizonte. Infelizmente a decomposição é intensa junto à rodovia, e não dispuzemos de tempo para a procura de melhores exposições. Pudemos observar somente as partes mais elevadas da coluna, onde se intercalam camadas de 2 a 4 cm de espessura de folhelhos pretos em calcários de 10 a 15 cm de espessura, achando-se estes completamente decompostos. Segundo observações posteriores do Prof. Josué C. Mendes, o Irati tem nesta região uma espessura de 30 metros, iniciando-se com um calcário muito decomposto logo acima do Palermo, não tendo sido possível a avaliação da sua espessura. Posteriormente o referido Professor observou e informou-nos sobre a existência de menos de 10 metros de Irati (constituídos de folhelhos com algumas bonecas de sílex) em Bom Retiro, junto a sedimentos do tipo Serra Alta, por baixo e por cima, o que confirma a ideia da flutuação das condições de oxigenação e de redução durante a deposição do Passa Dois. Finalmente, mais ao norte, em Taió e Serril ocorrem 2,5 m de calcário betuminoso.

c — *No Rio Grande do Sul* —

Foram muitas as localidades nas quais pudemos observar o Irati do Rio Grande do Sul. Apesar disso foram raras as ocasiões em que pudemos notar alguma semelhança com o Irati estudado nos demais estados. Baseando-nos no critério de Krumbein e Sloss (1953) não chamaríamos de Formação Irati a maior parte das exposições observadas, tão diferente é o aspecto litológico. No entanto, situam-se acima da Formação Palermo. Muito embora os caracteres paleontológicos não definam a formação geológica, devemos citar a existência de *Mesosaurus*, de *Pygaspis* e de madeiras silicificadas.

Pantano Grande —

As ocorrências que mais chamam a atenção pela falta de semelhança situam-se nos arredores de Pantano Grande, nas imediações do km 8 da rodovia Porto Alegre-Uruguaiana.



Caracterizam-se pela predominância de siltitos claros, de granulação heterogênea, com porcentagem às vezes alta de areia fina. São rochas bem estratificadas, predominando leitos centimétricos. Uma das madeiras fósseis observadas parecia indicar uma biocenose, graças à sua posição vertical. A cerca de 3 km ao sul de Pantano Grande observamos nova ocorrência, onde é abundante o número de fragmentos de madeira silicificada, espalhados pelo solo. Conseguimos amostrar junto ao chão um calcário amarelo muito compacto, maciço, e cheio de fissuras milimétricas em disposição ortogonal. Este calcário parece formar lentes de pequenas dimensões.

#### São Sepé-Formigueiro —

Entre São Sepé e Formigueiro o Irati já possui cores mais escuras, mas continua complementemente atípico. As rochas se apresentam semelhantes a folhelhos somente na superfície dos cortes de estrada, graças à ação da água que desagrega, separa os planos da laminação da rocha exposta. Escavando-se pouco menos de um palmo encontra-se a rocha meros desagregada, que em nada se parece ao folhelho do Irati. Apresentam a fratura conchoidal característica dos pelitos do Serra Alta, coloração cinzenta escura, micáceas e sem o menor vestígio de pirobetume. As raras intercalações de calcários são lenticulares e de pequena espessura, de mais ou menos um palmo. São compactos, maciços, ora cinzentos escuros, ora cor de creme.

#### São Gabriel —

Outra ocorrência visitada situa-se a 15 km ao norte de São Gabriel. Observamos cerca de 4 metros de espessura, onde alguns níveis poucos espessos já se apresentam folheados, portanto, mais parecidos com o Irati verdadeiro. Ocorre ainda uma lente calcária de gada, de cor creme, com nítida fratura conchoidal, muito semelhante ao de Pantano Grande, já descrito. Prosseguindo nas observações mais a sudoeste, vimos

o Irati na localidade chamada Cerro das Caveiras, a 20 km a NW de Dom Pedrito. Aí o calcário é mais espesso, chegando a ser explorado para a obtenção de cal em tempos passados. Amostramos um belo exemplo de calcarenito muito rico em valvas de crustáceos, bem como, de minúsculos fragmentos quase esféricos de 0,5 a 1 mm de tamanho, sem a estrutura típica dos oólitos, que os de idioma inglês chamam de "pellets". Outra amostra coletada é de um calcário castanho avermelhado bem cristalino, certamente recristalizado. Não sabemos, contudo, se tais amostras são representativas, por falta de boas exposições. São muito comuns nesta ocorrência restos de *Mesosaurus*.

#### Bagé-Hulha Negra —

Finalmente, vimos ainda o Irati entre Bagé e Hulha Negra, onde é representado por um silito cinzento compacto, micáceo, com fratura conchoidal e mal estratificado. Acha-se atravessado por alguns veios de 3 a 4 cm de espessura de quartzo no centro e calcedônia nas bordas. Acha-se cheio de cavidades irregulares, centimétricas, onde o quartzo forma cristais milimétricos.

#### Passo São Borja —

Merece ser citada a ocorrência de um calcário claro, compacto, muito rico em ossos desarticulados de *Mesosaurus*. Situa-se em Passo São Borja, a 50 km a WSW de São Gabriel. O aspecto macroscópico deste calcário assemelha-se muito aos dos calcários de Piracicaba e Laranjal, inclusive na natureza do resíduo insolúvel ao ácido clorídrico. São também encontrados esporos de gimnospermas quase iguais aos que observamos nos calcários de São Paulo, o que faz aumentar a semelhança litológica de rochas tão distantes. É realmente notável a similaridade na litologia, tanto macroscópica como microscópica, como também quanto ao conteúdo fossilífero, de uma formação geológica relativamente pouco espessa (pelo menos nos aflo-



ramentos e sondagens conhecidos) e tão extensa, como é a Formação Irati.

Muito embora não tenhamos visto nenhum afloramento típico do Irati, sem dúvida alguma este ocorre nas partes profundas, o que se depreende da leitura do trabalho de Sena Sobrinho (1942), que descreve com pormenores a litologia de São Gabriel, nas proximidades de um dos locais onde estivemos. As sondagens, que se distanciam de 400 a 500 metros atingiram profundidades ao redor de 30 a 50 metros. Passemos a transcrever o perfil da mais profunda, furo nº 1, cota 135 metros:

Terra vegetal	1,30 m
Folhelhos pretos	8,70 m
Calcário argiloso cinzento (?)*	10,00 m
Calcário duro	1,00 m
Folhelho betuminoso	5,00 m
Calcário argiloso	5,70 m
Calcário dolomítico c/pirita	7,50 m
Calcário argiloso duro (?)*	6,50 m
Calcário semi-cristalino c/sílex	3,00 m

(\*) No gráfico dos perfis estas duas camadas assinaladas constam como folhelho argiloso calcífero, com um símbolo intermediário que não permite o esclarecimento da litologia.

Do exame dos demais perfis e da leitura do trabalho citado chamamos a atenção para diversos fatos, a saber: a presença de sílex no calcário mais próximo à base. A abundância de rochas carbonáticas, bem maior do que a de folhelhos. A presença de pirita e de material betuminoso, indicando a continuação das condições de sedimentação observadas desde o estado de Goiás, como veremos logo a seguir. Da observação do gráfico concluímos ainda que são comuns camadas lenticulares, enquanto que outras parecem apresentar variação lateral considerável, no caso do gráfico estar correto. Lembramos, em todo o caso, que as lentes observadas em superfície ocorrem também em profundidade.

#### d — No Estado de Goiás —

Muito embora a ocorrência a ser descrita seja a mais setentrional, deixamo-la para o fim, desobedecendo à ordem geográfica para obedecer à de importância, porque as nossas observações restringiram-se apenas a algumas amostras coletadas pelo Geólogo Antonio Thomaz Filho, da Petrobrás, e gentilmente cedidas para o nosso estudo. O afloramento situa-se a 11 km ao norte de Montividiu, que se localiza na região sul do estado de Goiás. Foi medida uma espessura parcial de 16 metros para o Irati, que tem por baixo um sil de diabásio de posição estratigráfica desconhecida por falta de exposição. Passemos à descrição das amostras que foram coletadas de baixo para cima. Não conhecemos as espessuras correspondentes. As primeiras amostras parecem ser antigos calcários, agora completamente substituídos pela sílica sob a forma de quartzo, muito embora o aspecto seja o do sílex. É provável ter havido a recristalização e perda de água. A coloração é cinzenta escura e homogênea. Acima desta rocha ocorre um folhelho côr de creme, micáceo, devendo achar-se alterado, pela presença de raízes atuais. Segue uma rocha interessante pela estrutura oolítica, pelo menos na aparência, porque não se percebe a textura interna típica dos oólitos. Macroscopicamente é uma rocha escura, graças à côr preta dos oólitos, cujo tamanho médio é de 0,3 a 0,6 mm. Acham-se envolvidos por uma matriz de calcedônia de coloração mais clara. Uma vez intemperizados os oólitos tornam-se castanhos, o que nos leva a acreditar que fôssem pelo menos em parte sideríticos, dada também a coloração em secção delgada e a presença de ferro reveada pelo espectrógrafo. Acreditamos que esta zona oolítica seja expressiva na região, pois, outras amostras coletadas à parte da secção descrita, são igualmente oolíticas. A amostra seguinte, portanto acima da oolítica, é um folhelho preto bem laminado, bem típico da formação Irati, com raros e irregulares nódulos de sílex castanho escuro de poucos milímetros de tamanho. Uma vez



aquecida, esta rocha exala ligeiro odor que lembra o do betume. Segue um folhelho avermelhado cheio de concreções irregulares de sílex ora castanho avermelhado ora preto. Finalmente, a última amostra é de um dolomito levemente róseo, muito compacto, sem estrutura alguma. Tivemos ainda a oportunidade de observar o testemunho de uma sondagem efetuada a quase 100 km a SW do citado perfil (sondagem de Jataí, da Petrobrás), tendo atingido o Irati entre 303 a 344 metros de profundidade. Trata-se de um belo exemplo de calcário oolítico totalmente silicificado, com os oólitos pretos e a matriz clara. É abundante a pirita, sob a forma de diminutos cristais irregularmente espalhados por toda a amostra.

e — *No Estado de Mato Grosso* —

Complementando este capítulo das descrições devemos ainda mencionar a ocorrência de bons afloramentos da Formação Irati em Mato Grosso, nos arredores de Alto Garças e Alto Araguaia, descritas por Almeida (1954), que admite uma espessura máxima de 20 metros para o Irati daquela área. Quanto à litologia o citado autor descreve “folhelhos e dolomitos parcialmente silicificados e impregnados de substâncias piro-oleíferas”. As rochas dolomíticas são

exploradas para a obtenção de cal em três localidades desta área.

O Irati de Mato Grosso é conhecido em profundidade, graças às perfurações executadas pela Petrobrás (Vide fig. 1-1). Sua espessura é variável, desde poucos metros até 50, numa das sondagens de Dourados, que por sinal, possui traços de petróleo. A espessura mais freqüente é a de 35 metros. Quanto à litologia, em nada difere do Irati que conhecemos nos afloramentos. Ocorrem folhelhos pretos micáceos, dolomitos, o sílex é muito abundante, bem como, a pirita. Em nenhuma das descrições vimos referências a sedimentos clásticos grosseiros.

Ao finalizarmos este capítulo, mais uma vez chamamos a atenção para a uniformidade, para a constância dos caracteres litológicos, paleontológicos e estruturais (espessura e posição das camadas) da Formação Irati. Lembramos que no Uruguai, a 1.00 km dos afloramentos do Estado de Goiás, ocorre a mesma formação com os mesmos caracteres citados, ou seja, as chamadas “utitas betuminosas de Mangrullo”, cuja espessura é de 70 metros e pertencentes ao Grupo Mello. Constituem-se de folhelhos negros por vezes betuminosos e calcários cinzentos com *Mesosaurus*, sendo comum a ocorrência de pirita, segundo a descrição de Caorsi e Goñi (1958).

#### IV — ESTRUTURA GERAL DA FORMAÇÃO IRATI

Este assunto acha-se bem exposto no trabalho de Freitas (1951), que se valeu da uniformidade litológica e estratigráfica da Formação Irati para a interpretação da tectônica da bacia do Paraná. Neste trabalho o citado autor baseou-se em dados de sondagens, tomando o Irati como horizonte chave e endossando as idéias de Oppenheim (1934b) e de Gutmans (1949), que interpretam as grandes discrepâncias da altimetria do Irati como sendo devidas a falhamentos, o que tivemos o ensejo de verificar, tanto no campo, como em novos dados de sondagens. Assim sendo, limitar-nos-emos a acrescentar algumas novas informações que visam mais for-

talecer as idéias já existentes, bem como, a apresentar os dados que obtivemos da direção e mergulho das camadas no Estado de São Paulo.

##### 1. *Dados altimétricos* —

Quanto aos novos dados da altimetria do Irati, devemos às inúmeras perfurações executadas pela Petrobrás na bacia do Paraná, sendo as cotas transcritas no mapa da fig. 1-1. Graças ao conhecimento das cotas de quatro furos e das suas respectivas coordenadas geográficas, pudemos determinar o mergulho de quase 1° para sudeste na região sul de Mato Grosso (arredores de Dourados, a 200 km a WNW da desembocadura do Para-



napanema). Trata-se de uma posição perfeitamente compatível com a direção das margens da antiga bacia onde se depositou o Irati. Merece ainda destaque a cota da base do Irati na perfuração de Pres. Epitácio (cota-2576 m), a mais profunda que verificamos, fato de pleno acôrdo com a posição central, na área da calha do rio Paraná, onde deveria ser mais intenso o abatimento.

Bem ao norte da bacia, na região sul de Goiás, o Irati foi perfurado a pouco mais de 300 m de profundidade numa distância de cerca de 50 km ao sul da faixa E-W onde aflora o Grupo Passa Dois e que delimita a região setentrional da bacia. Trata-se da perfuração de Jataí, igualmente da Petrobrás. Tudo indica um ligeiro mergulho para o sul. É óbvio que o número de perfurações não permite qualquer conclusão peremptória sobre a posição dos estratos, intensamente afetados por falhas e por intrusões de diabásio, o que se verifica a partir do exame dos registros das perfurações.

## 2. *Configuração dos falhamentos*

No estado de São Paulo, onde fizemos estudos mais acurados, pudemos verificar no campo que a principal causa da discrepância altimétrica do Irati é, como já referimos inicialmente, devida a falhas. Também as intrusões de diabásio podem produzir deslocamentos locais, por vezes de grande monta, como ocorre na região de Itacemópolis, Assistência e Ipeúna, onde a faixa do Grupo Passa Dois acha-se soerguida de mais de 400 metros, se fôr obedecido o mergulho que determinamos para o Irati. Todas as falhas que pudemos medir no campo dirigem-se para o norte ou nordeste, todas com forte mergulho para leste ou sudeste. Outra grande falha foi constatada pelas perfurações da Petrobrás nos arredores de Guareí, onde a formação em estudo ocorre a 660 metros de altitude a poucos km ao sul da cidade. A citada falha situa-se a 35 km a oeste da cidade e se prolonga para NNE, tendo abatido as camadas situadas a oeste da

falha. Num dos poços o Irati está a 222 m de profundidade, o que vem indicar a ordem de grandeza do rejeito.

Trata-se de falhas normais aproximadamente coincidentes com a direção das camadas, que por sua vez coincide também com a direção dos contatos com o Grupo Tubarão, o que parece concordar com a idéia de Gutmans (1949), ou seja, da existência de um anfiteatro escalonado por falhas, formando o arcabouço geral da bacia do Paraná. Quanto ao problema da existência de dobras tectônicas no Irati, assunto em que Almeida e Barbosa (1953) discordam de Oppenheim e Malamphy (1936) para o caso da estrutura de Pitanga (fazenda famosa desde os tempos de Washburne, pelas perfurações pioneiras para petróleo e pela estrutura levantada que determina a formação de bela escarpa que descamba para o vale do Corumbataí), não encontramos afloramento algum do Irati, perdurando aberta a questão. Percorremos por duas vezes os arredores da fazenda, num círculo de quase dois km de raio, sem termos visto o Irati, salvo um solo muito semelhante que ocorre a menos de 1 km da sede, rumo Tanquinho. A rocha predominante nesta área é um siltito esverdeado excessivamente duro, do topo do Tubarão. Uma légua a nordeste aflora o Irati em Assistência, soerguido por um possante sil de diabásio. As camadas ora se apresentam horizontais ou quase horizontais, ora com mergulho de meio a um grau para o rumo NE a ENE. São certamente posições anormais, mudadas pela intrusão. Também nesta região de Assistência, onde determinamos a posição espacial do banco basal em quatro pedreiras, não conseguimos concluir sobre a existência de estruturas dobradas, o que foi feito por Washburne (1930) e por Barbosa e Gomes (1958). Em Pitanga tomaram como base a atitude de uma camada de sílex considerada próxima à base da Formação Irati. Infelizmente não conseguimos observar esta camada, provavelmente encoberta pelo solo na área percorrida por nós. Quanto à estrutura de Assis-



tência, tudo indica que passou despercebido dos autores citados o espesso sil referido poucas linhas atrás. Tal intrusão, que ocupa área perfeitamente mapeável e espessura ao redor de 25 m, não consta no mapa do citado trabalho, motivo pelo qual julgamos mais viável ter havido a influência do diabásio na perturbação por eles determinada.

### 3. *Influência das intrusões na estrutura* —

Merece destaque a quase ausência de grandes perturbações, mesmo junto a corpos intrusivos de dimensões consideráveis, como por exemplo o que observamos nas proximidades de Paraíso (E. F. S., entre Piracicaba e São Pedro), onde o Irati aflora na via férrea por cima do diabásio, certamente relacionado a um imenso sil. Nesta ocorrência medimos um mergulho de apenas 4° para oeste. As duas ocorrências de calcário marmorizado logo acima do diabásio de Assistência mostram-se horizontais. Em Rio das Pedras, a cerca de 5 km a SSW da cidade, ocorre o Irati marmorizado pelo diabásio. Nesta localidade determinamos a direção e mergulho em uma das pedreiras e procedemos ao nivelamento (trabalhamos com nível de mão) de mais quatro ocorrências, sendo de 1 km a distância máxima entre as mais afastadas. A direção medida foi de N 45° E e o mergulho de 1° 30' para NW, ou seja, praticamente o mesmo mergulho que medimos noutras pedreiras distanciadas do diabásio. As outras três pedreiras situam-se em cotas perfeitamente compatíveis com a direção e mergulho previamente medidos, sendo o cálculo executado com o auxílio de fotografias aéreas mais dos dados altimétricos relativos tomados no campo.

Outras ocorrências podem ainda ser observadas nas proximidades de Piracicaba. Numa delas, logo na saída para São Pedro, observa-se tanto o Irati como o Corumbataí praticamente interados quanto à sua posição, tendo por baixo o diabásio sob a forma de sil. Este fato é perfeitamente compatível com a fluidez

do magma, neste caso ativo sob o ponto de vista da sua força hidrostática. Barbosa e Gomes (1958) opinam que estas intrusivas são responsáveis por pequenas estruturas localizadas, de pequeno vulto, o que está de acordo com as nossas observações de campo. Admitem ainda os citados autores que o Irati tenha sido o local de mais fácil acesso às intrusões, por ser mais fácil a penetração graças ao menor peso das camadas de cima. Quem observar o mapa geológico do Estado de São Paulo nota, realmente, grande discrepância no tamanho do sil situado ao norte de Piracicaba em relação aos demais existentes no Tubarão, bem menores do que o primeiro.

### 4. *Direção e inclinação do Irati* —

Sempre que determinamos a posição do Irati, em pequenas pedreiras isoladas, ou num determinado trecho de uma pedreira, muito comumente encontramos discrepâncias no rumo do mergulho. A causa de tais discrepâncias reside na existência de suaves abaulamentos que afetam umas poucas dezenas de metros de extensão. Não temos a menor dúvida de que tais abaulamentos não são tectônicos. A fim de evitar o erro causado por estes abaulamentos, escolhemos uma pedreira visível em grande extensão, muito uniforme, aparentemente longe do diabásio e em situação topográfica muito favorável a um levantamento preciso. Assim sendo, evitamos os abaulamentos já citados, e demarcamos três pontos devidamente distanciados e favoráveis na intersecção dos segmentos, e em ângulos que não afetaram a exatidão requerida.

A pedreira escolhida para este trabalho foi a do Sr. Maluf, uma das mais belas da região, pela enorme área descoberta e extensão de exposição das camadas. Situa-se a 18 km de Piracicaba rumo Tietê, a cerca de 500 metros da rodovia estadual. Do alto de um atêrro situado no centro de um dos flancos da pedreira, escolhemos os citados pontos, bem no topo do banco calcário basal. A partir de uma linha de base de 28,25 me-



tros, determinamos por triangulação a posição horizontal e vertical dos pontos, o que foi executado com um taquímetro Norton, cuja precisão é de até meio minuto, por interpolação. Uma vez resolvido o problema dos três pontos, determinamos gráficamente a direção N35° E, com um mergulho de 1° 20' para NW. A partir de um dos cantos do triângulo (cujos lados medem 91, 101 e 153 metros) determinamos a diferença de nível num quarto ponto distanciado de 400 metros a sudeste, medida esta que veio confirmar o valor do ângulo do mergulho. Nesta última medida o erro foi de apenas 60 cm, o que não afeta a ordem de grandeza do valor do gradiente.

a — *Extrapolação da direção e mergulho* —

De posse destes dados de direção e mergulho, extrapolamos estas medidas às demais pedreiras da região toda, até às de Laranjal, no mosaico das fotografias aéreas que montamos para toda a área em que aflora o Irati. Uma vez retificada a orientação geográfica das fotos, bem como, a sua escala (aproximadamente 1:25.000), localizamos todas as ocorrências visitadas (cerca de 25) entre Piracicaba e Laranjal, numa linha curva de ao redor de 60 km. Conhecendo previamente as altitudes do banco calcário basal (estas foram determinadas com aneróides de precisão e sempre que possível corrigidas após aferimento nas estações das linhas férreas de Piracicaba), marcamos-las no mapa feito a partir do mosaico. A seguir fizemos o cálculo trigonométrico das altitudes que deveriam ter as ocorrências, aplicando-se o valor da tangente de 1° 20' e tomando-se como base a altitude da pedreira do Sr. Maluf (onde o topo do banco basal achase a 565 m de altitude). Pudemos desta maneira constatar a veracidade e a exatidão das medidas de direção e mergulho tomadas com teodolito na pedreira do Sr. Maluf. Fomos felizes na escolha dos três pontos tomados como base da determinação da posição desta importante camada. Prolongando-se ainda a direção a nordeste, o afloramento que

estudamos próximo a Limeira, a 44 km da pedreira do Sr. Maluf, ainda se encontra praticamente dentro da posição estabelecida trigonométricamente, com apenas 65 metros a mais da posição calculada, como se vê na fig. 4-1.

A direção que determinamos parece concordar com a posição do Irati no perfil elaborado por Felício (1952), que se valeu dos dados de sondagens efetuadas no Mun. de São Pedro, SP. Entre dois poços (Araquá Lima nº e São Pedro nº 1, distanciados de 5,4 km) alinhados segundo a direção geral das camadas, verifica-se que as camadas se acham praticamente horizontais, fato que vem confirmar as medidas de direção que executamos no campo.

Não há dúvida de que o valor do ângulo de mergulho é válido somente para as áreas marginais da bacia. Afastando-se rumo ao centro o referido ângulo deverá diminuir cada vez mais. Como não conhecemos o gradiente desta diminuição atribuímos valores hipotéticos para as discrepâncias altimétricas encontradas para o Irati mais distanciado da zona marginal.

Há casos em que se acha patentada a existência de perturbações por falhamentos, como por exemplo, a ocorrência situada a 7 km ao norte de Laranjal. O Irati acha-se localizado em região escarpada, onde os lados da escarpa e a direção geral da drenagem coincidem com direções de diáclases medidas no campo, ou seja, E — W, NW e NS. Em resumo, tudo indica que aquela área sofreu um levantamento por falhas, sem ter afetado a posição das camadas. Confirmando esta suposição, determinamos a direção de N 60° E com um mergulho de 2° para NW para a Formação Estrada Nova em Conchas, SP, a 18 km a oeste do Irati estudado em Laranjal. Medimos também a posição das camadas do Tubarão logo abaixo do Irati, em belas exposições na rodovia Tietê-Laranjal, sendo de N 40° E a direção, com um mergulho de 2° para NW. Ainda, poucos km ao sul da pedreira do Sr. Maluf, na rodovia para Tietê, determinamos a direção NE, com um mergulho de 1° 30' para NW,



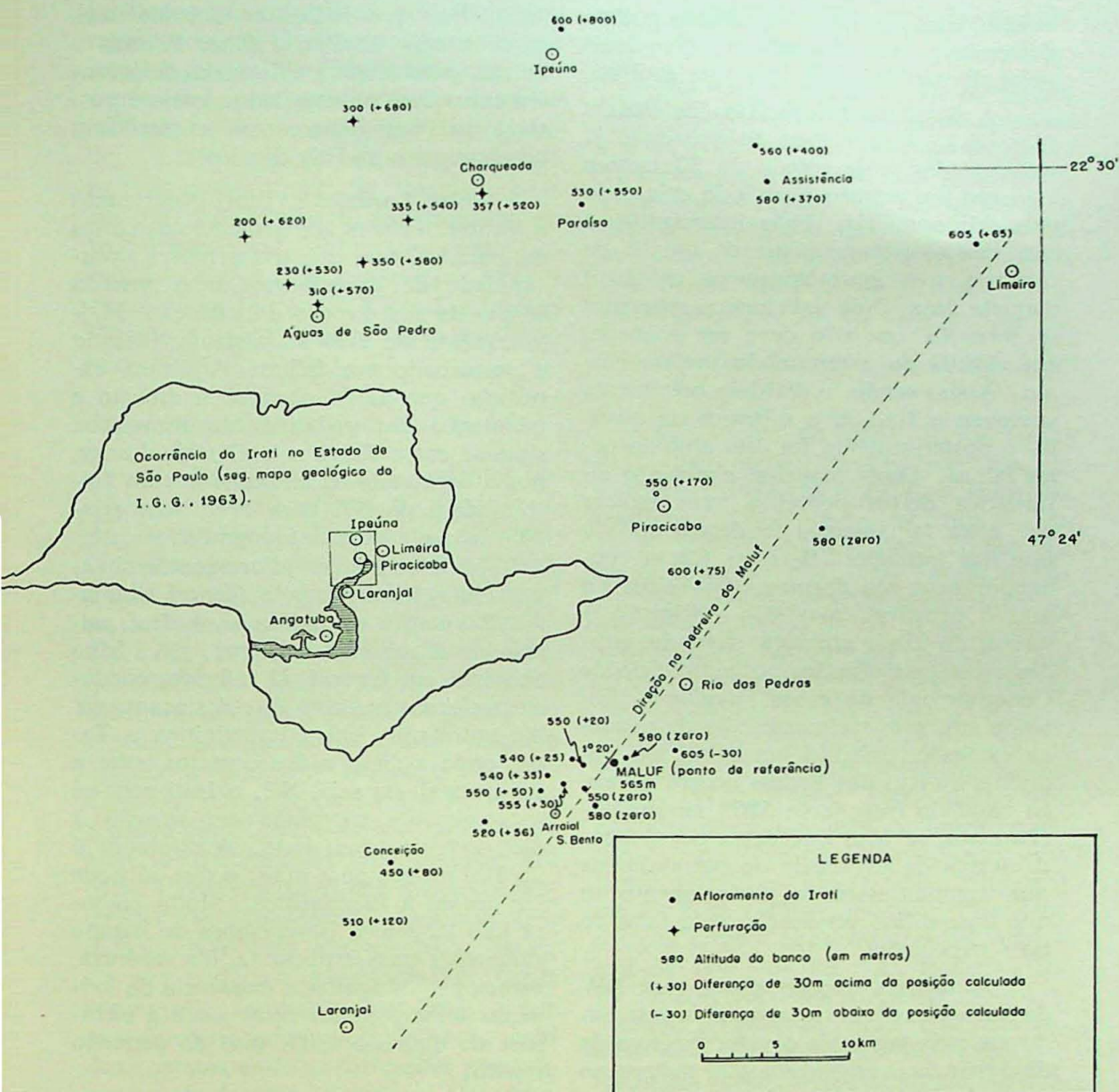


Fig. 4-1. — Mapa da localização e das altitudes das ocorrências estudadas mais pormenorizadamente do Estado de São Paulo.

para a Formação Estrada Nova, num afloramento que aparentava ausência de perturbação. (Estas são relativamente comuns nesta área). Tais medidas vêm confirmar a veracidade da determinação da posição das camadas do Irati, que coincide perfeitamente com a direção dos contatos na região estudada, ou seja, desde Cesário Lange até Limeira. Vêm ainda confirmar a ausência de perturbações

por dobramento, que quando existem, são de âmbito local, confirmando as idéias de Oppenheim (1934b).

As discrepâncias encontradas nas diversas pedreiras situadas nos arredores da do Sr. Ma'uf, numa distância de cerca de 5 a 8 km (fig. 4-1), são explicáveis pelas inúmeras falhas quase verticais de direção N-S que ocorrem naquela área. São falhas normais de pequeno



rejeito, mas que no seu conjunto podem determinar esca'onamentos responsáveis pelas discrepâncias da altimetria do Irati.

A 5 km ao sul de Rio das Pedras (fig. 4-1) localizam-se as pedreiras já mencionadas, cuja cota é de 30 metros a menos em relação à altitude calculada pela trigonometria. Fato interessante é que elas se situam acima de um sil de diabásio que marmorizou os calcários daquela área. Não sabemos a espessura da intrusão, que não deve ser pequena, em virtude da extensão do metamorfismo. Assim sendo, o diabásio certamente soergueu o Irati, não sabemos de quanto, e posteriormente foi este abatido pelas falhas. Desta maneira, a posição altimétrica destas pedreiras vem indicar que estes falhamentos se deram após a fase das intrusões. Se estas fôrem contemporâneas aos derrames basálticos (o que é provável, mas não obrigatório) seriam de idade cretácea, segundo estudos recentes realizados no laboratório de Geocronologia da nossa Faculdade. Estas falhas, provavelmente, são de pequena extensão, pois, 18 km a NE das pedreiras de Rio das Pedras ocorre o banco basal do Irati (cota 580) na sua posição certa, se bem que outra possibilidade seja a da existência de outras falhas que compensassem o deslocamento, o que é de difícil verificação pela falta de boas exposições.

À medida que se afasta para NW da linha de referência aparentemente aumenta cada vez mais o valor positivo da discrepância, atingindo a 800 metros ao norte de Ipeúna. No entanto, nesta localidade, nivelamos cuidadosamente duas pedreiras distanciadas de cerca de 500 metros, e a direção e mergulho do banco basal permanecem inalterados, ou seja, de 19° 30' para NW. O exame das cotas do Irati em 20 sondagens situadas entre São Pedro, Águas de São Pedro e Charqueada mostra a mesma altitude da formação segundo a direção NE, o que vem fortalecer a ideia de que o deslocamento foi homogêneo, sem dobrar nem adernar, na maioria dos casos. É óbvio que o foi dito é válido somente para os traços gerais. Apesar de não termos observado

mergulhos que indiquem dobramentos, as estruturas de Pau d'Alho, Pitanga e outras, patenteam a existência de levantamentos bem pronunciados, onde é possível que aos falhamentos se associem adernamentos radiais dômicos.

Entre Laranjal e Tatuí observamos a formação em estudo somente nos cortes de estradas, sem que tivéssemos a oportunidade de executarmos uma medida segura da sua direção e inclinação. Muito comumente acha-se bastante alterado e perturbado por falhas. A última exposição que ainda obedece à direção e inclinação das pedreiras de Piracicaba situa-se entre Pereiras e Cesário Lange, numa área onde os afloramentos do Irati mudam de NE para NW, sem relação aparente com a topografia.

Mais ao sul, os afloramentos situados entre Itapetininga e Guareí situam-se 200 metros abaixo do nível ideal, calculado trigonometricamente. A falha existente em Guareí, já referida, coaduna-se perfeitamente com este deslocamento. No entanto, entre Itapetininga e Tatuí, onde a direção dos contatos volta a ser normal, ou seja, NE, o Irati acha-se anormalmente soerguido em relação à área tomada como base. A diferença é de 500 metros para mais, o que só pode ser devido a falhamentos. Muito embora não tenhamos observações de campo suficientes para explicar tal discrepância, mencionamos apenas a existência de inúmeras falhas, muitas delas junto a intrusões de diabásio (sil), mas de pequeno rejeito.

c — *Posição do Irati nas ocorrências mais sulinas do Estado de São Paulo* —

Prosseguindo as nossas observações de campo verificamos que as camadas mergulham de 19° para N, obedecendo ao desvio da faixa dos contatos, que passa a ser E-W na região situada entre Angatuba e Paranapanema. Não pudemos medir as camadas do Irati, que se acham muito alteradas, mas executamos várias medidas nas camadas mais frescas da Formação Estrada Nova. As ob-



servações que se seguem, nos demais estados, mostram claramente que os rumos dos mergulhos são indubitavelmente determinados pela configuração pretérita da bacia, sendo os mergulhos ou exagerados tectonicamente ou originalmente grandes apenas junto às margens, pois, em 100 km apenas a profundidade do Irati atingiria a 2.300 metros, o que não se dá, como era de se esperar. Mais a oeste, entre Fartura e Taguaí, o colega Vicente Fúlgaro determinou o mergulho para NNE.

d — *Posição do Irati no Paraná* —

No Estado do Paraná pudemos verificar a mesma configuração, sendo sempre escolhidos os afloramentos mais distanciados dos corpos de diabásio. Assim é que entre Carlópolis e Joaquim Távora, a Formação Estrada Nova mergulha cerca de 1º para WNW. Entre Joaquim Távora e Santo Antonio da Platina medimos um mergulho suave para NW, e pouco mais ao norte, a meio caminho entre as duas cidades citadas, o mergulho é para o norte, ainda para a Formação Estrada Nova. Mais ao sul a direção do Irati foi determinada com precisão por Maia (1961) a partir dos dados de sondagens em São Mateus. Determinou a direção NW com um mergulho suave, de menos de um grau para SW (mais comumente 14 metros por km), o que está de pleno acôrdo com a direção geral dos contatos entre as formações gondwânicas daquela área. Em Eng. Gutierrez, que se situa a 46 km a NW de São Mateus, confirmamos o mesmo mergulho para o contato do Irati com a formação sobrejacente, numa boa exposição de cerca de 50 metros, junto à estação da linha férrea.

e — *Posição do Irati em Santa Catarina* —

Em Santa Catarina, mais ou menos a 50 km a NNE de Lages, determinamos a direção de N 10º E com um mergulho de pouco menos de um grau para oeste. Prosseguindo rumo sul confirmamos a mesma direção e o mesmo mergulho para as duas formações sobrejacentes, ou seja, Serra Alta e Serrinha, assim designadas na região sul do País.

f — *Posição do Irati no Rio Grande do Sul* —

Finalmente, no Estado do Rio Grande do Sul, onde a direção geral das camadas gondwânicas é E-W, o mergulho continua obedecendo à configuração da bacia, ou seja, para o norte, como era de se esperar. Fato interessante é que em São Gabriel, onde se inicia a inflexão das camadas para o sul, a direção do Irati passa a ser NE com mergulho para NW, segundo Teixeira (1938) e segundo informação do Eng. Vicente Padula, da Petrobrás, que se acha estudando o Irati inclusive por meio de sondagens, na região sul da bacia. Infelizmente não encontramos dados sobre a direção e inclinação do Irati no Uruguai, onde, segundo Caorsi e Goñi (1958), esta formação é de caráter lenticular, pelo fato de nem sempre achar-se presente, muito embora seja descrita uma espessura de 70 metros, portanto, quase ou mais que o dôbro do Irati do Brasil, que tudo indica, pelo que acabamos de expor, tratar-se de uma formação contínua. Há quem imagine ter sido o Irati uma série de lagos continentais, uns maiores e outros menores. Tal idéia não encontra apoio no que acabamos de expor, o que foi baseado em observações diretas no campo e na leitura de outros trabalhos a respeito.

## V — ASPECTOS ESTRUTURAIS DA FORMAÇÃO IRATI

### 1. *Estruturas tectônicas* —

Já tratamos de algumas partes deste tópico no capítulo precedente, dada a relação do assunto a ser tratado com os traços gerais da formação. Por este mo-

tivo limitarnos-emos aqui a descrever algumas falhas observadas e discutir o problema dos sistemas de diáclases, sua relação com as intrusões de diabásio e a sua eventual influência na topografia.



Na área situada entre Laranjal e Piracicaba, onde os estudos foram acurados, determinamos dois sistemas principais de diaclases. Um deles varia de N 35° W a N 50° W e o outro de N 50° E a N 70° E. Praticamente todas elas são verticais. Às vezes observa-se o diaclasamento somente no banco basal, em certos casos formando-se grandes sulcos pela dissolução mais fácil ao longo da diaclase, não se vendo o menor indício de diaclasamento nas camadas rítmicas mais plásticas. Esta direção parece não ter a menor influência na drenagem. O diaclasamento decorrente dos silos de diabásio tem direção predominante para NE, que sem dúvida alguma é uma direção de tensão. Numa das pedreiras de calcário marmorizado de Rio das Pedras ocorre um pequeno dique de poucos centímetros de largura, cuja direção é N 40° E, vertical. Também entre Piracicaba e Taquaral, nas proximidades de um grande corpo intrusivo, ocorre intenso fendilhamento N 60° E na formação Corumbataí, havendo um pequeno dique de diabásio de poucos palmos de espessura segundo a mesma direção.

Quanto às falhas, citaremos algumas que chamaram a nossa atenção, além das já referidas no capítulo precedente. Uma delas é semelhante à ilustração de Almeida e Barbosa (1953, fig. 40), pelo fato de ter falhado o banco

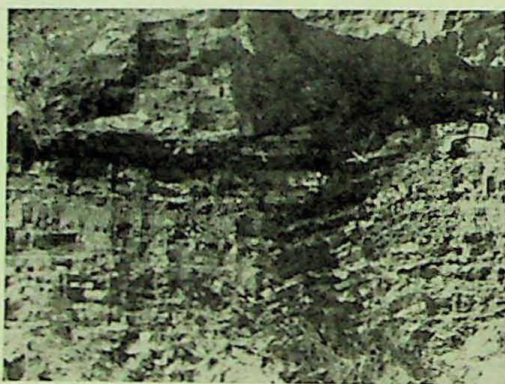


Fig. 5-1. — Pequena falha normal de meio metro de rejeito no banco basal. A parte superior da zona rítmica acomodou-se à falha por meio de suave dobra, graças à maior plasticidade da zona rítmica (Bairrinho).

basal mais rijo e dobrado a zona rítmica mais plástica, com a diferença de que a nossa falha é normal e a citada é inversa, caso mais raro. Sua direção é NS, com um mergulho de 70° para leste. Situa-se numa das pedreiras do Bairrinho, pequeno povoado a cerca de 1,5 km a NW da pedreira do Sr. Maluf (fig. 5-1). Outra direção que parece ter relação com as falhas normais é a direção NE. Uma das falhas observadas, que obedece a esta direção, merece ser mencionada, pelo fato de formar um belo e nítido "graben". Ambas as falhas que o delimitam se alinham segundo NE com caimento de 80° para SE. Situa-se entre Tatuí e Itapetininga, na rodovia estadual. A distância entre os planos da falha é de apenas 20 metros, e as camadas abatidas acham-se lindamente encurvadas para cima num dos lados, junto às camadas do Irati, mostrando bem pelas dobras de arrasto o abatimento da parte central.

A única conclusão que tiramos a partir das nossas observações em conjunto é que predominam largamente as rupturas (diaclases ou falhas) ocasionadas por forças de tração, e não de compressão, fato que coaduna com as estruturas falhadas ao invés de dobradas.

## 2. Estruturas atectônicas de deformação —

### a — Dobras produzidas pela hidratação de folhelho —

Trata-se de uma estrutura mais ou menos comum nas camadas rítmicas do Irati do Estado de São Paulo. Como se vê nas fig. 5-2, 5-3 o grau de deformação varia de ligeiros abaulamentos até dobras bem pronunciadas. Hills (1963) ilustra um caso análogo muito semelhante a vários que observamos. A natureza montmorilonítica dos minerais argilosos dos folhelhos que estudamos é perfeitamente compatível com o fenômeno da intumescência por hidratação, fato que determina o desenvolvimento de pressões consideráveis, segundo obra citada de Hills.



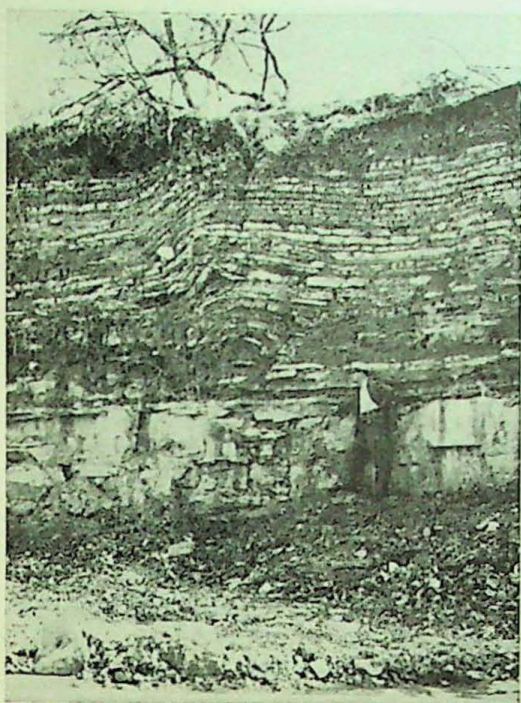


Fig. 5-4. — Pequenas dobras originadas pelo deslizamento da lama calcária. Este aspecto, relativamente raro, ocorre no mesmo nível da brecha do banco, cuja origem é a mesma. (Pedreira do Sr. Maluf, foto do Prof. Josué C. Mendes).



Fig. 5-5. — Ligeira flexura na zona rítmica, a pouco mais de 1,5 m do topo do banco. Note-se que uma das camadas se acha dobrada (quase no centro da fotografia) enquanto que outras se encontram nitidamente imbricadas. (Pedreira situada a menos de um quilômetro ao sul da do Sr. Maluf).

Figs. 5-2 e 5-3. — As duas fotos, tiradas na mesma pedreira (a do Sr. Maluf), exibem as citadas deformações. Enquanto que na de cima os estratos acham-se nitidamente dobrados, na de baixo sofreram um ligeiro arqueamento na sua parte inferior.

b — *Deformações produzidas por deslizamentos* —

Sem dúvida alguma a brecha existente no banco basal constitui um dos aspectos estruturais mais interessantes, pelo fato de indicar a plasticidade da lama calcária. Além do rompimento das camadas menos plásticas, o desliz da lama calcária pode provocar ocasionalmente pequenas dobras irregulares, denominadas enterolíticas por Hills (obra ci-

tada), dada a sua analogia com as a'ças intestinais. Tal aspecto, contudo, é raro na formação em vias de estudo (Fig. 5-4). Outras vezes tem-se a impressão de que o deslize se acha associado a fenômenos de compactação diferencial, o que se acha ilustrado na fig. 5-5, onde se observa uma flexura associada a pequenas dobras das camadas rítmicas.

c — *Estruturas diapíricas* —

Trata-se de estruturas relativamente raras, tendo sido observadas em apenas três ocorrências. Contudo, o seu interês-



se reside na confirmação de que a lama calcária pode, eventualmente, manter-se plástica longo tempo após a sua sedimentação, fato conhecido e citado por Pia (1933). Trata-se de estruturas diapíricas em pequena escala, tendo a lama calcária penetrado, atravessado as camadas de cima, certamente graças ao peso das camadas superiores, que comprimiram as de baixo ainda plásticas. Sendo desiguais as pressões, pode dar-se o escape da lama para um dos lados, formando-se corpos à maneira de um sil, ou para cima, como foi o nosso caso. Não encontramos na literatura referências sobre este tipo de estrutura em rochas calcárias, provavelmente por tratar-se de caso raro.

A primeira ocorrência observada situa-se na estrada de rodagem Itapetininga-Angatuba, km 195, onde predominam folhelhos pirobetuminosos com 10% de perda ao fogo, chegando a arder sob a chama. Uma das camadas calcárias parece emitir uma verdadeira protuberância de forma irregular, fazendo com que os estratos ao seu lado se encurvem para cima, forçados pela protuberância, que é ligeiramente inclinada, de meio metro de altura por 20 cm na sua parte mais larga (fig. 5-6). É formada por um

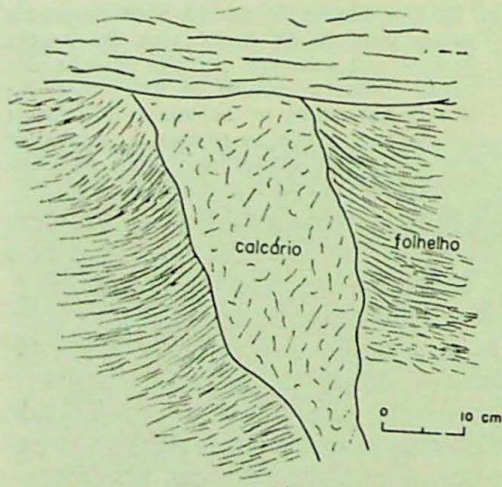


Fig. 5-6. — Penetração do calcário através do folhelho pirobetuminoso, cujas lâminas se encurvaram no sentido da penetração da lama calcária, cuja plasticidade é patenteada nesta ocorrência. (Km 195 da rodovia Itapetininga — Angatuba).

calcário cinzento escuro, muito compacto, rijo, e cheio de pequenas vesículas preenchidas parcialmente com betume, já semi-endurecido. Sua textura é uniformemente fina, predominando cristais de 5 microns de tamanho médio. Ocasionalmente a calcita se recristaliza em cristais milimétricos, raros. Trata-se de um calcário bastante puro, com somente 3% de resíduo insolúvel, constituído, como praticamente todos os demais, de calcedônia, cuja descrição acha-se no capítulo VI. Queremos apenas lembrar de que não encontramos a resposta para a plasticidade no resíduo insolúvel, tal como se dá com a brecha da pedreira do Sr. Maluf.

A segunda ocorrência é bem maior do que a do km 195. Acha-se em Assistência, na pedreira do Sr. Anafrain Huppert, no mesmo local onde Landim (1965) fez interessante estudo da deformação por compactação dos leitos situados abaixo do banco calcário explorável. Acha-se bem ilustrada nas figuras 1 e 4 do referido trabalho. O calcário é homogêneo, apresenta-se todo fraturado, medindo o corpo "intrusivo" pouco mais de um metro por menos de 0,5 m de largura. Tal como a amostra anterior, a porcentagem de resíduo insolúvel deste calcário é nitidamente menor do que a dos calcários adjacentes. Enquanto que estes possuem de 20 a 30% de resíduo, aquele possui somente 5%, constituído quase que exclusivamente de calcedônia. Tanto nesta ocorrência como na de Angatuba (km 195) o teor em clásticos do resíduo é mínimo, de cerca de 1% apenas (em relação ao resíduo, e não à amostra toda), o que não coaduna com a suposição de que o calcário tenha sido argiloso para ser plástico.

#### d — Falhas —

As falhas adiastróficas penecontemporâneas à sedimentação são raras. Uma delas mereceu a nossa atenção pelo fato de relacionar-se à brecha, como ilustra a fig. 5-7. No entanto, as falhas produzidas pela dissolução do calcário do banco e posterior assentamento são mais ou menos comuns na região estudada.





Fig. 5-7. — Pequena falha de acomodação logo acima da camada de brecha, cuja espessura é de 15 cm. E' provável ter-se originado da plasticidade da camada de brecha, cuja base não foi afetada pelo deslocamento. Note-se que muitos fragmentos acham-se imbricados pelo deslocamento da lama calcária. (Pedreira do Sr. Maluf).

### 3. Estruturas primárias sem deformação —

#### a — Marcas onduladas —

Obedecendo à criteriosa classificação de Pettijohn (1957, pág. 158) das estruturas sedimentares, descreveremos brevemente algumas marcas oriundas da correnteza das águas onde foi depositado o Irati. A mais espetacular delas consiste nas marcas onduladas (ripple marks). O valor médio de  $\lambda$  é de 10 a 15 cm, e a altura é de cerca de 2 cm, sendo estes valores mais ou menos constantes para todas as ocorrências observadas (fig. 5-8). Aparentemente são simétricas, mas todas as vezes que se nota uma ligeira assimetria, esta indica uma correnteza de nordeste para sudoeste. Mais notável é a constância da orientação das cristas, quase sempre para NW, desde as pedreiras de Laranjal até às dos



Fig. 5-8. — Marcas onduladas do topo do banco calcário de uma pedreira situada 2,5 km a SW da do Sr. Maluf. As cristas acham-se orientadas para N 45° W, como a maioria delas.

arredores de Piracicaba. Numa delas, situada a meio caminho entre as citadas localidades (bairro Conceição), observamos marcas onduladas numa camada distante 2 metros abaixo do topo do banco, orientadas exatamente com a mesma direção das de cima. Sem dúvida, trata-se de fato notável o da constância da direção da correnteza em tempo tão longo, ou seja, o tempo para que se depositassem e se consolidassem 2 metros de lama calcária, o que deve corresponder a muitas centenas de milênios. Mais ao norte, nas pedreiras de Assistência, não observamos as referidas marcas, mas observamos sulcos de erosão, que também sugerem a correnteza rumo sudoeste, assunto ainda a ser discutido no final deste trabalho.

Como era de se esperar, a textura dos calcários das marcas onduladas mostrou tratar-se de um calcarenito (segundo a conhecida classificação de Grabau), cuja descrição será feita no capítulo referente às texturas. As únicas exceções quanto à orientação das cristas foram encontradas na pedreira do Sr. Maluf. Além das comuns, orientadas para noroeste, ocorrem também cristas orientadas para N 70° W.

#### b — Marcas de erosão —

Como já referimos, ocorrem também sobre a superfície do topo do ban-



co basal diversas marcas que tudo indica tratar-se de sulcos de erosão. Foram observados na já citada pedreira do Sr. Fanico e na vizinha, a menos de um quilômetro de distância, do lado oposto da rodovia estadual. Um dos sulcos se apresenta bifurcado, como se duas correntezas se unissem, tendo escavado cerca de 5 cm numa largura de 15 a 20 cm, numa extensão de vários metros de comprimento. Em função da suposta afluência dos cursos d'água (muito provavelmente subaquáticos) esta se dirigia para sudeste, concordando com a direção dos demais sulcos observados nas pedreiras vizinhas. A cerca de 500 metros ao sul, próximo à estrada asfaltada, ocorre o famoso conglomerado tão discutido, considerado por muitos como a base do Irati e por outros tido como "bone-bed" local. Sem entrarmos nesta discussão, citaremos o imbricamento de seixos neste conglomerado atípico, que também indica a correnteza para sudeste, assunto que ainda será discutido mais pormenorizadamente.

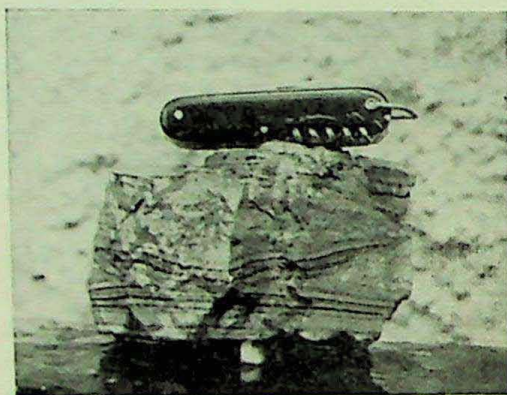


Fig. 5-9. — Pequeno canal esculpido na lama calcária e posteriormente preenchido. As lâminas pretas são de folhelho calcítico. (Bairro Conceição, a 12 km a NNE de Laranjal).

A fig. 5-9 ilustra com clareza uma destas marcas de erosão, formada no meio do banco. O sulco esculpido na lama calcária ainda inconsolidada foi posteriormente preenchido pelo mesmo tipo de material. Esta estrutura não é co-

mum, sendo encontrada no bairro Conceição, situado 12 km a NNE de Laranjal.

#### 4. Estruturas secundárias de origem química —

São duas as estruturas desta natureza que poderiam ser descritas. Contudo, uma delas é tão complexa, que preferimos tratar à parte. Trata-se do problema do sílex, tão controvertido, complexo e difícil, que ao nosso ver, merece destaque neste trabalho. Assim sendo, reservamos um dos capítulos ao problema do sílex.

Outra estrutura de origem química, formada pela dissolução do calcário, consiste nas suturas, também denominadas juntas suturadas, que são verdadeiros estilólitos em miniatura. Realmente, sob a lupa binocular de forte aumento, exibem as co'unas estriadas com o mesmo aspecto dos estilólitos normais. Diferem somente no tamanho, não ultrapassando de 2 a 3 mm de comprimento. Como nos demais casos, esta linha de sutura é paralela à estratificação e se destaca pela coloração preta, às vezes brilhante. Tal aspecto se deve à concentração do material pirobetuminoso, cujo odor é bem característico quando aquecido à chama, e insolúvel no éter. Junto a esta substância orgânica ocorrem grânulos de quartzo, de feldspato fresco e muito abundante, ocasionalmente de mica e turmalina. Acha-se assim concentrado o resíduo insolúvel análogo ao que já havíamos observado no resíduo insolúvel ao ácido clorídrico. A única diferença, que chamou a nossa atenção, consiste na ausência ou quase ausência de calcedônia, mineral que forma 50% do total do resíduo insolúvel da mesma amostra, que por sua vez, possui 7% de resíduo insolúvel. É possível que tenha aumentado o pH das águas que continuaram a percolar através da zona suturada, vindo a dissolver também a calcedônia, certamente mais fácil de ser solubilizada do que o quartzo, graças à sua menor dimensão e cristalinidade.



## 5. Estruturas de origem orgânica —

Neste subcapítulo serão descritos muito brevemente o modo de ocorrência dos principais fósseis da Formação Irati, sendo alguns deles até então desconhecidos. Não entraremos na discussão paleontológica, pois, trata-se de assunto já estudado por outros e que foge à finalidade deste trabalho. Além das estruturas orgânicas propriamente ditas, que obedecem à citada classificação de Pettijohn, acrescentaremos neste subcapítulo a descrição dos demais fósseis observados. Pecamos, portanto, no arranjo da matéria, mas por outro lado, unimos assuntos intimamente correlatos.

### a — *Mesosaurus e Stereosternum* —

O mais espetacular dos fósseis, pela beleza, pela perfeição na fossilização e ainda pela abundância em que ocorre, é sem dúvida alguma o famoso *Mesosaurus brasiliensis* (fig. 5-10), estudado por

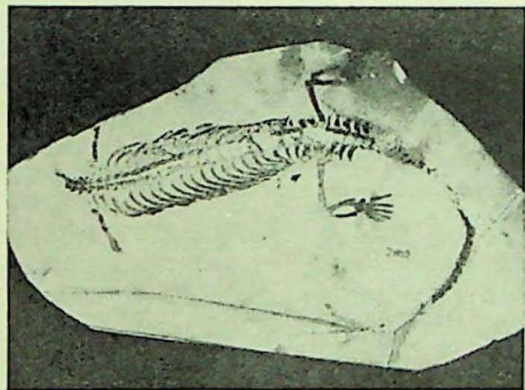


Fig. 5-10. — Fóssil do réptil *Stereosternum*, onde os ossos se fossilizaram por conservação. Trata-se de um exemplar raro pela sua perfeição. Foi doado ao Autor pelo seu tio, Prof. Sylvio de Aguiar Souza, em 1940. Mede 14 cm entre os membros anteriores e posteriores.

Mac Gregor (1908, IIa. parte). Segundo este autor o *Mesosaurus* ocorre preferencialmente na região sul do Irati, a partir do Paraná, enquanto que em São Paulo ocorre o *Stereosternum tumidum* de Cope, que difere pelo número de vértebras (segundo informação do Prof. Jo-

sué C. Mendes), bem como, pelo tamanho e forma dos dentes, bem menores no *Stereosternum* e longos e finos, quase aciculares, no *Mesosaurus*, como tivemos a oportunidade de observar. No entanto, von Heune (1941) os considera iguais, opinando para a existência de formas jovens e adultas, ao mesmo tempo que os compara com os da África, da Formação White Band.

Os esqueletos apresentam-se ora inteiros (são muito raros os com cabeça) ora desarticulados, o que certamente se deve à movimentação da água. Já citamos a abundância de ossos soltos associados às marcas onduladas no topo do banco basal, predominando largamente as costelas, como era de se esperar. Os membros, quer anteriores ou posteriores, são igualmente raros junto aos esqueletos mais completos. Mais raros ainda que a própria cabeça são os ossos que constituem a costela abdominal, que nada mais são do que ossículos delgados que ocorrem junto aos ossos do esterno.

Mais comumente os ossos do referido réptil são conservados, pois, ao microscópio mostram-se constituídos de material fosfático bi-refringente, provavelmente da natureza da dahllita. Outras vezes, inclusive na mesma ocorrência, os ossos podem ser substituídos por carbonato de cálcio. Nunca observamos a substituição dos ossos pelo sílex, o que está de acordo com o trabalho de Rogers (1924), que considera a silicificação dos ossos um caso extremamente raro. Um tipo de fossilização raríssimo que observamos, mas digno de nota pelo interesse científico, consiste num molde externo de um setor do tronco do réptil, de 10 cm de comprimento, formado de calcêdônia microcristalina (fig. 5-11). A sílica, ao invés de substituir os ossos, preencheu os interstícios e adjacências do esqueleto, de modo que o lugar ocupado pelos ossos é agora vazio, e o correspondente à medula vertebral é cheio. Aham-se presentes alguns pequenos vazios delgados que correspondem às costelas abdominais, osso extremamente raro pela sua pequena dimensão. Sua presença indica a máxima tranquilidade das águas



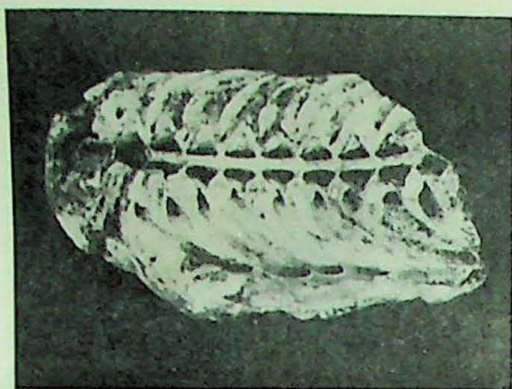


Fig. 5-11. — Molde externo silicificado de um fragmento de *Stereosternum*. Note-se a região da medula vertebral preenchida pelo sílex. Mede 10 cm de comprimento por 5 cm de largura. (Arraial São Bento, Piracicaba).

onde se deu a deposição. Finalmente, outro tipo de material formador dos ossos fósseis descritos é um fosfato amorfo análogo à colofana, provavelmente formado por hidratação do fosfato original do osso.

Numa secção longitudinal de uma costela pudemos observar com muita nitidez os canais de Havers, geralmente tortuosos e anastomosados, de 0,1 a 0,2 mm de diâmetro. É interessante o fato de estarem comumente preenchidos de betume amarelado, em quantidade suficiente para que os ossos ardam sob a chama. O mesmo se dá com os ossos pretos encontrados no folhelho, com a diferença de que se acham impregnados de substâncias pirobetuminosas, insolúveis no éter, mas que se desprendem e se inflamam facilmente sob uma chama comum, de álcool. A orientação óptica das fibras ósseas é diferente da dos ossos atuais. Enquanto que estes possuem elongação positiva, aqueles são negativos, o que concorda com os estudos de Rogers. Numa secção transversal ao comprimento de uma costela de material fosfático pudemos observar com nitidez o conjunto dos canais de Havers. Cruzando-se os nícois observa-se bem a chamada estrutura pseudo-esferulítica (Rogers, 1924, pág. 548), que se deve à disposição concêntrica das camadas anisótropas, e não à disposição fibro-radiada como é o caso dos esferulitos, segundo a explicação

do autor citado, que estuda com pormenores petrográficos os ossos fósseis. O perióstio é igualmente visível, com uma espessura relativamente grande, de 1 mm, numa costela de 4 mm de diâmetro.

#### b — *Liocaris* —

Outro fóssil bastante comum, que chega a predominar entre os componentes de certas camadas calcárias é o crustáceo *Liocaris*, do qual acham-se conservadas as suas carapaças, cujo tamanho médio é de 2 a 3 mm, podendo atingir a 5 mm. Acham-se dispostas quase sempre deitadas segundo a estratificação mas de maneira caótica, o que é compatível com a tranqüilidade das águas em que se depositaram. Algumas delas acham-se dispostas em posição vertical, o que vem confirmar a calma do ambiente de sedimentação. Apesar destas evidências da pouca movimentação, junto às citadas carapaças muitas vezes predomina o calcário clástico, sob a forma de grânulos de 0,1 a 0,2 mm de diâmetro, sem o menor sinal de estrutura interna, constituídos de cristais de 1 a 2 microns de tamanho. Poderiam certamente ser considerados "pellets" de calcário, que deveriam ter sido transportados por correntes brandas, de pouca velocidade, sem a devida competência para rearranjar e orientar as valvas já depositadas.

Nas amostras estudadas o tipo de fossilização parece ser por conservação, tendo em vista a constância da cristalinidade no interior das valvas, que provavelmente são de natureza calcária. Os demais crustáceos da Formação Irati foram estudados com pormenores por Mezzalira, encontrando-se a documentação bibliográfica na citação Mezzalira (1964).

#### c — *Espículas de esponja* —

Passemos agora à citação dos fósseis inéditos, encontrados no decorrer das observações ao microscópio petrográfico. O mais interessante deles, sem dúvida alguma, é representado pelas espículas sílicas de *Demospongia*, ordem *Haplosclerida*, ou *Poecilosclerida*, ou ainda, *Epi-*



polasida, segundo informação por carta de Robert M. Finks, especialista no assunto, professor de Queens College, Flushing, New York, E. U. A. Segundo informação do colega Vicente Fúlfaro, o já citado descobridor deste interessante fóssil, estas mesmas espículas ocorrem espalhadas em grande extensão geográfica e em grande espessura, dentro da Formação Estrada Nova, sempre com o mesmo aspecto, ou seja, monoxônica, delgada, ligeiramente curva e medindo 30 a 40 microns de diâmetro por um comprimento de cerca de 0,5 mm no máximo, sendo mais comuns as de 0,3 mm. Ópticamente mostram-se sempre recristalizadas de maneira difusa, sem orientação preferencial e extinção ondulante indefinida em toda a extensão da espícula. Muito comumente exibem o canalículo interno bem conservado. O índice de refração é próximo ao do quartzo, o que evidencia a perda d'água da opala original, agora recristalizada em calcedônia, fato comum entre as espículas silicosas antigas, citado pela literatura paleontológica.

Tomando conhecimento da existência de espículas dentro da Formação Estrada Nova, procuramos o referido fóssil nas nossas amostras em vias de estudo, tendo sido fácil a descoberta em certos horizontes, tal a sua abundância. Enumerando as ocorrências na sua ordem estratigráfica temos o seguinte: ocorrem com extrema raridade nos argilitos do topo do Tubarão (Formação Taquaral), a poucos metros da base do Irati, o que foi visto nos afloramentos da rodovia para Piracicaba, nas proximidades de Tupi, a 11 km da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. O mesmo observamos no topo do Tubarão situado a menos de 2 km da estação de Taquaral, rumo a Piracicaba, onde o banco basal do Irati acha-se logo acima dos argilitos siltosos do Tubarão. Poucos metros acima, estratigraficamente falando, nos siltitos argilosos cinzentos levemente azulados, que se situam abaixo do banco calcário do Sr. Maluf, são abundantes as espículas. Foram as escolhidas para serem enviadas aos Estados Unidos, tal a abun-

dância em espículas. Pouco acima, já no banco calcário basal (junto à brecha calcária situada a 0,5 m acima da base do banco), encontramos raríssimas espículas junto a fragmentos de sílex certamente primário, singenético, certamente graças à proteção contra as soluções que as teriam dissolvido, tal como se deu com os calcários com sílex estudados por Pitman (1959), assunto que será tratado no capítulo VII. Da mesma maneira que o autor citado, não encontramos o menor vestígio de espícula no resíduo insolúvel ao ácido clorídrico das cento e poucas amostras dissolvidas e estudadas. Nos folhelhos pretos das camadas rítmicas observamos cerca de três espículas após a observação de mais de uma dezena de amostras. Podemos afirmar que são quase inexistentes. No entanto, no afloramento já descrito anteriormente, situado entre Itapetininga e Angatuba, logo acima de folhelhos pretos betuminosos isentos de espículas, são muito abundantes as espículas. Este afloramento, sem dúvida alguma, representa um fácies oxigenado dentro da Formação Irati. Não temos dúvida de que a matéria orgânica acumulada junto à lama calcária determinou o aumento do pH e a consequente dissolução das espículas.

Deve aqui ser lembrado de que a ocorrência de espículas silicosas de esponja não se restringe aos horizontes citados, pois, foram também encontrados por Almeida e Barbosa (1953) no membro Tatuí, situado logo abaixo do Taquaral. Segundo os autores citados trata-se de espículas poliaxiais típicas de ambiente marinho. Tais espículas acham-se associadas a uma provável glauconita, segundo os autores citados, ocorrendo nas imediações de Paraíso (E. F. S.), entre Piracicaba e São Pedro.

#### d — *Esporos* —

Outro fóssil encontrado em várias amostras são esporos alados de gimnospermas, muito parecidos com os descritos por Jizba (1962), tanto na forma como nas dimensões. Segundo esta palinologista são formas típicas do Paleozóico superior, sendo encontradas em grande



abundância em folhelhos continentais. Todos os esporos observados se apresentam com o mesmo aspecto, diferindo apenas em pequenos detalhes. Constituem-se de uma esférula de 50 microns de diâmetro rodeada de duas aletas semiesféricas, diametralmente opostas, que determinam o tamanho em conjunto de 100 microns. Ao microscópio mostram-se isótropos, e índice de refração inferior ao do bálsamo do Canadá, motivo pelo qual admitimos que o material tenha se conservado sem alteração. Além do mais, uma vez incinerado o material ao maçarico, desaparecem os esporos, o que não se daria se fôssem silicificados. A sua presença vem indicar a proximidade das margens onde aflora o banco calcário, bem como, a abundância destas gimnospermas, confirmando o que já disse Jizba (1962). Ocorrem em várias pedreiras situadas ao sul da cidade de Piracicaba, em Angatuba, onde são muito raras e um tanto diferentes das já citadas, e finalmente, no Rio Grande do Sul, onde os observamos em duas ocorrências. Uma, já mencionada anteriormente, em Passo de São Borja, e outra, numa rocha calcária testemunhada numa sondagem da Petrobrás em São Sepé. Da mesma maneira que a anterior, o resíduo insolúvel deste calcário é em tudo análogo aos de São Paulo, inclusive na forma dos esporos alados e no aspecto da calcedônia. Tais esporos são mais comumente encontrados no resíduo insolúvel dos calcários. Digno de nota é o fato de serem extremamente raros nos folhelhos e comuns no interior dos nódulos de sílex do folhelho pirobetuminoso. Tudo indica que os esporos foram decompostos na lama argilosa sapropélica, e que foram protegidos pelo sílex, certamente de origem primária neste presente caso.

#### e — Restos orgânicos no betume —

Encontramos ainda uns poucos e raros vestígios organizados no resíduo insolúvel (ao éter ou benzina) dos betumes que ocorrem nas fendas e cavidades dos calcários marmorizados de Assistência. Muito provavelmente tenha se dado a conservação destes raros restos no ma-

terial betuminoso. Entre estes, predominam fragmentos de tecidos vegetais, onde são bem visíveis os vasos condutores. Encontramos também alguns raros apêndices de artrópodes, provavelmente de crustáceos, que ocorrem em grande quantidade em certos níveis do banco calcário daquela região. Ocorrem com relativa frequência corpos amarelados isótropos, provavelmente de natureza resinosa, juntamente com filamentos que lembram a gas. A maioria destes restos citados desaparecem com o aquecimento ao rubro, o que vem indicar o processo de conservação, salvo algumas células talvez silicificadas.

#### f — Estruturas incógnitas

Finalizando, citaremos a ocorrência de estruturas em parte semelhantes às descritas por Kegel (1965), que são bilobites do devoniano médio do Piauí. Enviamos duas amostras ao referido estudioso, sendo uma delas um calcário da pedreira do Sr. Maluf e outra, um folhelho carbonoso de uma pedreira existente nas proximidades de Limeira. Recebemos com resposta um trabalho já publicado (Kegel, 1967), no qual o citado estudioso dá ênfase à semelhança destas marcas com outras encontradas no permo-carbonífero da Austrália. As que encontramos são elípticas, medindo de 0,5 a 1 cm de tamanho, e possuem no centro uma pequena crista alongada no sentido do maior eixo. Fato digno de nota é que sobre a mesma superfície da rocha (num caso calcário, noutro folhelho), noutras marcas idênticas, ao invés de crista tem-se uma pequena reentrância alongada. Se se tratasse de marcas de dissolução (segundo a opinião de outros estudiosos), dificilmente ambos os casos estariam com a mesma orientação.

#### 6. Estratificação

Trata-se de uma feição bastante característica do Irati, pois, a muitas centenas de metros de distância pode-se reconhecer esta formação geológica pela regularidade dos estratos rítmicos de fo-



lhelhos e calcários. São, como já referimos, decimétricos, regulares, raramente inferiores a 10 cm e raramente superiores a 30 cm. A constância na espessura de um único estrato é fato notável. Os casos de lenticularidade ou de adelgaçamento das camadas são exceções, e quando presentes, são mais comumente devidos ao fenômeno da compactação irregular das camadas. A separação

entre elas é nítida. Ocasionalmente o plano de separação é ligeiramente ondulado, ou corrugado, talvez pelo mesmo fenômeno. No 3.º capítulo já descrevemos os pormenores da estratificação do banco basal, bem como, dos estratos rítmicos. No último capítulo serão tecidas algumas considerações a respeito das prováveis causas desta estratificação tão nítida e que tanta beleza empresta à Formação Irati.

## VI — FEIÇÕES MICROSCÓPICAS DOS SEDIMENTOS DO IRATI

Pouco temos a discorrer neste capítulo, uma vez que fomos obrigados muitas vezes a complementar a descrição macroscópica com a microscópica. Procuraremos então, sintetizar as nossas observações referentes às texturas mais comumente encontradas, bem como, à composição do resíduo insolúvel dos calcários.

### 1. Rochas calcárias

#### a — Descrição da textura mais frequente: microgranoblástica em mosaico

Tanto os calcários do banco como os encontrados nas camadas rítmicas, apresentam-se de modo muito uniforme quanto à textura. Longe da influência térmica dos diabásios predominam largamente os calcários finamente granulados em mosaico, estando os cristais de calcita ou dolomita, ou ambos, intimamente justapostos e sem a menor orientação cristalina, o que se acha ilustrado na fig. 6-1 A. A granulação média ora varia de entre 3 e 10 microns (com um valor médio de 5 microns) ora de 6 a 20 microns (com uma média de 15 microns). Muito embora predominem os tipos mais magnesianos, são raros os casos de idiomorfismo entre os cristais que compõem as rochas. Quando é o caso, a granulação é ligeiramente aumentada, e os cristais idiomorfos de forma losangular chegam a medir de 0,1 a 0,15 mm de tamanho. As secções delgadas mostram claramente a abundância de espaços vazios nestas camadas mais dolomitizadas, o que já foi discutido anteriormente e que se acha ilustrado na fig. 6-1 B.

#### b — Influência do betume

Outro fator que parece intervir na granulação das rochas calcárias (são poucas as nossas observações) vem a ser a presença de material betuminoso, cuja origem é singenética. As camadas de coloração castanha (coloração esta dada pelo betume irregularmente distribuído em manchas ao longo das camadas) possuem uma granulação média de 10 a 15 microns, enquanto que as claras, sem betume, possuem granulação média de 5 microns. É provável que a matéria orgânica tenha fluidificado a lama calcária, facilitando o crescimento dos cristais de calcita.

#### c — Calcarenitos em marcas onduladas

A fig. 6-1 C esquematiza outro tipo de textura que por vezes ocorre nos calcários estudados. Não é comum este tipo, muito embora seja encontrado em mais de um nível. No presente caso trata-se da secção delgada da crista de uma marca ondulada de uma das pedreiras da estrada Piracicaba-Tietê (pedreira Amaral-Machado, a quase 3 km a SW da pedreira do Sr. Maluf). A textura clástica restringe-se a umas poucas lâminas milimétricas, separadas das camadas microcristalinas por superfície de suturas. Muito embora trate-se de uma marca ondulada não percebemos qualquer vestígio de uma eventual textura palimpséstica que identificasse um calcarenito. É provável que a dissolução (comprovada pelas várias suturas existentes) tenha diminuído a espessura original das camadas clásticas, pois, num segundo corte de outra marca ondu-



da do bairro Conceição (a 10 km a SW do Sr. Maluf), a camada de calcarenito varia de 0,5 a 1,5 cm de espessura. Em ambos os casos constitui-se de esférulas de 0,1 a 0,2 mm de tamanho, às vezes bem achatadas segundo o plano da estratificação. Internamente mostram em alguns casos a disposição concêntrica característica dos oólitos.

Os cristais são pequenínimos, de poucos microns de tamanho e caótica-mente distribuídos. Entre os corpos esféricos, oolíticos ou não, a cristalinidade do calcário é maior, de 20 a 40 microns, contrastando com a pequena cristalinidade do interior dos oólitos ou pseudo-oólitos. Fato idêntico observamos em calcários oolíticos silicificados do sul de Goiás, nas proximidades de Montividiu, bem como, numa amostra de sondagem de Jataí, sul de Goiás (profundidade de 303 metros). Estes calcários o-

olíticos são considerados como pertencentes à base do Estrada Nova.

Junto à zona dos calcarenitos, ou mesmo, junto às eventuais lâminas mais argilosas dentro dos calcários, costuma aumentar o teor de quartzo clástico, como era de se esperar. Raramente tais grãos clásticos atingem o tamanho da areia fina. São mais comumente de 40 a 60 microns de diâmetro. É freqüente o aspecto corroído dos grãos de quartzo, fato que vem comprovar o meio alcalino favorável à dissolução da sílica. A fig. 6-1 D ilustra a associação de prováveis oólitos, agora silicificados, junto a grãos de quartzo anormalmente grandes, de 0,1 a quase 0,2 mm de tamanho, muitos raros no Irati. Segundo Plumley et al. (1962) predominam largamente as rochas calcárias típicas de ambiente de baixo grau de energia, sendo conservada uma lama de granulação finíssima, muito provavelmente de origem química ou bioquímica ou ambas juntas.

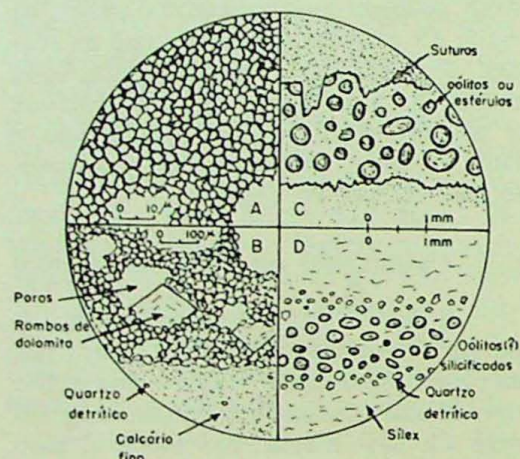


Fig. 6-1. — A — Textura microgranoblástica em mosaico do calcário claro, mal estratificado e homogêneo, do banco do Arraial São Bento. Trata-se do tipo mais freqüente de textura.

B — Calcário dolomítico recristalizado junto ao calcário de granulação fina, igualmente dolomítico, mas sem recristalização. Acha-se separados pelo plano da estratificação. (Pedreira do Sr. Maluf).

C — Secção do topo de uma marca ondulada. Alternam-se lâminas de calcarenito (parcialmente dissolvidas) com o calcário microgranular, separados pelas suturas. (Pedreira Amaral-Machado).

D — Silix de origem metassomática com oólitos (ou pseudo oólitos) agora silicificados junto a grãos detríticos de quartzo de dimensões anormalmente grandes. (Assistência, Rio Claro).

#### d — Textura da brecha intraformacional

A textura da brecha intraformacional parece ser mais ou menos constante, sendo observada em mais de uma ocorrência. A matriz costuma possuir uma granulação muito fina, ao redor de 3 microns, ao passo que os fragmentos possuem granulação maior, com um tamanho médio de cerca de 10 microns. Fato digno de nota é o da relativa freqüência de cristais maiores, recristalizados, límpidos, medindo de 100 a 300 microns, dentro dos fragmentos da brecha, recristalização esta, não observada na matriz. Uma explicação plausível é que tal recristalização tenha sido singênica e tenha tornado a camada calcária prematuramente quebradiça e endurecida, ao contrário das demais camadas, que tudo indica, por muito tempo conservaram a sua plasticidade, o que já foi discutido. Não acreditamos ser fácil a explicação do porquê deste fenômeno, pois, a obliteração pela recristalização apaga as estruturas e texturas primárias oriundas das condições de precipitação das rochas calcárias.



Outros calcários pertencentes à Formação Irati de outros estados nada apresentaram de particular quanto à sua textura e quanto à natureza do resíduo insolúvel.

#### e — *Considerações sobre a diagênese*

Do que acabamos de expor concluímos que deve ser grande o tempo que leva para completar-se o processo diagenético que transforma tanto a lama calcária como a argilosa em rocha dura. Segundo dados experimentais de Weller (1959) a lama calcária custa mais a consolidar-se do que a argilosa. Considera ainda este autor que a consolidação dos calcários é fenômeno ainda desconhecido, mormente pelo fato de não haver sinais de esmagamento nos fósseis apesar da porosidade inicial ter sido grande. Não se sabe de onde teria provindo o calcário que preencheu por igual todos os poros, sem que se verificasse a contração da lama. Segundo Chilingar et al. (1967) existem cerca de 30 fatores que podem interferir na diagênese das rochas calcárias, ora de natureza físico-química, bioquímica, climática, tectônica, etc., o que mostra a complexidade do fenômeno.

Já foi tentado o endurecimento da lama calcária recente das Bahamas, sob diversas condições de temperatura, pressão, tempo, granulação do material, e outros fatores ainda. Os resultados ainda são incertos, pairando muitas dúvidas sobre este difícil problema. Tais estudos acham-se transcritos no trabalho de Cloud (1962), sendo executados por Robertson, E. C., Sykes, L. R. e por Newell, M.

Quanto ao problema do tamanho dos cristais antes e depois da diagênese, citaremos a opinião de Bathurst (1959), que dá ênfase ao fato de que o tamanho microscópico dos cristais que hoje formam o mosaico das rochas consolidadas, corresponde ao tamanho inicial quando o material ainda era uma lama calcária. Dado o aumento em 8% em volume com a transformação aragonita — calcita, aumento esse nem emprentado, não se pode saber se lama ori-

ginal teria sido calcítica ou aragonítica. No entanto, segundo Pettijhon (1957, pag. 401), há quem acredite que o giz cretáceo não se litificou por causa da precipitação original ter sido de lama calcítica, ao invés de aragonítica.

Nem sempre predominam nas lamas calcárias recentes as agulhas de um a cinco microns de tamanho, como se dá na fração argilosa da lama calcária das Bahamas (Cloud, 1962). Segundo estudos de Matthews (1966) a lama existente na costa sul das Honduras Britânicas é formada essencialmente de calcita finíssima proveniente da abrasão de algas calcárias, corais e outros organismos, sendo muito rara a presença de agulhas de aragonita, mineral predominante nas Bahamas (Cloud, 1962).

Segundo as nossas observações ao microscópio petrográfico acreditamos na alta predominância da lama calcária de origem química e granulação entre 5 a 10 microns. Enquanto que nas Bahamas a lama calcária perfaz somente 40%, sendo a restante areia e silte calcários (Cloud, 1962), no caso do Irati uma porcentagem muito pequena constituía-se de pseudo-oolitos, ocasionais oolitos e restos de carapaças de crustáceos, por vezes abundantes, mas em níveis delgados e ocasionais.

## 2. Folhelhos

### a — *Composição mineralógica*

Dada a alta friabilidade dos folhelhos existentes na área estudada com mais pormenores, não nos foi possível a obtenção de secções delgadas, motivo pelo qual executamos cortes de superfícies pequenas, mas que são suficientes para que se tenha idéia da textura do material pelítico, que se acha sempre associado a silte médio e grosso, quartzoso e feldspático. Não é raro encontrar-se inclusive plagioclásios absolutamente frescos, o que vem sugerir a condição de baixa temperatura para a sua conservação. Os minerais micáceos (muscovita e alguma biotita) são abundantes, sempre orientados de acordo com a estratificação.



Os minerais argilosos apresentam-se com dimensões da ordem de grandeza de poucos microns a fração de micron, sendo comumente orientados como são os micáceos. Às vezes percebem-se lâminas de cerca de 5 microns de espessura de material mais escuro, muito provavelmente de natureza orgânica, que em conjunto, dá a cor preta aos folhelhos. O índice de refração do material argiloso é inferior a 1,54.

Dada a associação destes folhelhos montmorilloníticos com dolomitos ou calcários dolomíticos, julgamos oportuna a citação de Fairbridge (1963, pag. 457), que se refere a existência de relação entre dolomitos e montmorillonita altamente magnésiana, o que foi observado em calcários permianos de Kansas, E. U. A. Não encontramos na literatura o porquê desta associação. Julgamos provável ter havido o fenômeno da troca de bases para que tenha aumentado o teor de magnésio desta montmorillonita.

#### b — *Textura*

Uma das amostras de folhelho pôde ser laminada, graças à sua maior coerência. Foi coletada na rodovia estadual entre Itapetininga e Angatuba, km 195. O folhelho é pirobetuminoso, bem preto, micáceo e o caráter folheado é menos evidente, motivo pelo qual não houve dificuldade em ser laminado. Apresenta lâminas de 0,1 a 1 mm de espessura constituídas de grãos de quartzo e alguns feldspatos, grãos estes de 80 a 100 microns de tamanho, ou seja, da classe da areia fina, o que é raro no Irati. Comumente apresentam-se sob a forma de lentes, indicando a existência de zonas de correnteza mais veloz, que esculpiram pequenos canais na lama argilo-siltosa e depositaram os grãos arenosos. Tanto as citadas lâminas como estas lentes acham-se irregularmente dispersas, afastadas de alguns milímetros e noutras partes, de 1 a 2 centímetros. E' nítida a orientação dos minerais micáceos e argilosos segundo a estratificação, e ainda, a presença de uma substância intersticial de cor castanha, isotropa ou muito pouco bi-refringente, tal-

vez de natureza sapropélica, e finalmente a pirita, sob a forma de minúsculos grãos ou em agregados maiores, lenticulares, chegando a perfazer cerca de 5 a 10% do total da amostra. Dadas as condições de ocorrência, tudo indica tratar-se de pirita singenética, originada certamente da reação do  $H_2S$  próprio dos sapropelitos sobre os hidróxidos de ferro que costumam acompanhar o material argiloso.

#### c — *Distribuição granulométrica*

A presença de grãos siltosos e areia fina (esta é bem mais rara) não se restringe a este folhelho que acabamos de descrever. Outros, de outras procedências possuem igualmente a fração clássica siltosa grosseira, em maior ou menor porcentagem, porém nunca superior a 50%. Como é difícil a desagregação completa dos folhelhos, não podemos precisar o teor da fração argilosa. Quanto aos minerais argilosos, medimos sua porcentagem por meio da solubilização pelo ácido sulfúrico a quente. Numa das amostras de Ipeúna, SP, determinamos o valor de 30% em relação ao total da rocha.

#### d — *Considerações sobre a laminação*

Quanto ao problema da laminação, não encontramos nenhum aspecto que indicasse a existência de fatores secundários, pós-sedimentação, de natureza diagenética, o que é citado por Rubey (1930), que estudou com pormenores o problema da laminação de folhelhos. Entre as demais causas enumeradas por este estudioso, e que se enquadram nos nossos estudos citaremos a granulação e variação na quantidade de matéria orgânica, segundo as nossas observações ao microscópio. Sobre o problema de ser a laminação primária ou secundária, lembramos a estrutura ilustrada na fig. 5-6, onde as lâminas do folhelho acham-se encurvadas obedecendo à penetração da lama calcária. Tal aspecto não deixa dúvida de que a lama argilosa já era laminada antes da diagênese dos calcários, sendo portanto uma laminação primária e não diagenética. "Mu-



tatis mutandis", o mesmo raciocínio pode ser feito em relação às deformações por compactação estudadas por Landin (1967), já citadas anteriormente.

Passemos agora à descrição das já citadas lâminas pretas de material argiloso folheado microscopicamente, encontradas nos calcários do banco (figs. 3-3 e 5-7). Em secção delgada apresentam-se como um conjunto de lâminas corrugadas, sinuosas, irregulares, aparentemente anastomosadas, de 5 a 10 microns de espessura. Entre estas delgadas lâminas perdura o calcário com a mesma textura da parte isenta das citadas lâminas. Junto à trama irregular das lâminas escuras aumenta o teor de grãos de quartzo, cujo tamanho oscila entre 20 e 40 microns. Tudo indica a deposição da lama calcária mais a mistura de matéria orgânica, silte e material argiloso, em disposição laminar certamente ocasionada por correntezas irregulares e extremamente brandas.

### 3. *Sílex*

A textura do sílex, em muitos casos observados obedece à dos calcários mas nem sempre. O sílex negro, que ocorre comumente sob a forma de camadas contínuas de até um palmo de espessura, mostra-se heterogêneo na sua textura. Em certas partes da lâmina a textura é muito fina, com granulação ao redor de 5 microns, ao lado de zonas mais grosseiras de granulação média de 50 microns. Estas zonas acham-se dispostas de modo irregular, com interpenetrações mútuas. Localmente ocorrem zonas esferulíticas de 0,1 mm como tamanho médio. Nestes esferulitos a calcedônia dispõe-se em fibras radiais, ora com a orientação óptica da calcedônia mesmo, ora o inverso, ou seja, o da quartzina, tal como descreve Leinz (1938). Ambas as formas se encontram lado a lado, o que indica que é realmente impossível saber-se a causa destas diferentes orientações, como já ponderou o citado estudioso. Contudo, de um modo geral, segundo as nossas observações, predominam largamente as de alongação negativa, ou seja, com o menor índice de refração coincidindo com

a maior direção da fibra. O tipo quartzina foi também encontrado em outras amostras, mas muito raramente. Quanto ao sílex de origem singenética preferimos descrevê-lo à parte o que será feito no próximo capítulo.

### 4. *Resíduo insolúvel ao ácido clorídrico*

#### a — *Finalidades deste estudo*

Tivemos como principal finalidade do estudo do resíduo insolúvel dos calcários a verificação da natureza dos componentes clásticos não carbonáticos (que podem dizer das condições de sedimentação), bem como, a procura de eventuais fósseis. Foram determinadas as porcentagens entre os constituintes do resíduo, bem como, as porcentagens em relação à rocha total. Antes de iniciarmos este estudo, tivemos em mente o estudo da suposta variação do material argiloso, e a sua eventual comparação com a argila dos folhelhos da zona rítmica. Contudo, tal não pôde ser executado, dada a ausência quase generalizada de argila junto ao resíduo insolúvel, tanto dos calcários do banco, como dos da zona rítmica.

#### b — *Porcentagem*

As porcentagens de resíduo variam desde 2% até 25%. Muito raramente excede de 30%. Se construíssemos o histograma das porcentagens observaríamos a moda na classe correspondente a 9 a 10%. Seria, no entretanto, uma moda destituída de interesse, pois, pouco se destaca das demais classes.

#### c — *Descrição do resíduo mais frequente*

A maior parte do resíduo é formada por calcedônia, fato que observamos desde o Rio Grande do Sul até Mato Grosso (em amostras de sondagem), quer para os calcários que afloram, quer para os profundos, testemunhados pela Petrobrás. O teor varia de modo irregular, inclusive dentro da mesma amostra. Os práticos que se ocupam do fa-



brico da cal chegam a reconhecer pelo aspecto macroscópico certos calcários que se tornam "empedrados" pelo aquecimento e não produzem a cal. Procuramos a causa deste fenômeno, que nada mais é do que a porcentagem anormalmente elevada de calcedônia, que se funde, vitrifica e impede a transformação do carbonato em óxido. Muito interessante é o fato de certos fragmentos de calcário manterem a sua forma e até mesmo a estratificação após o ataque com ácido clorídrico. Examinando-se a natureza destes fragmentos sob a lupa, nota-se que se constituem de um verdadeiro esqueleto de calcedônia, que se coalesce e mantém os pigmentos carbonosos responsáveis pela estratificação mesmo depois da dissolução dos carbonatos. Em secção delgada não se percebe a calcedônia, que é mascarada pela calcita ou dolomita. A fim de observar a sua textura, conseguimos retirar cuidadosamente uma parte da lamínula, dissolver o calcário e cobrir novamente sem destruir a trama de calcedônia, que perdurou após o ataque. Examinada sob luz refletida mostrou-se de coloração leitosa. Percebe-se uma ligeira tendência à disposição paralela à estratificação, tudo indicando que a sílica distribuiu-se e precipitou-se obedecendo ao arranjo das lâminas calcárias já depositadas.

Os fragmentos de calcedônia variam de 20 a 30 microns de tamanho. Em alguns calcários o resíduo é mais grosseiro, de cerca de 50 microns de diâmetro. O índice de refração é ao redor de 1,52. Ocasionalmente atinge valores anormalmente baixos, de até 1,48, cuja causa não investigamos. A anisotropia pode ser nítida a quase imperceptível. No entanto, o diagrama obtido pelo raio X não revelou qualquer vestígio de substâncias amorfas, de onde se conclui da inexistência da opala. Na realidade, seria de se estranhar se este mineral fosse encontrado, dada a tendência para a sua recristalização nos sedimentos mais antigos.

#### d — *Descrição dos clásticos*

Além da calcedônia os resíduos insolúveis contêm ainda certa porcentagem

de material siltoso. Em raros casos o resíduo clástico é da classe da areia. Quando é o caso, os grãos geralmente não ultrapassam de 0,1 mm. Tanto o silte como a eventual areia fina representam a fração clástica das rochas calcárias. Medimos a sua porcentagem em relação à calcedônia pelo método da comparação visual, usando gráficos previamente construídos. Verificamos que a porcentagem de clásticos no resíduo insolúvel é muito variável, sendo a variação muito irregular, fato comprovado pelo exame das secções delgadas. Nestas observa-se às vezes a presença de leitos submilimétricos onde predomina o silte clástico quartzoso, enquanto que em outras, que representam a maioria, o silte é distribuído de maneira caótica, ora quase ausente, ora em quantidade um pouco maior. A porcentagem de clásticos junto ao resíduo insolúvel costuma variar de zero a 30%, sendo o resto a calcedônia. Considerando-se a rocha toda, o teor de clásticos raramente chega a 5%.

Quanto à composição mineralógica dos grãos clásticos, predomina o quartzo, como era de se esperar. O feldspato acha-se presente em quase todas as amostras, e muitas vezes quase tão abundante como o quartzo. Entre os feldspatos observamos com certa frequência plagioclásios absolutamente frescos. E' provável que tenham provindo em parte dos sedimentos do Tubarão, que certamente formavam as margens do antigo lago. Lembramos de que até Jundiá ainda existem restos de cobertura glacial, sugerindo que as rochas do embasamento pré-cambriano deveriam situar-se distanciadas das águas onde se depositavam os sedimentos do Irati. Não se pode afirmar de quanto seria a contribuição de clásticos provindos do pré cambriano, pela falta de minerais guias eventualmente existentes.

Outro mineral comum é a muscovita, nem sempre fácil de ser percebida por causa da pequena dimensão. Entre os minerais pesados mais frequentes citamos o zircão, a turmalina e a granada. Ocasionalmente encontramos a apatita e o rutilo. Lembramos



que a granada é um dos minerais mais comuns do Tubarão, não somente nos tilitos, o que já foi verificado por Leinz (1937 b) e por Amaral (1965), como também em vários outros sedimentos pertencentes à citada formação permocarbonífera, o que tivemos por diversas vezes a oportunidade de verificar. Trata-se de outro dado que indica que o Irati não transgrediu por sobre o Tubarão, mas sim, sedimentou-se sobre os seus sedimentos, como já referimos poucas linhas atrás.

#### e — Componentes orgânicos

São encontrados em relativa abundância os esporos de gimnospermas, já

mencionados. Ocorrem também ocasionais fragmentos de vegetais. Após o aquecimento ao rubro persistem, sendo provável estarem silicificados. Parecem ser mais abundantes nas camadas de coloração acastanhada, que por sua vez são as mais ricas em material betuminoso, como já referimos. De um modo geral, praticamente todos os resíduos dos calcários de Laranjal a Piracicaba (quando não marmorizados) apresentam material betuminoso (ao redor de 2%) e pirobetuminoso (menos de 1%, que quando aquecidos, exalam o odor típico de asfalto queimado.

### VII — O PROBLEMA DO SÍLEX

#### 1. Estudos anteriores

Este problema, cuja importância não se restringe à Formação Irati, mas a todo o Gondwana (desde o Grupo Tubarão ao topo do Passa Dois), já foi tratado por diversos estudiosos. De todos os trabalhos e referências sobre a silificação destaca-se o de Leinz (1938) que estuda com pormenores a petrografia dos sílex de diversas formações gondwânicas, inclusive os do Irati. Segundo este estudioso a origem do sílex reside nas emanações silicosas finais do magma basáltico. Tal interpretação fundamenta-se na abundância de intrusões de diabásio nos sedimentos gondwânicos na parte norte da bacia do Paraná. Mais recentemente, Fúlvaro (1967) aborda o presente tema com muita propriedade, descrevendo com minúcias as ocorrências de sílex do Grupo Passa Dois, tecendo considerações muito propositadas sobre a sua gênese. Antes destes estudiosos, vários outros pesquisadores opinaram sobre a provável origem do sílex, sem contudo, terem se baseado em estudos petrográficos. A título de completarmos o histórico das idéias sobre o citado problema citaremos Oppenheim (1934 a), que presume "que a fonte de soluções silicosas tinha relação com o mar triássico, pelo qual foram depositadas as camadas marinhas do topo da Estrada Nova e

base do Rio do Rasto". Segundo o mesmo autor a fonte primária seria o magma basáltico. Admite assim a origem singenética para o sílex descrito, ao passo que para o sílex do permiano inferior (certamente referia-se ao Irati), a origem admitida é epigenética, "considerando o carácter estrutural deste sistema de sedimentos". Por sua vez, Moraes Rego (1930) explica a formação do sílex pelo "contacto de magmas em via de consolidação com a água do mar; essas condições provocam reações geradoras da sílica gelatinosa, que precipitou". Esta explicação diz respeito ao sílex do Estrada Nova.

Já tivemos o ensejo de focalizar o problema da dissolução, origem e precipitação da sílica sob várias formas cristalinas (Amaral, 1961), ocasião em que discorremos sobre as dificuldades e diversidade de opiniões sobre este tema, de alta importância científica e econômica. Não temos a pretensão de dar a resposta definitiva ao citado problema para o caso do Irati, bem mais complexo do que os casos anteriores já estudados. Limitar-nos-emos a dar a descrição do que foi observado, comparar com as descrições de outros autores e concluir somente o que está ao nosso alcance. Assim sendo, passemos à descrição das maneiras pelas quais ocorre o sílex e da sua distribuição em todo o Irati.



## 2. Distribuição geográfica do sílex do Irati

O sílex, sob a forma de massas visíveis macroscopicamente, ocorre desde o Estado de Santa Catarina até aos afloramentos de Goiás. Tivemos o ensejo de observá-lo em diversos testemunhos de sondagem, bem como, lemos sobre a sua presença em praticamente todos os registros litológicos das perfurações da Petrobrás executadas na bacia do Paraná, que se acham demarcados no mapa da fig. 1. Merece menção o poço de Carlota Prenz, Angatuba, SP, onde observamos o sílex laminado (considerado por nós como primário) em uma das amostras e lemos sobre a sua existência em diversos intervalos descritos no Relatório de Sayão Lobato, que descreve em muitos testemunhos 10 até 30% de sílex, ora preto ora cor de fígado. Não observamos o sílex sob a forma macroscópica no Irati do Rio Grande do Sul, mas ocorre a calcadônia, idêntica à de São Paulo, no resíduo insolúvel de alguns dos calcários estudados (os mesmos já citados, onde ocorrem os esporos de gimnospermas). Mais ao sul do Estado de São Paulo torna-se mais raro o sílex, comparado ao Irati dos arredores de Laranjal e Piracicaba. Parece haver maior quantidade de sílex onde o Irati se apresenta com os estratos rítmicos de folhelho e calcário. Muito embora seja mais raro nos afloramentos do Paraná, mormente os da região sul, verificamos também a sua presença em algumas perfurações da Petrobrás que atravessaram o Irati no Estado do Paraná.

## 3. Distribuição do sílex dentro das camadas do Irati

Iniciando com os folhelhos pirobetuminosos situados poucos metros abaixo do banco, o que foi observado na pedreira do Sr. Maluf, notamos a ocorrência de sílex sob a forma de nódulos esféricos e sub-esféricos, isolados, desde 0,5 cm a 3 cm de tamanho, irregularmente esparsos no folhelho, perfazendo ao redor de 5% da rocha. Acima situam-se os siltitos cinza azulados (a chamada "lage azul", rica em espículas

de esponja", sem o menor vestígio de sílex. Não fôra o folhelho pirobetuminoso preto de baixo, teríamos considerado esta camada como sendo do topo do Tubarão. Acima situa-se a chamada "lage fria", já citada, e acima desta o banco explorável. Medindo em diversas secções a porcentagem de sílex, que perfaz 3%. Lembramos que a porcentagem total de sílica é bem maior, pois, muito comumente é elevado o teor de calcadônia no resíduo insolúvel destes calcários.

Mais acima, nas camadas alternadas de folhelho e calcário, aumenta a quantidade de sílex, que passa a perfazer 25%, cifra que talvez possa ser aumentada, graças à presença de pequenos nódulos pretos de sílex geralmente abundantes nas camadas de folhelhos da mesma cor, o que dificulta a observação. Mais comumente o sílex se concentra nas partes inferiores das camadas rítmicas, sobretudo nas proximidades do banco. Faz exceção uma pedreira situada próxima a Limeira, onde o sílex, sob a forma de nódulos, é mais abundante nas partes mais altas das camadas rítmicas.

## 4. Modos de ocorrência

O sílex ocorre de cinco maneiras bem distintas, que provavelmente correspondem a diferentes processos genéticos, como discutiremos adiante.

### a — Camadas

Mais comumente ocorre sob a forma de camadas de vários centímetros a um palmo ou mais de espessura, contínuas ou não, substituindo total ou parcialmente os calcários da zona rítmica. Parecem predominar nas partes inferiores, mais próximas ao banco calcário. Estes leitos de sílex são relativamente raros nas camadas rítmicas afetadas pelo metamorfismo optálico produzido pelo diabásio. Nestas ocorrências predomina o sílex sob a forma de delgados e descontínuos leitos de 3 a 5 mm de espessura, que consideramos de origem primária por analogia a outras ocorrências que serão descritas adiante. O sílex que ocorre sob a forma de leitos é



mais comumente preto, podendo às vezes ser castanho, cinzento, ou ligeiramente creme. Não costuma exibir sinais visíveis de estrutura, pelo fato de substituir calcários muito homogêneos, maciços, como são os leitos das camadas rítmicas. A cor preta perdura após o aquecimento ao rubro. O material pulverizado torna-se cinzento escuro, cor que fica mais escura após o aquecimento com o maçarico. Muito provavelmente trata-se de coloração por estrutura e não por pigmentação, pois, a matéria orgânica certamente seria destruída. O pó, em tubo fechado, desprende água após crepitar intensamente, como era de se esperar. Outras vezes é bem nítida a estrutura original conservada nos bancos de sílex, podendo ocorrer cores diferentes na mesma amostra. Não é rara a ocorrência de delgados leitos de sílex preto singenético dentro do sílex amarelado de origem metassomática posterior.

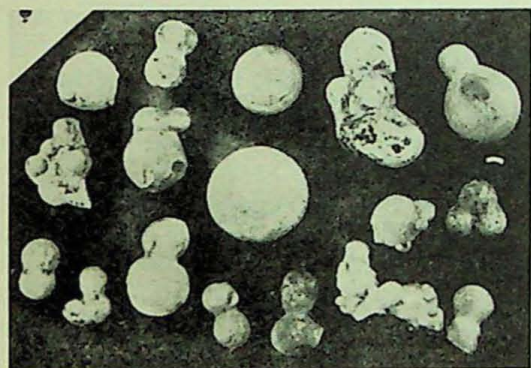


Fig. 7-1. — As famosas bonecas de sílex coletadas no solo do Irati da região situada entre Laranjal e Piracicaba. Note-se que em alguns dos nódulos percebe-se a estratificação, enquanto que outros mostram-se homogêneos (metade do tamanho natural).

#### b — Nódulos

Uma segunda maneira pela qual ocorre o sílex consiste nos nódulos esféricos, muito comumente coalescidos em formas bizarras, constituindo as famosas bonecas do Irati, que muito comumente se concentram no solo avermelhado, e que tão bem se prestam para diferenciá-lo da terra roxa (fig. 7-1). São mais comumente achatados segundo o

plano da estratificação. Predominam os nódulos centimétricos, havendo também os de poucos milímetros até um decímetro ou mais de tamanho. Excepcionalmente atingem dimensões maiores, como os de Santa Catarina, já descritos anteriormente. Ocorrem tanto nos calcários como no folhelho da zona rítmica, onde são mais abundantes. Às vezes os nódulos se distribuem de preferência num determinado leito de calcário, aparentemente igual aos leitos vizinhos, e outras vezes distribuem-se de maneira caótica. Quando ocorrem nos calcários costumam exibir a estrutura original, o mesmo não se dando com os nódulos existentes no folhelho, que se amolda ao redor dos nódulos de sílex. Numa das pedreiras de Ipeúna o folhelho da zona rítmica chega a ser todo corrugado, tal a quantidade de nódulos. Contudo, não há indícios diretos se o folhelho se acomodou ou se foi forçado pelo sílex durante o crescimento dos nódulos. No calcário observam-se os dois casos. Ora o nódulo deforma a estratificação ora não a perturba. Mesmo perturbando a estratificação podem exibir em seu interior a estrutura do calcário que foi substituído.

Lembramos aqui dos nódulos pretos já mencionados, existentes no folhelho pirobetuminoso situado abaixo da "lage azul", infra banco (pedreira do Sr. Ma'uf). A abundância de esporos no interior dos nódulos não deixa dúvida da sua origem singenética. Fato interessante é o da concentração de pirita finamente disseminada no sílex quando em contato com o folhelho. Tem-se a impressão de que a pirita penetrou no gel silicoso antes do seu endurecimento. No interior destes nódulos, ao mesmo tempo que no interior do folhelho aderido a ele, encontram-se fragmentos esparsos de um material absolutamente isótropo. Acreditamos na reminiscência da opala que não sofreu a recristalização, apesar da antiguidade destes sedimentos em vias de estudos. A granulação deste tipo de sílex (foram observadas outras amostras de outras localidades) é de 30 a 60 microns, como média.



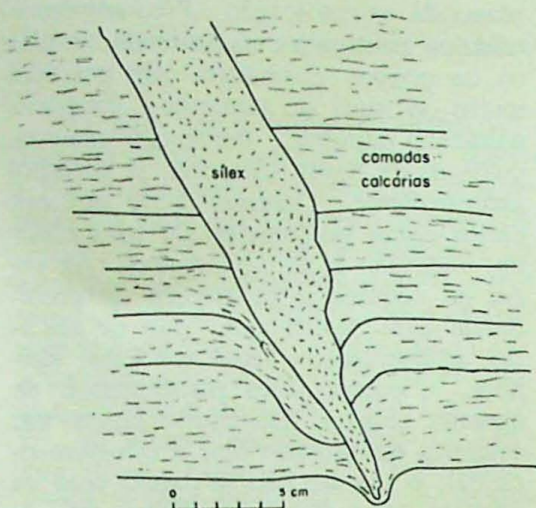


Fig. 7-2. — Uma das maneiras pela qual o sílex se relaciona ao calcário, sendo nítida a delimitação entre ambos. É provável que o arqueamento das lâminas calcárias decorra da sua plasticidade. Neste caso o sílex seria singenético, formado antes da diagênese. (Bairrinho, Piracicaba).

#### c — Veios

Não são raros os veios de sílex atravessando o banco calcário. São irregulares, e às vezes a forma é lenticular. Nunca os observamos na zona rítmica, menos sujeita ao processo de fissuração. Os citados veios são quase sempre inclinados, de espessura variável entre poucos centímetros a um palmo, ou mais, e comumente se adelgaçam e desaparecem. Este adelgaçamento às vezes se dá para cima, outras vezes para baixo, não informando, portanto, sobre o sentido do movimento das soluções silicosas, se foram ascendentes ou descendentes. Um destes casos extremamente curioso observamos numa das pedreiras situadas junto à rodovia Piracicaba — Tietê (pedreira Amaral-Machado). Trata-se de uma cunha oblíqua de 5 cm de largura por 30 a 40 cm de comprimento, de sílex completamente destituído de estrutura, e que, ao cortar os estratos de calcário determinou pronunciado encurvamento dos estratos sendo que um deles se amolda à extremidade da cunha, como se vê na fig. 7-2. Não sabemos explicar este curioso aspecto. Outras vezes o calcário acha-se substituído pelo sílex nas proximidades do veio, até 10 a 20 cm de dis-

tância das paredes (fig. 7-3). Distingue-se bem o sílex que preencheu o vazio, do sílex que substituiu o calcário logo ao lado. Este tipo é sempre cinzento ou acastanhado. Nunca vimos o sílex preto nestes veios. Num único caso, este tipo de ocorrência mostrou-se de grande tamanho, de mais de 2 metros na horizontal por quase um metro na vertical, com contornos irregulares junto ao calcário do banco da pedreira do Sr. Maluf. Não temos dúvida de que este sílex substituiu o calcário do banco, mas não sabemos em que época, ou melhor, em que fase do processo relacionado à silicificação.

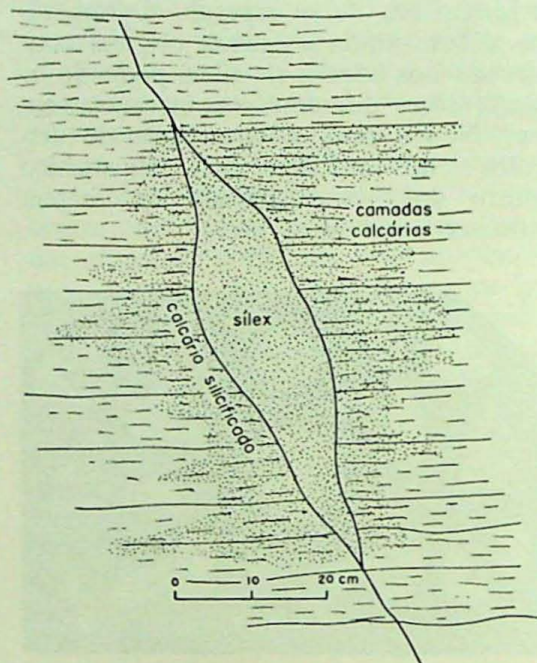


Fig. 7-3. — Neste segundo caso o sílex (pontilhado) substitui o calcário adjacente ao veio lenticular. Tanto na fig. 7-2 como no presente caso o sílex é destituído de estrutura. (6,5 km a NNE de Laranjal).

#### b — Blocos grandes e informes

Um quarto tipo, diferente dos demais, foi observado junto às camadas totalmente decompostas, mas que ainda mantêm a estrutura original. Trata-se de grandes blocos de forma irregular, de pouco mais de 0,5 m de tamanho, mais comumente acastanhados. Entre outras ocorrências, citamos a de Taquaral, junto à via férrea a caminho de Piracicaba. Como nunca vimos estes blocos nas inúmeras pedreiras estuda-



das, interpretamos sua origem como sendo relacionada ao intemperismo, que teria mobilizado a calcedônia finamente disseminada pelos calcários da Formação Irati.

#### e — Lâminas de origem singenética

Deixamos para o fim a forma que consideramos a mais importante, pelo fato de não haver dúvida quanto à sua origem primária. Trata-se do sílex finamente laminado, disposto em delgadas e descontínuas lâminas de 1 a 5 mm de espessura, espaçadas de 5 até 20 cm em certas zonas, enquanto que em outras acha-se ausente. Estas lâminas ocorrem tanto no calcário do banco como nos calcários e folhelhos da zona rítmica, sendo descritas na testemunhagem de Lins, SP, onde o Irati ocorre a 1.705 metros de profundidade. Já mencionamos a sua existência nos testemunhos de Angatuba, onde as lâminas de sílex acham-se junto dos folhelhos pretos. Sua coloração é mais ou menos constante, acastanhada ou cinzenta. Em seção delgada este tipo de sílex não exhibe estrutura alguma. Contém raros esporos conservados em seu interior, bem como, impurezas que parecem ser orgânicas. A granulação é fina, da ordem de 20 a 40 microns de tamanho. Muito interessante é o fato dos fragmentos tabulares deste tipo de sílex exibirem sinuosidades minúsculas, ou seja, inter-

penetrações milimétricas com o calcário, sempre na superfície inferior do fragmento. A superfície de cima, no entanto, mostra-se sempre lisa. Em outros casos ambas são lisas, mas nunca vimos o contrário, em algumas dezenas de observações. Trata-se de um dos argumentos que indicam a origem primária deste sílex laminado, o que se acha ilustrado na fig. 7-4. As demais evidências serão discutidas logo adiante.

Antes contudo, de tecermos considerações sobre as origens do sílex, a título de completarmos a sua descrição, citaremos os dados referentes aos voláteis, ou seja, a sua perda ao fogo. É altamente provável que além da água tenha sido também expulsa a matéria orgânica, pois, se compararmos com as porcentagens de água citadas por Pettijohn (1957, pag. 435) as nossas medidas são anormalmente elevadas. Para os nódulos, quer existentes junto ao folhelho preto, quer junto ao calcário do banco, determinamos 1,5% de material volátil. A ausência de qualquer odor sugere ser pequena a quantidade de matéria orgânica. Para o sílex laminado de origem singenética, existente na brecha, determinamos o teor de 1,7%. Para o resíduo insolúvel de calcedônia determinamos 3,0% para um de índice de refração mais próximo ao do quartzo, ao passo que para outra amostra, de índice de refração inferior a 1,54, como é a grande maioria dos casos, o teor em água e outros eventuais voláteis é de 4,3% o que está de pleno acordo com a relação existente entre teor de água e abaixamento do índice de refração.

#### 5. As prováveis origens do sílex

Pettijohn (1957, pag 439), ao tratar deste assunto no seu magnífico tratado sobre rochas sedimentares, usa a expressão "teorias" para o presente problema, o que dá a falsa idéia da existência de mais de uma explicação para o fenômeno. Temos a ousadia de criticar este insigne mestre, pois, na realidade o sílex se forma de muitas maneiras diferentes, fato comprovado pela observação das suas diversas formas de ocorrência, não só no Grupo Passa

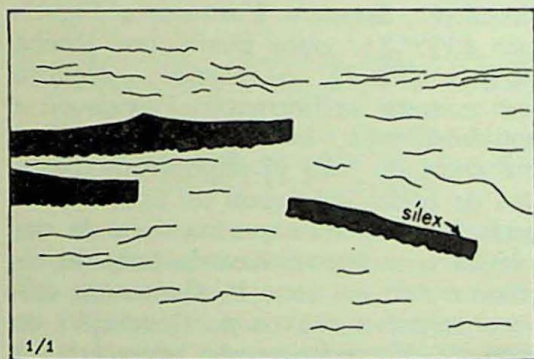


Fig. 7-4. — Fragmentos de sílex singenético dentro do calcário com lâminas de folhelho preto. A fragmentação foi devida à plasticidade da lama calcária. Note-se a superfície inferior irregular e a superior lisa. (Pedreira do Sr. Maluf).



Dois como também no Tubarão. Twe-  
nhofel (1919) apresenta uma síntese das  
teorias, com especial atenção aos núdu-  
los, optando igualmente pela viabilidade  
de várias teorias. O difícil do proble-  
ma, segundo a nossa opinião, consis-  
te em enquadrar este ou aquele tipo de  
sílex nesta ou naquela teoria. Nem  
sempre se pode afirmar em que época  
se deu o processo, se foi durante, logo  
após ou longo tempo após a sedimenta-  
ção. A principal divergência de opiniões  
exposta por Pettijohn reside no proble-  
ma da origem singenética ou epigenéti-  
ca do sílex. No Irati, certamente ocor-  
rem ambos os casos, e às vezes até mes-  
mo na mesma amostra. Tal pudemos  
constatar num espécime coletado numa  
das pedreiras vizinhas à do Sr Maluf.  
Sob a luz ultravioleta, é nítida a fluo-  
rescência acastanhada do sílex interpre-  
tado como singenético. Junto a este o-  
corre um pequeno nódulo centimétrico  
de um sílex mais translúcido, cinzento  
ligeiramente azulado, com uma fluo-  
rescência amarela clara bem contrastante  
com a do sílex inicialmente descrito. Não  
temos dúvida de que ambos foram for-  
mados em tempos diferentes e sob con-  
dições também diferentes.

Entre os diversos trabalhos nos  
quais nos baseamos, dada a semelhança  
dos fatos citados com os observados por  
nós, destacam-se os seguintes: Pittman  
(1959), que estudou os calcários silici-  
ficados cretáceos do Texas. Notamos  
neste trabalho muitas analogias, não so-  
mente quanto às nossas observações, co-  
mo também, quanto aos métodos de es-  
tudo. Tarr (1917), que relacionou as  
condições fisiográficas do ambiente com  
a formação do sílex, bem como, as con-  
dições de salinidade do meio de depo-  
sição. Este autor, contudo, nega a in-  
fluência dos organismos para a forma-  
ção do sílex. Siever e Scott (1959),  
que apresentaram uma síntese concisa  
do problema, sobretudo sob o ponto de  
vista das condições geoquímicas do am-  
biente. Por fim, o trabalho de Sujkowsky  
(1959), de alto interesse para o nosso  
estudo, pelos diversos argumentos apre-  
sentados que se enquadram perfeitamen-  
te no caso do Irati e que vão a favor  
da interpretação que propuzemos para

a gênese de uma das formas do sílex,  
ou seja, a singenética.

Antes de abordarmos o problema  
referente à origem do sílex devemos  
mencionar outro problema afim, que diz  
respeito à fonte primária da qual se ori-  
ginou a sílica. Uma delas, à qual ain-  
da nos referiremos logo adiante, consis-  
te nas espículas silicosas de esponjas.  
Muito embora não tenhamos dúvidas  
quanto à sua importância na formação  
do sílex, julgamos que somente as es-  
ponjas não seriam suficientes para que  
se formassem as centenas de bilhões de  
toneladas de sílex que ocorrem na For-  
mação Irati. Lembramos que predomi-  
naram condições adversas ao desenvol-  
vimento das esponjas, que medram em  
águas oxigenadas e movimentadas. As-  
sim sendo, acreditamos que além das  
espículas, grande parte da sílica deve ter  
provido da transformação da montmo-  
rillonita noutro mineral argiloso com  
teor mais baixo em  $\text{SiO}_2$ , provavelmente  
o caulim. Segundo Siever (1962) es-  
ta transformação libera a sílica, que em  
outras condições poderá formar argilas  
altamente silicosas. No nosso caso, o  
pH mais elevado certamente favoreceu a  
remobilização da sílica, que se teria con-  
centrado em maior quantidade junto às  
camadas rítmicas, onde o sílex perfaz  
mais de 25%, como já referimos. Lem-  
bramos de que ocorre a montmorillo-  
nita entre os minerais argilosos dos fo-  
lhelhos do Irati, junto a folhelhos me-  
nos montmorilloníticos, provavelmente  
caulínicos. Segundo Formoso e Figuei-  
redo (19962), obra citada por Rocha  
Campos (1967), o mineral argiloso  
mais comum da Formação Palermo é a  
montmorillonita, fato que vem indicar  
que antes do Irati já imperavam condi-  
ções de pouca drenagem na área de de-  
gradação, enquanto que na área de de-  
posição o ambiente deveria ter sido al-  
calino e rico em ions bivalentes de cálcio  
e magnésio, ativos na floculação da  
sílica. Tais condições são necessárias à  
formação da montmorillonita, segundo  
Keller (1964). Em que época ter-se-ia  
verificado a transformação da montmo-  
rillonita com a liberação da sílica não  
podemos saber. E' provável que a aci-  
dificação do meio (o que promove a



citada transformação) tenha sido influenciada pela pirita, que produz o ácido sulfúrico, mas não sabemos quando.

#### a — Origem singenética

Já nos referimos a este tipo de sílex. O argumento mais convincente para a origem primária é a sua presença nos fragmentos da brecha intraformacional, limitando-se unicamente ao fragmento sem afetar a matriz, como se vê na fig. 7-5. Não há dúvida algu-

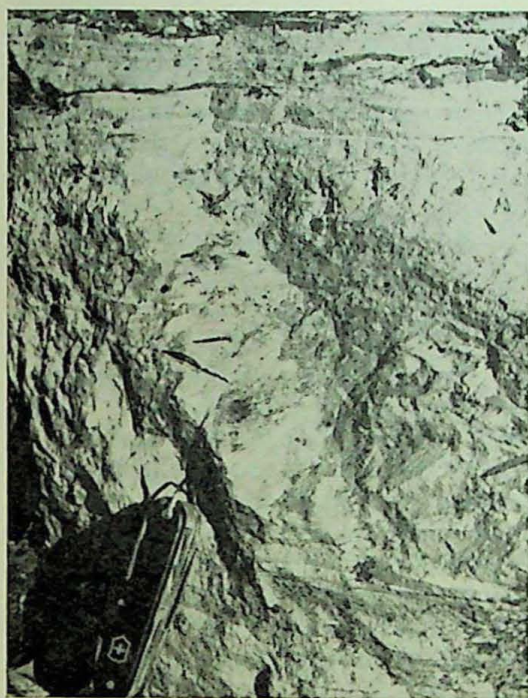


Fig. 7-5. — Sílex singenético (dois fragmentos alongados, pretos, logo acima do canivete) da brecha do banco do Sr. Maluf. Note-se que o sílex se restringe ao fragmento da brecha, o que vem comprovar a sua origem primária, anterior à fragmentação.

ma de que a camada sofreu o fenômeno da silicificação antes de ser rompida. Até agora referimo-nos ao fator relativo à época em que se deu o fenômeno. Em base das observações de Pittman (1959, pag. 132) procedemos a cuidadosa procura de espículas de esponja englobadas e portanto conservadas pelo próprio produto da dissolução de outras espículas. Fomos felizes na procura, apesar da sua extrema raridade.

Assim como aconteceu com Pittman, em mais de uma centena de observações não encontramos vestígio algum de espícula de esponja no resíduo insolúvel dos calcários. No entanto, da mesma maneira que o autor citado, as encontramos junto ao sílex singenético da brecha intraformacional da pedreira do Sr. Maluf. Segundo a explicação de Pittman, a ação bacteriana é heterogênea, ora alcalinizando o meio graças à produção de amônia, ora desprendendo  $\text{CO}_2$  ou  $\text{H}_2\text{S}$ , em condições diferentes, que acidificam o meio e conseqüentemente precipitam a sílica. Como predominaram as condições redutoras mais propícias à alcalinização do ambiente, as espículas foram dissolvidas e incorporadas à lama calcária. Sujkowsky (1958), ao anumerar os fenômenos diagenéticos que se realizam nos sedimentos marinhos sob condições redutoras, afirma que a sílica livre finamente dispersa é dissolvida graças ao desprendimento de gases resultantes da decomposição da matéria orgânica. Este fato explica a extrema raridade de espículas no Irati e a sua freqüência na Formação Estrada Nova e nas zonas de fácies oxigenado dentro do Irati. Desta mesma forma explicar-se-ia a abundância e a constância da calcedônia, sempre presente no resíduo insolúvel dos calcários de praticamente toda a Formação Irati. Há dez anos atrás tivemos o ensejo de percorrer diversas pedreiras do Irati do mun. de Piracicaba na companhia do Prof. Dr. Carl W. Correns, do qual muito me orgulho de ser amigo. Segundo informações por carta opina este notável cientista pela origem orgânica do sílex do Irati, sendo provável que o estudo do isótopo 18 do oxigênio possa informar com mais segurança. Trata-se de um tema que provavelmente possa ser estudado futuramente, pois, este estudo já foi realizado por Degens e Epstein (1962), que converteram o silício em  $\text{SiC}$  e analisaram o oxigênio desprendido sob a forma do  $\text{CO}$ .

Fato interessante é o da presença isolada destas lâminas de sílex consideradas como primárias na zona rítmica, logo acima do banco marmorizado pelo



sil de diabásio de Assistência. Não ocorrem junto nem os nódulos nem as camadas decimétricas de sílex, comuns em toda a região, inclusive nas pedreiras situadas a cerca de 2 km ao sul, próximas à rodovia estadual. Trata-se assim de mais um argumento a favor da origem singenética destas lâminas mais comumente lenticulares de sílex.

#### b — *Origem metassomática*

Quanto aos nódulos e camadas decimétricas de sílex, na maioria dos casos não há dúvida alguma da substituição metassomática do calcário, fato bem evidenciado tanto em certos nódulos como nas camadas oolíticas ou pseudo-oolíticas silicificadas. O sílex de origem metassomática é mais facilmente visível na Formação Estrada Nova, onde são freqüentes as coquinas ou calcários oolíticos silicificados. No Irati, contudo, onde as rochas calcárias são mais homogêneas, nem sempre pode-se concluir com absoluta certeza pelo fenômeno de substituição metassomática. Não encontramos evidências que pudessem explicar a origem de alguns dos nódulos do folhelho. O principal problema refere-se a época em que se deu o fenômeno e de onde se originou a sílica. Ou ela foi remobilizada do próprio calcário, sempre rico em calcedônia, ou teria sido introduzida graças à eventual

transformação da montmorillonita, fato já referido.

#### c — *Origem magmática*

Quando o sílex corta os calcários e se deposita nas fendas, substituindo lateralmente o calcário nas adjacências do veio, julgamos perfeitamente viável a explicação de Leinz (1938), segundo a qual a fonte da sílica seria relacionada às emanções hidrotermais do magma basáltico. Estas emanções encontrariam caminho mais fácil através de fissuras ou de zonas de fraqueza pré-existent. A favor desta teoria lembramos a ausência de sílex no Irati do Rio Grande do Sul, onde o Gondwana não se acha influenciado pelas intrusões de diabásio. Lembramos, no entanto, da existência da calcedônia no resíduo dos calcários, que, segundo a nossa interpretação tem origem completamente diferente, como já foi exposto.

#### d — *Origem climática*

Finalmente, os grandes e irregulares blocos de sílex já descritos, que ocorrem junto à rocha decomposta, interpretamos como sendo originados por processo climático moderno, provavelmente ativo durante épocas mais secas alternadas com épocas mais chuvosas, nas quais a sílica finamente disseminada teria sido dissolvida e precipitada localmente durante as consecutivas estiagens.

### VII — DOLOMITIZAÇÃO

Quase todas as rochas calcárias da Formação Irati são dolomitizadas, ora mais, ora menos intensamente, ocorrendo também os dolomitos puros ou quase puros, juntos a calcários que parecem ser isentos de magnésio. Ambos os casos extremos são raros, sendo o último mais raro ainda. Assim sendo, as rochas calcárias do Irati enquadram-se na categoria de dolomito calcítico, ou calcário dolomítico, adjetivado de muito ou pouco. Em muitos casos estudados observamos variações na mesma amostra, o que dificulta a classificação correta. Contudo, predominam largamente os dolomíticos, o que concorda com as análises químicas apre-

sentadas no trabalho de Guimarães (1952), bem como, com as determinações que fizemos.

Uma das observações realizadas refere-se à distribuição dos dolomitos nas camadas do Irati, tanto no banco como nas camadas rítmicas. Apesar do número de ensaios não ser suficiente para uma conclusão categórica, pareceu-nos ser a dolomitização mais intensa no banco do que nas camadas da zona rítmica. O único aspecto macroscópico que comprova claramente a existência da dolomitização primária ocorre na brecha do banco basal, que apresenta fragmentos esparsos de dolomito numa matriz mais calcítica do que dolomítica.



Uma dolomitização secundária, certamente, teria afetado tanto a matriz como os fragmentos. Outras vezes a zona dolomítica se distribui como delgadas lâminas separadas por zonas mais calcíticas, o que sugere a dolomitização primária.

Em secção delgada é difícil concluir-se, dada a finura da granulação das rochas calcárias de um modo geral, sejam dolomitizadas ou não. Nem sempre os dolomitos exibem os rombos típicos da recristalização da dolomita. Muito comumente são idênticos aos calcários.

A fim de resolver o problema da distribuição da dolomita nas rochas cal-

cárias do Irati, procedemos a uma amostragem cuidadosa no banco da pedreira do Sr. Maluf, submetendo as amostras ao nitrato de prata sobre uma superfície previamente alisada. Posteriormente examinamos várias outras amostras de pedreiras próximas e de outras ocorrências mais distantes. Assim sendo, passemos a transcrever os resultados de algumas das observações. Adiantamos aqui que foram encontradas algumas discrepâncias em amostras distanciadas de poucas centenas de metros, o que parece indicar que a dolomitização não se deu de modo uniforme no sentido horizontal.

Base	— dolomito calcítico (cêrca de 50%).
20 cm acima	— do'omito pouco calcítico.
40 cm	— dolomito calcítico com leitos de 0,5 a 1 cm de espessura (paralelos à estratificação) de dolomito puro.
60 cm	— trata-se da brecha intraformacional de 20 cm de espessura. matriz ora calcítica ora mais dolomítica; fragmentos ora de dolomito puro ora mais calcíticos, com muitas variações na horizontal.
80 cm	— dolomito muito pouco calcítico, contendo lâminas centimétricas de calcário pouco dolomítico, sempre paralelas à estratificação.
1,0 m	— dolomito muito pouco calcítico, o mesmo sendo observado em 1,1 e 1,2 metros.
1,4 m	— do'omito puro, com raríssimas lâminas submilimétricas de dolomito calcítico.
1,6 m	— dolomito puro.
1,8 m	— dolomito calcítico.
2,3 m	— do'omito muito pouco calcítico.
2,6 m	— dolomito quase puro e calcário do'omítico em lâminas alternadas de 0,5 cm.
2,8 m	— calcário pouco dolomítico, com raras lâminas submilimétricas de dolomito puro.
3,0 m	— do'omito, ora puro, ora calcítico, variando irregularmente, mas sempre segundo o plano da estratificação.
3,2 m	— Tôpo do banco: do'omito quase puro, o mesmo se dando numa das pedreiras vizinhas, poucos km ao sul. Nesta ocorre o calcário dolomítico sob a forma de raras e irregulares manchas ou de delgadas lâminas.
3,3 m	— Trata-se da primeira camada calcária da zona rítmica, logo acima do banco. A rocha é um calcário pouco dolomítico.
4,0 m	— calcário praticamente puro, o mesmo se dando numa pedreira situada 15 km a SW.
6,0 m	— dolomito calcítico.



Um dos ensaios foi executado numa secção delgada, a fim de verificarmos o comportamento das bandas dolomíticas e calcíticas ao microscópio. Para isso escolhemos uma amostra pertencente ao banco de uma pedreira situada 3,5 km a SW do Sr. Maluf. Macroscopicamente parece haver perfeita delimitação entre a zona dolomítica e a calcítica, dispondo-se ambas segundo a estratificação, como sempre, sendo a espessura de 0,5 cm. Ao microscópio, contudo, percebe-se uma passagem gradual entre a faixa calcítica e a dolomítica. Esta é praticamente pura, enquanto que a calcítica parece possuir 10 a 20% de dolomita. Em ambas a granulação é extremamente fina, tendo os cristais cerca de 5 microns de tamanho. Nem sempre se nota a tendência ao idiomorfismo dos cristais de dolomita. Sob o microscópio petrográfico ambas as partes não parecem diferir na sua textura e na porosidade. Este fato, mais a disposição laminar ou lenticular, mas sempre segundo o plano da estratificação, levam-nos à suposição de tratar-se de um processo singenético, ou penecontemporâneo à sedimentação. Seria difícil imaginar que as soluções magnesianas tenham se infiltrado de maneira tão regular na rocha já consolidada, como já nos referimos anteriormente. Segundo estudos recentes de Deffeyes, K. S. et al. (1965) o mecanismo da dolomitização acha-se bem explicado num modelo recente que ocorre na ilha de Bonaire, onde os calcários modernos acham-se em vias de dolomitização graças à concentração da água do mar, que forma soluções com elevado teor de magnésio em relação ao de cálcio.

No entretanto, o que acabamos de expor não é a regra geral. Outras a-

mostras, pertencentes à zona rítmica, mostram com grande clareza e aumento de porosidade relacionado ao idiomorfismo dos cristais de dolomita, cujo tamanho de 100 a 150 microns faz com que se destaquem da massa mais fina ao lado (fig. 6-1 B). Esta, por sua vez, se contrasta com a camada adjacente (ou seja, a cerca de um centímetro de distância da zona recristalizada pela dolomitização), de granulação finíssima, de poucos microns de tamanho, como é a maioria das rochas calcárias do Irati. Não sabemos, contudo, se a dolomitização com recristalização é também singenética, ou penecontemporânea à sedimentação. Sintetizando as nossas observações, ora a textura não é alterada, ora é pela recristalização e aumento em porosidade, mas sempre obedecendo ao plano da estratificação. Trata-se de um problema complexo e interessante, que sem dúvida alguma poderia ser o tema de outra tese, muito provavelmente a ser elaborada no futuro.

Finalmente, citaremos uma amostra pertencente ao banco de uma das pedreiras situadas ao norte de Laranjal. Nesta se observa nitidamente a preferência da dolomitização junto à camada rica em carapaças minúsculas de *Liocaris*. Nesta parece que a calcita e a dolomita ocorrem nas mesmas proporções, ao passo que o resto da amostra se apresenta laminada de zonas mais calcíticas e outras mais dolomíticas. É provável que a zona das carapaças seja mais permeável às soluções magnesianas, ou ainda, que o eventual aumento de CO<sub>2</sub> produzido pela decomposição dos organismos tenha influído no processo de reação entre as soluções magnesianas e o carbonato de cálcio previamente precipitado. (Fairbridge 1963, pag. 448).

## VIII — AS SUBSTÂNCIAS BETUMINOSAS DO IRATI

A fig. 9-1 mostra claramente as evidências da origem singenética do betume no Irati, bem como, tecer considerações sobre a provável origem singenética do betume existente nas rochas calcárias. Não entraremos nos pormenores deste importante tópico, uma vez que já foi bem estudado

por Fróes Abreu (1946 e 1962), grande autoridade no assunto.

### 1. Nas rochas calcárias

A fig. 9-1 mostra claramente as evidências da origem singenética do betume nas zonas castanhas do calcário. Estas, na fotografia, correspondem às ca-



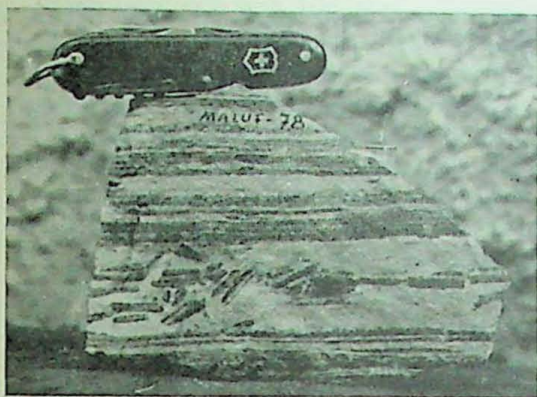


Fig. 9-1. — Fraturas sofridas pela camada betuminosa, graças a deslizamentos da lama calcária, o que comprova a origem singenética deste tipo de betume. (Pedreira do Sr. Maluf).

madas mais escuras. Na parte inferior da amostra observa-se o fragmento de uma destas camadas castanhas betuminosas, achando-se os fragmentos dispersos numa matriz branca, de um calcário mais compacto com traços de betume. É tão nítida a separação entre fragmentos betuminosos castanhos e matriz, que não é possível ter-se o betume infiltrado posteriormente (fig. 9-2). Noutra amostra, procedente de uma pedreira situada na mesma área, as partes betuminosas e não betuminosas acham-se dispostas em lâminas de 0,5 a 1 cm de espessura, sendo muito nítida a separação entre elas. O resíduo insolúvel mostra ligeira diferença na granulação de uma e outra, o que comprova oscilações nas condições físicas simultâneas às bioquímicas, que regularam a formação do betume. Numa destas zonas castanhas determinamos 6,6% de material betuminoso, do qual pouco menos que a metade é insolúvel no éter, tratando-se provavelmente de pirobetume.

Nos demais calcários o betume é comumente encontrado em pequena quantidade, de cerca de 1 a 2%, mais ao redor de 0,5% de pirobetume. Uma vez dissolvido pelo éter, filtrado e evaporado o solvente, obtém-se um resíduo castanho de consistência rija, mas não quebradiça. Sob a luz ultravioleta fluoresce com uma coloração castanha clara.



Fig. 9-2. — Laminação produzida pela presença de betume singenético em zonas preferenciais, de coloração castanha. As faixas claras são mais pobres em betume. (Pedreira do Sr. Maluf).

Outras vezes, ao invés de impregnações no calcário sob a forma de manchas castanhas, o betume ocorre distribuído ao longo de fissuras ou de zonas mais porosas, dando a impressão de ter migrado. Nestes casos sua cor é bem preta, assemelhando-se a um piche endurecido. Este tipo de betume costuma encerrar fragmentos microscópicos semelhantes a restos vegetais silicificados, com a estrutura fibrosa característica, observada sob o microscópio. Pelo fato de serem silicificados mantêm-se inalterados com o aquecimento ao rubro.

Outra maneira pela qual ocorre o betume consiste no preenchimento de pequenas cavidades existentes no calcário. Neste caso o betume se apresenta como líquido mesmo, chegando a fluir lentamente quando a amostra é quebrada. Depois de exposto ao ar vai-se endurecendo aos poucos, sem contudo tornar-se quebradiço. É escuro e inodoro, queimando-se com fumaças pretas e odor característico de asfalto queimado. Deixa um resíduo preto e brilhante, de natureza grafitosa, inalterável quando aquecido ao rubro. Este tipo de betume fluoresce com uma coloração castanha escura, quando submetido à luz ultravioleta.



Muito interessante é a maneira pela qual ocorre o betume em Assistência, numa das pedreiras onde o calcário se acha marmorizado por um sil de diabásio. Da mesma maneira que a matéria orgânica é expulsa durante o processo da recristalização, acreditamos que o mesmo tenha se dado com o betume. Não sabemos se a temperatura foi insuficiente ou se as condições de ambiente fechado tenham impedido a volatilização do betume. O fato é que nenhum calcário marmorizado mostra o menor sinal de betume, que ocorre unicamente no interior de cavidades irregulares estreitas, abertas mais comumente segundo a estratificação e quase sempre atapetadas por cristais milimétricos de calcita, tal como descreve Krejci-Graf (1963) em calcários petrolíferos da Venezuela, onde as cavidades são preenchidas por asfalto ou por petróleo. No nosso caso ocorre o betume no interior das cavidades referidas, cuja extensão na horizontal varia desde alguns centímetros até de alguns palmos, com uma espessura máxima de 0,5 a 2 ou 3 centímetros. O betume é bem mais fluido que os já descritos, também de coloração preta e destituídos de qualquer odor em condições normais de temperatura. Às vezes o betume chega a fluir das aberturas recentemente quebradas. Numa destas aberturas coletamos o betume que se achava embebendo uma trama densa de cristais aciculares de anidrita. Acreditamos que esta anidrita tenha se formado a expensas do enxôfre contido no betume, pois, segundo Fróes Abreu (1946) a quantidade de enxôfre (sob a forma de vários compostos de composição complexa) pode atingir até 16%. É provável que a reatividade tenha sido aumentada com o calor do diabásio, favorecendo assim a reação com o carbonato de cálcio. Muito comumente o betume é encontrado nos interstícios de uma espécie de esponja de calcita, cuja origem desconhecemos, mas que se encontra no interior dos vazios cheios de betume. Uma vez retirado o betume e dissolvida a calcita de aspecto esponjoso, obtém-se um resíduo cheio de cristais milimétricos muito bem formados de apofilita, cuja determinação

devemos à habilidade e competência do Prof. Dr. José M. V. Coutinho, que conseguiu executar medidas ao goniômetro de reflexão, a fim de certificar-se da classificação previamente feita por ele mesmo. A associação da apofilita com substâncias betuminosas é rara, mas não se trata de novidade, havendo referências na literatura mineralógica.

A existência de material betuminoso líquido numa rocha metamorfozizada pela intrusão de diabásio indica condições de impermeabilidade, que impediram o escape do material betuminoso submetido a temperaturas elevadas, que recristalizaram as rochas calcárias. Segundo dados experimentais de C. B. Osborne (autor citado por Powers et al., 1932) o calor da intrusiva determina a destilação da água contida na rocha, que é vaporizada, bem como, a gaseificação e a liquificação dos hidrocarbonetos. O gás e os líquidos assim formados ocuparão as juntas ou cavidades, tal como observamos em Assistência. Após o resfriamento dá-se a condensação da fase gasosa em líquida, segundo o autor citado. Acreditamos que o gás já encontrado numa das perfurações realizadas no município de São Pedro, próxima a Assistência, tenha a sua origem no calor das intrusivas comumente encontradas nos poços desta região.

## 2. Nos folhelhos

Tudo o que foi descrito até agora refere-se às substâncias betuminosas encontradas nos calcários, que possuem também os pirobetumes. Nos folhelhos nunca encontramos o menor sinal de betume solúvel em éter. Notamos, casualmente, uma pequena solubilidade no bromofórmio. Não sabemos, contudo, a natureza da substância que se dissolveu, se se trata de betume ou pirobetume. As substâncias pirobetuminosas eventualmente existentes nos folhelhos podem perfazer até 10% da amostra, e algumas vezes em espessuras consideráveis, como observamos na Fazenda Boa Vista, na vila dos Aleixos, município de Taguaí, SP. Uma das camadas de folhelho que medimos nesta localidade parece ter mais de 5 metros de espessura.



Também no km 195 da estrada Itapetininga-Angatuba ocorre este tipo de folhelho, cuja espessura parece ser de alguns metros. Na área situada entre Rio Claro e Laranjal é mais raro o folhelho pirobetuminoso, e quando se mostra como tal, é bem menos do que os descritos. Faz excessão o folhelho já citado e descrito que ocorre na base do Irati da pedreira do Sr. Maluf, abaixo dos siltitos argilosos infrabranco.

### 3. *Comportamento sob as radiações ultravioletas*

Os folhelhos pretos pirobetuminosos se comportam de maneira heterogênea. Ora apresentam reação fracamente positiva, parecendo às vezes coincidir com a direção da estratificação, ora não apresentam reação alguma. Não procuramos as razões deste fenômeno por tratar-se de assunto muito afastado do tema do nosso trabalho.

Quanto aos calcários, observamos que muitos deles mostram-se uniformemente acastanhados sob a luz ultravioleta, enquanto que outros mostram-se listados de bandas de cor castanha carregada e pálida, cores estas que coincidem com a estratificação. As faixas castanho escuras coincidem com as camadas de cor mais carregada, sendo provável que possuam teor maior de substâncias orgânicas ou betuminosas, ou

ambas, que reagem sob a citada radiação.

O material betuminoso destilado dos folhelhos terciários de Tremembé fluorescem com uma cor castanha bem clara, enquanto que o de São Mateus, PR, da Formação Irati, fluoresce com cor castanha carregada. Já o material betuminoso extraído por aquecimento em tubo de ensaio, por condensação nas paredes frias do tubo, fluoresce com a mesma cor, mas com uma intensidade sensivelmente menor, dando a impressão de que algum composto mais ativo se desprende ao ser aquecido em tubo aberto.

### 4. *Odor*

Tanto os folhelhos como os calcários, uma vez quebrados exalam um odor característico, motivo pelo qual são denominados de calcários fétidos, o que se deve à presença de substâncias orgânicas sulfuradas de composição química complexa, segundo estudos de Fróes Abreu (1946). Realmente, o betume extraído por solventes dos calcários é absolutamente inodoro. No entanto, o material betuminoso extraído pelo aquecimento dos folhelhos e condensados nas paredes frias do tubo de ensaio exala um odor bastante forte e bastante desagradável, difícil de ser definido, mas completamente diferente do odor obtido pela percurssão da rocha.

## IX — O EFEITO TÉRMICO DO DIABÁSIO SOBRE AS ROCHAS DO IRATI

### 1. *Estudos anteriores*

Este assunto já foi abordado por Leinz (1937a), que estudou as transformações de um calcário do município de Corumbataí, SP, que se acha em contato com um sil de diabásio. O citado calcário passou de preto e pirobetuminoso para branco e sem betume, tendo a sua granulação aumentada. De finíssima que era, passa a indivíduos de 50 a 100 microns de tamanho. Neste presente caso, descrito por Leinz, a espessura afetada é de apenas 1 metro, passando logo acima ao aspecto normal.

### 2. *Descrição das ocorrências*

Dentre as diversas pedreiras situadas nos arredores da vila de Assistência destacam-se as do Sr. Antônio Vit e do Sr. Abílio Pedro, pela beleza da exposição e pela facilidade com que pode ser observada a litologia. As demais pedreiras, situadas a cerca de 2 km ao sul da vila, bem próximas à rodovia estadual asfaltada (uma delas é a do Sr. Fanico, já citada anteriormente), muito embora se localizem próximas ao diabásio, mostram-se fracamente afetadas pelo metamorfismo optálico. Apenas al-



guns níveis inferiores do banco calcário apresentam-se mais grosseiramente cristalinos, com textura sacaróide semelhante à dos mármore. Os demais calcários são de textura fina, com manchas milimétricas irregulares, caóticamente distribuídas, de calcário mais grosseiro, de 100 a 200 microns de tamanho, numa granulação de 20 a 30 microns em média. Acreditamos que o corpo de diabásio não seja muito espesso nesta área, ao contrário do sil que se acha em contato com as já citadas pedreiras mais próximas da vila de Assistência.

Nestas, a espessura de rochas afetadas pelo metamorfismo talvez ultrapasse de 10 metros. A existência do solo impede a medida exata. Logo abaixo, em contato com o banco, acha-se o diabásio, cuja espessura é de 25 metros. Ocorre até às proximidades do vale do rio Corumbataí, onde observamos arenitos do topo do Tubarão, bastante endurecidos, certamente pelo efeito do metamorfismo optálico. Poucos metros abaixo, quase junto às águas do Corumbataí, ocorrem sedimentos finos, cheios de delgados leitos de sílex que não conseguimos amostrar pelo fato de serem muito íngremes as margens.

### 3. *Aspectos macroscópicos dos calcários marmorizados*

Retornando ao Irati, passemos à descrição macroscópica dos calcários marmorizados pelo diabásio. A característica que mais chama a atenção é a presença de bandas de espessura irregularmente variável de calcário preto e branco ou cinzento. Quando a espessura da faixa branca é apreciável, de mais de meio metro, a rocha se presta bem para revestimento, o mesmo se dando com os calcários regularmente bandados. São muito freqüentes os nódulos elípticos (sempre com o maior eixo paralelo à estratificação) de calcário bem branco e bem recristalizado no centro. Aham-se comumente rodeados por calcita milimétrica fibro-radiada e outras vezes por uma delgada zona de calcário bem preto, tudo indicando a expulsão do pigmento carbonoso pelo pro-

cesso da recristalização. Temos observado tais nódulos sempre no calcário acinzentado, ou seja, com maior ou menor quantidade de material carbonoso. Uma vez aquecido perde a coloração preta, e chega às vezes a exalar um leve odor que lembra o do betume. Uma vez moído perde a cor preta, tornando-se um pó acinzentado. Faz exceção um calcário grafitoso, que moído, se conserva preto como antes, certamente pelo fato de ter sofrido um processo mais rigoroso de metamorfismo. Logo adiante faremos referência a esta interessante ocorrência.

Os calcários recristalizados pelo efeito térmico do diabásio recebem a denominação local de "marmorina", termo muito bem cunhado, dada a sua semelhança com o mármore. Muito comumente a granulação varia na mesma banda, seja preta ou branca, aparecendo faixas de 0,5 a 1 cm de calcário sacaróide. A presença das bandas claras e escuras nem sempre é devida ao fenômeno da expulsão da matéria carbonosa durante a recristalização. Há casos em que a coloração escura é motivada pela existência da matéria orgânica originalmente na rocha. Tal observamos na brecha do banco, afetada pelo metamorfismo térmico.

### 4. *Aspectos microscópicos dos calcários marmorizados*

#### a — *Cristalinidade*

Quanto à cristalinidade dos calcários marmorizados, as nossas observações ao microscópio petrográfico concordam plenamente com as de Leinz (1937), que determinou, como já referimos inicialmente, a granulação de 50 a 100 microns. Eventualmente ocorrem manchas irregulares, às vezes centimétricas, de cristais maiores. Ocasionalmente ultrapassam de 1 mm, o mesmo se dando no interior dos já citados nódulos elípticos. De um modo geral, coexistindo na mesma lâmina as bandas claras e escuras, nota-se nítida diferença na granulação entre ambas. Parece que as impurezas orgânicas dificultam



o processo de recristalização, pois, as partes pigmentadas são sempre de granulação mais fina que as partes não carbonosas.

#### b — *Minerais neo-formados*

Durante as nossas observações tivemos o ensejo de identificar 4 minerais formados pelo metamorfismo optálico das rochas calcárias. Um deles é a grafita, presente sob a forma de cristais de 1 a 2 mm de tamanho, concentrados em raras camadas centimétricas do calcário marmorizado que ocorre a 4,5 km a ENE da pedreira do Sr. Maluf, na denominada pedreira da Lapa, propriedade do Eng. Pedro Abechian. Foi o único local onde encontramos a grafita. Mesmo em outras amostras da mesma pedreira, a coloração preta dos calcários não é motivada pela grafita, uma vez que a coloração desaparece com o aquecimento ao rubro.

Outro mineral comum, que ocorre tanto na pedreira da Lapa como nos calcários marmorizados de Assistência, é o diopsídio. Costuma concentrar-se em determinadas zonas paralelas à estratificação, zonas estas, de 1 a 2 mm de espessura. Muito provavelmente correspondem a leitos originalmente mais ricos em calcedônia finamente subdividida, por conseguinte, mais ativa quanto à reatividade, tendo então se combinado com a dolomita. O diopsídio se apresenta em cristais de 0,3 a 0,5 mm de tamanho, tendo em seus interstícios o carbonato que certamente escapou à reação.

O terceiro mineral, encontrado nos calcários marmorizados de Assistência, e de maneira análoga aos minerais já descritos, não é de diagnose fácil. E' provável que se trate de um mineral do grupo das cloritas, mas pobre em ferro. E' alongado, incolor, índices de refração 1,54 e 1,56 negativo, 2V praticamente zero e extinção reta.

Finalmente, o quartzo mineral estudado, cuja origem pode ou não ser considerada metamórfica, é a hidromagnesita. E' encontrada sob a forma de rosetas achatadas segundo o plano da estratificação, de 3 a 5 mm de diâme-

tro. Os cristais são ao mesmo tempo placóides e alongados, límpidos e com tôdas as características ópticas da hidromagnesita. Dada a maneira com que ocorre este mineral, até agora ainda não descrito no País, é provável que se tenha formado a partir de soluções residuais aquecidas que teriam hidratado e ao mesmo tempo, lixiviado o cálcio da dolomita pré-existente.

#### c — *Estruturas nodulares*

Muito interessante é a existência de nódulos esféricos, ora isolados ora concrescidos, à maneira das bonecas de sílex. Seu tamanho varia de 0,5 a 2 cm, sendo constituídos de uma mistura heterogênea de minúsculos cristais de diopsídio de 5 a 10 microns de tamanho, mais minúsculas acículas do provável mineral clorítico e a apofilita. Esta, por sua vez encontra-se sob a forma de cristais grandes, milimétricos, alongados e irregularmente interpenetrados. Ao redor dos nódulos costuma ocorrer uma zona regular, de um a dois milímetros de espessura de cor nitidamente mais escura. Julgamos provável ter-se dado uma eventual reação do antigo sílex com o calcário magnesiano, em zonas preferenciais mais aquecidas ou mais ricas em gases, que não só facilitaram a reação, como propiciaram a cristalização da apofilita. Estes citados nódulos são raros, tendo sido observados na pedreira do Sr. Abílio Pedro, situada a pouco mais de 2 km ao norte da vila de Assistência.

#### 5. *Modificações das rochas pelíticas*

Muito embora seja patente a transformação dos folhelhos, não se pode classificá-los como rocha metamórfica, pelo menos sob o ponto de vista da sua textura e composição mineralógica. No entretanto, o aspecto macroscópico da rocha muda por completo, quer quanto à estrutura, quer quanto à coloração. Tais aspectos são bem visíveis na pedreira do Sr. Antônio Vit, onde não mais se observam os folhelhos pretos tão característicos do Irati. Logo acima



do banco calcário ocorrem as camadas rítmicas típicas, de calcário marmorizado e camadas de uma rocha esverdeada, bem estratificada em lâminas de 0,5 a 2 mm, diferenciadas unicamente pela coloração, esverdeada mais escura e esverdeada bem pálida. Uma vez molhada, esta rocha é extremamente lisa e untosa, aparentando ao tacto uma substância graxa ou saponificada, o que faz jús à sua composição montmorilonítica, já referida. Ao microscópio não se percebe a menor diferença entre as lâminas. Não temos a menor idéa sobre a provável causa da cor verde, se poderia ou não haver influência da matéria orgânica sobre o grau de oxidação do pigmento ferroso, eventualmente mais reduzido. Em secção delgada não se nota a presença de minerais neoformados nem aumento de granulação por parte dos minerais argilosos, cujo tamanho varia de fração de micron a cerca de 5 microns, como valor médio.

## 6. *Comportamento do sílex e da calcedônia*

Já referimos que o sílex torna-se raro nas ocorrências marmorizadas, motivo pelo qual as nossas observações são escassas. Do pouco observado parece não haver mudança na granulação, comparando-se com o sílex existente nos calcários não marmorizados. O resíduo insolúvel de calcedônia, existente em ambos, não sofre também a menor modificação no que diz respeito ao tamanho dos indivíduos. Nem mesmo o índice de refração foi modificado pelo aquecimento, o que seria de se esperar pela eventual perda d'água. A raridade do diopsídio, que seria resultante da reação da dolomita com a sílica sob a forma de calcedônia ou mesmo sílex, talvez pudesse ser explicada pela insuficiência de temperatura. Em determinadas zonas eventualmente mais aquecidas ter-se-ia verificado a reação e consequente desenvolvimento do diopsídio.

## XI — CONDIÇÕES DE SEDIMENTAÇÃO DO IRATI

### 1. *Idéias anteriores*

Já fizemos referências sobre as dificuldades deste problema, tão discutido e controvertido quanto à questão de ser marinho ou continental. Já referimos igualmente que um dos principais objetivos deste trabalho foi o de procurar argumentos mais sólidos que esclarecessem este ou aquele ponto de vista. As linhas que finalizarão o presente trabalho traduzem em parte as idéias já há tempos elaboradas, desde as de Euzébio de Oliveira (1940), que entre parêntesis, mostram bem a sua conhecida meticulosidade nas observações ao lado da prudência nas conclusões, até às mais modernas, de Maack (1952), de Almeida (1954), de Beurlen (1954 e 1955), de Putzer (1955), de Bischoff (1957), de Sanford e Lange (1960) e de Mendes (1961, 1963 e 1967). Todos são unânimes em considerar a quietude e vasta extensão das águas, o que é óbvio. No entanto, quanto ao fato de ser marinho ou continental as opiniões são, como já referimos, discordantes.

Assim é que White (1908), o pai do Irati, considera-o continental na região de Santa Catarina. Deixa aberto o problema para o Irati do Paraná e São Paulo, citando a existência de fósseis duvidosos, transcritos por Derby através de cartas. Por sua vez, Mendes (1961 e 1963) afirma categoricamente tratar-se de lagos continentais. Almeida (1954) opina para um ambiente de água salobra. Moraes Rego (1940) acha que ambos os tipos (salobra e marinho) são possíveis. Felicíssimo (1940) interpreta como sendo um mar epicontinental de água provavelmente salobra, e finalmente Washburne (1930), noutro extremo, advoga a existência de águas tão altamente salinas a ponto de impedir a vida dos seres marinhos comuns daquela época. Antes de darmos o nosso parecer sobre este importante tópico, ponderaremos sobre as condições tectônicas, climáticas e físico-químicas.

### 2. *Condições tectônicas*

Basta um relancear de olhos sobre a litologia monótona em tão grande á-



rea, e ainda mais, numa espessura tão pequena e tão constante dentro da escala considerada, para concluir-se sobre a quietude tectônica da bacia do Paraná, bem como, das terras circundantes. Após a aplainamento generalizado resultante da erosão glacial, perdurou por longo tempo a fase de repouso, fato comprovado pela ausência quase absoluta de psamitos. Os grãos de areia, além de extremamente raros, nunca ultrapassam o tamanho da areia fina de Wentworth. Esta calmia tectônica não se restringe ao Irati. Segundo a descrição litológica de Almeida e Barbosa (1953) os últimos e raros vestígios da glaciação permo-carbonífera no Estado de São Paulo são encontrados no Membro Tupi, ou seja, na base da Formação Itapetininga, a última do Grupo Tubarão. O membro seguinte, denominado de Tatuí, segundo os autores citados evidencia a penetração gradual do mar, fato comprovado pela presença de espículas poliaxônicas silicosas de esponja ao lado de provável glauconita. Esta idéia concorda também com a de Maack (1952, pag. 211), que muito embora não seja categórico em suas afirmações, alega a existência de "água salobre ou salgada e, provavelmente, devem sua origem a um mar epicontinental, isolado por barras, com periódica entrada de água oceânica, ou a um grande mar continental, o que se torna evidente pela enorme e uniforme extensão desta formação". Os sedimentos do Membro Tatuí não mostram mais os indícios da glaciação, que, pelo menos na área em apreço, desapareceu definitivamente. Os sedimentos clásticos são visivelmente mais finos, aparecendo leitos de calcário com sílex.

Finalmente, acima do Tatuí repousa o Taquaral, nem sempre presente, mas que evidencia a mesma tranquilidade tectônica, tal a finura da granulação. Tivemos a oportunidade de observar argilitos finíssimos, com muito pouco silte, no topo do Taquaral. Nas demais ocorrências, fora do Estado de São Paulo, as condições deveriam ter sido análogas, o que se depreende da litologia do Palermo nos estados sulinos.

Não temos dúvida de que o ambiente era aquoso e continuou aquoso no decorrer da sedimentação do Irati. Não sabemos o porquê, mas o fato é que durante o tempo geológico em que se depositou o Irati, as condições de sedimentação tornaram-se uniformes em toda a bacia do Paraná, desde os Estados de Goiás e Mato Grosso até ao Uruguai. A uniformidade sob o ponto de vista tectônico é patenteada sobretudo pela constância e pequenez da espessura. Tudo indica que por longo tempo paralizou-se a movimentação negativa da bacia, bem como, a movimentação positiva das terras circundantes.

Mais tarde, quando as condições euxínicas cessaram, continuou a deposição num ritmo mais acelerado, mormente nas partes centrais da bacia, onde a Formação Estrada Nova atinge a quase mil metros de espessura, o que foi verificado na sondagem de Pres. Epitácio, SP. Certamente reativou-se simultaneamente o movimento ascendente da área positiva, fornecedora dos detritos (mais comumente siltosos) para o Estrada Nova. Finalizando estes eventos tectônicos deu-se o levantamento geral de todo o bloco, seguindo à regra da emersão generalizada do triássico. Nunca mais o nível do mar se aproximou destas terras, transformadas posteriormente em imensos e monótonos desertos.

### 3. Condições climáticas

#### a — Banco calcário basal

Muito embora seja grande o número de fatores que intervêm na precipitação dos calcários, tudo indica que o fator temperatura teve influência decisiva. A abundância de répteis, bem como, de outras formas de vida, animal ou vegetal, nos leva à conclusão do clima quente, que certamente perdurou por longo tempo geológico, pelo menos no Estado de São Paulo e norte do Paraná, onde predominam largamente os calcários na base do Irati. Mais ao sul os calcários da base são mais ricos em intercalações de folhelho, que de-



veriam ser formados em ambiente mais frio, segundo as idéias clássicas da literatura paleoclimática.

Entre o banco e a zona rítmica, na superfície correspondente ao topo do banco, é muito comum a presença de grande número de costelas de *Stereosternum*, sempre desarticuladas e sem orientação, apesar das freqüentes marcas onduladas de correnteza. É muito provável ter havido alta mortalidade dos répteis, graças ao frio, que por sua vez, foi o responsável pela mudança da deposição, de calcário para folhelho.

Mendes (1961) cita a existência de anéis anuais nas madeiras fósseis do Irati, mais comumente encontradas no interior do banco calcário da base. Isso vem demonstrar a variabilidade climática inclusive na época de deposição dos calcários, sendo provável ter havido flutuações da precipitação pluviométrica, ocasionando assim a formação dos anéis anuais.

#### b — Camadas rítmicas

Não temos dúvida da influência do clima no ritmismo da deposição decimétrica de calcários e folhelhos, tal a pureza de ambas as rochas. Pelo menos no Estado de São Paulo, nunca observamos a presença de margas. A quase ausência de argilas nos calcários e a raridade de calcários junto aos folhelhos indica a ação marcante do clima no controle da deposição destes sedimentos.

Hallan (1964), estudou o ritmismo folhelho — calcário do jurássico da Inglaterra, que, segundo a sua descrição assemelha-se ao Irati quanto à estratificação. Tal ritmismo é por ele interpretado como sendo produzido por processos originais, primários, bem como, pela migração diagenética, por conseguinte, por processos secundários. Apresenta interessante argumentação, baseada no esmagamento de fósseis nos folhelhos e a sua boa conservação nas camadas calcárias, fato interpretado como descalcificação do folhelho. Para o caso do Irati não há por enquanto nenhuma evidência de transformação pe-

la diagênese. Tudo indica que o ritmismo é o produto das condições de sedimentação, refletindo as variações originais do clima, o que ainda será discutido.

Muito embora não tenhamos dúvida quanto às causas climáticas na alternância dos estratos em discussão, o principal problema, ao nosso ver insolúvel, consiste na causa da variação climática. Segundo Anderson (1964), que classifica as unidades rítmicas de acordo com os respectivos tempos que levaram para se formar, não se pode saber se o ciclo das manchas solares teria influência na variação rítmica de camadas com esta espessura decimétrica. O autor citado discute igualmente o tempo de deposição. Se compararmos os estratos rítmicos do Irati com os citados por Anderson e por Bradley (1929), imaginamos um tempo de mil a três mil anos para ter-se depositado uma das camadas. A velocidade média de deposição de sedimentos análogos aos do Irati, segundo Bradley, é de um decímetro por milênio, de onde se conclui da impossibilidade de se conjecturar sobre as causas primárias da estratificação que estamos considerando.

O citado trabalho de Bradley versa sobre sedimentos rítmicos miocênicos lacustres do Colorado e Utah (Formação Green River), cuja litologia é semelhante à do Irati. Difere apenas na espessura dos estratos, que lá são milimétricos, ou seja, são sedimentos laminados. "Mutatis mutandis", comparando o que foi estudado e interpretado por Bradley com as nossas observações, admitimos um clima quente e pouco chuvoso para os calcários, quer do banco, quer da zona rítmica. Já referimos sobre a quase ausência de argilas e a raridade de silte nos calcários, tudo indicando que além das condições de clima quente, a precipitação pluviométrica deveria ter sido pequena. As eventuais e delgadas lâminas onde se concentram os grãos clásticos indicam efêmeras fases de maior pluviosidade, e como consequência, ligeiro aumento da velocidade das águas que fluíam à bacia de sedimentação. A abundância de



feldspatos frescos, inclusive de plagioclásios, entre os grãos clásticos siltosos vem igualmente a favor desta interpretação. Passados alguns milênios, rapidamente o clima ter-se-ia mudado para frio e mais chuvoso. Continua abundante o feldspato, a granulação do silte e a sua quantidade aumentam em relação aos calcários e o fornecimento de detritos orgânicos parece obedecer a um ritmo anual, segundo o que se observa nas secções delgadas.

#### 4. Profundidade

A raridade de perturbações nos estratos, provocadas pela turbulência da água nos leva a supor a existência de uma profundidade razoável, porém, impossível de ser avaliada. A plantura da região certamente favorecia a ação de vendavais fortes, que certamente determinariam a formação de ondas vigorosas. Apesar disso, os estratos todos são típicos de águas calmas, o que vem sugerir a profundidade relativamente grande, livre das ondas de tempestades ou de vendavais. Por êstes motivos citados concordamos com o ambiente proposto por Rich (1953), que considera o Irati com sendo de ambiente "fondo". A existência de brechas intraformacionais originadas por movimentos de fluxo, mais os "ripple marks", podem indicar também o ambiente "clino" proposto por Rich (1951). Êste autor preferiu deixar aberto o problema referente ao ambiente continental ou marinho.

O relêvo suave das terras adjacentes à bacia certamente não permitiu a formação de correntezas suficientemente fortes para obliterar a laminação da lama previamente depositada. Por sua vez, a profundidade das águas impediu que as ondas de tempestades alterassem a estratificação, fato que determinaria o caráter de "onda", segundo a classificação de Rich (1951). A estas alturas devemos nos lembrar que a paisagem certamente era altamente favorável a ventos. Em tão larga superfície exposta, com pouca admissão de água pluvial, a evaporação certamente foi de alta intensidade. No entanto, não há evidências de formação de evaporito de

espécie alguma. De onde viria a água para repor a que foi evaporada? Êste assunto será discutido no último subcapítulo.

#### 5. Condições físico-químicas do ambiente

A presença de substâncias betuminosas mais a pirita, ambas generalizadas por quase todo o Irati, inclusive o existente nas partes centrais da bacia (conhecido por meio dos testemunhos de sondagens), tanto nas rochas calcárias como nos folhelhos, não deixa dúvida quanto às condições de pH e Eh. Em base do trabalho de Krumbein e Garrels (1952), que relacionam tais condições às diferentes associações mineralógicas mais aos compostos derivados da matéria orgânica, julgamos razoável considerar o valor de ao redor de 8 para o pH e um valor negativo ao redor de 0,3 para o potencial de oxirredução das águas onde se depositaram os sedimentos do Irati. Segundo os autores citados as substâncias que integram os sedimentos de origem química não se misturam ao acaso, pois, a sua formação obedece às condições de oxidação e redução. Lembramos de que no Irati verifica-se a associação pirita, substâncias betuminosas e carbonatos em praticamente toda a extensão da bacia.

Quanto às condições de salinidade temos somente evidências indiretas de tratar-se de água salobra, com o que concordamos com Almeida (1954). Pettijohn (1957, pag. 601) refere-se à escassez de fósseis em águas de baixa salinidade, dando ênfase à dificuldade da diagnose dêste tipo de ambiente, tal como o nosso caso, discutido e controvertido. Lembramos apenas de que não existe no Irati o menor sinal de evaporito salino, ao contrário do que se dá com o lago miocênico estudado por Bradley (1948, pag. 643), já citado anteriormente.

Finalmente, quanto à matéria orgânica conservada e posteriormente transformada em betume, pirobetume e material carbonoso, tudo indica que durante todo o tempo de deposição e em



praticamente toda a área de sedimentação do Irati verificou-se a conservação, pelo menos parcial, da matéria orgânica depositada. A configuração das margens, imaginada pelos que já estudaram o Irati, coaduna bem com a idéia de grande extensão, propícias ao desenvolvimento da vida vegetal e animal em grande intensidade. Seriam assim, as regiões fornecedoras dos detritos orgânicos que se espalhariam posteriormente por meio das correntes aquáticas ou mesmo dos ventos. Uma vez depositados, tudo indica que a superfície limitante que separa os valores positivos e negativos do Eh deveria situar-se acima do plano água-sedimento. A ausência de seres bentônicos mais a existência de pirita vêm indicar que se formou o  $H_2S$ , que envenenou o fundo de lama e material sapropélico. Julgamos viável imaginar que de tempos em tempos houvesse movimentações de turbulência nas águas, tal como se deu durante a deposição do célebre folhelho Burgess cambriano, da Colúmbia Britânica. No nosso caso a mortandade afetaria os *Liocaris*, que em certos níveis chegam a perfazer mais de 50% da rocha.

#### 6. Ambiente geográfico de sedimentação

##### a — A principal controvérsia

Os traços gerais da paisagem já foram esboçados, tanto no presente trabalho, como em alguns dos já citados. Resta-nos discutir se esta imensa bacia de águas quase estagnadas, onde parece ter sido nequena a admissão de água provinda das terras elevadas de fundo redutor, envenenado pelo  $H_2S$  estaria ou não ligada ao mar. Não há a menor dúvida de que os 40 m da Formação Tatuí mais os 28 m (quando presentes) do Taquaral foram depositados em ambiente aquoso, tendo o mar penetrado na base do Tatuí no dizer de Almeida e Barbosa (1953). No entretanto, segundo informações verbais do Prof. Josué C. Mendes, ocorrem Conchostráceos (são todos eles de água doce) na Formação Tatuí. Por outro lado, ne-

do, nega a existência de braquiópodes acima do Irati em Irati, PR, contrariando Beurlen (1954). Segundo os nossos estudos julgamos cabível a existência de fósseis de diferentes ambientes pois, encontramos argumentos que vão a favor da comunicação desta imensa bacia com o mar, assunto a ser tratado nas linhas que se seguem.

##### b — Os principais argumentos

Antes de apresentarmos os nossos argumentos, citaremos e discutiremos a argumentação de Mendes (1961 e 1963), que opta para a existência de lagos continentais para o Irati. Seu principal argumento reside na ausência de fósseis num meio tão propício à sua conservação. Realmente, apesar da nossa intensa procura nos resíduos insolúveis dos calcários, em seções delgadas, nos folhelhos desagregados e sobre a superfície dos estratos em exame macroscópico, nada encontramos. Por outro lado, se o ambiente foi bom para a conservação, foi péssimo para a vida, quer bentônica ( $H_2S$ ), quer planctônica (salinidade baixa). Se os sedimentos de águas salobras se caracterizam pela escassez de fósseis (Pettijohn, 1957, pag. 601), com mais razão ainda as águas salobras e sapropélicas. Deve ainda ser acrescentado de que existem muitas ressalvas aos melhores fósseis indicadores de ambiente. Assim é que Krejci-Graf (1964), entre muitos exemplos, cita a existência de Asteroidea em concentração salina de 8 por mil, no Báltico. Por outro lado, cita a ocorrência de Charáceas (são características de água doce) em água com salinidade de 15 por mil. Neste trabalho Krejci-Graf dá ênfase ao estudo dos elementos traços, dos isótopos e do teor de porfirina existente na matéria orgânica dos sedimentos, quando se quer decifrar as condições físicas, químicas e físico-químicas em que foram formados. É provável que no futuro tenhamos a possibilidade material e pessoal de desenvolver tais estudos no nosso meio. Graças ao auxílio dos colegas Dr. Franco Levi e Dna. Maria Szikszay pudemos executar parte dos estudos referen-



tes a alguns elementos traços, assunto que passaremos a abordar.

#### b<sup>1</sup> — *Teor de níquel das cinzas do betume*

São vários os elementos traços que se concentram preferencialmente nos sedimentos argilosos ou na fração orgânica, graças a processos biológicos, podendo dar-se a formação de complexos metalo-orgânicos, ou por fenômenos de adsorção seletiva e posterior sedimentação (Keith e Degens, 1959). Muitos destes elementos apresentam discrepâncias, ora maiores, ora menores, quando se concentram em material marinho ou não marinho. Entre os diversos elementos traços existentes na matéria orgânica escolhemos o níquel, por ser grande a discrepância e por ser de fácil análise espectrográfica. Enquanto que nas cinzas da matéria orgânica dos sedimentos continentais dos ciclotemas pensilvanianos da Pensilvânia (E.U.A.) o teor de níquel é de 20 a 25 ppm, nas cinzas de material marinho o teor varia de 70 a 150 ppm (Degens et al. 1957).

Como o níquel acha-se ligado a proteínas, num complexo metalo-orgânico, seguimos a técnica recomendada por Dwiggins (1962), que consiste na incineração a cerca de 500° C em corrente de oxigênio, cuja função é a de oxidar totalmente a matéria orgânica. Usamos neste estudo o betume existente nas fendas e cavidades do calcário marmorizado de Assistência (pedreira do Sr. Antonio Vit), onde por vezes o betume chega a fluir, sendo fácil a sua coleta. Este betume foi solubilizado em éter, filtrado, evaporado e incinerado. O controle da temperatura foi feito com por termo-elétrico, e o oxigênio circulou durante todo o tempo de aquecimento. O resíduo grafioso foi então submetido ao exame espectrográfico, numa análise semiquantitativa. O resultado foi de mais de 80 ppm. Não temos a menor dúvida de que o valor destas cifras reside na comparação com outro material certamente terrestre, o que não pôde ser feito. Contudo, tivemos o cuidado de comparar os nossos dados com os de outros trabalhos. Um deles

é o já citado de Dwiggins, que analisa as cinzas de vários petróleos adotando a mesma técnica de Degens et al. (1957). Os valores encontrados variam desde 30 a 270 ppm, em média. Em outro trabalho, de Borchert e Krejci-Graf (1959) as cifras são menores, ao redor de 1 a 10 ppm. E' provável ter havido o superaquecimento e perda de níquel, tal como aconteceu com o material estudado por nós, antes de conhecermos a técnica proposta por Dwiggins. Os autores citados referem-se ao aumento de níquel nos sedimentos sapropélicos associados ao sílex, como é o nosso caso.

#### b<sup>2</sup> — *Teor de boro nos folhelhos*

Segundo o trabalho de Keith e Degens (1959) o boro se encontra nos minerais argilosos dos sedimentos marinhos, sendo grande a discrepância em relação aos continentais. Naqueles a quantidade é de 115 ppm, enquanto que nos continentais é de 44 ppm, como valor médio. A causa da maior concentração do boro nas argilas marinhas reside na reação destes íons existentes na água do mar com os hidrosilicatos aluminosos, que fixam o boro por adsorção.

Os resultados obtidos por meio do espectógrafo, usando-se um padrão equivalente a 112 ppm, o que foi feito pela Sra. Maria Szikszay, deu um valor aparentemente baixo, de 50 ppm. As razões deste valor baixo são as seguintes: o mineral argiloso não foi isolado da amostra, e os folhelhos usados são ricos em quartzo e muscovita. Examinamos os mesmos folhelhos analisados quimicamente, sendo que numa das amostras determinamos o valor de 30% de perda após o ataque com ácido sulfúrico aquecido (concentração de 50%). Descontando-se a sílica que não foi atacada na nossa análise, mais os sulfetos e matéria orgânica, acreditamos que os 50 ppm dosados na nossa amostra possam ser duplicados.

#### b<sup>3</sup> — *Relação dos isótopos C<sup>13</sup> e O<sup>18</sup> dos calcários*

Graças à correspondência que mantivemos com o Prof. MacKenzie Keith,



da Universidade da Pensilvânia, E. U.A. a respeito da técnica da análise do níquel, propôs-se este conceituado especialista em Geoquímica a estudar a relação dos referidos isótopos dos nossos calcários, relação esta que pode dizer do ambiente de sedimentação, independentemente da idade da rocha (Keith e Weber, 1964). Enviamos ao Prof. Keith 5 amostras do banco basal do Irati (da pedreira do Sr. Maluf, de Laranjal e de Assistência), uma da Formação Estrada Nova de Rio Claro (trata-se de um calcário onde foram encontradas "Estérias") e finalmente, outra da Formação Estrada Nova do município de Fartura. Transcreveremos parte da carta enviada por Keith, data de 25 de novembro de 1966.

"It seems to me that the most striking feature of the results is that all of the samples, except those from Rio Claro (near diabase sill) have carbon isotopic compositions consistent with marine origin. You may find it surprising that sample 68-356, from the Estrada Nova horizon of plants and *Estheria*, has a marine isotopic character. I suppose one should consider the possibility of continental forms being preserved in a near-shore marginal marine environment".

Não temos dúvida em acatar a interpretação deste emérito mestre, interpretação esta que se harmoniza bem com o nosso ponto de vista, que por sua vez se fundamenta na observação dos tópicos que estamos apresentando, mais os já citados, sobre a presença de esporos e abundância de restos de répteis, indicando a proximidade do continente e pequena profundidade das margens.

Algumas amostras possuem certa deficiência em C<sup>13</sup>. Segundo o trabalho citado (Keith e Weber, 1964, pag. 1792) a causa desta deficiência pode residir na influência do isótopo 12 fornecido pela decomposição da matéria orgânica. É provável ter-se verificado fato análogo com os nossos calcários, por vezes ricos em material betuminoso pri-

mário. Citamos este fato porque os calcários de água doce caracterizam-se pela deficiência do isótopo 13.

A análise do gráfico construído pelos citados autores, à pag. 1790, mostra claramente que se trata de um método estatístico, e os próprios autores, no resumo do trabalho, afirmam tratar-se de um método importante mas não infalível. Assim sendo, trata-se de mais um dado que se vem somar aos demais, que estão sendo enumerados.

b<sup>4</sup> — *Espículas silicosas de esponja*

Já mencionamos a referência de Almeida e Barbosa (1953) sobre as espículas marinhas po iaxônicas silicosas no tópo do Tubarão. No entanto, as espículas encontradas por Vicente Fúlfaro na Formação Estrada Nova de Angatuba e várias outras localidades, mais as espículas que encontramos no Irati, são sempre monaxônicas. Segundo a literatura especializada as espículas silicosas de água doce ocorrem a partir do jurássico. A fim de nos certificarmos da natureza destas espículas, enviamos um fragmento do siltito avermelhado do Irati de Angatuba (onde é grande a quantidade de espículas) ao Prof. Dr. Norman Herz, atualmente no Geological Survey dos E.U.A. Este professor e amigo, não encontrando no referido departamento quem pudesse classificá-las, muito gentilmente enviou a um dos grandes especialistas no assunto, o Prof. Dr. Robert M. Finks, que remeteu o resultado do seu exame. Segundo ele nada se pode afirmar sobre o ambiente, apesar dos *Spongillidae* serem conhecidos somente a partir do jurássico. Mais adiante diz não conhecer nenhum registro de esponja de água doce do permiano.

b<sup>5</sup> — *Dolomitização primária*

O dolomito primário existente no Irati indica ter havido condições de alta salinidade. (Deffeyes et al., 1965, Pettijohn, 1957, pag. 424, e Fairbridge, 1963, pag. 456). O magnésio concentrado graças aos processos de evaporação reage com o calcário previamente depo-



sitado, dando origem às rochas dolomíticas primárias ou penecontemporâneas. As soluções enriquecidas em magnésio e outros sais tornam-se mais densas e podem penetrar a profundidades de muitos metros, dependendo das condições de percolação. Tal foi observado por Defeys et al. em Bonaire, como já referimos anteriormente. A ausência de evaporitos e gipsita, que costumam associar-se a dolomitos primários, vem fortalecer ainda mais a nossa hipótese, sobre o suprimento contínuo de água do mar que aos poucos se concentrava fornecendo o magnésio ativo na dolomitização.

b<sup>6</sup> — *Ausência de indícios de evaporação*

Num clima pouco chuvoso, numa bacia fechada, numa área extensa, sujeita à evaporação, seria de esperar a existência de freqüentes gretas de contração, bem como, de evaporitos em larga escala, aspectos inexistentes na Formação Irati. A melhor explicação, ao nosso ver, reside na existência de uma comunicação com o mar. Além do clima quente, a paisagem plana certamente favorecia a existência de ventos fortes, fatores que fazem aumentar a evaporação. Tais eventos devem ter-se verificado nos lagos miocênicos do Colorado e Utah (Formação Green River), onde se formaram sedimentos betuminosos associados a camadas de evaporitos, segundo descrição de Bradley (1948).

b<sup>7</sup> — *Alcalinidade da água*

Já referimos sobre o caráter alcalino das águas da bacia. Analisando-se o gráfico de Krumbein e Garrels (1952, pag. 26) não se tem a menor dúvida do valor elevado do pH em meio redutor. Lembramos que a água doce costumam associar-se depósitos húmicos, cuja acidez não coaduna com as condições de sedimentação do Irati, fato que se apoia no trabalho de Twenhofel (1939, pag. 1106). Assim sendo, a alcalinidade do meio mais as condições propícias à formação de substâncias betuminosas, muito embora nada comprovem, favorecem a idéia da penetração da água do mar,

tornando o meio alcalino. Outras analogias são encontradas no trabalho de Sujkowski (1958), que descreve vários aspectos relativos à formação do sílex singenético marinho, aspectos estes, muito semelhantes aos que observamos no Irati.

Por outro lado, sabemos da existência generalizada de sedimentos pirobetuminosos de água doce e de sílex em calcários continentais, como tivemos a oportunidade de observar em Itaboraí, Estado do Rio de Janeiro. Não temos a menor dúvida de que todos os argumentos apresentados estão longe de serem conclusivos, mas que em conjunto assumem importância, fortalecendo-se mutuamente.

7. *Considerações finais*

Uma vez apresentados os argumentos que acabamos de expor, resta-nos esboçar os traços gerais da paisagem hipotética que reinava na ocasião em que se depositaram as rochas da Formação Irati. A bacia toda, incluindo as terras circundantes, caracterizava-se pela monotonia e extensão da planície. A vegetação certamente era luxuriante, tal a abundância de esporos. Twenhofel (1939), ao explicar as condições de formação dos folhelhos negros, dá ênfase à existência de áreas aplainadas extensas e em vias de subsidência, bem como à existência de lagoas marginais com estreita ligação ao mar. Cita ainda este famoso cientista as espessuras pequenas das camadas. Os três tópicos citados se enquadram bem no caso do Irati.

Já referimos que a bacia se comunicava com o mar, em local ainda não conhecido por falta de dados. Sendo geométrico o decréscimo da concentração dos restos de organismos marinhos com a distância do local de acesso, torna-se fácil explicar a ausência de fósseis marinhos. Tais organismos, levados pelas marés ao interior da bacia, morreriam logo pela baixa salinidade ou pela toxidez da água estagnada no fundo, fato óbvio e citado por Twenhofel (1939).

Quanto ao sentido das correntes aquáticas, lembramos a constância da o-



rientação das marcas onduladas e das marcas de erosão subaquática encontradas entre Piracicaba e Laranjal. A direção da correnteza parece coincidir com a da antiga costa, e transversal à direção da declividade. Tal situação é análoga àquela estudada por Murphy e Schlange (1962) na bacia cretácea do Recôncavo Bahiano. É possível que a movimentação da água tenha transportado em larga escala os restos de esponja, cujas espículas foram espalhadas pela água corrente por grande parte da bacia (segundo observações de Fúlvaro, 1967, não ocorrem na região central do Paraná nem em Santa Catarina).

A fim de explicar a existência de sedimentos típicos de ambiente oxigenado, isentos de substâncias de origem orgânica, imaginamos que em determinados locais tenha se verificado a penetração lenta, mas contínua, de água doce vinda da região continental. Beurlen (1955), muito a propósito, já afirmara que a sedimentação sapropélica teria obedecido a variações geográficas dentro da própria bacia. A maior oxigenação apenas destruiu a matéria orgânica, e a sedimentação contínua impediu a laminação, caráter peculiar aos sedimentos argilosos de toda a formação estudada. Lembramos aqui do interesse da procura de microfósseis nos testemunhos de sondagem que tenham atingido o Irati. Lembramos ainda do interesse do estudo

da variação do conteúdo de boro nos folhelhos da citada formação em seu conjunto.

Passados alguns milhões de anos mudou-se definitivamente o clima cíclico que caracterizou o Irati. As épocas quentes não mais voltaram e as águas passaram a mais oxigenadas, sem que se saiba também o porquê. Os répteis primitivos, tão abundantes outrora, não resistiram ao abaixamento da temperatura. A subsidência continuou no mesmo ritmo, e as terras emersas provavelmente se reativaram no seu movimento ascendente, pois, aumentam-se os sedimentos clásticos em espessura e também em granulização, após o tempo em que se sedimentou o Irati. Tais foram as condições em que se depositaram os sedimentos posteriores ao Irati, ou seja, a Formação Estrada Nova, cuja litologia às vezes se assemelha à dos fácies oxigenados que ocorrem esparsos dentro do Irati.

Muitos milhões de anos depois iniciou-se o movimento ascendente generalizado de todo o setor meridional do escudo brasileiro. A Formação Estrada Nova passa a sofrer o desgaste erosivo, patenteado por extensa camada de brecha existente no contacto com o Grupo São Bento. Desta maneira soergueram-se definitivamente as terras acima do nível do mar, para mais tarde formar-se o maior dos desertos do mundo, de todos os tempos da história da Terra.



## XII — CONCLUSÕES

1. A Formação Irati que aflora no Estado de São Paulo caracteriza-se por um banco dolomítico junto à base, ou muito próximo dela, tendo por cima estratos decimétricos alternados de folhelho preto ocasionalmente pirobetuminoso e calcário dolomítico muito comumente silicificado. A eventual ausência do banco pode ser atribuída à maior profundidade do ambiente (como na região central da bacia), ou à penetração de água fluvial que modificaria localmente as condições de precipitação da lama calcária.
2. Na faixa compreendida entre Limeira e Laranjal, Estado de São Paulo, o Irati se apresenta com a direção N 35° E, mergulhando de 1° para NW.
3. O betume existente nas camadas calcárias da região central do Estado de São Paulo é em grande parte singenético, conferindo a elas uma coloração castanha. Não são encontradas substâncias betuminosas nos folhelhos, mas sim, pirobetuminosos, quando existentes.
4. Nos folhelhos do Irati da região central do Estado de São Paulo acha-se presente a montmorillonita, sendo provável que constitua o mineral argiloso mais comum.
5. A Formação Irati ocorre em praticamente toda a extensão da Bacia do Paraná, consistindo num delgado pacote cuja espessura varia de 20 a 40 metros. Caracteriza-se por folhelhos escuros (por vezes pirobetuminosos) e rochas calcárias mais comumente dolomitizadas. Tanto os folhelhos como os calcários acham-se acompanhados de nódulos, lâminas ou camadas de sílex e de pirita finamente subdividida.
6. Os rumos dos mergulhos das camadas do Irati dirigem-se sempre para o interior da bacia do Paraná, de onde concluímos da existência pretérita de um único lago, e não de diversos lagos isolados.
7. Dentre as deformações tectônicas predominam as faixas normais.
8. Dentre as deformações atectônicas predominam aquelas resultantes de deslizamentos, que determinaram a formação de brechas delgadas (geralmente em 3 níveis) no banco calcário basal, existentes na faixa central do Estado de São Paulo e na região norte do Estado do Paraná.
9. As diversas formas de sílex que ocorrem em praticamente toda a formação estudada (inclusive nas ocorrências profundas, testemunhas), têm várias origens, a saber: singenética, metassomática, a partir de soluções provavelmente relacionadas ao magmatismo basáltico e ocasionalmente de origem climática. O sílex singenético pode ter-se originado da dissolução e posterior precipitação de espículas silicosas de esponja.
10. O fenômeno da dolomitização processou-se, pelo menos em parte, logo após a deposição da lama calcária. Além desta dolomitização singenética é possível também ter-se processado a dolomitização epigenética, ou seja, após a diagênese.
11. As intrusões de diabásio exerceram modificações na textura das rochas calcárias (aumento na granulagem), sendo relativamente rara a neo-formação de minerais pe-



- lo metamorfismo. Formaram-se por este processo o diopsídio, a grafita, a apofilita e a hidromagnesita. Nos folhelhos, as únicas transformações observadas consistiram na mudança de cor (de preta para esverdeada) e na perda da folheação.
12. Os novos fósseis encontrados na Formação Irati consistem em esporos alados de gimnospermas, de espículas silicosas monoaxônicas de esponja e de apêndices de artrópodes no betume.
  13. A litificação da lama calcária processou-se em alguns casos longo tempo depois da deposição (fato patenteado pelas estruturas diapíricas em pequena escala), enquanto que em outros casos, logo após a deposição (fato patenteado pelo estudo das brechas calcárias intraformacionais).
  14. As rochas calcárias do Irati são praticamente isentas de impurezas argilosas. Predominam largamente as impurezas de calcedônia, sendo na maioria das vezes desprezível a contribuição de clásticos. Estes, por sua vez, consistem de quartzo, muito comumente acompanhado de feldspatos frescos, por vezes em porcentagem elevada.
  15. A granulação das rochas calcárias do Irati costuma ser extremamente fina. Ocorrem com relativa frequência calcarenitos de grãos esféricos, ocasionalmente de textura oolítica.
  16. Deveria ter imperado clima quente e pouco chuvoso durante a deposição da base do Irati. Posteriormente passaria a frio e chuvoso alternado com épocas quentes e secas.
  17. Reinou a tranquilidade tectônica durante a deposição de todo o Grupo Passa Dois.
  18. O pH do ambiente deveria ter sido ao redor de 8 e o potencial de oxidação — redução (Eh) ao redor de -0,3, o que se infere a partir da litologia, da associação mineralógica e da matéria orgânica conservada nos folhelhos.
  19. As águas do lago movimentaram-se por longo tempo de nordeste para sudoeste, nas margens situadas do lado nordeste da bacia.
  20. Este imenso lago comunicava-se com o mar, não sabemos em que região.
  21. Muito embora predominassem as condições redutoras por quase toda a bacia, eventualmente, em certos locais raros e esparsos, as águas eram oxigenadas. Tal mudança de condições verificou-se tanto no espaço geográfico como no tempo geológico, do que resultou um fácies semelhante ao da Formação Estrada Nova dentro da Formação Irati.



## BIBLIOGRAFIA

- Almeida, F. F. M. e Barbosa, O. (1953), Geologia das quadrículas de Piracicaba e Rio Claro, Estado de São Paulo: Div. Geol. Min., Bol. 143, Rio de Janeiro.
- Almeida, F. F. M. (1954), Geologia do centro-leste matogrossense: Div. Geol. Min. Bol. 150, Rio de Janeiro.
- Amaral, S. E. (1961), Silicificação intersticial de arenitos de Sergipe (Série Barreiras) e de Varnhagen, SP (Série Itararé): Bol. Soc. Bras. Geol., vol. 10, n.º 1, pp. 79-99, São Paulo.
- Amaral, S. E. (1965), Nova ocorrência de rocha moutonnée em Salto, SP: Bol. Soc. Bras. Geol., vol. 14, pp. 71-82, São Paulo.
- Anderson, R. Y. (1964), Varve calibration of stratification: em Symposium on Cyclic Sedimentation: Bol. 169, State Geol. Survey Kansas, pp. 1-20, E.U.A.
- Barbosa, O. e Gomes, F. A. (1958), Pesquisa de Petróleo na bacia do rio Corumbataí, Estado de São Paulo: Div. Geol. Min., Bol. 171, Rio de Janeiro.
- Bathurst, R. G. C. (1959), Diagenesis in Mississippian calcilutites and pseudobreccias: Jour. Sed. Petr., vol. 29, n.º 3, pp. 365-376.
- Beurlen, K. (1954), Horizontes fossilíferos das camadas Serra Alta do Paraná: Div. Geol. Min., Bol. 152, Rio de Janeiro.
- Beurlen, K. (1955), As Formações gondwânicas do sul do Estado do Paraná: Div. Geol. Min., Bol. 153, Rio de Janeiro.
- Bischoff, von G. (1957), Stratigraphie, Tektonik und Magmatismus des Perms und Mesozoikums in Gebiet von Jacarézinho, Nordparaná: Geol. Lands., Beihefte Geol., J. 25, pp. 91-100, Alemanha.
- Borchert, H. e Krejci-Graf, K. (1959), Spurenmamente in Sedimenten und ihre Derivation: Bergbauwissenschaften, n.º 130, Senderdruck aus Bergb.-Wiss. 6, Heft 9/10, Seite 205-215, Alemanha.
- Bradley, W. H. (1929), The varves and climate of the Green River Epoch: U.S.G.S., Prof. Paper 158, pp. 87-110, E.U.A.
- Bradley, W. H. (1948), Limnology and the Eocene lake of the Rocky Mountain Region: Bol. Geol. Soc. Am., vol. 59, n.º 7, pp. 635-648.
- Caorsi, J. H. e Goñi, J. (1958), Geologia Uruguaya: Inst. Geol. del Uruguay, Bol. 37, Montivideo.
- Chilingar, G. V., Bissell, H. J. e Wolf, K. H., (1967), Diagenesis of carbonate rocks: em Developments in Sedimentology, Ed. por Larsen e Chilingar, Elsevier Publ. Co, N.Y.
- Cloud Jr., P. E. (1962), Environment of calcium carbonate deposition West of Andros Island Bahamas: Geol. Sur. Prof. Paper n.º 350.
- Collon, A. (1897), Le Pétrole dans les environs du Mont de Bofete et de Porto Martins, dans l'Etat de São Paulo: Ed. por I.G.G., Secr. Agr. Est. de São Paulo, 1970.
- Deffeyes, K. S., F. J. Lucia e P. K. Weyl, (1965), Dolomitization of recent and Plio-Pleistocene sediments by marine evaporite waters on Bonaire, Netherlands Antilles: in Dolomitization and Limestone Diagenesis, A Symposium, Soc. Ec. Paleont. and Min. Sp. Publ. n.º 13.
- Degens, E. T., Williams, E. G. e Keith, M. L. (1957), Environmental studies of carboniferous sediments. Part. I: Geochemical criteria for differentiating marine and fresh-water shales: Bol. Am. Ass. Petr., Geol., vol. 41, pp. 2427-2455.
- Degens, E. T. e S. Epstein, (1962), Relationship between  $O^{18}/O^{16}$  ratios in coexisting carbonates, cherts and dolomites: Am. Ass. Petr. Geol., vol. 46, p. 534.
- Delaney, P. J. V. e Formoso, M. L. (1960), Ocorrência de uma chamada bentonita no Município de São Gabriel, Rio



- Grande do Sul, Bol. n.º 2, Escola de Geologia, pp. 5-13, Pôrto Alegre, RS.
- Dwiggins Jr., C. W. (1962), Quantitative determination of trace metals in crude oils by X-ray spectrography: Report of Investigation, Bureau of Mines, 6039 U. S. Depart. of the Interior, E.U.A.
- Fairbridge, R. W. (1963), The importance of limestone and Ca/Mg content to Palaeoclimatology: em Problems in Palaeoclimatology: Interscience Publ., John Wiley & Sons, Ltd., N. Y.
- Felicissimo, Jr., J. (1940), Xistos pirobetuminosos e arenitos asfálticos no Estado de São Paulo: Inst. Geogr. e Geol., Secr. Agric., Bol. 27, pp. 275-280, São Paulo.
- Felicissimo, Jr., J. (1952), Histórico das pesquisas de petróleo no estado de São Paulo: O I.G.G., Inst. Geogr. e Geol. Secr. Agric., Revista vol. X, n.º 4, pp. 262-275, São Paulo.
- Formoso, M. L. e Figueiredo Filho, P. M. (1962), Estudo sedimentológico do Grupo Guatá (R.G.S.) (Nota preliminar): Resumo de comunicação, XVI Congr. Bras. Geol., Recife.
- Freitas, R. O. (1951), Ensaio sobre a tectônica moderna do Brasil: Fac. Fil., Ciên. Letr. da Univ. de São Paulo, Bol. 130, (Geologia n.º 6), São Paulo.
- Friedman, S. A. (1954), Low temperature authigenic magnetite: Econ. Geol., vol. 49, n.º 1, pp. 101-102.
- Fróes Abreu, S. (1946), O Irati a suas relações com o problema do petróleo: Min. e Met., vol. X, n.º 60, pp. 267-279, Rio de Janeiro.
- Fróes Abreu, S. (1962), Recursos Minerais do Brasil, 2.º volume: Ministério da Indústria e Comércio, Ins. Nac. de Tecnologia, Rio de Janeiro.
- Fulfaro, V. J. (1967), Contribuição à geologia da região de Angatuba, Estado de São Paulo, Tese para concurso de doutoramento apresentada à Fac. de Fil., Ci. e Letr. da U.S.P.
- Guimarães, J. E. P. (1952), Calcário no Estado de São Paulo. Inst. Geogr. e Geol. Bol. 32, Secr. Agric., São Paulo.
- Gutmans, M. (1949), Tectônica da bacia do Paraná: Min. e Met., vol. XIV, n.º 80, pp. 47-49, Rio de Janeiro.
- Hallan, A. (1964), Origin of the limestone-shale rhythm in the Blue Lias of England: a composite theory: Jour. Geol., vol. 72, n.º 2, pp. 157-169.
- Harrington, H. J. (1950), Geología del Paraguay Oriental: Ministério de Educacion, Univ. de Buenos Aires, Fac. de Cie. Exactas, Fisicas e Naturales, Buenos Aires, Argentina.
- Hills, E. S. (1963), Elements of Structural Geology, John Wiley & Sons, Inc, N. Y.
- Holmes, A. (1921), Petrographic Methods and Calculations: Thomas Murby & Co., Londres.
- Huene, F. von (1941), A idade permiana inferior de tôdas as camadas contendo mesossáurios, trad. por Gerson de Faria Alvin: Min. e Met., vol. VI, n.º 32, pp. 64-68, Rio de Janeiro.
- Jizba, K. M. M. (1962), Late Paleozoic bisaccate pollen from the United States midcontinent area: Jour. Paleont., vol. 36, n.º 5, pp. 871-887.
- Kegel, W. (1965), Rastos de Biloties no Devoniano Médio do Piauí: Div. Geol. e Min., Notas Preliminares, n.º 122, Rio de Janeiro.
- Kegel, W. (1967), Rastos do Grupo dos Biloties da Formação Irati, São Paulo: Div. Geol. e Min., Notas Preliminares, n.º 136, Rio de Janeiro.
- Keith, M. L. e Degens, E. T. (1959), Geochemical Indicators of Marine and Fresh-Water Sediments: em Researches in Geochemistry, pp. 38-61, Ed. por Philip H. Abelson, John Wiley & Sons, Inc., N. Y.
- Keith, M. L. e Weber, J. N. (1964), Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils: Geoch. et Cosmoch. Acta, vol. 28, pp. 1787-1816.
- Keller, W. D. (1941), Petrography and origin of the Rex Chert: Bol. Geol. Soc. Am., vol. 52, n.º 8, pp. 1278-1298.
- Keller, W. D. (1964), Processes of origin and alteration of clay minerals: in Soil Clay Mineralogy, A Symposium, ed. por Rich, C. I., e Kunze, G. W., The Univ. of North Caroline, Press Chapel Hill.
- Krejci-Graf, K. (1963), Origin of oil: Geophysical Prospecting, vol. XI, n.º 3, pp. 244-275, Holanda.



- Krejci--Graf, K. (1964), Geochemical Diagnoses of Facies: Proceedings of Yorkshire Geol. Soc., vol. 34, n.º 23, pp. 469-521.
- Krumbein, W. C. e Garrels, R. M. (1952), Origin and classification of chemical sediments in terms of pH and oxidation-reduction potentials: Jour. Geol., vol. 60, pp. 1-33.
- Krumbein, W. C. e Sloss, L. L. (1953), Stratigraphy and Sedimentation: W. H. Freeman and Co., Califórnia.
- Landim, P. M. B. (1965), Deformações por compactação em sedimentos da Formação Irati: Bol. Soc. Bras. Geol., vol. 14, pp. 53-59, São Paulo.
- Landim, P. M. B. (1967), O Grupo Passa Dois (P) na bacia do rio Corumbataí, Tese para concurso de doutoramento apresentada à Fac. de Fil., Ci. e Letr. da U.S.P.
- Leinz, V. (1937), Observações nos contatos de diabásio com sedimentos: Serv. Geol. e Min., Notas preliminares e estudos, n.º 7, pp. 13-16, Rio de Janeiro.
- Leinz, V. (1937 b), Estudos sobre a glaciação Permo-carbonífera do Sul do Brasil: Serv. Fom. Prod. Min., Bol. n.º 21, Rio de Janeiro.
- Leinz, V. (1938), A silicificação nos sedimentos gondwânicos no sul do Brasil e sua origem: Serv. Fom. Prod. Min., Publicação especial n.º 5, Rio de Janeiro.
- Maack, R. (1947), Breves notícias sobre a geologia dos estados do Paraná e Santa Catarina: Arquivos Bio. e Tecnol., Inst. Bio. e Pesq. Tecnol., vol. II, pp. 63-154, Paraná.
- Maack, R. (1952), O desenvolvimento das camadas gondwânicas do sul do Brasil e suas relações com as formações Karoo da África do Sul: Arquivos Bio. e Pesq. Tecnol., vol. VII, pp. 201-253, Paraná.
- Mac Gregor, J. H. (1908), Mesosaurus Brasiliensis nov. sp. do Permiano do Brasil: Com. Estudos das Minas de Carvão de Pedra, Relatório Final, parte II, pp. 302-336, Rio de Janeiro.
- Maia, J. (1961), Relatório Final da exploração da área a NW de São Mateus do Sul — Jazida Ten. Kurt Wolff: Relatório inédito da Petrobrás, Petróleo Brasileiro, S.A., Superint. de Industr. do Xisto.
- Matthews, R. K. (1966), Genesis of recent lime mud in Southern British Honduras: Jour. Sed. Petr., vol. 36, n.º 2, pp. 428-454.
- Meilenz et al. (1950), in Wahlstrom, E. E., Petrographic Mineralogy, John Wiley & Sons, Inc., N. Y.
- Mendes, J. C. (1961), Algumas considerações sobre a estratigrafia da bacia do Paraná: Bol. Paranaense Geogr. n.º 4 e 5, p. 3-33.
- Mendes, J. C. (1963), Novos aspectos da estratigrafia das camadas eogondwânicas da bacia do Paraná: Eng. Min. Met., vol. 38, n.º 226, pp. 189-192, Rio de Janeiro.
- Mendes, J. C., Fulfaro, V. J., Amaral, S. E. e Landim, P. M. B. (1966), A Formação Irati (Permiano) e fácies associadas: Bol. Soc. Bras. Geol., vol. 15, n.º 3, pp. 55-69, São Paulo.
- Mendes, J. C. (1967), Passa Dois Group, publ. em Problems in Brazilian Gondwana Geology: Intern. Symp. on the Gondwana Strat. and Paleont., Cons. Nac. de Pesq., Curitiba, PR. Brasil.
- Mezzalana, S. (1952), Clarkecaris, novo gênero de crustáceo Syncarida do Permiano: Bol. Soc. Bras. Geol., vol. 1, n.º 1, São Paulo.
- Mezzalana, S. (1954), Novas ocorrências de crustáceos fósseis da Formação Irati do Sul do Brasil: em Paleontologia do Paraná, ed. por F. W. Lange, Vol. Comemoração 1.º Centenário Est. Paraná, pp. 165-173.
- Mezzalana, S. (1957), Ocorrências fossilíferas novas da Série Passa Dois na região de Limeira-Rio Claro-Piracicaba: Bol. Soc. Bras. Geol., vol. 6, n.º 2, pp. 37-58, São Paulo.
- Mezzalana, S. (1964), Grupo Estrada Nova: em Geologia do Estado de São Paulo, Bol. 41, Inst. Geogr. Geol., Secr. Agric., São Paulo.
- Moraes Rego, L. F. (1930), A Geologia do Petróleo no Estado de São Paulo: Serv. Geol. e Min., Bol. 46, Rio de Janeiro.
- Moraes Rego, L. F. (1940), A Geologia do Estado de São Paulo: Bol. do D.E.R., Vol. VI, pp. 25-47, São Paulo.
- Moraes Rego, L. F. (1945), Nota sobre a localização de uma sondagem no Estado



- de São Paulo: Geol. e Metalurgia, Bol. 1, pp. 27-47, Esc. Politécnica da Univ. de São Paulo.
- Murphy, M. A. e Schlanger, S. O. (1962), Sedimentary structures in Ilhas and São Sebastião Formations (Cretaceous), Recôncavo Basin, Brazil: Bol. Am. Ass. Petr. Geol., vol. 46, n.º 4, pp. 457-477.
- Niggli, P. (1954), Rocks and Mineral Deposits: W. H. Freeman and Co., San Francisco, E. U. A.
- Oliveira, E. P. (1927), Geologia e recursos minerais do Estado do Paraná: Serv. Geol. e Min., Monografia n.º VI, Min. Agric., Ind. e Com., Rio de Janeiro.
- Oliveira, E. P. (1940), História da Pesquisa de Petróleo no Brasil: (obra póstuma) Min. da Agricultura, Rio de Janeiro.
- Oliveira, F. P. (1889), Reconhecimento geológico do vale do Rio Paranapanema: transcrito na Revista O I. G. G., Ano VIII, n.º 3, pp. 219-241, Secr. Agric. São Paulo.
- Oppenheim, V. (1934 a), Nota sobre o sílex (chert) no sul do Brasil. Acad. Bras. Sci., Annaes, vol. VI, pp. 83-87, Rio de Janeiro.
- Oppenheim, V. (1934 b), Rochas gondwânicas e geologia do petróleo do Brasil Meridional: Serv. Fom. Prod. Min., Bol. 5, Rio de Janeiro.
- Oppenheim, V. e Melampy, M. C. (1935), Sobre a tectônica da área São Pedro-Xarqueada: Minist. Agric., Bol. 24, pp. 69-80, Rio de Janeiro.
- Pettijohn, F. J. (1957), Sedimentary Rocks, 2.a ed.: Harper & Brothers, N. Y.
- Pia, J. (1933), Die Rezenten Kalksteine: Akademische Verlagsgesellschaft M. B. H. Leipzig, Alemanha.
- Pittman Jr., J. S. (1959), Silica in Edwards Limestone, Travis County Texas: em Silica in Sediments, Symposium ed. por H. Andrew Ireland, Soc. Econ. Paleont. and Mineralogists, Sp. Public. n.º 7, Tulsa, Oklahoma, E. U. A.
- Plumley, W. J. et al. (1962), Energy index for limestone interpretation and classification: in Classification of Carbonate Rocks, pp. 85-107, A Symposium, Am. Ass. Petr. Geol., Ed. por W. E. Ham.
- Powers, S. e Clap, F. G. (1932), Nature and origin of occurrences of oil, gas and bitume in igneous and metamorphic rocks: Bol. Am. Ass. Petr. Geol., vol. 16, n.º 8, pp. 719-726.
- Putzer, H. (1955), Geologia da Folha de Tubarão, Estado de Santa Catarina: Div. Fom. Prod. Min., Bol. 96, Rio de Janeiro.
- Rich, J. L. (1951), Three critical environments of the deposition, and criteria for recognition of rocks in each of them: Bol. Geol. Soc. Am., vol. 62 n.º 1, pp. 1-20.
- Rich, J. L. (1953), Problems in Brazilian Geology and Geomorphology-suggested by reconnaissance in summer of 1951: Fac. Fil., Ciên. Letr. da Univ. de São Paulo, Bol. 146 (Geologia n.º 9), São Paulo.
- Recha-Campos, A. C. e Farjallat, J. E. S. (1967), The Tubarão Group in the Brazilian portion of the Paraná Basin: in Problems in Brazilian Gondwana Geology, International Symposium on the Gondwana Stratigraphy and Palaeontology, Curitiba, Paraná.
- Rogers, A. F. (1924), Mineralogy and petrography of fossil bone: Bol. Geol. Soc. Am., vol. 35, pp. 535-556.
- Rubey, W. W. (1930), Lithologic studies of fine-grained Upper Cretaceous sedimentary rocks of the Black Hills region. Prof. Paper 165, U. S. G. S., pp. 1-54.
- Sanford, R. M. e Lange, F. W. (1960), Basin-study approach to oil evaluation of Paraná Miogeosyncline, South Brazil: Bol. Am. Ass. Petr. Geol., vol. 44, n.º 8, pp. 1316-1370.
- Sena Sobrinho, M. (1942), Sondagens para pesquisa de folhelho piro-betuminoso na Estância Santa Cruz — São Gabriel: Secr. de Est. dos Neg. da Agric. Ind. e Com., Bol. 95, Rio Grande do Sul.
- Shrock, R. R. (1948), Eequence in Layered Rock: McGraw-Hill Book Co., Inc. N. Y.
- Siever, R. e Scott, R. A. (1959), Organic geochemistry, editado por I. A. Breger, The MacMillan Co., N. Y.
- Siever, R. (1962), Silica solubility, 0º-200º C., and the diagenesis of siliceous sediments: Jour. of Geol., vol. 70, n.º 2, pp. 127-150.



- Sujkowski, Zb. L. (1958), Diagenesis: Bol. Am. Ass. Petr. Geol., vol. 42, n.º 11, pp. 2692-2717.
- Tarr, W. A. (1917), Origin of the chert in the Burlington Limestone: Am. Jour. Sci., vol. XLIV, n.º 264, pp. 409-452.
- Teixeira, E. A. (1938), Feltão pirobetuminoso de São Gabriel, R. G. do Sul: Min. e Met., vol. III, n.º 13, pp. 53-54.
- Twenhofel, W. H. (1919), The chert of the Wreford and Foraker Limestones along the State Line of Kansas and Oklahoma: Am. Jour. Sci., Vol. XLVII, n.º 282, pp. 407-429.
- Twenhofel, W. H. (1939), Environments of origin of black shales: Bol. Am. Ass. Petr. Geol., Vol. 23, n.º 8, pp. 1178-1198.
- Warne, S. St. J. (1962), A quick field of laboratory staining scheme for the differentiation of the major carbonate minerals: Jour. Sed. Petr., vol. 32, n.º 1, pp. 29-38.
- Washburne, C. W. (1930), Petroleum Geology of the State of São Paulo — Brasil: Com. Geogr. Geol., Bol. 22, São Paulo.
- Weller, J. M. (1959), Compaction of Sediments: Bol. Am. Ass. Petr. Geol., Vol. 43, n.º 2, pp. 273-310.
- White, I. C. (1908), Relatório Final da Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra do Brasil, Rio de Janeiro.



