UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC

30900005673

TRATAMENTO DE DADOS QUÍMICOS E
PETROGRÁFICOS DE ROCHAS ALCALINAS DO
BRASIL MERIDIONAL

Rosa Maria Cotrim Soares

Orientador: Prof. Dr. Franco Levi

TESE DE DOUTORAMENTO

COMISSÃO EXAMINADORA

	nome	ass.
Presidente:	Dr. F. Levi	
Examinadores:	Dr. P.M.B. Landim	
	Dr. P.A. Morettin	
	Dr. H. Born	
	Dr. H. Ulbrich	

São Paulo
1984

"... it is true that randomness, or anarchy, is in some measure the law of nature and that some of the order we think we see is a dream in our own minds. As geologists we are in a better position than most to set limits to the anarchy, and also limits to the dream." (Krauskopf, 1968)*

* "... é verdade que a aleatoriedade, ou a anarquia, é de certa forma a lei da natureza e que parte da ordem que cremos ver é um sonho em nossas mentes. Como geólogos estamos em posição melhor que a dos outros para estabelecer limites à anarquia, assim como ao sonho."

ÍNDICE

	Pág.
AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
INTRODUÇÃO	001
CAPÍTULO 1. OS DADOS	
1.1. Apresentação	004
1.2. Amostra e população	047
1.3. Plano amostral	052
1.4. Fontes de erros	054
CAPÍTULO 2. CÁLCULOS E GRÁFICOS DA PETROLOGIA	
2.1. Diagramas de Variação	059
2.1.1. Diagrama Sílica/Álcalis	062
2.1.2. Diagrama R/Si	073
2.1.3. Diagramas QLM	075
2.1.4. O número de Niggli <u>qz</u>	091
2.1.5. Diagrama ID/SiO ₂	094
2.1.6. Sistema Q - Ne - Kp	099
2.1.7. Os diagramas triangulares	102
2.2. As Análises Modais e o Esquema Classifica <u>tório</u>	110
2.2.1. Os duplos triângulos QAPF	112
2.3. Comparação entre gráficos normativos e mo <u>dais</u>	118

CAPÍTULO 3. ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIANTE

3.1. Análise Fatorial

3.1.1. Histórico e conceitos 141

3.1.2. Aplicação 147

3.1.2.1. Resultados para o conjunto das rochas alcalinas.. 148

3.1.2.2. Para os basaltos 154

3.1.2.3. Maciço de Iporá 154

3.1.2.4. Maciço de São Sebastião . 154

3.1.2.5. Maciço de Poços de Caldas 154

3.1.2.6. Maciço de Tunas 157

3.1.2.7. Maciço de Itapirapuã 157

3.1.2.8. Para as rochas alcalinas em geral - elementos traços 157

3.1.3. Discussão dos Resultados 157

3.2. Análise de Agrupamento ("Cluster Analysis") 165

3.2.1. Conceitos 165

3.2.2. Aplicação 168

3.3. Análise Discriminante 173

3.3.1. Conceitos 173

3.3.2. Aplicação 176

3.3.2.1. Amostras separadas pelo coeficiente de correlação através da Análise de Agrupamento 177

3.3.2.2. Amostras separadas pelo coeficiente de distância através da Análise de Agrupamento 179

3.4. A integração da estatística multivariante com os cálculos petrológicos 184

	Pág.
CAPÍTULO 4. ANÁLISE ESTATÍSTICA UNIVARIANTE	
4.1. Conceitos básicos	189
4.2. Cálculo das estatísticas descritivas para as rochas alcalinas	194
4.3. Os histogramas e as curvas de distribuição de frequência dos elementos químicos.	209
4.4. Os histogramas modais	232
4.5. A interação da estatística univariante com os cálculos petrológicos	240
CAPÍTULO 5. CONTRIBUIÇÃO À PETROGÊNESE	
5.1. A evolução do conceito de Província Petrográfica Alcalina	243
5.2. As (sub)Províncias Alcalinas do Brasil Meridional	246
5.2.1. Província de Poços de Caldas	246
5.2.2. Província Rio Verde-Iporá	249
5.2.3. Província do Arco de Ponta Grossa.	252
5.2.4. Província de Ipanema	258
5.2.5. Província Serra do Mar	259
5.3. Origem das associações petrográficas	262
CAPÍTULO 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	
6.1. Capítulo 1	276
6.2. Capítulo 2	279
6.3. Capítulo 3	284
6.4. Capítulo 4	290
6.5. Capítulo 5	295
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	299

ÍNDICE DAS FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1 - Mapa de localização dos Maciços Alcalinos do Brasil Meridional	008
FIGURA 2 - Mapa geológico e amostral do Maciço Alcalino de Itapirapuã	010
FIGURA 3 - Mapa geológico e amostral do Maciço Alcalino de Tunas	012
FIGURA 4 - Mapa geológico e amostral do Maciço Alcalino de Juquiá	014
FIGURA 5 - Mapa geológico e amostral do Maciço Alcalino de Santa Fé	015
FIGURA 6 - Mapa geológico e amostral do Maciço Alcalino de Monte do Trigo	017
FIGURA 7 - Mapa geológico e amostral do Maciço Alcalino de Iporã	022
FIGURA 8 - Mapa geológico e amostral do Maciço Alcalino de Jacupiranga	025
FIGURA 9 - Digrama $\text{SiO}_2/\text{Álcalis}$ para as rochas alcalinas do Brasil Meridional	063
FIGURA 10 - Digrama $\text{SiO}_2/\text{Álcalis}$ para as rochas basálticas da Bacia do Paraná	064

FIGURA 11 - Mapa de localização dos pontos segundo $\text{SiO}_2/\text{Álcalis}$ para as rochas alcalinas do Brasil Meridional	065
FIGURA 12 - Mapa de isovalores dos dados em relação a quartzo e nefelina normativo	067
FIGURA 13 - Mapa de isovalores dos dados em relação a I.D.	068
FIGURA 14 - Digrama $\text{SiO}_2/\text{Álcalis}$ mostrando o limite composicional das rochas alcalinas do Brasil Meridional	069
FIGURA 15 - Diagrama $\text{SiO}_2/\text{Álcalis}$ para os Maciços de Tunas e Itapirapuã	070
FIGURA 16 - Diagrama $\text{SiO}_2/\text{Álcalis}$ para o Maciço de São Sebastião e outros	071
FIGURA 17 - Diagrama $\text{SiO}_2/\text{Álcalis}$ para o Maciço de Poços de Caldas, Iporã e outros	072
FIGURA 18 - Diagrama R/Si para o Maciço de Poços de Caldas	074
FIGURA 19 - Diagrama R/Si para o Maciço de São Sebastião..	076
FIGURA 20 - Diagrama R/Si para os Maciços de Tunas e Itapirapuã	077
FIGURA 21 - Diagrama R/Si para o Maciço de Juquiã	078
FIGURA 22 - Diagrama R/Si para o Maciço de Iporã	079

	Pág.
FIGURA 23 - Diagrama R/Si para as rochas alcalinas do Brasil Meridional	080
FIGURA 24 - Diagrama QLM para as rochas alcalinas do Brasil Meridional	082
FIGURA 25 - Diagrama QLM para as rochas alcalinas dos Maciços de Tunas e Itapirapuã	083
FIGURA 26 - Diagrama QLM para as rochas alcalinas dos Maciços de Juquiã, Ipanema e Jacupiranga	084
FIGURA 27 - Diagrama QLM para as rochas alcalinas do Maciço de Poços de Caldas	085
FIGURA 28 - Diagrama QLM para as rochas alcalinas dos Maciços de São Sebastião, Itatiaia, Monte do Trigo e outros	086
FIGURA 29 - Diagrama QLM para as rochas alcalinas do Maciço de Iporã	087
FIGURA 30 - Diagrama QLM para as rochas basálticas da Bacia do Paraná	088
FIGURA 31 - Frequência de distribuição do qz para as rochas alcalinas do Brasil Meridional	092
FIGURA 32 - Frequência de distribuição de qz para as rochas basálticas da Bacia do Paraná	093
FIGURA 33 - Curvas de distribuição de I.D. comparadas com SiO ₂ para as rochas alcalinas do Brasil Meridional	096

	Pág.
FIGURA 34 - Curvas de distribuição dos I.D. para as rochas basálticas da Bacia do Paraná	098
FIGURA 35 - Gráfico Q Ne Kp para as rochas alcalinas do litoral RJ-SP, Tunas e Itapirapuã	100
FIGURA 36 - Gráfico Q Ne Kp para as rochas dos Maciços de Poços de Caldas, Iporá e Juquiã	101
FIGURA 37 - Diagrama FMA para os Maciços de Poços de Caldas e São Sebastião	103
FIGURA 38 - Diagrama FMA para os Maciços de Tunas e Itapirapuã	105
FIGURA 39 - Diagrama Fe Mg AlK para as rochas alcalinas e basálticas do Brasil Meridional	106
FIGURA 40 - Diagrama Na Ca K para os Maciços de Tunas e Itapirapuã	107
FIGURA 41 - Diagrama Na Ca K para os Maciços de Iporá e São Sebastião	108
FIGURA 42 - Diagrama Na Ca K para as rochas alcalinas e basálticas do Brasil Meridional	109
FIGURA 43 - Diagrama QAPF para as rochas alcalinas dos Maciços de Tunas, Itapirapuã e Itatiaia	113
FIGURA 44 - Diagrama QAPF para as rochas alcalinas dos Maciços de Iporá e Santa Fé	114
FIGURA 45 - Diagrama QAPF para as rochas alcalinas do Maciço de Poços de Caldas	115

	Pág.
FIGURA 46 - Diagrama QAPF para as rochas alcalinas dos Maciços de Itatiaia e São Sebastião	116
FIGURA 47 - Diagrama QAPF para as rochas alcalinas dos Maciços de Juquiã, Jacupiranga e outros	117
FIGURA 48 - Diagrama QAPF para as rochas alcalinas do Brasil Meridional	121
FIGURA 49 - Diagrama QML para as rochas alcalinas e basálticas do Brasil Meridional	122
FIGURA 50 - Diagrama SiO ₂ /Álcalis para as rochas alcalinas e basálticas do Brasil Meridional	123
FIGURA 51 - Diagrama Ne M A para as rochas alcalinas do Brasil Meridional	124
FIGURA 52 - Gráfico de Análise Fatorial para as rochas alcalinas do Brasil Meridional	149
FIGURA 53 - Gráfico de Análise Fatorial para as rochas basálticas da Bacia do Paraná	155
FIGURA 54 - Gráfico de Análise Fatorial para as rochas alcalinas de Iporã e São Sebastião	158
FIGURA 55 - Gráfico de Análise Fatorial para as rochas alcalinas dos Maciços de Itapirapuã e Tunas	159
FIGURA 56 - Gráfico de Análise Fatorial para as rochas alcalinas do Brasil Meridional em relação aos elementos traços e para o Maciço de Poços de Caldas	160

FIGURA 57 - Gráfico de projeção das amostras nos eixos fatoriais de rochas alcalinas do Brasil Meridional e de Poços de Caldas	162
FIGURA 58 - Gráfico de projeção das amostras nos eixos fatoriais de rochas alcalinas de Iporá e São Sebastião	163
FIGURA 59 - Gráfico de projeção das amostras nos eixos fatoriais de rochas alcalinas de Tunas e Itapirapuã	164
FIGURA 60 - Dendrograma para as rochas alcalinas (coeficiente de correlação)	169
FIGURA 61 - Dendrograma para as rochas alcalinas (coeficiente de distância)	170
FIGURA 62 - Dendrograma para as rochas alcalinas e basálticas do Brasil Meridional	172
FIGURA 63 - Porcentagem de frequência das rochas alcalinas separadas pela Análise Discriminante (1)	180
FIGURA 64 - Porcentagem de frequência das rochas alcalinas separadas pela Análise Discriminante (2)	183
FIGURA 65 - Diagrama Álcali/Sílica mostrando o campo composicional das rochas alcalinas do Brasil Meridional	186
FIGURA 66 - Diagrama Álcali/Sílica mostrando os limites composicionais para as rochas alcalinas da Província de Gardar	187

	Pág.
FIGURA 67 - Histogramas dos elementos maiores das rochas alcalinas do Brasil Meridional	210
FIGURA 68 - Histogramas dos elementos maiores das rochas alcalinas posteriores a G-1 e W-1	212
FIGURA 69 - Histogramas dos elementos maiores das rochas alcalinas separadas pela Análise de Agrupamento (coeficiente de correlação)	214
FIGURA 70 - Histogramas dos elementos maiores das rochas alcalinas separadas pela Análise de Agrupamento (coeficiente de distância)	216
FIGURA 71 - Histogramas dos elementos maiores das rochas basálticas da Bacia do Paraná	218
FIGURA 72 - Histogramas dos elementos traços das rochas alcalinas do Brasil Meridional	220
FIGURA 73 - Curvas de frequência acumulada do SiO_2	224
FIGURA 74 - Curvas de frequência acumulada do Al_2O_3	225
FIGURA 75 - Curvas de frequência acumulada do Fe_{tot}	226
FIGURA 76 - Curvas de frequência acumulada do CaO	227
FIGURA 77 - Curvas de frequência acumulada do Na_2O	228
FIGURA 78 - Curvas de frequência acumulada do K_2O	229
FIGURA 79 - Histogramas modais para as rochas alcalinas em relação à porcentagem de feldspatos	233

	Pág.
FIGURA 80 - Histogramas modais para as rochas alcalinas em relação à porcentagem quartzo e nefelina	237
FIGURA 81 - Histogramas de qz para as rochas alcalinas do Brasil Meridional	241
FIGURA 82 - Histogramas de I.D. e SiO ₂ para a Província de Gardar e do Brasil Meridional	242
FIGURA 83 - Distribuição das Principais Províncias Alcalinas do Brasil Meridional	247
FIGURA 84 - Digrama QAPF, QML e QNeKp para as rochas alcalinas de Tunas e Itapirapuã	254
FIGURA 85 - Diagrama SiO ₂ /Álcalis para as rochas alcalinas e basálticas do Brasil Meridional	256
FIGURA 86 - Diagrama R/Si para as rochas alcalinas e basálticas do Brasil Meridional	257
FIGURA 87 - Diagrama QAPF e QLM para as rochas alcalinas e basálticas do Brasil Meridional	266
FIGURA 88 - Histogramas de I.D. para as rochas alcalinas e basálticas do Brasil Meridional	268
FIGURA 89 - Diagrama QNeKp para as rochas alcalinas do Brasil Meridional	271
FIGURA 90 - Comparação entre distribuição de qz para as rochas jovens do Atlântico e Pacífico e as rochas alcalinas e basálticas do Brasil Meridional	272

ÍNDICE DAS TABELAS

	Pág.
TABELA 1 - Distribuição de análises químicas de rocha por área do maciço (km ²) e idade K-Ar preferidas..	009
TABELA 2 - Proporções de óxidos de elementos principais em amostras de rochas alcalinas do Maciço Itapirapuã	011
TABELA 3 - Proporções de óxidos de elementos principais em amostras de rochas alcalinas do Maciço de Tunas	013
TABELA 4 - Proporções de óxidos de elementos principais em amostras de rochas alcalinas dos Maciços de Juquiá e Santa Fé	016
TABELA 5 - Proporções de óxidos de elementos principais em amostras de rochas alcalinas dos Maciços de Monte do Trigo, Cananéia, Marapicu, Cabo Frio e Itatiaia	018
TABELA 6 - Proporções de óxidos de elementos principais em amostras de rochas alcalinas do Maciço de São Sebastião	019
TABELA 7 - Proporções de óxidos de elementos principais em amostras de rochas alcalinas do Maciço de Poços de Caldas	020
TABELA 8 - Proporções de óxidos de elementos principais em amostras de rochas alcalinas do Maciço de Poços de Caldas	021

	Pág.
TABELA 9 - Proporções de óxidos de elementos principais em amostras de rochas alcalinas do Maciço de Iporá	023
TABELA 10 - Proporções de óxidos de elementos principais em amostras de rochas alcalinas dos Maciços de Jacupiranga, Ipanema e outros	024
TABELA 11 - Composições Modais de rochas do Maciço Alcalino de Itapirapuã	028
TABELA 12 - Composições Modais de rochas do Maciço Alcalino de Tunas	031
TABELA 13 - Composições Modais de rochas do Maciço Alcalino de Juquiã	034
TABELA 14 - Composições Modais de rochas do Maciço Alcalino de Monte do Trigo	036
TABELA 15 - Composições Modais de rochas do Maciço Alcalino de Anitápolis	038
TABELA 16 - Composições Modais de rochas do Maciço Alcalino de Santa Fé	040
TABELA 17 - Composições Modais de rochas do Maciço Alcalino de Iporá	041
TABELA 18 - Composições Modais de rochas do Maciço Alcalino de Poços de Caldas	046
TABELA 19 - Composição mineralógica normativa de rochas alcalinas do Brasil Meridional e I.D., I.Agp. e Razão Na ₂ O/Álcalis	126

	Pág.
TABELA 20 - Matriz de Coeficientes de Correlação entre Variáveis para as rochas alcalinas do Brasil Meridional	150
TABELA 21 - Matriz de Coeficientes de Correlação entre Variáveis (rochas basálticas do Brasil Meridional)	156
TABELA 22 - Dados de Média e Desvio Padrão para as rochas alcalinas (elementos maiores)	196
TABELA 23 - Dados de Simetria e Curtose para as rochas alcalinas (elementos maiores)	197
TABELA 24 - Dados de Média, Desvio Padrão, Simetria e Curtose para as rochas alcalinas e basálticas do Brasil Meridional	198
TABELA 25 - Dados de Média e Desvio Padrão para as várias unidades e maciços alcalinos do Brasil Meridional	199
TABELA 26 - Dados de Média e Desvio Padrão para os vários maciços alcalinos do Brasil Meridional	204
TABELA 27 - Média para as concentrações em ppm dos elementos traços para as rochas alcalinas do Brasil Meridional	207
TABELA 28 - Dados da Média, Desvio Padrão, Simetria e Curtose para os elementos traços das rochas alcalinas do Brasil Meridional	208

A G R A D E C I M E N T O S

Ao Orientador, Prof. Dr. FRANCO LEVI, cujo espírito crítico e destemido incentivou-me à pesquisa de tema tão abrangente e polêmico.

À Comissão de Pós-Graduação do Instituto de Geo-ciências da Universidade de São Paulo, que através do Prof. Dr. UMBERTO G. CORDANI encaminhou críticas consistentes à pré-tese, permitindo o aperfeiçoamento do presente trabalho.

Ao Prof. Dr. GILBERTO AMARAL por ter colocado à minha disposição os Programas "Trend" e "Norma" de sua autoria e pelos esclarecimentos pertinentes.

Ao Prof. Dr. CELSO DE BARROS GOMES, orientador do Mestrado, de quem assimilei parte da formação empírica e disciplinada, possibilitando a elaboração desta tese.

Aos Profs. Drs. MOACIR COUTINHO e MILTON LANDIM que através do "Exame de Qualificação" esclareceram aspectos importantes para a conclusão deste trabalho.

À SONIA MARIA BARROS DE OLIVEIRA e LÚCIA MELO, cujos questionamentos constantes permitiram o meu amadurecimento intelectual, malgrado as dificuldades da condição feminina.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, instituição da qual fui bolsista, nível de doutoramento, de 1977 a 1980.

À Empresa de Recursos Naturais do Estado de Alagoas, EDRN/AL, por ter permitido a disponibilidade necessária para a conclusão desta tese.

Aos companheiros da Pós-Graduação, Sônia Margarida, Arlei, Antonio, Saul, Miriam e demais colegas pela solidariedade de sempre.

À Sra. Rosi Carvalho Lemos cujo trabalho datilográfico organizado e eficiente permitiu a boa apresentação da presente tese.

Ao Sr. Jayme Alves da Silva pelos serviços de impressão.

Aos desenhistas Vicente e Tereza (Maceió/AL) e Itacy Kroehne pela elaboração dos gráficos e diagramas.

À minha mãe e irmãs Dudu, Elza e Hilda pela confiança e afetividade constantes.

Aos amigos Hêlvio, Szylit, Alfredo, Pedro, Lucidéia, Mariane, Cristina e Estevão.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, ajudaram na elaboração deste trabalho.

R E S U M O

Análises químicas e modais de rochas alcalinas compiladas da literatura foram utilizadas para uma reavaliação de dados amostrais referentes às Províncias Petrográficas do Brasil Meridional. Foram determinados os parâmetros e índices da petrologia e traçados Diagramas de Variação, selecionados em função da literatura geológica com prioridade para aqueles escolhidos para representar províncias mundiais.

Técnicas estatísticas multivariantes, tais como, Análise de Agrupamento, Análise Discriminante e Análise Fatorial foram utilizadas com o objetivo de descrever e classificar os vários tipos petrográficos das províncias. Foram computadas também estatísticas amostrais e descritivas dos elementos maiores em forma de óxidos e eventualmente dos elementos traços (em ppm), tanto para as unidades petrográficas, como maciços e para as rochas das províncias e, traçados histogramas e curvas de distribuição de frequência cumulativa.

Com base nos resultados obtidos pela combinação dos vários critérios foram delimitados vários campos composicionais e comparados dados modais e mineralógicos normativos, além de dados sobre proporções em óxidos e catiônicas. Os gráficos resultantes do tratamento dos dados químicos e petrográficos foram então integrados nos vários esquemas geotectônicos e petrológicos descritos na literatura.

Foi demonstrado que existe uma interrelação entre os gráficos petrológicos clássicos e aqueles deduzidos da Análise Estatística Multivariante, principalmente a Análise Fatorial. As outras técnicas multivariantes tiveram apenas efeito descritivo. Quanto aos histogramas, foram utilizados com bons resultados, principalmente na delimitação de populações em função dos índices petrológicos ID e qz.

Com relação aos Diagramas de Variação verificou-se que os mais adequados na representação de associações petrográficas e/ou províncias são aqueles que relacionam as composições modais e normativas (QLM e QAPF) porque além de definirem claramente os campos composicionais permitem avaliar os prováveis erros analíticos e amostrais pelo confronto dos dados.

A B S T R A C T

Data from samples of alkaline rocks of S and SE Brasil were re-evaluated in terms of chemical and modal analysis. By means of variation diagrams, petrological indexes and parameters were determined and plotted, selecting the types that are most adequate to represent world provinces.

In order to classify and describe compositional types and their fields, several multivariate statistical procedures were used: cluster, discriminant and factor analysis. Univariate statistics analysis of chemical elements in the form of oxides and occasionally trace elements data were also computed. Histograms and cumulative frequency curves were drawn for each massif and petrographic unit belonging to the S and SE Brasil "Province".

An integrative approach combines the chemical and petrological data into diagrams, in accordance with current geotectonic and petrological models. The results indicate limits of compositional fields by comparing norms, modes and data on oxide and cations proportions.

Chemical graphs from petrology are clearly related to those of statistical methods, mainly factor analysis. Other multivariate techniques displayed mostly descriptive effects. Histograms showed good results, discriminating populations mainly in terms of the "differentiation index" (ID) and the Niggli number qz.

The most important variation diagrams are the Streckeisen double triangles (QAPF) and the Niggli normative (QLM) since they compare modal and normative mineralogical data and evaluate sample and analytical errors eventually present.

I N T R O D U Ç Ã O

A escolha deste tema, "Tratamento de Dados Químicos e Petrográficos das Rochas Alcalinas do Brasil Meridional", surgiu da necessidade de relacionar as técnicas gráficas da petrologia clássica ao tratamento estatístico dos dados e de definir um problema relevante tanto num contexto nacional como global.

No âmbito internacional destaca-se a obra de Sorensen (1974) "The Alkaline Rocks", onde é analisada a importância dessas rochas com base na coletânea de várias pesquisas publicadas. No país, tem sido reservado um grande espaço ao estudo desse grupo de rochas nas últimas décadas. Nesse sentido, é de particular importância o trabalho de revisão de Ulbrich e Gomes (1981), constituindo uma tentativa de caracterização dessas rochas. O modelo geotectônico mais recente, estabelecido por Almeida (1983), permite também sintetizar as principais características estruturais das rochas alcalinas mesozóicas do Brasil Meridional.

O presente trabalho constitui uma contribuição a mais ao estudo global dessas rochas, condensando grande parte dos dados de análises num texto de compilação e análise estatística, tentando discriminar grupos, representá-los em gráficos e integrá-los em esquemas petrogenéticos.

O objetivo principal deste trabalho é portanto a conjugação de uma perspectiva Informática com uma Petrológica.

A perspectiva informática refere-se à formalização de dados através de esquemas lógicos, resultantes do tratamento de dados, sendo mais um meio do que um objetivo em si.

Quanto à perspectiva petrológica, permite integrar os dados previamente formalizados em esquemas lógicos nos vá

rios modelos petrológicos e geotectônicos correntemente aceitos. Nesse sentido foram corroboradas ou refutadas hipóteses definidas.

Outro aspecto que merece ser considerado é quanto à escala do presente trabalho, cujos dados avaliados referem-se aos elementos maiores e às várias fases mineralógicas e só excepcionalmente aos elementos traços. Nesse sentido é válido mencionar que, apenas nos últimos anos as pesquisas locais sobre rochas alcalinas atingiram uma escala de maior detalhe, com os trabalhos recentes desenvolvidos no DMP do IGUSP. Assim, a não consideração de elementos traços, de razões isotópicas, de composição de fases fluidas e outros dados pertinentes, não permite elaborar novos modelos petrogenéticos.

A estrutura lógica do trabalho está condicionada a uma divisão em capítulos:

O primeiro capítulo versa sobre a apresentação e justificativa dos dados, análise das populações e amostras, considerações sobre fontes de erros e a conceituação de um plano amostral ideal.

O segundo é de natureza petrológica, apresentando os vários índices e diagramas selecionados em função da literatura sobre rochas alcalinas. Desse modo, foi dada prioridade para os diagramas $\text{SiO}_2/\text{Álcalis}$, R/Si , QAPF, QLM, NaCaK e FMA, confrontando os resultados obtidos tanto em relação a outras províncias alcalinas, como confrontando com os campos composicionais das rochas basálticas da Bacia do Paraná.

O terceiro capítulo analisa as várias técnicas multivariantes, indicando que a Análise Fatorial leva a uma representação mais completa da composição química dos maciços, associações e províncias petrográficas, auxiliando na análise das condições de formação. As outras técnicas foram usadas mais com intuitos comparativos e descritivos.

No quarto capítulo propõe-se uma análise de dados univariantes, procedendo-se ao cálculo das médias e dispersões para cada elemento nos vários tipos petrográficos, associações, maciços e províncias. Elabora-se então o traçado de histogramas e curvas cumulativas.

No quinto capítulo efetua-se a integração dos dados nos vários modelos geológicos vigentes, através de tratamento tanto estatístico como petrológico clássico. Desse modo, de particular importância na definição das várias associações e/ou províncias são os gráficos QLM e QAPF, os quais comparam a composição mineralógica normativa e modal, o diagrama $\text{SiO}_2/\text{Álcalis}$ e os diagramas de Análise Fatorial, ao posicionarem as variáveis e as amostras, definindo campos petrológicos composicionais passíveis de serem diretamente comparados com outras províncias.

O sexto capítulo apresenta os principais resultados obtidos em cada capítulo anterior, mostrando as limitações dos dados amostrais e analíticos, as premissas utilizadas na escolha das técnicas de análise e, enfim, os aspectos relacionados a integração dos dados em modelos petrológicos e geotectônicos consagrados.

Foram utilizados programas de computador em linguagem FORTRAN IV e pacotes da SPSS ("Special Package for Social Sciences"), do Centro de Computação da Universidade de São Paulo. Para os cálculos petroquímicos utilizou-se especificamente o Programa NORMA, de Amaral (1967).

C A P Í T U L O 1

OS DADOS

1.1. APRESENTAÇÃO

O tratamento numérico de dados químicos e petrográficos em geologia, tem longa tradição e remonta desde a primeira década do século XX, com os trabalhos clássicos de Clarke, que calculou as mais conhecidas médias de composição química para os vários tipos de rochas. Outros trabalhos sobre o assunto encontram-se em Washington (1917), Lacroix (1928), Walker (1930), Kennedy (1934), Fermor (1934), Larsen (1948), Mac Donald (1949), Kuno (1950), e outros da primeira metade do presente século.

Nockolds e Allen (1954) e Nockolds (1954, 1956) calcularam também as composições químicas médias e respectivas normas para um certo número de rochas ígneas mais comuns. As análises foram coletadas da literatura e quase sempre apresentavam composições modais definidas. Mais tarde, Green e Poldervaart (1955, 1958) e Ahrens (1964) referem-se aos critérios empíricos utilizados no estudo de composição química de algumas províncias petrográficas, propondo um tratamento estatístico dos dados químicos.

Nos vários trabalhos de síntese da literatura geológica, os vários petrógrafos determinaram as medidas de tendência central (média) e dispersão dos dados amostrais (% em peso de óxidos resultantes de análises químicas, % modais e normativas), com o objetivo de definir esses parâmetros estatísticos para os vários tipos petrográficos, unidades, associações e até províncias. Esses dados são retirados da literatura e provêm de informações de diferentes autores, épocas e laboratórios e em geral não fazem parte de um plano amostral. Esses autores estabelecem critérios para selecionar as amostras de melhor qualidade, eliminando os erros analíticos. Essas condições foram examinadas por Manson (1967), ao estudar a composição química das

rochas basálticas de distribuição mundial.

Autores diversos, ao elaborarem trabalhos de síntese, discutem o problema da seleção dos dados químicos de rocha para fins de análise estatística. Gerasimovsky et al. (1974) e Upton (1974), ao estudarem a composição química das rochas das províncias alcalinas de Gardar e Kola, respectivamente, estabeleceram condições para seleção de dados amostrais da literatura.

A Província Alcalina de Gardar (Upton, op. cit), de dimensão semelhante à Província Alcalina do Brasil Meridional é constituída de diferentes associações petrográficas (inclusive ultramáfico-alcalinas), de diferentes idades e essas são consideradas no seu conjunto, independente do modo de ocorrência e apesar da duração da atividade magmática ser de 400 milhões de anos. O autor descreve inclusive vários diagramas de variação e os parâmetros estatísticos, tais como, média e variância para os vários tipos petrográficos e maciços, utilizando de dados químicos procedentes de diferentes laboratórios.

A Província Alcalina de Kola (Gerasimovsky, et al., op. cit), tem uma área de ocorrência semelhante a das alcalinas do Brasil Meridional, embora o número de amostras consideradas seja inferior a 300, proveniente de diferentes idades e laboratórios. Os autores calculam as médias para os vários tipos petrográficos, associações e maciços. Outros autores, tais como: Wimmenauer (1974), Pavlenko (1974), Philpotts (1974), Borley (1974) e Bowden e Turner (1974), calcularam também as composições médias dos vários tipos petrográficos, associações e maciços de diversas províncias do mundo. Esses trabalhos de síntese, muitas vezes abrangem áreas contínuas ou descontínuas, de dimensões até continentais e nem sempre mapeadas em detalhe. O objetivo é apenas de estabelecer tendências e determinar intervalos de composição química e mineralógica.

Ruegg (1969), ao analisar os aspectos geoquímicos e mineralógicos das rochas basálticas da Bacia do Paraná, comenta

sobre a validade dos dados utilizados desde que as análises químicas foram retiradas da literatura, formando uma amostra estatística que não sofreu qualquer seleção prévia. Segundo esse autor, esse procedimento embora subjetivo, pode ser estabelecido quando se admite que a amostra estatística não está contaminada por tipos exóticos, não representativos das rochas da província.

O mesmo autor, Ruegg (op.cit), questionou também a qualidade analítica das amostras de rochas basálticas do Brasil Meridional mostrando que os erros analíticos poderiam interferir no estudo estatístico dessas amostras porque os dados foram originados de diferentes laboratórios, embora refira-se que esses podem ser reduzidos drasticamente, quando o número de amostras é grande (Ahrens, 1966). Além disso, a utilização desses dados é justificada pelo autor como "um esforço preliminar na interpretação do conteúdo e distribuição dos principais elementos das rochas da província".

Outra questão que se coloca é a dificuldade de apreciação das características geoquímicas e da interpretação petrológica de rochas de uma determinada província, diante do fato das análises químicas de rochas serem expressas em termos de concentração percentual de aproximadamente 10 variáveis óxidos principais. Portanto, as correlações entre análises químicas de rochas procedentes de uma mesma província, envolvem uma manipulação complexa dos dados selecionados. Ruegg (op.cit) comenta ainda que essas dificuldades são contornadas em estudos petrológicos, quando se usa índices de diferenciação, os quais envolvem um número restrito de óxidos analisados. Além disso, as características petrográficas das rochas da província são sintetizadas por médias aritméticas dos teores dos vários elementos em grupos selecionados.

O tratamento dos dados amostrais de análises químicas dos elementos maiores e menores das rochas alcalinas do Brasil Meridional é portanto uma questão controvertida. Ulbrich e Gomes (1981) referem-se a precariedade desses dados e a falta de condições de analisá-los. Contudo, do que foi exposto acima, vá-

rios aspectos têm de ser considerados quando se trabalha com os dados esparsos da literatura geológica e de diversas procedências: a) A uniformidade dos fenômenos em geologia; b) Disponibilidade dos dados de análises modais que reforçam ou não os resultados obtidos das análises químicas; c) A importância dos erros de acordo com o objetivo de trabalho; d) A necessidade de alcançar algum tipo de síntese. Essas questões serão tratadas nos capítulos subsequentes, quando forem computadas as estatísticas amostrais e feitas as inferências estatísticas para as várias hipóteses geológicas vigentes.

Por enquanto, cabe apenas apresentar os dados amostrais a serem considerados no presente trabalho: a Figura 1 mostra a localização dos maciços alcalinos do Brasil Meridional de acordo com Ulbrich e Gomes (1981) e as Figuras 2 a 8 representam os mapas geológicos e amostrais dos vários maciços alcalinos descritos na literatura geológica. Nas tabelas anexas constam: 1) Distribuição de amostras por maciço e densidade amostral (Tabela 1); 2) Os dados de medidas numéricas referentes às amostras (% em peso dos elementos maiores e concentração em ppm dos elementos menores) (Tabelas 2 a 10); 3) Composições modais para os vários tipos de rocha (Tabelas 11 a 18). A observação dos dados permite estabelecer as seguintes considerações:

- Do total de maciços citados na literatura (cerca de cinquenta), apenas vinte são amostrados e destes, oito têm um número significativo de amostras, particularmente aqueles referentes a trabalhos de tese (Figuras 2 a 8). Portanto, do total de amostras consideradas, cerca da metade não está plotada nos mapas geológicos e foi citada na literatura sem localização exata. Aquelas amostras localizadas referem-se aos maciços de Itapirapuã (Gomes, 1970), Tunas (Fuck, 1972), Juquiá (Born, 1971b), Iporá (Danni, 1974), Santa Fé (Souza, 1978). Os Maciços de São Sebastião, Poços de Caldas e Itatiaia possuem um número considerável de amostras mas estas ocorrências não estão localizadas nos respectivos mapas geológicos. Nota-se que nos trabalhos mais recentes há uma maior preocupação em situar as ocorrências das amostras analisadas.

FIGURA 1 - Mapa de localização dos Maciços Alcalinos do Brasil Meridional, de acordo com Ulbrich e Gomes (1981).

TABELA 1 - Distribuição de análises químicas de rocha por área do maciço (km²) e idades K-Ar preferidas.

MACIÇO	Nº DE ANÁLISES	IDADE PREFERIDA	ÁREAS (km ²)	DENSIDADE AMOSTRAL (am/km ²)
Anitápolis*	1	130 105	5	0.2
Itapirapuã	19	103	4	5
Jacupiranga*	03	133	65	0.05
Juquiã	11	127	10	1.
Tunas	18	110	20	1
Cananéia*	02	82	1	2
Ipanema*	03	123	12	0.3
Piedade*	01	122	Diques	<1
Monte do Trigo	03	80	12	0.3
S.Sebastião**	23	81	200	0.1
Marapicu*	01	72	10	0.1
Tinguã*	01	66	20	0.05
Cabo Frio*	03	51	1	3
Itatiaia**	08	66	220	0.04
P.de Caldas**	42	77	800	0.05
Tapira*	02	70	18	0.05
Salitre*	02	81	50	0.04
Santa Fê	13	-	1	0.1
Iporã	21	72	100	0.3

* Amostras anteriores a G-1 e W-1

** Amostras analisadas parcialmente anteriores a G-1 e W-1

FIGURA 2 - Mapa geológico e amostral do Maciço Alcalino de Itapirapuã, de acordo com Gomes e Dutra (1970).

TABELA 2 - Proporções de óxidos de elementos principais (percentagem em peso), em amostras de rochas alcalinas do Maciço de Itapirapuã. Procedimento analítico e dados adicionais, em Gomes (1967).

Nº	Nº Ref.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe _{tot}	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
01	1 ITAP	40.9	2.75	16.1	9.61	0.23	3.82	13.5	7.13	2.26
02	2 ITAP	43.4	2.15	17.70	8.69	0.27	3.24	12.40	6.96	3.47
03	3 ITAP	44.4	1.28	16.5	9.63	0.29	1.69	11.40	6.72	4.40
04	4 ITAP	47.5	1.00	17.5	7.97	0.21	0.24	9.31	6.20	6.76
05	5 ITAP	45.7	1.07	18.8	5.89	0.24	1.76	9.22	8.96	4.68
06	6 ITAP	44.2	1.50	18.0	8.94	0.28	1.65	8.64	8.76	4.13
07	7 ITAP	46.3	1.00	17.3	9.73	0.22	1.50	7.20	7.54	6.25
08	8 ITAP	48.1	1.00	19.2	5.84	0.13	1.28	6.55	7.32	7.45
09	9 ITAP	49.0	0.93	20.2	6.20	0.14	0.89	6.05	6.50	7.91
10	10 ITAP	49.8	0.55	21.0	6.93	0.21	-	4.00	8.63	6.81
11	11 ITAP	50.1	0.44	21.6	4.24	-	0.47	3.87	9.37	7.23
12	12 ITAP	48.0	0.37	22.7	2.58	0.07	0.42	3.59	11.30	7.00
13	13 ITAP	53.6	0.50	19.7	5.99	0.20	0.63	2.51	9.05	6.46
14	14 ITAP	53.9	0.12	24.0	3.97	-	0.21	2.20	7.80	5.97
15	15 ITAP	53.6	0.24	21.1	4.79	0.10	-	2.55	6.21	9.68
16	16 ITAP	52.8	0.60	21.4	5.24	0.19	0.10	1.90	8.18	7.16
17	17 ITAP	53.0	0.35	24.3	3.20	0.18	0.10	1.69	9.50	7.44
18	18 ITAP	53.0	0.58	21.6	3.51	-	0.12	1.69	10.40	6.88
19	19 ITAP	52.5	0.35	22.5	4.20	-	0.18	1.24	9.67	5.75

FIGURA 3 - Mapa geológico e amostral do Maciço Alcalino de Tunas, de acordo com Fuck (1972).

TABELA 3 - Proporções de óxidos de elementos principais (percentagem em peso), em amostras de rochas alcalinas do Maciço de Tunas. Procedimento analítico e dados adicionais em Fuck (1972).

Nº	Nº Ref.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe _{tot}	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
20	Tu - 88	63.21	0.40	18.68	3.91	0.07	0.15	1.60	5.72	5.89
21	Tu-165	60.84	0.85	18.12	6.82	0.33	1.09	1.51	5.70	4.20
22	Tu-224	60.81	0.75	20.98	4.56	0.26	0.49	1.68	5.80	4.40
23	Tu-153	61.22	0.45	16.82	6.11	0.31	1.37	1.54	6.75	4.80
24	Tu-165a	59.16	0.85	17.43	8.48	0.27	1.37	1.26	6.35	4.60
25	Tu-172	61.73	0.31	17.71	5.76	0.07	0.08	1.57	7.16	5.36
26	Tu-218	61.11	0.30	20.73	5.56	0.26	0.50	0.01	7.05	4.35
27	Tu-186	60.48	0.15	17.86	6.03	0.32	0.87	0.10	8.90	4.05
28	Tu-149	48.79	1.40	21.81	9.43	0.19	2.82	10.20	4.05	0.99
29	Tu-171	47.42	1.85	24.24	8.40	0.18	3.71	9.14	4.05	0.91
30	Tu-173	49.30	2.55	21.63	9.19	0.23	1.18	11.07	3.45	0.91
31	Tu-185	49.38	1.70	20.60	7.88	0.23	5.48	7.15	5.20	1.87
32	Tu-219	44.86	4.25	24.72	11.13	0.21	5.77	4.88	3.53	0.44
33	Tu-207	55.45	0.80	22.02	6.68	0.25	1.46	4.16	6.20	2.41
34	Tu-209	56.70	1.50	21.75	5.44	0.24	1.81	2.80	6.35	2.90
35	Tu-230	54.39	1.20	20.75	7.10	0.21	2.94	3.81	5.70	3.43
36	Tu-225	56.48	1.20	20.35	6.31	0.23	0.83	7.01	5.70	1.68
37	Tu-228	56.88	2.25	15.45	9.25	0.29	1.57	5.83	5.55	2.17

FIGURA 4 - Mapa geológico e amostral do Maciço Alcalino de Juquiá, de acordo com Born (1971a).

FIGURA 5 - Mapa geológico e amostral do Maciço Alcalino de Santa Fé, de acordo com Souza (1978).

TABELA 4 - Proporções de óxidos de elementos principais (percentagem em peso), em rochas alcalinas dos Maciços de Juquiã e Santa Fê. Procedimento analítico e dados adicionais em Born (1971b) e Souza (1978).

Nº	Nº Ref.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe _{tot}	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
38	Se - 60	54.90	0.83	20.06	4.76	0.05	0.59	2.14	6.57	7.51
39	Se - 84	54.30	1.04	19.52	5.27	0.08	0.60	2.79	6.10	7.22
40	Se - 39	54.60	0.91	18.10	5.66	0.08	0.95	3.51	6.62	7.42
41	Se - 11	46.50	0.93	18.60	7.40	0.04	1.95	6.73	7.95	6.39
42	S - 27	50.70	0.62	18.79	4.85	0.03	1.55	4.69	7.26	8.59
43	Se - 95	41.20	2.36	6.58	15.51	0.09	11.79	17.56	1.76	1.01
44	Se - 25	41.70	1.36	6.58	15.06	0.15	19.74	11.66	3.68	0.04
45	Se - 50	43.30	1.06	13.43	8.76	0.09	8.69	9.55	6.59	5.19
46	Se-103	38.60	2.72	10.37	13.86	0.09	12.93	13.46	1.94	3.55
47	S - 7	41.50	1.58	17.02	9.11	0.03	4.72	11.26	8.13	3.05
48	D	41.80	0.01	16.44	16.10	0.01	3.91	13.68	5.49	3.99
49	Sf - V3	47.68	1.54	3.06	8.71	0.16	21.53	14.47	0.47	1.16
50	Sf - V5	45.18	1.45	3.75	10.43	0.16	23.36	10.99	0.52	2.20
51	Sf-529	49.50	2.25	7.82	8.56	0.12	10.66	14.30	0.92	4.02
52	Sf-906	48.40	3.76	12.05	10.84	0.15	5.77	8.55	2.53	6.04
53	Sf-531	46.79	4.31	9.15	12.13	0.16	7.74	11.58	1.66	3.94
54	Sf-01c	43.35	3.85	8.07	12.33	0.18	10.76	14.28	1.77	2.21
55	Sf-GA1	43.74	4.67	9.44	13.47	0.17	8.50	12.49	1.29	3.74
56	F2/52	47.17	1.14	1.57	10.79	0.17	22.81	14.63	0.33	0.14
57	F2/554	49.63	0.83	5.67	7.88	0.16	20.20	12.62	0.27	1.90
58	Sf-004	49.49	2.68	16.00	7.57	Nd	3.35	5.62	2.95	5.54
59	N 32W	49.24	3.83	14.89	10.19	Nd	3.37	7.42	2.90	5.81

FIGURA 6 - Mapa geológico e amostral (Análises Modais) do Maciço Alcalino de Monte do Trigo, de acordo com Coutinho (1973).

TABELA 5 - Proporções de óxidos de elementos principais(% em peso), em amostras de rochas alcalinas dos Maciços de Monte de Trigo, Cananãia, Marapicu, Cabo Frio e Itatiaia. Procedimento analítico e dados adicionais em Coutinho e Melcher (1973), Freitas (1947a) e Ribeiro Filho (1967).

Nº	Nº Ref.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe _{tot}	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
60	01 MTR	58.12	0.42	19.00	5.39	0.26	0.48	1.81	5.98	5.05
61	02 MTR	58.20	0.23	21.10	3.06	0.20	0.36	1.71	6.72	4.80
62	03 MTR	41.50	1.70	13.80	2.55	0.60	12.46	13.60	1.60	1.22
63	01 CANA	59.10	0.01	17.30	7.20	0.19	1.50	4.20	5.30	4.10
64	02 CANA	65.60	0.01	17.50	3.40	0.13	0.24	1.20	5.90	4.50
65	01 MARA	53.10	0.01	19.07	5.57	0.17	0.01	1.33	9.41	6.84
66	01 CFR	58.46	0.28	16.56	8.28	0.01	0.62	2.62	6.23	5.44
67	02 CFR	58.75	0.77	17.46	4.82	0.01	1.03	2.55	6.81	5.87
68	03 CFR	43.66	1.21	17.35	13.28	0.01	4.27	9.39	5.12	2.07
69	01 ITAT	56.20	0.84	22.12	2.91	0.15	0.80	1.56	7.72	6.46
70	02 ITAT	59.56	0.42	19.10	3.86	0.12	1.07	1.16	6.44	6.84
71	03 ITAT	57.88	1.08	18.34	4.36	0.15	0.86	2.26	6.36	7.50
72	04 ITAT	59.72	0.92	19.55	3.34	0.15	1.35	1.94	5.34	6.20
73	05 ITAT	60.38	1.20	18.35	2.69	0.14	1.82	1.22	7.28	6.88
74	06 ITAT	59.30	0.55	18.90	2.40	0.15	0.60	1.40	8.50	6.30
75	07 ITAT	69.60	0.42	13.90	1.70	0.05	0.30	1.00	4.50	6.00
76	08 ITAT	66.00	0.29	16.70	2.60	0.02	0.30	1.80	5.70	5.50

TABELA 6 - Proporções de óxidos de elementos principais (percentagem em peso), em amostras de rochas alcalinas do maciço de S. Sebastião. Procedimento analítico e dados adicionais em Freitas (1947b) e Hennies (1968b).

Nº	Nº Ref.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe _{tot}	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
77	01	58.60	0.80	21.50	3.78	0.01	0.40	2.68	5.90	4.60
78	02	58.20	0.58	18.90	4.00	0.12	2.10	2.30	5.60	5.80
79	03	56.39	0.82	19.46	5.65	0.19	1.00	1.93	6.20	5.44
80	04	59.90	0.77	19.10	4.10	0.16	1.50	1.90	6.40	5.20
81	05	43.70	1.60	18.70	14.30	0.01	5.40	10.10	2.85	2.36
82	06	54.10	1.40	20.90	5.64	0.01	1.30	3.70	5.60	5.10
83	2001	63.00	0.20	20.14	2.53	0.15	0.15	0.20	5.80	7.45
84	2002	56.40	1.00	19.14	6.58	0.18	1.59	2.92	5.43	5.78
85	2003	60.60	0.40	18.80	6.17	0.20	0.70	1.40	7.57	5.50
86	2004	57.20	1.20	15.86	10.46	0.15	1.73	4.12	4.61	3.79
87	2005	57.65	0.50	17.72	3.80	0.15	1.10	2.40	6.38	6.12
88	2006	59.80	0.65	18.10	4.60	0.15	1.16	1.94	6.55	6.09
89	2007	54.00	0.75	20.75	6.13	0.15	1.60	4.45	6.35	5.00
90	2008	54.85	0.84	20.43	6.86	0.15	1.64	4.44	5.94	4.49
91	2009	43.60	0.80	13.09	11.20	0.20	13.24	14.12	2.72	0.54
92	2010	43.60	1.00	12.46	11.01	0.18	12.52	14.72	2.20	1.80
93	2011	37.80	1.00	19.77	11.22	0.20	4.49	11.24	8.72	2.68
94	2012	58.80	0.50	20.08	4.85	0.10	1.00	2.52	6.43	4.96
95	2013	57.80	0.40	21.04	4.96	0.23	0.50	1.00	8.42	5.13
96	2014	56.80	0.30	21.84	4.02	0.15	0.36	0.80	8.57	6.52
97	2015	60.04	0.40	19.02	4.85	0.15	0.58	1.32	6.05	6.64
98	2016	59.20	0.15	20.22	4.29	0.13	0.72	1.32	6.40	6.90
99	2017'	55.00	0.30	22.58	5.09	0.20	0.23	0.80	8.90	5.88

TABELA 7 - Proporções de óxidos de elementos principais (percentagem em peso), em amostras de rochas alcalinas do Maciço de Poços de Caldas. Procedimento analítico e dados adicionais em Freitas (1947a), Harder (1952), Moniz (1969) e Almeida (1977).

Nº	Nº Ref.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe _{tot}	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
100	M - 1	52.00	0.80	22.50	5.00	0.01	0.74	2.30	7.44	7.33
101	M - 2	52.80	0.54	23.30	4.65	0.01	0.50	1.57	8.37	7.05
102	M - 3	52.40	0.60	22.80	4.30	0.01	0.72	2.00	8.37	6.23
103	H - 1	53.06	0.35	20.85	5.26	0.01	0.61	1.29	7.18	8.32
104	20	54.80	0.60	20.20	5.10	0.24	0.21	1.58	7.54	8.22
105	30	52.20	0.92	20.00	6.52	0.20	0.36	1.86	5.23	7.36
106	11	54.30	0.58	21.10	4.53	0.21	0.19	1.40	8.04	8.15
107	36	53.10	0.66	19.50	6.15	0.25	0.26	2.02	8.52	8.38
108	78	53.30	0.58	20.60	6.12	0.33	0.28	1.20	8.83	7.45
109	90	53.90	0.70	18.80	6.90	1.14	0.38	1.87	8.07	7.55
110	113	53.70	0.53	19.50	6.86	0.49	0.22	1.59	8.18	8.05
111	115	53.40	0.56	19.50	6.98	0.33	0.23	1.58	8.08	7.97
112	118	51.22	0.49	20.09	6.97	0.26	1.71	2.09	9.58	6.72
113	123	51.45	0.53	21.87	7.11	0.02	0.43	1.82	8.25	7.01
114	137	52.02	0.49	23.61	5.52	0.17	0.52	1.27	7.71	7.70
115	H - 2	53.18	0.70	21.18	4.15	0.01	1.60	1.01	7.34	8.24
116	75	53.00	0.88	19.60	6.71	0.30	0.41	1.94	6.80	7.60
117	79	52.30	0.38	19.70	7.23	1.15	0.17	1.19	8.92	7.68
118	128	50.97	0.82	19.97	7.72	0.14	0.76	2.02	7.21	5.75
119	S / N	53.10	0.81	22.50	5.10	0.01	0.15	2.15	8.49	6.48
120	S / N	52.75	0.01	22.55	3.65	0.01	0.15	1.85	8.10	7.05

TABELA 8 - Proporções de óxidos de elementos principais (percentagem em peso), em amostras de rochas alcalinas do Maciço de Poços de Caldas. Procedimento analítico e dados adicionais em Barbosa (1933), Guimarães (1962) e Hennes (1968b).

Nº	Nº Ref.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe _{tot}	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
121	3	51.43	0.24	21.09	8.49	0.99	0.17	0.17	5.82	9.93
122	2	53.24	0.60	24.28	3.42	0.19	0.09	1.30	8.82	4.16
123	1	53.31	0.29	23.28	2.32	0.47	1.56	1.69	5.47	9.72
124	III	53.76	0.60	19.47	6.02	0.01	0.41	1.71	7.92	8.44
125	1024	40.10	2.00	13.80	13.00	0.20	7.30	12.80	5.30	1.40
126	1025	51.30	0.50	21.10	4.10	0.20	0.70	1.50	9.50	7.30
127	1026	51.50	0.60	21.20	4.20	0.20	0.80	1.60	9.50	7.50
128	1027	38.20	0.20	14.20	15.70	0.60	7.90	11.70	6.70	2.60
129	1028	67.20	0.20	15.80	3.10	0.10	0.70	1.60	4.80	5.80
130	1029	50.40	0.10	20.90	4.80	0.20	1.50	2.00	8.20	7.50
131	1030	51.70	0.50	22.00	4.00	0.25	0.70	1.40	10.20	8.00
132	1031	50.70	0.40	21.50	4.60	0.20	0.90	2.40	9.10	7.60
133	1032	55.80	0.50	22.00	4.60	-	0.40	-	2.00	13.00
134	1033	53.20	0.01	22.00	4.00	0.20	1.70	1.40	8.40	8.00
135	1034	38.60	2.80	14.40	12.10	0.15	7.90	13.80	4.50	1.50
136	1035	47.00	2.40	17.50	12.20	0.15	4.00	3.00	2.60	5.70
137	1036	52.20	0.20	22.50	4.10	0.20	0.60	0.70	9.20	7.30
138	1037	52.00	0.70	12.90	6.60	0.10	4.60	9.10	4.90	6.50
139	1038	68.00	0.30	15.80	2.90	0.05	1.00	1.50	5.20	5.10
140	1039	53.32	0.50	23.39	3.48	0.48	2.35	2.40	4.62	6.22
141	1040	51.58	0.01	20.58	4.69	0.01	0.01	2.92	6.27	8.79

FIGURA 7 - Mapa geológico e amostral do Maciço Alcalino de Iporã, de acordo com Danni (1974). Na parte superior o Maciço Morro do Macaco (MM) e na inferior Córrego dos Bois (P).

TABELA 9 - Proporções de óxidos de elementos principais (percentagem em peso), em amostras de rochas alcalinas do Maciço de Iporã. Procedimento analítico e dados adicionais em Danni (1974).

Nº	Nº Ref.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe _{tot}	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
142	MM . 4A	45.22	3.53	17.49	9.15	0.21	2.37	7.61	5.18	5.85
143	MM . 3A	51.48	1.58	19.54	5.69	0.16	1.02	4.37	5.56	7.15
144	MM . 39	53.22	1.21	19.90	5.14	0.16	0.76	4.05	5.54	7.33
145	P . 97	59.52	0.81	18.26	3.84	0.12	0.48	2.25	4.55	8.08
146	P . 47	43.24	8.65	12.20	11.49	0.07	7.61	10.81	2.53	2.10
147	P . 142	42.85	4.80	7.85	14.59	0.08	11.79	12.72	1.21	1.40
148	MM . 128A	41.73	4.37	11.31	12.70	0.07	11.73	10.84	1.31	2.91
149	MM . 133	44.35	2.70	11.47	13.62	0.29	9.08	12.60	2.49	2.02
150	MM . 244	43.07	3.54	14.61	12.33	0.21	4.54	10.26	3.28	4.60
151	P . 114	45.03	1.40	5.38	10.83	0.07	21.12	12.34	0.54	0.93
152	P . 7	47.54	1.67	5.69	6.92	0.03	16.22	20.48	0.28	0.06
153	P . 140	46.40	2.80	6.32	10.45	0.04	11.86	18.61	0.90	0.74
154	P . 125	47.66	2.09	5.15	10.40	0.18	15.12	15.90	0.96	1.24
155	MM . 254	43.00	2.55	3.16	11.08	0.15	17.03	19.58	0.24	0.01
156	P . 35	36.52	0.28	0.44	12.07	0.08	42.23	0.53	0.09	0.14
157	P . 2	36.59	0.16	0.01	12.53	0.08	41.77	0.49	0.13	0.13
158	MM . 110	33.48	0.10	0.40	10.82	0.18	39.68	0.74	0.01	0.01
159	P . 73	37.30	0.10	0.44	11.38	0.20	44.57	0.47	0.01	0.01
160	MM . 251A	40.78	1.34	2.22	11.04	0.19	23.64	14.85	0.01	0.01
161	P . 31	39.78	0.59	0.59	11.38	0.07	32.57	26.50	0.13	0.03
162	MM . 103	35.78	0.85	1.38	12.57	0.20	37.27	2.52	0.02	0.20

TABELA 10 - Proporções de óxidos de elementos principais (percentagem em peso), em rochas alcalinas dos Maciços de Jacupiranga, Ipanema e outros. Procedimento analítico e dados adicionais em Melcher (1954), Johannsen (1938), Guimarães (1960) e Herz (1977).

Nº	Nº Ref.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe _{tot}	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
163	01 JACU	38.58	4.32	6.15	19.84	0.16	11.47	18.60	0.78	0.13
164	02 JACU	39.60	4.00	4.70	15.10	0.01	13.30	21.60	0.06	0.03
165	03 JACU	49.81	2.24	16.34	8.38	0.01	2.97	6.69	5.51	4.17
166	01 IPAN	46.84	0.80	12.56	9.07	0.05	5.55	9.24	2.52	6.04
167	02 IPAN	51.42	1.10	3.08	21.66	0.32	3.50	8.74	5.10	2.18
168	03 IPAN	57.00	0.60	10.65	10.62	0.18	1.97	4.82	3.42	8.58
169	04 IPAN	47.00	0.80	1.50	15.74	0.01	14.19	8.71	4.55	1.94
170	05 IPAN	61.50	2.00	9.60	15.74	0.01	1.80	3.90	1.50	1.20
171	01 PIED	46.20	0.80	14.10	10.20	0.01	4.70	11.70	4.00	2.40
172	01 ANIT	57.04	0.37	6.61		0.17	3.58	6.16	4.21	8.12
173	01 SALI	33.27	9.86	2.80	19.83	0.07	12.35	17.50	1.42	1.82
174	02 SALI	42.63	12.89	1.50	8.41	0.09	6.55	20.39	3.56	1.82
175	01 TAPI	56.10	0.60	22.30	3.10	0.01	0.50	0.50	0.90	14.40

FIGURA 8 - Mapa geológico e amostral (Análises Modais) do Maciço Alcalino de Jacupiranga, de acordo com Amaral, 1978 (Amostras na Figura 47).

- Eliminando as amostras de rochas ultramáficas normais e considerando-se apenas as alcalinas segundo a definição de Sorensen (1974a), o número de amostras fica reduzido a cento e setenta e cinco, como consta nas Tabelas 2 a 10.

- Elaborando um critério de seleção ("screen") com a eliminação das amostras com soma total em % em peso de óxidos menor do que 99 e maior do que 101, esse número fica reduzido para aproximadamente 100 amostras.

- Constam das tabelas algumas amostras anteriores aos casos W-1 e G-1 (Fairbairn, 1951), portanto analisadas sem grande precisão e exatidão e outras amostras posteriores a esses casos. A Tabela 1 apresenta as amostras assim discriminadas.

- A maioria dos maciços amostrados apresenta idades entre 60/80 milhões de anos, estabelecidas por Amaral et al. (1967). Na Tabela 1 acham-se discriminadas as amostras de acordo com o grupo de idades.

- A densidade amostral para cada maciço é apresentada também na Tabela 1, onde se observa que as maiores densidades referem-se a aqueles maciços onde foram elaboradas as teses de doutoramento, previamente citadas, ou seja, Itapirapuã, Tunas, Iporá, Santa Fé e Juquiá, reforçando a necessidade de considerar esses trabalhos como sendo os de melhor qualidade amostral. Verifica-se ainda que as menores densidades amostrais referem-se a: Itatiaia, Poços de Caldas, Salitre, Tapira e São Sebastião, ou seja, aos maciços de grandes áreas, embora o número de amostras em alguns deles seja bem razoável (apresentam também o inconveniente de não serem localizadas). Apesar dessas considerações, considera-se que o número teórico de amostras por maciço não é proporcional apenas às suas áreas mas também às variações amostrais (assunto a ser discutido no próximo item).

Os teores de elementos traços são apresentados na Tabela 27. O número de dados amostrais apresentado é relativa-

mente pequeno, mas poderá auxiliar nas inferências geológicas a serem efetuadas a partir da análise dos elementos maiores. As amostras são assim distribuídas: 64 análises para rochas alcalinas de várias localidades: 34 para Poços de Caldas, 11 para o Estado do Rio (Itatiaia, Nova Iguaçu, Mendanha e Marapicu), 4 para Cabo Frio, 2 para Porto Murinho e 1 para Ipanema, apresentadas por Guimarães (1962) e 19 análises para rochas alcalinas de Itapirapuã, publicadas em Gomes e Dutra (1970). Os elementos traços, em ambos os casos, foram analisados utilizando as técnicas descritas por Herz e Dutra (1960).

- Os dados amostrais referentes às análises modais constam das Tabelas 11 a 18 e, à semelhança das análises químicas, algumas acham-se localizadas nas figuras anexas (2 a 8) e outras são desprovidas de localização. Nesse caso, os maciços bem amostrados são também aqueles de Itapirapuã, Tunas, Santa Fé, Iporá e Juquiá. Os maciços de São Sebastião e Jacupiranga não dispõem de análises modais computadas e apenas estimativas modais semi-quantitativas de algumas amostras (a Figura 7 refere-se às amostras do maciço de Jacupiranga). Os outros maciços amostrados são Anitápolis (Melcher e Coutinho, 1966), Monte do Trigo (Coutinho e Melcher, 1973), Itapirapuã (Gomes, 1970), Tunas (Fuck, 1972), Iporá (Dami, 1974), Santa Fé (Sousa, 1978), Juquiá (Born, 1971b), Itatiaia (Ribeiro Filho, 1967), Ipanema (Guimarães, 1960), Ilha de Búzios (Bjornberg, 1955) e Poços de Caldas (Almeida, 1977).

- O erro amostral, em todos os casos, tende a ser grande, porque o número de amostras por unidade petrográfica e por maciço é em geral pequeno (alguns são desprovidos de amostras) e porque esse número não é proporcional à variância amostral a nível de unidade petrográfica e de maciço. Sabe-se da estatística descritiva que a falta de elaboração de um plano amostral conduz a erros ditos - erros amostrais. A análise estatística pode contudo auxiliar na análise dos erros inerentes embora não se possa determinar as probabilidades de erro ou acerto dessas medidas.

TABELA 11 - Composições modais de rochas do Maciço Alcalino de Itapirapuã, em Gomes (1967).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Feldspato Alcalino	-	5.8	47.4	25.6	14.2	18.9	29.9	26.6	39.9	33.4	50.6	47.8	40.9
Albita	-	-	-	-	tr	tr	0.1	-	-	-	-	0.1	10.2
Nefelina	23.5	34.7	2.8	8.6	25.6	25.5	42.6	20.6	35.3	11.6	28.5	17.2	13.0
Agregado	9.4	6.4	15.9	26.5	17.5	19.4	5.1	-	-	2.8	2.4	5.7	0.4
Cancrinita	2.5	tr	4.4	2.1	6.3	8.7	0.8	13.0	1.1	14.6	12.6	21.7	9.7
Piroxênio	46.1	31.0	3.2	19.2	25.4	18.3	13.3	17.6	11.9	31.9	3.5	6.3	24.1
Melanita	0.3	14.9	22.6	15.1	8.3	7.1	6.0	14.4	8.5	-	2.5	0.4	-
Outros	18.2	7.4	3.6	2.9	2.7	2.5	2.2	7.5	3.3	5.7	0.3	0.8	1.7
Q	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A	-	13	63	41	22	26	38	44	52	46	27	54	54
P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F	100	87	37	59	78	74	62	56	48	54	73	46	46
F	35	41	23	37	49	53	48	34	36	29	43	44	23
A	-	6	47	25	14	18	30	27	40	33	51	48	51
M	65	53	30	38	36	28	22	40	24	39	06	08	26
Classificação original	Biotita Melteigito	Melanita Malignito		Melanita	—		Nefelina			Sienitos		Nefelina Sienito	

	14	15	16	17	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Feldspato Alcalino	54.3	64.5	43.3	37.3	47.1	59.0	38.5	20.4	64.6	49.0	47.2	49.2	30.2
Albita	-	-	7.0	8.6	tr	0.2	-	tr	tr	-	tr	0.1	-
Nefelina	33.0	20.1	20.8	21.8	34.6	18.3	43.2	43.6	15.2	22.4	37.7	36.1	30.5
Agregado	0.5	-	-	-	1.5	8.1	-	2.0	2.5	3.7	0.9	1.2	0.7
Cancrinita	2.6	5.5	8.1	9.6	4.4	7.8	1.1	3.8	6.3	13.7	4.9	6.2	9.1
Piroxênio	5.2	7.2	19.1	20.9	10.9	5.9	9.4	28.5	9.2	9.1	7.3	4.0	25.8
Melanita	4.3	2.0	-	-	-	-	6.8	0.2	-	0.1	0.1	2.0	tr
Outros	0.1	0.7	1.7	1.8	1.5	0.7	1.0	1.5	2.2	2.0	1.9	1.2	3.7
Q	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A	60	72	63	59	54	63	46	29	73	55	52	53	44
P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F	40	28	37	41	46	37	54	71	27	45	48	47	56
F	36	26	29	31	40	34	44	49	24	40	43	43.5	40
A	54	65	50	45	47	59	38	20.5	65	49	47	49	30
M	10	09	21	24	13	07	16	30.5	11	11	10	7.5	30
Classificação original	N E F E L I N A						S I E N I T O S						

	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Feldspato Alcalino	45.7	55.3	15.3	37.9	37.0	35.8	50.4	27.2	22.6
Albita	-	-	-	-	tr	5.4	0.5	tr	-
Nefelina	40.3	-	33.5	10.7	37.7	25.7	19.0	53.2	21.3
Agregado	0.2	0.4	7.6	7.1	0.7	0.4	-	-	-
Cancrinita	0.7	28.9	tr	28.7	7.2	11.0	0.8	tr	1.9
Piroxênio	11.1	-	30.3	8.3	14.9	18.7	29.1	13.6	19.2
Melanita	1.7	-	9.4	-	-	-	-	-	-
Outros	0.3	-	3.9	7.3	2.5	3.0	0.1	6.0	35.0
Q	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A	53	65	27	45	45	52	72	33.75	50.0
P	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F	47	35	73	55	55	48	28	66.25	50.0
F	41	29	41	46	46	37	20	53	23.5
A	46	55	15	38	37	41	50	27	22.5
M	13	16	44	16	17	22	30	20	54
Classificação original	N E F E L I N A				S I E N I T O S				

TABELA 12 - Composições modais de rochas do Maciço Alcalino de Tunas, em Fuck (1972).

	Tu-129	Tu-218	Tu-186	Tu-119	Tu-149	Tu-171	Tu-173	Tu-179	Tu-183	Tu-185	Tu-216	Tu-219
Ortoclásio	87.5	90.5	45.6	-	-	-	-	10.4	-	0.4	0.5	-
Albita	-	-	22.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Plagioclásio	2.3	-	-	73.5	77.3	72.4	66.7	60.6	57.2	73.0	69.0	66.4
Nefelina	-	-	2.2	-	-	-	0.1	1.0	-	-	4.9	-
Sodalita	0.1	2.1	8.8	-	-	-	-	0.1	0.4	-	1.6	-
Piroxênio	-	3.8	14.5	6.4	1.0	4.7	6.4	1.8	9.8	3.8	6.7	17.7
Hornblenda	8.4	2.7	-	3.1	2.2	2.6	5.4	0.2	5.9	6.1	0.1	1.1
Kaersutita	-	-	-	3.3	0.5	0.1	6.2	17.9	13.9	0.7	-	5.0
Biotita	0.4	-	3.4	4.9	11.4	11.3	7.2	5.2	8.1	10.7	6.7	1.5
Opacos	0.7	0.9	0.2	2.8	2.1	7.1	4.1	0.9	1.8	1.2	3.6	3.2
Apatita	0.1	Tr	0.1	4.2	2.1	0.7	1.7	1.4	1.0	1.3	1.4	1.1
Zircão	0.2	-	0.1	-	-	-	-	-	-	0.1	-	-
Olivina	-	-	-	1.6	0.4	0.1	1.2	-	-	-	5.0	3.0
Zeólitas	0.2	-	1.2	-	-	1.0	0.6	0.6	-	2.4	0.5	-
Clorita	-	-	-	-	1.2	-	-	-	-	-	-	0.8
Epidoto	-	-	-	0.2	1.8	-	-	-	-	-	-	-
Titanita	0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Carbonato	-	-	-	-	-	-	0.4	-	-	0.3	-	0.2
Q	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A	97.3	97.7	86.3	-	-	-	-	14.5	-	0.5	0.6	-
P	2.6	-	-	100	100	100	99.8	84.0	99.3	99.5	90.8	100
F	0.1	2.3	13.7	-	-	-	0.2	1.5	0.7	-	8.6	-
F	0.1	-	-	-	-	-	-	2.8	1.0	-	21.0	-
A	89.5	92.4	78	-	-	-	0.3	26.4	-	1.5	1.6	-
M	10.4	7.6	22	100	100	100	99.7	70.8	99.0	98.5	77.4	100
Classificação original	Pulaskitos	Foiaito	G a b r o s					A l c a l i n o s				

	Tu-88	Tu-161	Tu-1656	Tu-1676	Tu-169	Tu-223	Tu-224	Tu-148	Tu-153	Tu-165a	Tu-170	Tu-172	Tu-175
Quartzo	4.6	0.2	-	-	0.4	-	0.3	-	-	-	-	-	-
Ortoclásio	80.6	93.8	89.6	89.3	92.3	91.1	94.4	81.4	85.1	84.0	92.1	91.2	84.1
Albita	-	-	-	-	-	0.2	-	0.2	-	-	-	-	-
Plagioclásio	5.3	-	0.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nefelina	-	-	-	-	-	-	-	-	1.1	-	-	-	-
Sodalita	-	-	-	-	-	-	-	4.0	4.3	1.2	1.6	0.7	1.7
Piroxênio	0.5	2.9	4.0	4.0	3.1	3.1	2.7	5.0	2.4	4.3	2.6	3.9	4.2
Olivina	-	1.0	1.2	1.4	1.8	0.3	0.5	-	-	-	-	-	-
Hornblenda	8.0	0.8	3.3	3.2	1.2	0.9	0.7	6.5	5.7	9.5	2.2	2.9	5.5
Biotita	-	0.3	0.9	0.8	0.3	1.7	0.3	0.1	-	-	-	-	-
Opacos	0.7	0.8	0.8	1.2	0.7	1.7	0.9	2.5	0.4	0.9	1.4	1.3	0.2
Apatita	tr	0.2	tr	0.1	0.1	0.7	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	tr	tr
Zircão	0.3	tr	tr	tr	0.1	0.1	tr	0.1	-	-	-	-	-
Titanita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Epídoto	-	-	-	-	-	-	-	0.1	-	-	-	-	-
Zeólitas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.3
Agregado	-	-	-	-	-	-	-	-	0.9	-	-	-	-
Clorita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Carbonato	-	-	-	-	-	0.2	-	-	-	-	-	-	-
Q	05	0.5	-	-	0.5	-	0.5	-	-	-	-	-	-
A	89	99.5	99.5	100	99.5	100	99.5	95	94	98.5	98.5	99.0	98.0
P	06	-	0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F	-	-	-	-	-	-	-	5	6	1.5	1.5	1.0	2.0
f	-	-	-	-	-	-	-	4.0	5.4	1.2	1.6	0.7	1.7
A	89.5	94	90	89	93	91	94.5	81.6	85.1	84.0	92.1	91.2	84.1
M	10.5	6	10	11	07	09	5.5	14.4	9.5	14.8	6.3	8.1	14.2
Classificação original	S i e n i t o s			A l c a l i n o s			P u l a s k i t o s						

	Tu-226	Tu-227	Tu-207	Tu-209	Tu-230	Tu-225	Tu-228
Ortoclásio	3.3	2.8	14.8	28.6	23.0	5.1	6.6
Plagioclásio	76.8	77.5	66.6	58.2	53.7	77.5	66.6
Nefelina	-	1.0	0.2	-	-	-	-
Sodalita	-	-	-	-	-	-	-
Olivina	0.4	0.2	-	-	-	-	-
Piroxênio	8.2	1.7	2.1	3.8	7.5	3.8	7.7
Hornblenda	0.8	4.1	9.6	4.5	0.6	2.3	1.5
Kaersutita	-	-	-	-	-	-	-
Biotita	8.2	7.4	2.6	1.4	12.1	9.1	14.2
Opacos	0.7	3.2	1.7	1.3	0.8	3.2	1.4
Apatita	1.1	1.1	0.5	0.6	1.0	1.1	1.3
Zeólitas	-	1.1	1.9	1.4	-	0.1	0.6
Clorita	-	-	-	-	0.1	0.1	-
Zircão	-	0.1	-	0.2	0.3	0.2	0.1
Q	-	-	-	-	-	-	-
A	4.1	3.4	18.1	32.95	30.8	06	9.0
P	95.1	95.4	81.6	67.05	69.2	94	91.0
F	-	1.2	0.3	-	-	-	-
F	-	4.4	0.6	-	-	-	-
A	12.5	12.5	44.3	68.4	51.6	71.9	12.7
M	87.5	83.1	55.1	31.6	48.4	28.1	80.3
Classificação original	G a b r o s A l c a l i n o s		Sienodioritos		Dioritos		

TABELA 13 - Composições modais de rochas do Maciço Alcalino de Juquiã, em Born (1971b).

	Se-60	Se-84	Se-39	Se-11	S-14	S-17	Se-99	Se-16	S-11	Se-50	Se-111	Se-53	Se-103
Feldspato Alcalino	56.5	84.5	74.5	35.5	54.5	52.0	73.0	33.0	29.0	1.5	1.0		
Feldspatóide	22.5	3.6	13.0	33.5	24.5	23.5	1.5	28.5	36.5	61.1	53.5	29.5	14.5
Piroxênio	9.5	0.5	1.5	22.0	10.5	tr	14.5	23.0	18.5	26.5	42.0	34.5	44.0
Olivina	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Anfibólio	1.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	tr	4.0
Biotita	4.5	8.0	8.0	3.0	2.5	7.5	5.5	6.5	5.5	6.5	0.5	34.5	30.0
Titanita	3.0	0.5	1.0	3.0	2.0	1.5	1.5	4.0	3.0	1.5	2.5	1.5	-
Cancrinita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Opacos	1.5	1.0	1.5	1.0	3.0	1.0	2.5	4.0	3.5	tr	1.0	tr	5.0
Outros	1.0	1.5		2.0	3.0	15.0	1.5	1.0	4.5	3.0		tr	2.0
Q	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A	71	96	85	51	69	69	98	53.5	44	2.5	2.0	-	-
P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F	29	04	15	49	31	31	02	46.5	56	97.5	98	100	100
F	23	04	13	34	26	27.5	2.0	28	38	63	54	30	15
A	57	86	75	37	56	61.0	74.0	34	30.5	2	1		
M	20	10	12	29	18	11.5	24.0	38	31.5	35	45	70	85
Classificação original	N e f e l i n a					S i e n i t o s							

	Se-95	Se-27	P-23	Se-31	Se-104	P-18	Se-45	Se-47	Se-61	Se-75	Se-74	Se-26	Se-35
Plagioclásio	-	-	7.0	-	13.5	-	-	-	-	-	-	-	-
Feldspato Alcalino	-	-	-	14.0	-	37.5	75.0	65.0	50.0	14.0	-	18.5	54.5
Feldspatóide	3	-	-	-	-	-	-	28.5	20.0	-	21.0	-	-
Piroxênio	81.5	60.0	57.0	49.0	55.5	42.0	23.5	1.0	4.0	46.0	58.5	42.0	28.0
Olivina	-	33.5	24.0	19.5	-	3.5	-	-	-	23.0	-	16.5	1.0
Anfibólio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biotita	6	1.5	0.5	12.0	13.0	9.5	1.0	-	10.0	8.0	11.0	8.5	12.5
Cancrinita	-	-	-	-	-	-	tr	-	3.0	-	-	-	-
Titanita	-	-	-	-	-	-	tr	-	2.0	-	-	-	-
Opacos	8.5	2.5	9.5	2.5	16.0	5.0	tr	3.5	3.0	6.0	9.0	14.5	4.0
Outros	0.5	3.0	1.5	2.5	2.5	2.5	-	2.0	8.5	3.0	-	-	-
Q	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-
A	-	-	-	100	-	100	100	70	71.5	100	-	100	-
F	100	100	100	-	-	-	-	30	28.5	-	100	-	100
F	3	-	-	14	-	-	-	28	20	-	21	-	-
A	-	-	-	-	-	38	75	65	50	44	-	19	55
M	97	100	100	86	100	62	25	07	30	86	79	81	45
Classificação original	U l t r a b á s i c a s						D i q u e s						

TABELA 14 - Composições modais de rochas do Maciço Alcalino de Monte do Trigo, em Coutinho e Melcher (1973).

	Mt-5	Mt-1	Mt-20a	Mt-20b	Mt-19	Mt-23	Mt-25	Mt-28	Mt-30b	Mt-1a	Mt-2	Mt-5
Feldspato Alcalino	pr	pr	-	-	75	93	85	83	83	61	67	72
Plagioclásio	15	9	12	7	-	-	-	-	-	-	-	-
Piroxênio	44	52	47	49	-	-	4	1	-	11	2	2
Anfibólio	4	16	8	18	10	4	5	8	12	-	-	pr
Feldspatóide	15	3	-	-	12	3	3	6	2	26	31	18
Zeólitas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
Opacos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biotita	2	3	4	4	pr	-	3	-	pr	-	-	pr
Olivina	13	8	28	19	-	-	-	-	-	-	-	-
Outros	7	3	1	3	3	pr	pr	2	pr	2	pr	2
Mesóstase	pr	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Q	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A	-	-	-	-	86	92	96.5	93.25	97.5	70.0	68.5	80
P	50	25	100	100	-	-	-	-	-	-	-	-
F	50	75	-	-	14	3	3.5	6.75	2.5	30.0	31.5	20
F	17.6	3.3	-	7	12	3	3	6	2	26	31	24
M	82.4	96.7	100	93	13	4	12	11	15	61	2	4
A	-	-	-	-	75	93	85	83	83	13	67	72
Classificação original	Melateralitos		Olivina melagabros		Foiaitos				Microfoiaitos			

	Mt-aV	Mt-15	Mt-22	Mt-26	Mt-27	Mt-8	Mt-9	Mt-32
Feldspato Alcalino	pr	75	75	75	69	47	70	68
Plagioclásio	-	-	-	-	-	-	-	-
Piroxênio	75	3	4	pr	pr	8	12	12
Anfibólio	pr	3	5	7	15	-	-	4
Feldspatóide	7	18	15	17	15	37	-	9
Zeólitas	-	-	-	-	-	-	-	-
Opacos	-	-	-	-	-	-	-	-
Biotita	1	pr	-	pr	1	8	18	7
Olivina	4	-	-	-	-	-	-	-
Outros	13	1	1	1	pr	-	-	-
Mesóstase	pr	-	-	-	-	-	-	-
Q	-	-	-	-	-	-	-	-
A	-	80.5	83.3	81.5	82.1	60	100	88.3
P	-	-	-	-	-	-	-	-
F	100	19.5	16.7	18.5	17.9	40	-	11.7
F	7	18	15	17	15	37	-	9
A	-	75	75	75	69	47	70	68
M	93	07	10	8	16	16	30	73
Classificação original	Jacu-piranguito	Microfoiaitos				Fonólitos		

TABELA 15 - Composições modais de rochas do Maciço Alcalino de Anitápolis, em Melcher e Coutinho (1966).

	4	23	39a	39b	9	21	33a	33b	40	5	2	23	5
Feldspato Alcalino	94.5	83.0	74.4	76.6	81.0	65.0	57.0	56.1	48.8	50.5	45.6	36.6	33.0
Plagioclásio	pr	8.5	9.4	8.8	1.8	10.0	1.8	0.4	8.4	-	-	1.6	0.1
Piroxênio Sódico	3.5	7.5	11.4	14.2	15.8	17.5	27.6	28.7	37.7	46.0	47.2	51.2	60.3
Anfibólio Sódico	pr	-	4.4	0.4	0.2	-	-	-	0.5	2.5	7.2	-	1.8
Apatita	1.0	1.0	0.2	pr	0.2	5.0	12.2	12.0	0.8	-	-	10.2	-
Opacos	-	-	0.2	pr	0.2	-	1.1	1.3	-	1.0	-	-	-
Titanita	pr	pr	-	-	0.4	-	0.2	1.5	0.2	-	-	0.4	-
Calcita	-	-	-	-	-	-	-	-	3.6	-	-	-	4.4
Q	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A	100	90	89	89.5	98	86.5	96.5	99.3	85	100	100	96	99.5
P	-	10	11	10.5	2	13.5	3.5	0.7	15	-	-	4	0.5
F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M	5.0	9.0	18	15.5	16.5	18	35	35	44	49.5	56	58	65
A	95.0	91.0	82	84.5	83.5	72	65	65	56	50.5	46	42	35
Classificação original	Pulaskito	Fenito			Pulaskito	Fenito	Pulaskito	Fenito	Pulaskito	Shonkinito			

	23 Anit	21 Anit	I Anit	II Anit	III Anit	IV Anit	V Anit	6a	6a2	6a3	18a	37	43
Feldspato Alcalino	22.6	17.8	-	-	-	-	-	-	-	-	4	pr	4.0
Plagioclásio	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Piroxênio Sódico	65.0	76.0	52.6	56.2	57.0	62.5	51.0	3.5	-	8.5	6.0	12.5	7.0
Anfibólio Sódico	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Feldspatóide	-	-	-	-	-	-	-	13.5	-	10.0	9.0	8.0	9.0
Biotita	-	-	38.0	34.0	40.0	29.5	44.0	-	-	1	1	0.5	pr
Opacos	-	-	9.0	3.8	3.0	1.4	4.8	-	-	pr	-	pr	-
Apatita	10.8	6.2	0.1	5.0	-	3.0	-	1.0	-	2.5	0.5	4.0	0.5
Outros	0.6	-	0.2	1.0	-	3.6	0.3	-	-	pr	pr	pr	-
Q	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A	96	100	-	-	-	-	-	-	-	-	31	-	31
P	04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F	-	-	-	-	-	-	-	100	-	100	69	100	69
F	-	-	-	-	-	-	-	79	-	51	56	-	38
M	74	81	100	100	100	100	100	21	-	49	44	-	62
A	26	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20
Classificação original	Shonkinito		P i r o x e n i t o s					D i q u e s					

TABELA 16 - Composições modais de rochas do Maciço Alcalino de Santa Fê, em Souza (1978).

	Se-529	Sf-V-3	Sf-V-5	Sf-01c	Sf-Ga-1	Sf-531	Sf-906
Clinopiroxênio	63.7	57.2	44.5	57.0	46.7	31.9	31.2
Olivina	-	25.9	29.5	5.4	2.4	0.2	0.2
Serpentina	-	0.6	4.1	-	-	-	-
Leucita	19.3	6.2	11.1	-	-	-	-
Pseudo-Leucita	2.2	0.6	-	-	-	-	-
Palgioclásio	-	-	-	6.3	9.5	-	-
Alcali-feldspato	-	-	-	3.2	2.8	38.5	41.1
Nefelina	-	0.4	-	3.0	4.5	9.9	11.1
Intercrescimentos Fêlsicos	-	-	-	9.6	22.0	2.1	1.5
Biotita	9.5	7.5	5.7	9.2	3.4	9.0	7.0
Opacos	3.9	1.0	4.5	4.6	7.7	6.0	6.5
Apatita	1.3	0.5	0.7	1.2	0.7	2.3	1.4
Carbonato	0.1	-	-	0.5	0.3	-	-
Titanita	-	-	-	-	-	0.1	1.4
A	-	-	-	25	16.5	79.5	79.0
P	-	-	-	50	56.5	-	-
F	100	100	100	25	27.0	20.5	21.0
F	21.5	7.2	11.1	3.6	6.7	10.4	11.5
A	-	-	-	3.8	4.1	40.3	42.3
M	78.5	92.8	88.9	92.6	89.2	49.3	46.2
Classificação original	M i s s o u r i t o s			Essexitos		Malignitos	

TABELA 17 - Composições modais de rochas do Maciço Alcalino de Iporã, em Danni (1974).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Olivina	7.8	-	8.3	-	-	-	9.4	-	-	-	-	-
Augita	61.2	0.5	56.2	43.5	54.6	53.7	31.1	27.4	18.8	2.5	0.4	-
Hastingsita	-	8.9	-	-	-	-	1.0	-	-	12.0	12.0	7.2
Plagioclásio	6.3	11.3	6.6	14.5	0.9	-	-	-	-	-	-	8.3
Anortoclásio	7.5	60.6	7.2	-	-	2.6	28.6	6.3	5.4	16.5	30.0	69.8
Nefelina	3.9	13.3	6.9	4.0	16.9	9.0	22.2	17.1	16.8	12.8	7.3	3.3
Albita	*	*	*	19.5	12.8	16.1	*	32.9	43.2	44.8	35.0	10.6
Biotita	5.4	4.4	5.5	10.5	2.6	8.1	1.0	3.7	4.3	-	-	-
Titanita	-	1.3	-	-	-	-	-	4.5	4.5	1.2	1.5	0.7
Apatita	0.2	-	0.3	1.0	3.1	0.4	-	1.2	0.2	0.5	0.2	0.2
Analcima	*	*	4.5	2.5	*	5.1	0.5	*	1.3	2.0	3.8	-
Natrolita	*	*	*	*	*	*	*	2.9	3.0	8.0	9.5	-
Magnetita	7.7	0.7	4.6	4.5	9.1	5.0	6.2	4.0	2.5	0.2	0.3	0.3
Q	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A	42.5	71.1	34.8	51.3	42.0	67.5	56.0	70.0	74.0	83.0	90.0	96.0
P	35.5	13.3	31.9	38.2	3.0	-	-	-	-	-	-	-
F	22.0	15.6	33.3	10.5	55.0	32.5	44.0	30.0	26.0	17.0	10.0	4.0
F	4.5	45.70	14.6	7.7	17.5	14.5	31.8	17.6	18.7	16.0	12.3	3.6
M	95.5	54.30	85.4	69.2	69.0	69.0	68.2	42.0	31.2	17.7	15.9	9.1
A	-	-	-	23.1	13.5	16.5	-	40.4	50.1	66.3	71.8	87.3
Classificação original	S i e n o g a b r o s			Shonkinitos		Malignitos		S i e n i t o s				

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Olivina	5.7	9.7	5.5	7.5	15.0	8.1	9.8	8.0	14.6	12.2	10.4
Augita	56.4	53.0	51.2	54.0	46.0	31.1	36.5	37.2	51.8	54.0	55.1
Plagioclásio	24.7	26.4	20.5	23.7	18.0	37.5	24.6	27.5	16.2	9.3	15.0
Ilm. + Magn.	8.0	8.0	11.3	8.0	9.4	7.0	6.9	7.2	6.4	4.9	7.5
Biotita	4.4	2.5	2.0	1.5	5.0	3.8	5.8	4.0	4.1	1.7	2.0
Ortoclásio	-	-	-	-	2.0	-	0.4	-	3.9	2.0	3.6
Nefelina	0.8	-	9.0	5.3	4.0	11.7	14.5	15.7	2.7	7.0	6.1
Apatita	traços	0.4	0.5	0.2	traços	0.8	1.4	0.4	0.3	0.6	0.4
Analcina	-	-	-	-	0.6	-	-	-	-	4.4	-
Q	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A	-	-	-	-	8.1	-	1.1	-	17.1	9.0	14.7
P	96.8	100	69.5	81.7	73.1	76.2	62.2	63.6	70.9	41.7	60.7
F	3.2	-	30.5	18.3	18.8	23.8	36.7	36.4	12.0	49.3	24.6
F	1.1	-	11.3	7.5	5.6	18.7	19.2	21.7	3.4	12.7	7.1
M	98.9	100	88.7	92.5	92.0	81.3	80.2	78.3	92.0	84.9	88.6
A	-	-	-	-	2.4	-	0.6	-	4.6	2.4	4.3
Classificação original	Gabros Alcalinos		T e r a l i t o s					E s s e x i t o s			

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Olivina	35.2	20.3	11.4	43.5	43.2	37.0	24.8	49.3	9.7	9.3
Clinopiroxênio	22.1	57.7	85.5	55.2	55.3	62.0	75.0	49.5	85.0	85.2
Ortopiroxênio	38.4	4.9	-	-	-	-	-	-	1.0	-
Biotita	2.5	12.9	1.3	-	-	-	-	-	3.8	3.0
Plagioclásio	0.3	3.5	-	-	-	-	-	-	-	-
Ilm. + Mang.	1.5	0.7	1.8	1.3	1.5	1.0	0.2	1.2	0.5	1.5
Nefelina	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Apatita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Q	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Classificação original	P i r o x e n i t o s									

	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Olivina	45.7	31.3	18.4	17.8	4.0	0.5	7.4	10.1	-	2
Clinopiroxênio	49.3	64.5	64.3	72.2	83.2	79.6	92.1	87.7	91.5	71
Ortopiroxênio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biotita	3.0	3.2	14.4	8.5	6.0	6.8	0.1	1.0	1.5	13
Plagioclásio	1.2	0.4	2.2	1.3	5.8	8.8	0.4	-	-	9
Ilm. + magn.	0.8	0.6	0.3	-	3.5	4.0	-	1.2	7.0	3
Nefelina	-	traços	-	-	0.2	-	-	traços	-	-
Apatita	-	traços	0.2	0.2	0.2	0.3	-	-	-	traços
Q	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P	100	100	100	100	97	100	100	100	100	100
F	-	-	-	-	03	-	-	-	-	-
F	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
M	100	100	100	100	99	100	100	100	100	100
A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Classificação original	P i r o x e n i t o s									

	1	2	3	4	5	6	7	8
Olivina	1.8	1.2	0.3	-	10.8	15.5	9.8	16.2
Augita	6.0	3.9	0.2	-	7.2	2.3	0.3	-
Augita	35.0	30.6	43.4	54.0	43.5	51.0	51.5	50.6
Analcima	19.9	25.2	39.1	32.0	25.4	10.0	23.1	19.8
Zeólitas	24.0	27.6	1.6	0.4	3.1	0.1	11.0	8.0
Biotita	1.6	2.3	4.6	0.5	2.8	0.1	0.5	-
Apatita	0.2	0.4	traços	0.2	0.2	-	-	0.4
Calcita	0.5	-	-	0.1	0.2	2.7	-	-
Magnetita	11.0	8.6	10.8	11.8	6.9	8.2	3.9	3.4
Q	-	-	-	-	-	-	-	-
A	-	-	-	-	-	-	-	-
P	-	-	-	-	-	-	-	-
F	100	100	100	100	100	100	100	100
F	43.9	52.8	40.7	33.4	28.4	20.2	34.0	28.0
M	56.1	47.2	59.3	66.6	71.6	79.8	66.0	72.0
A	-	-	-	-	-	-	-	-
Classificação original	M o n c h i k i t o s				F o u r c h i t o s			

TABELA 18 - Composições modais de rochas do maciço alcalino de Poços de Caldas, em Almeida (1977).

	110	03	36	90	196	14	81	121	128	327
Ortoclássio	39	57	43	51	40	60	42	75	44	47
Nefelina	26	16	20	30	27	20	30	8	5	13
Egirina	24	13	22	11	25	5	10	5	16	8
Cancrinita	-	-	-	-	-	-	2	-	12	-
Magnetita	0	<3	<1	0	<2	<1	<2	<2	<3	0
Ilmenita	0	<3	<1	0	<2	<1	<2	<2	<3	0
Pirita	0	<3	<1	0	<2	<1	<2	<2	<3	0
Apatita	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Natrolita	3	-	7	3	-	-	5	-	-	22
Sodalita + Analcita	6	8	12	5	5	12	-	7	19	10
Q	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A	52.7	70.3	52.4	57.3	55.5	65.2	54.5	83.3	55.5	51.0
P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E	47.3	29.7	47.6	42.7	44.5	34.8	45.5	16.7	44.5	49.0
F	35.0	24.0	25.0	11.0	32.0	32.0	38.0	18.0	24.0	45.0
M	25.0	19.0	22.0	38.0	28.0	8.0	16.0	7.0	20.0	8.0
A	40.0	57.0	43.0	51.0	40.0	60.0	46.0	75.0	26.0	47.0
Classificação original	Fonólito	Tinguaitos				Foiaitos				

- O erro analítico tende a ser grande, principalmente quando se considera as amostras anteriores a G-1 e W-1 além de que mesmo as amostras posteriores a esses casos foram analisadas em diferentes laboratórios. Uma análise desses erros pode ser feita para avaliá-los e corrigi-los como veremos nos capítulos subsequentes.

1.2. AMOSTRA E POPULAÇÃO

O problema da amostragem em geologia não tem recebido a importância que merece. Somente a partir das últimas décadas o assunto passou a ser discutido por vários geoestatísticos, destacando-se os trabalhos de Krumbein et al. (1956, 1962, 1965), Olson e Potter (1954), Potter e Olson (1965), Griffiths (1974a) e outros. No Brasil, são poucos os trabalhos referentes ao assunto destacando-se os de Ruegg (1969, 1975a, 1975b, 1976a, 1976b), Macedo (1979) e Suslick (1978). No campo geral da petrologia esses trabalhos são bastante escassos e as inferências sobre o assunto são efetuadas muitas vezes em analogia existente entre os corpos de rochas ígneas e metamórficas e aqueles sedimentares. Portanto, os algoritmos e modelos definidos para as rochas sedimentares são utilizados também para os outros grupos de rocha. De acordo com Griffiths (1974a), esses modelos são suficientemente gerais para serem aplicados às populações de qualquer campo de estudo.

Para a discussão do conceito sobre amostra e população aplicado à petrologia, vale rever algumas idéias definidas por vários autores, notadamente Krumbein e Graybill (1965) e Griffiths (1974a).

A amostragem é uma etapa no processo de solução de um problema e pressupõe um objetivo explicitamente definido previamente, um universo ou população também claramente definida e a identificação dos elementos da população. As propriedades dos

elementos são utilizadas para caracterizar a população e o objetivo da amostragem é o de estabelecer uma estimativa estatística apropriada dos parâmetros da população, $\bar{X}$ (média) e σ (desvio padrão).

Ao conjunto de todas as repetições possíveis de um fenômeno aleatório, denomina-se população, ou seja, a população é um conjunto de medidas referentes a um grupo de objetos e não um conjunto de objetos e a amostra refere-se a um sub-conjunto dessas observações, ou ainda, a população é uma campo de domínio da variável.

Como o conjunto total de observações é raramente disponível, os parâmetros populacionais têm que ser inferidos através das estatísticas amostrais. Para que as amostras possam fornecer informações úteis a respeito da população, é necessário: a) definir a população; b) que as amostras sejam representativas da população e c) que as amostras sejam aleatórias, isto é, tenham sido coletadas com imparcialidade, ou que sejam equiprováveis.

Existem diversos esquemas de amostragem, sendo os mais comuns os seguintes: Amostragem Casual Simples, Amostragem Sistemática e Amostragem Estratificada, sendo todos essas variações do modelo aleatório, como será discutido posteriormente.

Outros conceitos que devem ser considerados são: População Amostrada e População Alvo. A População Alvo é aquela sobre a qual está-se interessado e deseja-se fazer inferência e a População Amostrada é aquela que foi submetida a um processo de amostragem. A inferência estatística diz respeito às relações entre amostras e população amostrada, enquanto o relacionamento entre população amostrada e população alvo não é feito através da metodologia estatística mas sim por hipóteses geológicas. Além disso, deve ser especificado quando se trabalha com população e amostra: a) a definição do indivíduo; b) o tipo de medida numérica referente ao elemento; c) limites da população.

Portanto, o geólogo, de acordo com o objetivo de seu trabalho, especifica uma população conceitual a ser pesquisada. Essa especificação não tem base estatística mas geológica e deve ser homogênea em relação ao tempo, espaço e meio tectônico. Essa população conceitual, em algumas situações, é totalmente disponível para a amostragem. Nesse caso diz-se que a população alvo e a população amostrada coincidem. Contudo, a situação mais comum em geologia é a de que os indivíduos não estão inteiramente disponíveis. Então, define-se uma espécie seguinte de população, denominada de população amostrada. Como exemplo desses conceitos, em termos petrográficos, tem-se que a população alvo seria a aquele volume de rocha que ocorreu em alguma parte da crosta terrestre mas cuja parte do todo foi erodida. A população amostrada é então aquele volume de rocha agora existente em parte definida da crosta. O tipo de medida numérica a ser estabelecido seria, por exemplo, as percentagens dos elementos maiores em forma de óxidos e a amostra seria representada por um sub-conjunto da população amostrada, elementos escolhidos aleatoriamente (rochas), através das medidas numéricas ou dados amostrais (composições químicas). Portanto, uma vez estabelecidas as populações alvo e amostrada, passa-se para a etapa seguinte, ou seja, para o estabelecimento de uma amostragem. O objetivo dessa amostragem é o de obter-se uma estimativa estatística apropriada dos parâmetros da população, como já foi referido acima. Krumbein e Graybill (op. cit.) mostra que o objetivo de uma amostragem é o de aproximar-se da população alvo. Os autores mostram os três modos possíveis, pelos quais a população amostrada tende para a população alvo (Quadro 1).

QUADRO 1 - Fluxo-diagrama de análise estatística em termos de populações amostrada e alvo (Krumbein e Graybill, 1965).

Verifica-se que a situação mais comum em geologia é a da coluna central do Quadro 1, ou seja, quando nem todos os indivíduos de um dado fenômeno são diretamente disponíveis. A validade das generalizações obtidas pela análise estatística será baseada então em considerações meramente geológicas. Não é portanto possível estabelecer a probabilidade de que essas generalizações ou predições sejam corretas, dentro de limites específicos. Pode-se no entanto fazer estimativas sobre a população amostrada com base probabilística. Essa situação é também comum nos trabalhos petrográficos quando se estabelece um plano amostral (Ruegg, 1975a, 1975b). Alternativa diferente foi constatada pelo mesmo autor (Ruegg, 1969), no estudo de rochas basálticas em amostras coletadas da literatura (esquema definido à direita do Quadro).

Analisando as especificações acima, pode-se estabelecer as seguintes considerações quando se trabalha com as rochas alcalinas do Brasil Meridional, representadas pelos elementos principais em forma de óxidos, cujas amostras foram coletadas da literatura e não foram submetidas a um plano amostral:

- A população alvo é constituída por todas as rochas alcalinas que ocorreram numa determinada época geológica (cretáceo-jurássico), num determinado espaço geográfico (Brasil Meridional), sob um mesmo controle geotectônico (Reativação Wealdeniana). Portanto, essa população pode ser integrada nas especificações de Shaw (1961): "É necessário restringir a população no tempo e espaço". Essa população é móvel no decorrer do trabalho e pode ser eventualmente representada por determinada associação, maciço ou tipo petrográfico.

- A população alvo não pode corresponder à população amostrada porque a existência de afloramentos numa região depende da dureza diferencial das rochas de diferentes composições. A população amostrada é então representada pelo conjunto de rochas mais resistentes à erosão e disponíveis à amostragem.

- Não foi definida uma amostragem mas as amostras foram selecionadas com base subjetiva (situação à direita do Quadro). As estatísticas amostrais são computadas para obter-se dados de síntese. As inferências a respeito da população visada são feitas com base geológica.

- O indivíduo ou elemento da amostragem é a unidade petrográfica, representada pela rocha alcalina na definição de Sorensen (1974a). A medida numérica a ser considerada é o teor em óxidos dos elementos maiores nas amostras de rocha e mais raramente o teor em ppm de elementos traços.

1.3. PLANO AMOSTRAL

Como foi referido no item anterior, a situação mais comum em geologia, para a aproximação entre população amostrada e visada é a de estabelecer um plano amostral e a seleção de amostras por um procedimento operacional. Então computa-se as estatísticas amostrais e faz-se estimativas sobre a população amostrada com base probabilística. No caso das rochas alcalinas do Brasil Meridional, seria necessário então o estabelecimento de um Plano Amostral. Essa situação ideal não foi atingida no presente trabalho porquanto as amostras foram compiladas da literatura. O nosso objetivo foi então de apenas computar as estatísticas amostrais para obter-se dados de síntese. Esse procedimento é comum na literatura geológica.

Ruegg (1975a) inclui um conjunto de dados obtidos num mesmo laboratório, avaliando ao mesmo tempo o teor de elementos principais e traços. O autor realizou Plano Amostral Casual ou Equiprovável para seleção das amostras de rochas basálticas da Bacia do Paraná, o qual é também mencionado por Macedo (1979). Esse tipo de plano é justificado em rochas homogêneas, como as basálticas. No caso das rochas alcalinas outro tipo de amostragem, estratificado ou multinível, é pertinente, tendo em vista sua heterogeneidade.

Griffiths (1974b) comenta que em amostras heterogêneas, o fator estrutural introduz uma tendenciosidade ("bias"), ou seja, alguns elementos passam a ter mais chance de serem escolhidos e então a amostragem deixa de ser equiprovável. Um algoritmo é então definido por esse autor para resolver o novo tipo de amostragem e determinar se uma amostra é aleatória ou não e quais os parâmetros adequados para definí-la. Uma análise de variância das linhas e colunas comparadas com a interação entre linhas e colunas mostrará então as variações estruturais (do ponto de vista geológico e estatístico).

Krumbein e Slack (1956) estabeleceram um plano amostral em geologia aplicado à prospecção. O tipo de amostragem utilizado foi o multinível, cujo tipo foi introduzido em geologia por Olson e Potter (1954). Esse tipo de amostragem inclui tantos níveis amostrais quantos desejados, segundo uma hierarquia. Às vezes, separa-se o plano em duas partes principais, uma regional e outra local, selecionando-se vários níveis amostrais, em cada uma das partes, sendo a maneira de seleção aleatória. O número de amostras em cada nível é baseado nas diferenças de variância.

Krumbein e Tukey (1962) referem-se aos problemas que surgem quando se determina a composição de corpos de rocha heterogêneos, estabelecendo as etapas para os cálculos de variância entre os vários níveis composicionais, ou seja, entre segmentos, entre localidades dentro dos segmentos, entre amostras "dentro das localidades", entre tipos, interação entre segmentos e tipos, localidades e tipos, amostras e tipos, até chegar-se à variância total. Basicamente o plano amostral envolve a seleção de vários níveis amostrais, cada um de diferente escala de área. As escalas são subjetivas e podem variar desde muito detalhadas a regionais. O estabelecimento de níveis é arbitrário e quando pequeno simplifica o trabalho e reduz o número de testes de significância. Por outro lado, o aumento de níveis permite uma avaliação mais detalhada dos efeitos locais. O modelo estatístico utilizado é o casual, o qual estabelece que as localidades dentro de um segmento e as amostras dentro de localidades são selecionadas por processos aleatórios.

A sequência de cálculos para análise de variância pode ser vista no trabalho dos autores citados. Os dados multivariáveis e as réplicas amostrais são listados em linhas e colunas e são calculadas as médias quadráticas e as somatórias quadráticas para linhas e colunas (entre níveis e variáveis) e chega-se ao cálculo da variância total do conjunto. O número e o espaçamento das amostras em cada nível é proporcional à variância e o espaçamento pode ser fixado arbitrariamente.

De um modo geral, o número de amostras (N_t) a ser coletado no nível depende da variância nesse nível (σ_i) e da variância total (σ_t). Um resumo desses cálculos pode ser visto em Krumbein e Tukey (op.cit.) através de um diagrama esquemático para condensação e computação de médias quadráticas para um modelo multivariante, um quadro geral de análise de variância e tabelas condensadas. Esses esquemas podem ser adaptados para um exemplo genérico de como seria um plano amostral numa análise regional de variação geoquímica de elementos maiores e traços das rochas alcalinas do Brasil Meridional. Em analogia ao trabalho dos autores mencionados, pode-se considerar os seguintes níveis amostrais: a) Maciços; b) Unidades Petrográficas; c) Amostras em unidades petrográficas; d) Entre variáveis; e) Interação entre maciços e variáveis; f) Interação entre unidades petrográficas e variáveis; g) Interação entre amostras e variáveis. Outros níveis podem ainda ser estabelecidos. Maiores detalhes em Soares (1984).

1.4. FONTES DE ERROS

Uma das questões mais importantes que se coloca quando se estabelece um plano amostral sistemático é o número de amostras por localidade, o qual deve ser proporcional à variância composicional das rochas nessa localidade. Em termos petrográficos essa variância deve ser considerada a nível de afloramento, unidade mapeada e de maciço, em analogia às descrições de planos amostrais descritos por vários autores geoestatísticos. Portanto,

corpos de rocha variados requeriria um grande número de espécies para representá-lo adequadamente, como foi visto no item anterior. Nesse caso, pode-se estabelecer por exemplo um plano tal que o número de amostras compense as diferenças de variança.

Como já foi analisado, os dados amostrais a serem considerados no presente trabalho são aqueles disponíveis na literatura e portanto mais sujeitos a erros. Por outro lado, o estabelecimento de um plano teórico só seria viável com a utilização de dados preliminares para determinação do espaçamento e número de amostras. Nesse caso, a análise dos dados amostrais da literatura serviria pelo menos como suporte para o estabelecimento de um plano amostral ideal. Outro aspecto que tem de ser considerado é que o plano amostral pode dar uma visão mais próxima da realidade mas também pode indicar resultados já conhecidos da literatura, como pode ser constatado pela comparação entre os resultados obtidos por Ruegg (1969) e Ruegg (1975a).

É possível também apropriar-se de modelos matemáticos para avaliar a magnitude dos erros amostrais, como também analíticos de uma série de dados químicos de rocha compilados. Miesch (1967a) discute que o erro amostral em determinada localidade nunca é conhecido e sua computação requereria um conhecimento anterior da média verdadeira da localidade, uma amostragem completa da localidade e uma análise das espécies com uma perfeita precisão e exatidão ("accuracy"), o que é ideal. Entretanto, considera quatro aspectos relacionados ao erro amostral e indica sua importância estatística. Esses aspectos estão relacionados à análise anterior de variança multinível:

"A média geral do erro amostral de todas as espécies (rochas) e localidades tenderá para zero quando o número de localidades e espécies aumenta."

"A média dos componentes do erro amostral tende ao mesmo valor para cada localidade quando o número de localidades por espécie amostrada aumenta".

"A variância do erro amostral tende a ser a mesma para cada localidade quando o número de entidade amostrada por localidade aumenta."

"Os erros amostrais para uma localidade amostral tendem à distribuição normal."

No caso dos erros analíticos o problema é mais complicado e de importância considerável para os petrógrafos, principalmente quando se efetua trabalhos de síntese, ou seja, quando são consideradas amostras de rochas analisadas em diferentes épocas e laboratórios. Após as pesquisas de G-1 e W-1 (Fairbairn, 1951) verificou-se que a dispersão na determinação do teor em óxidos em amostras de rochas de diferentes laboratórios é grande. A partir de então, a credibilidade nas determinações químicas de rochas em laboratórios menos equipados diminuiu, caso frequente nas nossas precárias condições de trabalho. Por outro lado, as conclusões sobre erros analíticos propiciam algumas precauções para evitá-los, como as réplicas analíticas. Vistelius (1970a, b) estabeleceu uma correlação positiva entre determinações de óxidos de minerais de mesma densidade, mostrando que nem sempre a dispersão na determinação de óxidos em diferentes laboratórios deve-se a erros analíticos mas pode ser devida ao processo de preparação de amostra para análise química. Nesse caso, para as rochas alcalinas, constituídas de minerais de densidade semelhante, o erro analítico seria pequeno e menor do que para as rochas constituídas de minerais de diferentes densidades, como as basálticas. Essas considerações não foram amplamente confirmadas mas têm uma certa aceitação entre os geoquímicos modernos e o assunto continua em discussão.

Miesch (1967 b) também estabeleceu um modelo matemático e faz algumas considerações teóricas a respeito do erro analítico:

"O erro analítico é nulo quando a média desse erro para todas as localidades tende para zero."

"O erro analítico é nulo quando a média do erro analítico tende a ser a mesma de uma localidade para outra enquanto o número de espécies por localidade aumenta."

"O erro analítico é nulo quando a variância desse erro associada à espécie tende a ser a mesma de uma localidade para outra enquanto o número de espécies por localidade aumenta". (Esse tipo de erro pode em geral ser reconhecido porque é sistemático. Pode também ser corrigido, efetuando-se um número de análises proporcional à sua variância).

"A distribuição do erro analítico tende a ser normal".

Analisando as conclusões de Miesch (op.cit), observa-se que alguns tipos de erros só serão evitados com o estabelecimento de um plano amostral teórico e a análise de amostras em laboratório especializado, com as devidas precauções, para evitar os erros analíticos. Por enquanto, com referência aos dados amostrais compilados da literatura e utilizados no presente trabalho, cabe mencionar, reforçando as observações no item 1:

- O erro amostral tende a ser grande porque o número de amostras por unidade petrográfica e por maciço é pequeno (alguns são desprovidos de amostras) e não é proporcional à variância à nível de unidade petrográfica e de maciço.

- O erro analítico tende a ser grande porque as amostras foram analisadas em diferentes laboratórios e épocas. Contudo a comparação entre resultados obtidos para amostras anteriores e posteriores às análises de G-1 e W-1 não são tão diferentes, indicando que os prováveis erros analíticos não são significativos.

- As maiores densidades amostrais referem-se aos maciços de Itapirapuã, Tunas, Iporã, Juquiã, onde foram elaborados trabalhos em detalhe, notadamente Teses de Doutorado, sen-

do esses trabalhos considerados como de melhor qualidade amostral.

- Um plano amostral racional abrangeria um número de amostras proporcional à variância da unidade petrográfica.

CAPÍTULO 2

CÁLCULOS E GRÁFICOS DA PETROLOGIA

2.1. DIAGRAMAS DE VARIAÇÃO

A Petrologia utiliza diversos índices Químicos e Diagramas de Variação para representar Províncias Petrográficas.

As rochas de uma determinada província podem ser relativamente uniformes em composição mas, com frequência, são variadas tanto em relação à mineralogia quanto à química. Quando essa variedade composicional é muito grande torna-se difícil determinar se todas essas rochas têm uma mesma origem. Várias fases magmáticas podem ser reflexo dessa variação, cada fase compreendendo uma série ou associação petrográfica completa. Contudo rochas de uma mesma província devem ter alguma característica em comum, como assinalam Turner e Verhoogen (1960).

Herz (1977) refere-se às ocorrências de rochas alcalinas do Brasil Meridional como constituindo uma das mais clássicas províncias petrográficas do mundo. Esse autor menciona a necessidade de informações sobre tendências, petrologia e idades disponíveis para desenvolver um modelo da história e evolução dessas rochas agrupando-as, em conexão geotectônica com o magmatismo basáltico, nos grupos: a) Sincrônicas com as rochas basálticas da Bacia do Paraná; b) Mais jovens que essas. O mesmo autor inicia um tratamento dos dados químicos referentes às rochas alcalinas, em número pequeno de amostras, indexando-as e plotando-as em relação ao diagrama normativo Q-Ne-Kp.

Com referência às Províncias Petrográficas, Sorensen (1974a) comenta que as rochas alcalinas que as constituem não têm apenas um magma parental mas podem ser produto da diferenciação de diferentes magmas sob condições de enriquecimento em álca-

lis. Concorde com as associações de Scheynmann et al. (1961), e menciona as diferentes províncias alcalinas do mundo: a Província de Oslo, Havai, Kola, Gardar, Europa Central, Níger-Nigéria e outras (ver capítulo 5).

Diferentes autores tais como Gerasimovsky et al., Upton, Wimmenauer (op.cit.) consideram essas ocorrências alcalinas como constituindo províncias, subdividindo-as em associações apesar da atividade magmática abranger, às vezes, espaços de tempo e geográficos muito amplos.

Ulbrich e Gomes (1981) consideram várias províncias alcalinas no Brasil Meridional com base em associações petrográficas, idades e argumentos regionais, utilizando o modelo evolutivo de Herz (op.cit.), embora esse último autor não discrimine as diferentes ocorrências alcalinas em províncias, como foi explicado.

Anteriormente, outros autores, como Leinz (1940), Melcher (1966a) e Amaral et al. (1967) consideraram o conjunto das ocorrências como pertencentes a uma mesma província e tentaram agrupá-las em associações petrográficas, utilizando um único modelo de evolução, apesar de apresentarem diferentes níveis de condutos em exposição, como se refere especificamente Melcher (op.cit.). Desse modo, essas associações constituiriam manifestações de um mesmo evento tectônico de crescimento e expansão do assoalho oceânico e diferenciação abissal, sob condições de relativa quiescência tectônica, permitindo a acumulação de álcalis e voláteis.

O debate sobre origem e evolução dos complexos alcalinos tem sido intensificado nas últimas décadas. No capítulo 5, posicionar-me-ei sobre as diversas teorias. Se essas são agora mencionadas, é com o intuito de justificar o tratamento dos dados referentes a essas rochas, de modo global, como também compará-las com as rochas basálticas tectonicamente correlacionáveis. Neste sentido vale ainda mencionar os trabalhos de Almeida (1971, 1976, 1980, 1983), Bushee (1974), Fúlfaro et al. (1982) e Ferreira (1983).

Um tratamento global das rochas alcalinas do Brasil Meridional, utilizando diagramas de variação, análises modais e esquemas classificatórios vigentes é justificado com base no conceito mais amplo de Província Petrográfica como parece aceitar Sorensen (op.cit.).

Burri (1964) faz uma síntese dos principais índices petrográficos, catiônicos e normativos e apresenta diagramas de variação já consagrados, como o QLM (Niggli, 1943), $\text{SiO}_2/\text{Álcali}$ (MacDonald e Katsura, 1964), os diagramas triangulares de Larsen e Nockolds, as normas CIPW e outros.

Outros diagramas e índices petrográficos são apresentados em Sorensen (1974), notadamente aqueles de Jung e Brouse (1962), Thurnton e Tuttle (1960) e os já mencionados diagramas QLM, Álcalis x Sílica, os índices de Niggli bem como os diagramas triangulares mencionados.

Na maioria das províncias petrográficas existe uma variação mais regular do que casual entre as rochas associadas e essa regularidade pode-se manifestar nos diferentes Diagramas de Variação. Esses diagramas refletem uma ou várias linhas de evolução magmática contribuindo assim para elucidar as condições de formação dessas rochas, o que justifica a utilização da petrologia química para comparar os resultados obtidos com aqueles da Análise Estatística Multivariante (ver capítulo 4).

Por outro lado, o grande número de análises modais provenientes dos vários maciços alcalinos analisados em grande parte por Coutinho (1966, 1973), permite estabelecer comparações e reforçar os dados das análises químicas. Essas análises modais podem também ser utilizadas em esquemas classificatórios.

Vale mencionar, referente ainda à análise dos Diagramas de Variação, o trabalho de Pearce (1968) que mostra que os diagramas de Harker e outros diagramas ternários em % de peso, distorcem as tendências ("trends") genéticas, modificando as in-

clinações e desse modo não podem ser usados para discriminar hipóteses rivais, sugerindo o uso de determinadas razões, em vez de valores percentuais. No presente trabalho não foram utilizados esses aperfeiçoamentos embora reconheça as possíveis distorções das tendências de evolução (admitindo que essas podem não ser tão graves tendo em vista os objetivos gerais aqui tratados). Outros autores como Chayes (1964), Vistelius e Sarmanov (1961) retomaram discussões semelhantes sobre o assunto. Ruegg (1969, 1975a) e Macedo (1979) não efetuaram também essas correções.

2.1.1. DIAGRAMA SÍLICA/ÁLCALIS

O diagrama SiO_2 X $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ aplicado às rochas alcalinas do Brasil Meridional mostra uma forte concentração de pontos, em geral acima do traço do plano crítico de saturação, com exceção de algumas amostras ultramáficas de Iporá e Santa Fé, algumas raras amostras de Itatiaia e Poços de Caldas e uma relativa dispersão geral de pontos (Figura 9). Comparando esse conjunto com as rochas basálticas (Figura 10), observa-se que não há uma delimitação brusca entre os dois campos composicionais mas uma continuidade, inclusive com superposição dos basaltos e poucas alcalinas de Tunas, São Sebastião e Iporá, o que demonstra não haver rigidamente um espaço de rochas basáltico-toleíticas idealmente separado das rochas alcalinas por um plano crítico de saturação, como sugerido por MacDonald e Katsura (op.cit.).

Em analogia ao diagrama de Upton (op.cit.), para a Província do Sul da Groenlândia, onde foram "plotadas" 300 rochas ígneas analisadas no diagrama SiO_2 x Álcalis e acrescentadas dos valores normativos de quartzo e nefelina (com um pequeno campo para rochas com hiperstênio normativo sem ne ou quartzo) e dos valores de ID (Índice de Diferenciação), tem-se a seguinte situação para as rochas alcalinas do Brasil Meridional:

- A Figura 11 mostra o mapa de localização dos pontos segundo as razões Álcalis x SiO_2 .

FIGURA 9 - Diagrama $\text{SiO}_2/\text{Alcalis}$ para as rochas alcalinas do Brasil Meridional.

FIGURA 10 - Diagrama $\text{SiO}_2/\text{Alcalis}$ para as rochas basálticas da Bacia do Paraná (o traço do plano crítico de saturação de Mac Donald e Katsura, 1964, separa o campo dos basaltos teoféuticos e alcalinos).

FIGURA 11 - Mapa de localização dos pontos segundo razão $\text{Alcalis}/\text{SiO}_2$ para as rochas alcalinas do Brasil Meridional.

- A Figura 12 mostra o mapa de isovalores dos dados em relação a quartzo e nefelina normativos (a linha zero, saturada, fica aproximadamente no campo cujo símbolo está representado pelo número 2). Observa-se um aumento dos isovalores em direção SW.

- A Figura 13 mostra o mapa de isovalores dos dados em relação aos ID (Índices de Diferenciação). Observa-se um aumento dos valores na direção NE (aproximadamente perpendicular à anterior). Os pontos cujos isovalores estão delimitados pelos números 8 e 9 correspondem a valores com $ID > 80$ (maior concentração).

- Considerando-se uma superfície de 19 grau observa-se um ajuste razoável com os valores tanto de ID como de Ne e Qz normativos sendo o coeficiente de determinação mais alto (maior ajuste) para os Índices de Diferenciação (Figura 14).

- Em analogia ao gráfico determinado para a Província de Gardar, segundo Upton (Sorensen op.cit.), observa-se também uma zona determinada pelas diferentes rochas da província alcalina do Brasil Meridional (maiores detalhes sobre este gráfico serão abordados nos capítulos 4 e 5).

Em relação aos maciços individuais observa-se o seguinte comportamento:

- O Maciço de Tunas apresenta rochas que se situam pouco acima do traço do plano crítico de saturação indicando um comportamento saturado e uma forte diferenciação em SiO_2 (Figura 15).

- As rochas do Maciço de Itapirapuã mostram um caráter insaturado e também uma certa diferenciação em relação a SiO_2 (Figura 15).

- As rochas de São Sebastião mostram um comporta-

*****ANALISE DE TENDENCIA DOS NEFELINA E QUARTZO NORMATIVOS
 *****ROCHAS ALCALINAS DO LUGESTE DO BRASIL
 MAPA DE ISOVALORES DOS DADOS

FIGURA 12 - Mapa de isovalores dos dados em relação a quartzo e nefelina normativos
 (A linha zero saturada está representada pelo dígito 2).

*****ANALISE DE TENDENCIA DOS INDICES DE DIFERENCIACAO
 *****RECHAS ALCALINAS DO LUCESTE DO BRASIL
 MAPA DE ISOVALORES DOS DADOS

FIGURA 13 - Mapa de isovalores dos dados em relação aos ID (os pontos cujos isovalores estão delimitados pelos dígitos 8 e 9 correspondem a valores de ID > .80).

FIGURA 14 - Diagrama $\text{SiO}_2/\text{Alcalis}$ mostrando o limite composicional das rochas alcalinas do Brasil Meridional (os traços dos planos de saturação, direção NE e Índice de Diferenciação, direção NW, definem superfícies de 19 grau).

FIGURA 15 - Diagrama $\text{SiO}_2/\text{Alcalis}$ para os Maciços de Tunas e Itapirapuã.

FIGURA 16 - Diagrama SiO₂/Alcalis para o Maciço de São Sebastião e outros.

FIGURA 17 - Diagrama SiO₂/Alcalis para o Maciço de Poços de Caldas, Iporã e outros.

mento em relação aos álcalis, intermediário entre Itapirapuã e Tunas e uma certa diferenciação em relação a SiO_2 . Ver analogia com diagrama Q-L-M (Figura 16).

- As rochas do Maciço de Poços de Caldas mostram uma concentração de pontos (quase nenhuma diferenciação em relação a SiO_2) e um caráter insaturado nítido enquanto Iporá mostra dois campos de composição: um pobre em SiO_2 e outro rico em SiO_2 e mais alcalino (Figura 17).

- Existe também uma superposição de campos em alguns maciços, lacunas composicionais em outros, e uma forte dispersão de pontos para SiO_2 e álcalis que pode ser tanto responsável pelos comportamentos normais das funções de distribuição do SiO_2 e K_2O como pode refletir também erros amostrais e analíticos.

2.1.2. DIAGRAMA R/Si

O diagrama R/Si ($R = \text{K} + \text{Na} / \text{K} + \text{Na} + \text{Ca}$), foi utilizado por Wimmenauer (1974) para representar a Província Alcalina Vulcânica da França, delimitando séries saturadas e insaturadas. Danni (1974) utilizou o mesmo diagrama para as rochas alcalinas de Iporá.

Para as rochas alcalinas do Brasil Meridional, os seguintes resultados foram obtidos quando se utiliza os Índices de Diferenciação R em função da % catiônica (Si). Esse diagrama de variação, cujos índices utilizados são as porcentagens catiônicas, refletem melhor os estágios de diferenciação magmática.

- O Maciço de Poços de Caldas apresenta valores de R praticamente constantes (entre 90 - 100), com algumas exceções (amostras 26, 36, 29, 39, 40, 30 e 21): Figura 18.

- O Maciço de São Sebastião também se apresenta pouco diferenciado, com R entre 80 - 100, com exceção de algumas amostras (15, 16, 17 e 5), sendo contudo menos insaturado do que

FIGURA 18 - Diagrama R/Si para o Maciço de Poços de Caldas (a linha inclinada representa o traço do plano crítico de saturação).

o de Poços de Caldas (Figura 19).

- O Maciço de Itatiaia ocupa a mesma posição do maciço de São Sebastião, com exceção de raras amostras (7 e 8) de natureza supersaturada (que se situam além do traço do plano crítico de saturação): Figura 19.

- Os Maciços de Tunas e Itapirapuã apresentam R mais diferenciados (40 - 100) embora valores de Si paralelos e pouco variados (ver inclinação da reta de diferenciação $(60 - 90^\circ)$), sendo as rochas de Itapirapuã mais pobres em sílica e de caráter insaturado mais pronunciado (ver reflexos desses valores nos resultados normativos: Figura 25), portanto mais distantes do traço do plano crítico de saturação, à diferença de Tunas, praticamente saturadas (Figura 20).

- Os Maciços de Juquiá e Iporá apresentam valores de R diferenciados, reflexo da ampla margem de composição de rochas, desde alcalinas normais a ultramáficas (Figuras 21 e 22).

- As rochas alcalinas do Brasil Meridional quando consideradas em conjunto apresentam-se bem diferenciadas, apresentando valores de R e Si em ampla margem de composição (do mesmo modo quando são tratadas com os índices $\text{SiO}_2 \times \text{Álcalis}$): Figura 23.

2.1.3. DIAGRAMAS QLM

O diagrama QLM foi idealizado por Niggli (1943), para ilustrar variações químicas e mineralógicas de séries de rochas ígneas e províncias petrográficas, para fins comparativos, sendo um meio de reduzir um grande número de variáveis. Segundo esse autor, os componentes feldspato e feldspatóides seriam representados por $L = Kp + Ne + Cal$. O membro Q representaria o quartzo e os componentes máficos, olivina e piroxênio seriam representados por M. Desse modo, esse gráfico fornece uma feição preliminar da possível composição mineralógica a qual corresponde um de-

FIGURA 19 - Diagrama R/Si para o Maciço de São Sebastião.

FIGURA 20 - Diagrama R/Si para os Maciços de Itapirapuã e Tunas.

FIGURA 21 - Diagrama R/Si para o Maciço de Juquiã.

FIGURA 22 - Diagrama R/Si para o Maciço de Iporã.

FIGURA 23 - Diagrama R/Si para as rochas alcalinas do Brasil Meridional.

terminada composição química. Esses valores são calculados através dos números de Niggli (op.cit.). A linha PF representa a linha de saturação, i. e., separa as combinações mineralógicas com e sem quartzo normativos. A área abaixo de PF pode apresentar uma série de outras combinações mineralógicas. Um coeficiente de saturação $a = (3M - 2L/M)$ expressa a posição das várias amostras consideradas em relação à linha de saturação e à linha PL. As rochas alcalinas desprovidas de quartzo situam-se em geral abaixo de PF (linha de saturação), sendo que a maioria delas posiciona-se abaixo de FM, ou seja, possui valores negativos de a mas não atinge $-a$ (pontos localizados em LF). Poucos pontos deveriam cair em FM, ou seja, com $a = 0$. Desse modo, as associações mineralógicas frequentes estariam no triângulo FRL (paragênese feldspato - feldspatóide (+ olivina); triângulo MRL (piroxênio e feldspatóides, com olivina ou feldspato); triângulo PRM (piroxênio, feldspato, olivina) e no triângulo PRF (piroxênio, feldspato).

Os resultados obtidos para as rochas alcalinas do Brasil Meridional podem ser resumidos, em termo de prováveis composições mineralógicas (Figura 24):

- A maior parte das amostras situam-se no triângulo FRL, com paragênese feldspato x feldspatóide: Maciços de Itaipirapuã, Poços de Caldas e São Sebastião e algumas rochas de outros maciços (Figuras 25 a 29).

- Algumas amostras situam-se no triângulo PRF constituindo a paragênese Feldspato x piroxênio e/ou Olivina, também essa desprovida de quartzo (abaixo de linha de saturação): isso acontece em parte das rochas do Maciço de Tunas e raras do maciço de São Sebastião e o mesmo ocorre com as rochas basálticas da Bacia do Paraná (Figuras 25 a 30).

- Mais raramente as rochas alcalinas encontram-se posicionadas nos triângulos PRM, correspondente à paragênese alcalino-ultramáfica (piroxenitos) e RML (paragênese, gabros e teralitos): Figura 29.

FIGURA 24 - Diagrama QLM para as rochas alcalinas do Brasil Meridional (A maior parte das amostras situa-se no triângulo FRL, com Paragênese feldspato-feldspatóide).

FIGURA 25 - Diagramas QLM para as rochas alcalinas dos Maciços de Itapirapuã e Tunas.

FIGURA 26 - Diagrama QLM para as rochas alcalinas dos Maciços de Juquiã e outros.

FIGURA 27 - Diagrama QLM para as rochas alcalinas de Poços de Caldas.

FIGURA 28 - Diagrama QLM para as rochas alcalinas dos Maciços de São Sebastião, Itatiaia, Monte do Trigo e outros.

FIGURA 29 - Diagrama QLM para as rochas alcalinas do Maciço de Iporã.

FIGURA 30a - Diagrama QLM para as rochas basálticas da Bacia do Paraná (a maior parte das amostras situa-se no triângulo PRF, com paragênese piroxênio-feldspato).

FIGURA 30b - Diagrama QLM para as rochas basálticas da Ba-
cia do Paraná (cont.).

O cálculo dos índices Q, L e M é feito a partir dos índices (valores) de Niggli, de acordo com as seguintes expressões:

1º caso: Se $a_l \geq a_k$

a.1) $a_l > (a_k + c)$ e

$$a_l > (a_k + 2c + 2fm)$$

$$L' = 3(2a_k + c - 3p)$$

$$M' = 4a_l + 3fm - 200 + 11p + ti$$

$$Q' = si - 2a_k$$

a.2) $a_l < (a_k + 2c + 2fm)$

$$L' = 3(2a_k + (c - 3p))$$

$$M' = 150 - 3(c + a_k) + 19/2p + ti$$

$$Q' = si - (50 + 2a_k - a_l - 3/2p)$$

b) $a_l \leq (a_k + c)$

$$L' = 3(a_l + a_k)$$

$$M' = 3(50 - a_l) + 1/2p + ti$$

$$Q' = si - (50 + a_k - a_l - 3/2p)$$

2º caso: $a_l < (a_k)$

$$L' = 6a_l$$

$$M' = 3(a_k - a_l) + 3/2(fm + c) + ti + 7/2p$$

$$Q' = si - (100 - 1/2(fm + c - 3p))$$

$$z = si + a_l + a_k + ti + 2p + 100$$

$$L = L'/Z \cdot 100$$

$$M = M'/Z \cdot 100$$

$$Q = Q'/Z \cdot 100$$

2.1.4. O NÚMERO DE NIGGLI qz

O número de Niggli definido como $qz = si - si'$, expressa a saturação das rochas de uma série ou província em relação a sílica. É conveniente considerar que, quando $qz > 0$ existe sílica livre (rochas supersaturadas). Quando $qz = 0$, tem-se uma paragênese saturada, livre de quartzo. Para $qz < 0$, tem-se então rochas insaturadas ou constituídas de minerais pobres em sílica. Na fórmula acima $qz = si - si'$, si' expressa as quantidades de sílica requerida para a formação dos silicatos maiores. Esse valor é calculado pelos números de Niggli, segundo as expressões: 1º caso: $al > alk$, então $si' = 100 + 4alk$. 2º caso: $al < alk$, então $si' = 100 + 3al + alk$, quanto ao si , corresponde ao valor de Niggli (op. cit.), referente à sílica. O cálculo dos valores de Niggli é feito segundo combinações explicitadas em Soares (1984).

A frequência de distribuição de qz para as rochas alcalinas do Brasil Meridional encontra-se representada na Figura 31. Observa-se aí um padrão bimodal para essas rochas com modas entre -90 a -80 e -40 a -30. Observa-se também a predominância de valores de qz negativos para esse grupo de rochas. Por outro lado, se comparadas às rochas basálticas do Brasil Meridional, verifica-se um padrão unimodal para essas últimas, com moda compreendida entre -20 e -10, indicando também um caráter predominante insaturado. A bimodalidade das alcalinas sugere duas populações explícitas quando se combina as variáveis (valores de Niggli). A análise da ocorrência dessas duas populações será feita com maior acuidade na análise dos resultados finais (Capítulo 5), mas pode-se adiantar que ao primeiro grupo corresponde às rochas do maciço de Itapirapuã e Poços de Caldas enquanto ao segundo corresponde as rochas de São Sebastião. Por outro lado, as rochas basálticas da Bacia do Paraná apresentam uma distribuição de qz segundo um padrão unimodal, com moda entre -20 e -10 (Figura 32).

O número qz como uma expressão de saturação também é deduzido dos índices de Niggli. Para o cálculo desses valores é necessário considerar as seguintes premissas:

FIGURA 31 - Frequência de distribuição das rochas alcalinas do Brasil Meridional em relação ao número de Niggli (qz). Observa-se um padrão bimodal com modas entre -90 a -80 e -40 a -30.

FIGURA 32 - Frequência de distribuição das rochas basálticas da Bacia do Paraná em relação ao número de Niggli (qz). Observa-se um padrão unimodal, com moda entre -20 a -10.

$$si' = 6alk + 2(al - alk) + (c - (al + alk)) + fm$$

feldspato
alcalino

anortita

diopsidio

augi-
ta

$$s_i' = 6a_{lk} + 2a_l - 2a_{lk} + c - a_l + a_{lk} + f_m$$

$$si' = 4alk + al + c + alk + fm = 4alk + 100$$

```
2) al > alk
   al < (alk + c)
   si' = 100 + 4alk
```

```
3) al < alk
   si' = 100 + 3al + alk
   qz = si - si'
```

2.1.5. DIAGRAMA ID/SiO₂

O Índice de Diferenciação, ID, definido por Thurnton e Tuttle (1960) é expresso através da somatória dos componentes siálicos normativos, norma CIPW, quartzo, ortoclásio, albита, nefelina, leucita, ou seja: $ID = \Sigma (qz + ort + ab + ne + lc)$. É muito utilizado pelos diversos petrólogos como um parâmetro de diferenciação (Bowen, 1937; Chayes, 1963; Upton, 1974).

Os histogramas de Índice de Diferenciação e % em Sílica para as rochas ígneas alcalinas da Província de Gardar, segundo Upton (op. cit.) mostram um mínimo aparente para SiO_2 entre 50 - 55% correspondente a ID entre 60 - 63%, referente à composição traquibasáltica/sienogabro e de acordo com raciocínio de

Chayes (op. cit.) teria significado petrológico e não seria meramente o reflexo de tendenciosidade de amostragem. Outro mínimo, para SiO_2 entre 65 - 70%, seria também apenas aparente e corresponderia a pequena margem de composição entre sienitos e granitos. Outro mínimo aparente seria ainda entre os limites de sílica correspondentes a rochas básicas e ultrabásicas. Para esse autor haveria um significado petrogenético para essas lacunas composicionais.

Para as rochas alcalinas do Brasil Meridional a curva de distribuição do SiO_2 é normal ou aproximadamente normal (Figura 33) limitada pelos extremos ultramáficos (limite inferior) e graníticos (limite superior), não havendo um mínimo delimitável entre os pontos indicados por Upton (op. cit.). Por outro lado, a distribuição de ID é aproximadamente lognormal (sigmoidal negativa), com mínimos aparentes entre 10 - 15, 50 - 55 e 60 - 65% refletindo provavelmente tendenciosidade de amostragem, sem grande significado físico-químico. Por outro lado, o máximo de ID 85 - 90% corresponde a SiO_2 entre 50 - 55% (sienitos com feldspatoides), ou aos diferenciados alcalinos de Bowen (ID > 80), nos gráficos SiO_2 - Ne - Kp (ver item 2.1.6.). Vale mencionar que existe um pequeno mínimo de ID entre 60 - 65% (semelhante à Província de Gardar) mas não muito característico, de modo a permitir maiores considerações petrológicas.

Para rochas basálticas da Bacia do Paraná, tem-se a seguinte situação: Máximo de SiO_2 entre 48 - 50% e um padrão de distribuição tendendo a lognormal (sigmoidal positivo), com um caimento em direção aos membros intermediários e ácidos. Quanto aos ID o padrão de distribuição é aproximadamente normal com um ligeiro mínimo entre 55 - 60 talvez devido à tendenciosidade de amostragem (Figura 34).

Outro aspecto a considerar em relação às rochas magmáticas do Brasil Meridional é a existência de apenas uma única população quando se trabalha com SiO_2 para ambos os grupos de rocha (alcalinas e basálticas) embora os gráficos ID (combinações

FIGURA 33 - Curvas de distribuição de ID comparadas com a distribuição de SiO_2 para as rochas alcalinas do Brasil Meridional. Observa-se os mínimos aparentes entre 10 - 15, 50 - 55, 60 - 65 e um padrão log-normal, enquanto o SiO_2 apresenta um padrão normal.

FIGURA 34 - Curvas de distribuição dos ID para as rochas basálticas da Bacia do Paraná. Observa-se um mínimo aparente entre 55-60.

normativo -mineralógicas) mostre a provável existência de mais de uma população, cada uma destacada por um mínimo.

2.1.6. SISTEMA Q - Ne - Kp

Bowen (1937) ao estudar o sistema Q - Ne - Kp, de terminou vale térmico para rochas constituídas por esses três com ponentes. Para confirmar seus resultados teóricos considerou um conjunto de rochas alcalinas ocorrentes na natureza e "plotou-as", de acordo com suas composições químicas, no diagrama ternário, de terminado então uma área contida no vale térmico determinado ex perimentalmente. No caso considerou rochas apenas com ID > 80 (re síduo final magmático).

Tomando-se as mesmas precauções (considerando rochas com ID > 80) e considerando os prováveis erros analíticos po de-se estabelecer comparações entre as posições das rochas alcali nas do Brasil Meridional e o vale térmico determinado ex perimentalmente (pressão normal).

Os resultados obtidos encontram-se representados nas figuras anexas, discutidos a seguir:

- As rochas alcalinas máficas e ultramáficas fo ram excluídas dos gráficos (ID < 80).

- As rochas alcalinas do litoral RJ - SP caem no vale térmico determinado por Bowen (Figura 35).

- As rochas alcalinas do Maciço de Tunas também o cupam a mesma posição (Figura 36).

- As rochas alcalinas dos Maciços de Itapirapuã e Poços de Caldas caem fora da área determinada ex perimentalmente por Bowen (Figuras 35 e 36).

Uma explicação plausível para o fenômeno é dada

FIGURA 35 - Gráfico Q Ne Kp para as rochas alcalinas dos Maciços do Litoral RJ-SP, comparado com as rochas alcalinas dos Maciços de Tunas e Itapirapuã (Observa-se a posição das amostras em relação à área determinada experimentalmente por Bowen, 1937).

FIGURA 36 - Gráfico Q Ne Kp para as rochas alcalinas dos Maciços de Poços de Caldas, Iporã e Juquiã (Observa-se a posição das amostras em relação à área determinada experimentalmente por Bowen, 1937).

por autores mais recentes, Yoder e Tilley (1965), que demonstram que a diferentes pressões de voláteis o vale térmico é deslocado no sentido Kp (ver Capítulo 5).

Os valores de Q, Ab, Or, Ne, Kp foram recalculados em porcentagem daqueles obtidos pelo cálculo normativo (Tabela 19). A maior parte das amostras situam-se no triângulo interior de composição Ab - Ne - Or. Algumas apresentam composição no campo Or - Ne - Lc e mais raramente no lado Ne - Lc. Quanto às amostras supersaturadas, distribuem-se no Triângulo Q - Ab - Or (caso frequente para os Maciços de Itatiaia e algumas amostras de Tunas e São Sebastião). Várias amostras foram excluídas por apresentarem ID < 80.

2.1.7. OS DIAGRAMAS TRIANGULARES

O gráfico FMA, diagrama triangular, foi utilizado para representar as rochas alcalinas do Brasil Meridional.

$$F = (Fe^{3+} + 0.9Fe^{2+} + Mn) \times 100/Deno$$

$$M = Mg \times 100/Deno$$

$$A = (Na + K) \times 100/Deno$$

$$Deno = Fe^{3+} + 0.9Fe^{2+} + Mn + Mg + Na + K$$

Os resultados obtidos mostram a seguinte situação:

- Para o Maciço de Poços de Caldas nota-se uma diferenciação pouco pronunciada de M em relação ao extremo alcalino (Figura 37).

- Para o Maciço de São Sebastião a diferenciação é ainda mais pronunciada que a anterior (Figura 37).

- Para o Maciço de Tunas existem três "trends"

FIGURA 37 - Diagrama FMA para os Maciços de Poços de Caldas e São Sebastião.

de diferenciação sendo um deles paralelo ao de São Sebastião e os outros dois, respectivamente, mais ricos em F e M, sendo um deles paralelo ao de Itapirapuã (Figura 38).

- Para o Maciço de Itapirapuã existe um "trend" pouco pronunciado e com as rochas mais máficas pobres em F e M (Figura 38).

- Para o maciço de Iporá a diferenciação em álcalis é mínima, havendo um forte enriquecimento em M.

- Para o maciço de Juquiá há uma forte dispersão de pontos, sem praticamente diferenciação.

- Para o conjunto das rochas alcalinas verifica-se uma dispersão de pontos em relação a FM indicando a presença de mais de uma tendência.

O gráfico Fe_{tot} , AlK, MgO foi utilizado por Ruegg (1969) para representar as rochas basálticas da Bacia do Paraná. Esse gráfico é algo diferente do anterior, FMA, principalmente no que se refere ao cálculo do componente F. Desse modo, $Fe_{tot} = Fe_{tot} \times 100/Deno$; $AlK = AlK \times 100/Deno$; $Mg = Mg \times 100/Deno$ ($Deno = Fe_{tot} + Alk + Mg$). Os valores obtidos para os gráficos FMA e Fe_{tot} AlK Mg apesar de não serem exatamente iguais, permitem serem confrontados, mostrando assim o comportamento predominantemente férrico das rochas basálticas e alguma superposição entre os dois grupos de rocha (Figura 39).

O diagrama Ca, Na, K mostra uma situação semelhante com um "trend" definido para Tunas e forte dispersão para Itapirapuã e Poços de Caldas (Figura 40). Uma certa diferenciação é também evidenciada para Iporá, embora haja um comportamento mais rico em potássio e forte diferenciação dos membros mais básicos para os alcalinos. Os Maciços de Itatiaia e São Sebastião mos-

FIGURA 38 - Diagrama FMA para os Maciços de Itapirapuã e Tunas (a área interrompida significa o campo dos basaltos da Bacia do Paraná).

FIGURA 39 - Diagrama Fe Mg AlK para as rochas alcalinas e basálticas do Brasil Meridional (a área hachurada representa o campo dos basaltos e os pontos as rochas alcalinas).

FIGURA 40 - Diagrama Na Ca K para as rochas alcalinas dos Maciços de Tunas e Itapirapuã (a área inferior representa o campo das rochas basálticas da Bacia do Paraná).

FIGURA 41 - Diagrama Na Ca K para os Maciços de São Sebastião e Iporã.

FIGURA 42 - Diagrama Na Ca K para as rochas alcalinas e basálticas do Brasil Meridional (a área hachurada representa o campo dos basaltos e os pontos as rochas alcalinas).

tram comportamento anômalo (Figura 41). Quanto às rochas alcalinas, no seu conjunto, mostram uma forte superposição de campo em relação às rochas basálticas e uma forte dispersão geral de pontos (Figura 42).

2.2. AS ANÁLISES MODAIS E O ESQUEMA CLASSIFICATÓRIO

Como já foi mencionado no Capítulo I, cerca de 200 análises modais de rochas alcalinas do Brasil Meridional encontram-se distribuídas na literatura e foram descritas em termos das várias fases mineralógicas que as compõem, totalizando às vezes até 10 a 20 componentes. Entre essas análises destacam-se aquelas descritas por Gomes e Dutra (1970), Fuck (1972), Born (1971), Coutinho e Melcher (1973), Melcher e Coutinho (1966) Souza (1978), Danni (1974) e reproduzidas nas tabelas anexas (11 a 18). Outras análises foram ainda consideradas, embora algumas não tenham sido mencionadas no texto.

Essas análises refletem a complexidade mineralógica dessas rochas que só podem ser melhor compreendidas através de esquemas mineralógicos complexos e de multicomponentes.

Sorensen (1974b) expressa essa complexidade, descrevendo a mineralogia das rochas alcalinas, em etapas, em função das várias associações. Apenas em relação aos nefelina sienitos a mineralogia é descrita em função de grupos de minerais, tais como, anfibólio, piroxênio, minerais félsicos, acessórios e metais raros, com várias espécies minerais, em cada grupo.

No Brasil, vários autores tentam definir a complexidade mineralógica das várias ocorrências de rochas alcalinas, destacando-se os trabalhos de tese de Gomes, Fuck, Born, Coutinho e Melcher, Souza, Danni (op. cit.). Ulbrich e Gomes (1981) fazem também uma tentativa de aprofundamento na mineralogia dessas rochas, tentando agrupá-las em associações e dando início a uma sé-

rie de trabalhos em detalhe que serão publicados nos próximos anos.

Vale repetir que não é objetivo deste trabalho fazer considerações sobre a mineralogia dessas rochas mas apenas utilizar os dados descritos na literatura para elaborar tratamentos estatísticos e tentar relacioná-los com os dados das análises químicas. Desse modo, como já foi comentado nos itens anteriores, as análises modais podem ser utilizadas na interpretação petrológica desses grupos de rochas. Assim, se a composição química dessas rochas sugere modelos composicionais relativamente simples, o modelo mineralógico é muito mais complexo. Se os basalitos podem ser facilmente representados por um sistema de 3 ou 4 componentes (plagioclásio, piroxênio, olivina, opacos), essas rochas são expressas por uma associação mineralógica muito complexa (até dez a vinte fases).

Os esquemas classificatórios tentam contudo simplificar os modelos mineralógicos expressando essas rochas em função de 04 componentes: Quartzo - Feldspato alcalino - Plagioclásio - Feldspatóides (Duplo Triângulo QAPF), de acordo com Sorensen (op. cit.), definido por Streckeisen (1967) e adotado pela Subcomissão Sobre Sistemática de Rochas Ígneas (1972), in Sorensen (1974b), referindo-se apenas aos componentes essenciais.

Deve-se considerar ainda que, a classificação das rochas alcalinas constitui um sério problema de nomenclatura. Sorensen (op. cit.) publica um glossário no qual constam definições de nomes e também recomendações para termos que devem ser preservados ou abandonados, estabelecendo uma classificação mais atual para essas rochas. Os termos referem-se a Johanhssen (1938), Troger (1935), Jung e Brousse (1959) e referências soviéticas (Sorensen, 1974b). O mesmo autor propõe tabelas de classificação para esse grupo de rochas as quais são divididas de acordo com Streckeisen (op. cit.), baseado em composições modais.

No Brasil, o problema da uniformidade de classifi

cação deve ser encarado como um objetivo a ser atingido, uma vez que uma unificação de linguagem se torna necessária. Nesse contexto, será feita uma tentativa de uniformização desses dados, agrupando-os segundo os esquemas classificatórios vigentes.

Na descrição e integração dos dados químicos raramente foi dada ênfase aos elementos menores e traços, sendo os Modelos Químicos definidos geralmente em função dos elementos maiores, simplificando as relações entre os constituintes em forma de óxidos. Do mesmo modo, com relação aos dados modais foram utilizados esquemas simplificados para essas rochas, agrupando-as em função dos minerais essenciais QAPF ou definindo-as quantitativamente em histogramas modais, expressos pelas razões quartzo/nefelina e feldspato alcalino/feldspato total (Capítulo 4). Essa mineralogia pode transformar-se em modelos bem mais complexos, se for dada ênfase aos constituintes minerais menores, como metais raros e variedades mineralógicas alcalinas, melhor individualizadas em trabalhos petrográficos pormenorizados (Ulbrich et al., 1979).

2.2.1. OS DUPLOS TRIÂNGULOS QAPF

Para as rochas alcalinas do Brasil Meridional os diagramas QAPF (Figuras 43 a 48) mostram uma concentração de pontos no lado AF do duplo triângulo de Streckeisen, correspondente a uma composição de Feldspato Alcalino x Feldspatóides, predominante entre as amostras estudadas e refletindo possivelmente o comportamento geral da população de rochas alcalinas. Nesse campo de composição situam-se as rochas dos Maciços de Itapirapuã, Poços de Caldas, Monte do Trigo e algumas alcalinas dos Maciços de Iporá, Juquiá, São Sebastião, as quais correspondem os fóides sienitos ou álcali-fóides sienitos da Subcomissão Sobre Sistemática de Rochas Ígneas. Outro campo notável de composição é representado pelos Maciços de Iporá e Santa Fé, com amostras bem distribuídas ao longo do triângulo APF, subsaturadas portanto e correspondentes tanto a fóides sienitos e álcali-fóides sienitos como a fóide monzosienitos (fóide-plagisienito e fóide monzodiorito/mon

FIGURA 43 - Diagrama QAPF para as rochas alcalinas dos Maciços de Tunas, Itapirapuã e Itatiaia.

FIGURA 44 - Diagrama QAPF para as rochas alcalinas dos Maciços de Iporã e Santa Fé.

FIGURA 45 - Diagrama QAPF para as rochas alcalinas do Maciço de Poços de Caldas.

FIGURA 46 - Diagrama QAPF para as rochas alcalinas dos Maciços de Itatiaia e São Sebastião.

FIGURA 47 - Diagrama QAPF para as rochas alcalinas dos Maciços de Monte do Trigo, Juquiã, Ipanema, Ilha de Búzios

zogabro (essexitos) e ainda fóide diorito/fóide gabro (teralito). É notável contudo algumas lacunas de composição entre os dois campos opostos (feldspatóide - feldspato alcalino e fóide-plagioclásio). O Maciço de São Sebastião apresenta dois campos de composição: um deles segundo a linha AF e o outro, correspondente às rochas mais básicas, na linha PF. O Maciço de Tunas apresenta três campos de composição: a) segundo a linha AF; b) segundo AP; c) segundo QAP - rochas supersaturadas. O Maciço de Itatiaia agrega rochas distribuídas em dois campos de composição: o primeiro deles corresponde às rochas insaturadas, constituídas de feldspatos alcalinos e o outro corresponde às rochas supersaturadas (Triângulo QAP).

É importante considerar que a pequena proporção de rochas com associações Plagioclásio-Feldspatóides pode ser reflexo da falta de precisão das análises modais, uma vez que, nesses tipos petrográficos o plagioclásio ocorre em pequena proporção ou em intercrescimento lamelar e portanto pode ser computado como feldspato alcalino (Por exemplo, Juquiá).

Outro ponto a considerar é a posição de rochas tais como nordmarkitos, pulaskitos, malignitos, missouritos, shonkinitos, umptekitos, melteigitos e ijolitos, referidas na literatura. Numa primeira aproximação pode-se considerar que os nordmarkitos situam-se no campo dos álcali-quartzo sienito. Os pulaskitos no campo dos sienitos enquanto os foiaitos no dos fóide sienitos. Os melteigitos, ijolitos e alguns malignitos caem no campo dos foidolitos. Os malignitos correspondem aos sienitos com feldspatóides, enquanto os umptekitos e shonkinitos (Ipanema) caem no campo dos sienitos com feldspato alcalino (vértice A).

2.3. COMPARAÇÃO ENTRE GRÁFICOS NORMATIVOS E MODAIS

A comparação entre dados de análises normativas e modais foi utilizada por Wimmenauer (op. cit.) no estudo de algumas províncias alcalinas da Europa Central. O autor tenta delimitar vários campos de composição correspondentes a várias séries

alcalinas de uma mesma província. Burri (1964) considera que as relações mútuas entre a composição química e mineralógica de rochas é de grande significado em gráficos petrológicos (ver Soares, 1984).

Com base nos diagramas de Streckeisen (op. cit.) e Niggli - Burri (op. cit.) tentamos também delimitar alguns campos de composição para as rochas alcalinas no Brasil Meridional (Figuras 48 a 49). Considera-se estes gráficos como os mais elucidativos no estudo da composição global das várias associações e maciços porque mostra para cada composição química a correspondente composição mineralógica, permite avaliar prováveis erros analíticos e comparar as várias composições, em gráficos semelhantes, obtida em outras províncias.

- As rochas alcalinas de Itapirapuã constituídas principalmente de nefelina sienitos constituem um campo de composição bem delimitado no duplo triângulo de Streckeisen (Figura 48) e no triângulo QLM - campo a (Figura 49).

- As rochas alcalinas de Tunas constituídas por sienitos alcalinos, sienodioritos e sienogabros constituem um campo bem delimitado do anterior, sem superposição, como pode ser observado no triângulo QLM - campo b (Figuras 48 e 49).

- As rochas alcalinas de Iporá apresentam-se bem diferenciadas, como podem ser observadas nos dois gráficos, com composição desde sienítica a piroxenítica, passando pelos membros intermediários (fóide-monzo sienito, essexito e teralito), embora haja superposição de algumas rochas com os campos de composição anteriores: campo c (Figuras 48 e 49).

- A maioria das rochas alcalinas de Poços de Caldas constitui um campo de composição coincidente ou abrangido pelo campo a (Figuras 48 e 49).

- O maciço de São Sebastião constitui um campo de

união entre os dois conjuntos iniciais a e b, representando portanto um novo campo d (Figura 46).

- O Maciço de Itatiaia constitui ainda um novo campo de composição, parte dele contido no campo anterior exceto os quartzo sienitos (Figura 46).

- O campo de rochas alcalinas de Juquiá é em parte coincidente com os campos a e c, embora os resultados de análises modais sejam um tanto contraditórios com os resultados normativos, pois, enquanto em termos modais, é representado pela linha AF do duplo triângulo QAPF, constitui em termos normativos (triângulo QLM) um maior diferenciado alcalino. Provavelmente essa contradição deve-se à não computação de plagioclásio nas análises modais (ou na não discriminação entre feldspatos): Figura 49.

- O campo de rochas basáltico toleíticas constitui um limite nítido entre os campos alcalinos embora haja raras superposições.

- Quando as rochas alcalinas são vistas como um único conjunto observa-se uma certa continuidade composicional entre elas e as rochas basálticas toleíticas, com algumas lacunas composicionais (triângulo QLM): Figuras 48 a 50.

- As lacunas composicionais devem ser pesquisadas para verificar qual é o seu significado físico-químico (se de fato não existem rochas nessa margem de composição ou se correspondem a amostras ausentes por deficiência de amostragem).

- No triângulo de classificação adotado por Polanski (1940) in: Sorensen (1974a) e utilizado por Gomes (1967), Figura 51, cujos vértices são constituídos por Nefelina, Máficos e Feldspato Alcalino, observa-se uma maior distribuição dos vários tipos petrográficos, segundo os índices de Coloração. As amostras analisadas situam-se nos campos dos nefelina sienitos leucocráticos, dos nefelina sienitos, nefelina sienitos mesocráticos,

FIGURA 48 - Diagrama QAPF para as rochas alcalinas do Brasil Meridional e os diversos campos composicionais.

FIGURA 49 - Diagrama QLM para as rochas alcalinas do Brasil Meridional e os diversos campos com posicionais.

FIGURA 50 - Diagrama SiO₂/Alcalis para as rochas alcalinas do Brasil Meridional e os diversos campos composicionais. Observe - se o traço do plano crítico de saturação de Mac Donald e Katsura (1964).

FIGURA 51 - Diagrama Ne M A para as rochas alcalinas do Brasil Meridional

malignitos, iuvitos e mais esparsamente nos campos dos melteigitos, ijolitos e malignitos melanocráticos. Observa-se aí, pelo menos duas zonas de maior concentração de amostras: uma localizada nos extremos feldspato alcalino-máfico (praticamente sem feldspatóides) e outra com fóides e máficos e enriquecimento em álcalis. Para as várias ocorrências individuais ter-se-ia praticamente três campos de composição, representados respectivamente por Itapirapuã (e Poços de Caldas), Tunas (Anitápolis, Ipanema) e Itatiaia (São Sebastião).

As composições mineralógicas normativas, base de cálculo para os valores Q, L e M, ID e outros, encontram-se na Tabela 19.

TABELA 19 - Composição mineralógica normativa de rochas alcalinas do Brasil Meridional (calculada a partir das análises químicas das Tabelas 2 a 10) e Índice de Diferenciação, Índice Agpático e Razão $\text{Na}_2\text{O}/\text{Alcalis}$.

Amostra Nº										
Norma	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
quartzo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ortoclásio	13.3	20.0	26.3	40.6	27.1	24.3	31.4	35.3	46.2	39.4
albita	4.7	3.1	11.0	9.7	1.9	5.7	-	-	1.0	9.6
anortita	5.2	6.6	1.8	-	-	-	-	-	2.5	-
nefelina	35.5	34.8	30.0	28.0	43.1	40.8	34.4	36.1	34.1	37.9
leucita	-	-	-	-	-	-	4.3	6.5	-	-
diopsídio	21.1	17.5	9.4	1.3	9.5	9.0	3.2	6.9	4.8	0.1
hiperstênio	-	-	-	-	4.3	-	-	-	-	-
olivina	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
acmita	-	-	-	-	-	3.8	8.1	3.9	-	2.4
MS	4.8	0.4	4.8	-	-	-	-	-	-	-
CS	7.4	7.2	11.1	13.3	8.6	8.2	6.2	6.3	5.3	5.7
wollastonita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
apatita	3.3	1.9	2.0	0.1	1.4	1.3	1.4	0.7	0.7	0.1
ilmenita	3.8	2.9	1.8	1.3	1.5	2.1	1.4	1.4	0.8	0.7
cromita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
magnetita	5.2	0.3	2.5	-	2.5	1.2	2.5	1.9	-	1.0
hematita	-	4.3	3.7	5.2	0.1	3.3	1.8	0.6	4.0	3.0
ID	53.5	57.9	67.0	78.0	7.2	70.8	69.8	77.5	81.2	86.9
Na + K/Al	0.85	0.80	1.00	1.10	1.07	1.05	1.19	1.16	1.08	1.10
$\text{Na}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	0.76	0.66	0.60	0.48	0.66	0.68	0.55	0.50	0.45	0.56

Amostra Nº										
Normas	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
quartzo	-	-	-	-	-	-	-	18.3	-	4.9
ortoclásio	38.3	2.17	36.9	34.3	56.2	41.5	41.4	45.9	33.2	34.3
albita	-	-	13.7	35.5	7.0	18.6	9.7	14.2	23.9	50.7
anortita	-	-	-	9.3	1.1	0.5	1.6	7.3	0.9	7.1
nefelina	43.6	47.4	32.0	19.6	28.7	32.1	42.4	-	36.5	-
leucita	2.4	14.3	-	-	-	-	-	-	-	-
diopsídio	2.5	4.5	3.3	-	0.1	0.5	0.5	-	0.9	-
hiperstênio	-	-	-	-	-	-	-	2.1	-	3.5
olivina	-	-	-	0.4	-	-	-	-	-	-
acmita	6.9	4.1	9.2	-	-	-	-	-	-	-
wollastonita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MS	-	3.9	-	-	-	-	-	-	-	-
CS	4.2	3.1	2.0	2.0	2.5	2.2	1.6	-	0.5	-
apatita	0.4	0.3	0.3	0.4	0.9	0.2	0.1	0.6	0.6	0.2
ilmenita	-	-	0.6	-	-	-	-	0.9	0.4	0.5
cromita	-	-	-	-	-	-	-	11.6	-	-
magnetita	-	-	1.2	-	-	-	-	1.5	1.2	1.1
hematita	-	-	0.3	0.1	2.5	1.4	1.2	-	1.4	-
ID	84.3	83.5	82.7	89.4	91.8	92.2	93.7	78.5	93.7	90.1
Na + K/Al	1.14	1.19	1.17	0.85	1.15	1.07	1.04	0.60	1.01	0.90
$\text{Na}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	0.56	0.62	0.58	0.57	0.39	0.53	0.56	0.17	0.63	0.49

Amostra Nº	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Norma	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
quartzo	8.7	8.3	-	-	-	2.0	-	-	-	3.1
ortoclásio	24.6	25.6	27.9	26.9	31.0	25.1	23.3	5.8	5.3	5.4
albita	50.8	51.4	58.9	56.5	56.9	61.9	56.3	33.7	31.7	31.6
anortita	4.1	8.2	1.4	5.4	0.3	0.1	-	38.6	44.8	41.7
nefelina	-	-	0.5	-	3.6	-	9.3	1.6	2.6	-
leucita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
diopsídio	-	-	4.9	0.6	3.3	-	0.3	9.8	0.2	-
hiperstênio	3.9	2.1	-	2.5	-	2.2	-	-	-	3.3
olivina	-	-	1.8	1.5	-	-	3.4	2.1	7.5	-
acmita	-	-	-	-	-	-	4.9	-	-	-
MS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CS	-	-	-	-	0.8	-	-	-	-	-
apatita	1.1	-	-	-	0.15	-	-	-	-	-
ilmenita	1.2	1.0	0.6	1.2	0.4	0.4	0.2	1.9	2.5	3.6
cromita	2.9	3.9	-	-	-	4.7	-	-	-	-
magnetita	4.1	2.5	3.7	5.2	3.2	3.5	1.9	4.6	3.9	4.1
hematita	-	-	-	-	-	-	-	1.4	0.9	1.1
wollastonita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.7
ID	84.3	85.4	87.5	83.5	91.7	89.1	89.0	41.3	39.8	40.2
Na + K/Al	0.81	0.72	1.02	0.93	1.05	0.81	1.06	0.33	0.30	0.29
Na ₂ O/Na ₂ O+K ₂ O	0.58	0.57	0.58	0.58	0.57	0.62	0.69	0.80	0.82	0.79

Amostra Nº	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Norma	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
quantzo	-	13.0	6.5	5.4	3.4	1.9	4.7	-	-	-
ortoclásio	10.8	2.6	14.0	16.8	20.0	9.8	13.0	44.0	42.4	43.4
albita	31.0	31.8	55.0	56.1	50.5	50.9	50.5	20.3	31.5	14.5
anortita	26.9	24.3	20.4	13.6	18.6	24.8	10.9	3.0	4.0	-
nefelina	8.9	-	-	-	-	-	-	22.9	13.7	23.9
leucita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
diopsídio	6.4	-	-	-	-	-	-	5.2	-	10.7
hiperstênio	-	8.0	-	-	-	3.3	5.0	-	-	-
olivina	8.7	-	-	-	-	-	-	1.0	3.1	-
acmita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.5
MS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CS	-	-	-	-	-	-	-	0.8	0.8	0.6
wollastonita	-	-	-	-	-	3.9	7.3	-	-	-
apatita	2.3	-	-	-	-	-	-	0.2	3.1	0.5
ilmenita	-	5.9	1.1	2.0	1.6	1.6	3.1	1.1	1.4	1.2
cromita	4.4	10.5	1.7	3.3	0.7	-	-	-	0.2	-
magnetita	0.2	1.3	3.7	2.1	4.1	3.4	5.2	1.7	1.9	1.3
hematita	-	4.0	-	0.9	0.3	-	-	-	-	-
ID	50.8	47.5	75.6	78.4	73.9	62.7	68.2	87.3	87.7	81.9
Na + K/Al	0.50	0.23	0.57	0.62	0.65	0.52	0.73	1.06	1.03	1.17
Na ₂ O/Na ₂ O+K ₂ O	0.74	0.89	0.72	0.69	0.62	0.77	0.72	0.47	0.46	0.47

Amostra Nº	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Norma	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
quartzo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ortoclásio	19.7	23.9	-	-	-	-	7.0	9.9	-	-
albita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
anortita	-	-	7.3	1.2	-	9.2	0.9	8.3	-	-
nefelina	37.7	30.5	9.8	19.1	25.1	10.5	43.0	29.1	-	-
leucita	14.0	20.7	4.9	0.1	24.1	16.9	8.5	10.6	-	-
diopsídio	-	13.1	53.1	37.7	7.0	19.8	26.6	21.2	-	-
hiperstênio	14.2	-	2.3	-	11.1	6.4	-	-	-	-
olivina	-	-	8.1	32.1	20.4	23.0	-	-	-	-
acmita	6.0	7.5	-	-	8.7	-	-	-	-	-
MS	-	1.10	1.10	1.10	1.5	1.5	1.5	1.5	-	-
CS	2.7	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	3.7	9.5	-	-
wollastonita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
apatita	1.8	0.4	0.3	0.1	0.1	1.4	2.5	-	-	-
ilmenita	1.2	0.8	3.4	1.8	1.4	3.8	2.1	-	-	-
cromita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
magnetita	2.2	-	8.3	5.4	-	6.3	5.2	-	-	-
hematita	-	-	-	-	-	-	-	11.0	-	-
ID	71.4	75.3	14.7	19.3	49.3	27.5	58.65	49.7	-	-
Na+K/Al	1.15	1.27	0.62	0.79	1.31	0.81	0.96	0.86	-	-
Na ₂ O/ Na ₂ O + K ₂ O	0.55	0.46	0.64	0.99	0.56	0.35	0.73	0.58	-	-

Amostra Nº	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
Norma										
quartzo	1.8	-	-	3.0	12.6	-	0.4	-	-	-
ortoclásio	30.3	28.5	7.8	24.1	26.6	40.2	31.7	34.3	12.5	36.9
albita	54.6	60.5	2.0	47.4	53.0	8.4	55.2	42.5	19.0	28.6
anortita	9.1	8.5	29.2	11.2	4.6	-	2.0	-	18.6	6.4
nefelina	-	0.1	8.1	-	-	32.9	-	10.5	16.7	23.1
leucita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
diopsídio	-	-	32.2	-	-	0.5	-	7.9	16.1	0.7
hiperstênio	1.8	-	-	5.2	0.6	-	1.7	-	-	-
olivina	-	2.1	15.9	-	-	-	-	-	3.9	1.3
acmita	-	-	-	-	-	15.4	-	0.4	-	-
MS	-	-	-	-	-	0.4	1.2	-	-	0.4
CS	-	-	-	-	-	1.7	-	0.1	0.1	1.7
apatita	-	-	-	0.7	0.4	-	4.7	0.6	2.8	0.1
ilmenita	0.5	0.3	1.0	-	-	-	0.3	1.0	1.7	1.1
cromita	0.4	1.9	-	-	1.3	-	1.2	-	-	-
magnetita	2.6	1.3	-	0.4	0.3	-	5.3	2.2	8.4	1.5
hematita	-	-	1.9	4.7	2.1	-	0.3	-	-	-
wollastonita	-	-	-	2.8	-	-	-	-	-	-
outros	-	-	1.5	-	-	-	-	-	-	-
ID	86.8	89.1	18.0	74.6	92.30	81.7	87.3	87.4	48.3	88.7
Na+K/Al	0.87	0.81	0.30	0.81	0.888	1.27	1.05	1.08	0.60	0.96
Na ₂ O/ Na ₂ O+K ₂ O	0.54	0.58	0.57	0.56	0.57	0.58	0.53	0.54	0.71	0.54

Amostra Nº	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Norma										
quartzo	3.2	-	-	0.1	-	-	0.1	-	-	1.7
ortoclásio	26.9	34.0	32.1	30.1	14.2	30.0	43.1	33.8	31.2	22.6
albita	52.5	49.9	49.8	56.3	20.4	48.3	51.0	48.2	49.5	41.8
anortita	10.0	7.1	3.3	6.6	31.9	15.3	0.9	10.5	1.0	11.5
nefelina	-	-	3.4	-	3.3	1.1	-	-	9.4	-
leucita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
diopsídio	-	-	-	-	7.4	-	-	-	3.7	-
hiperstênio	5.8	5.5	-	4.6	-	-	0.9	3.0	-	14.6
olivina	-	1.1	5.5	-	8.6	7.7	-	2.8	-	-
acmita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CS	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	-
wollastonita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.3
apatita	0.9	1.3	1.9	0.8	1.3	0.9	-	1.2	0.1	1.0
ilmenita	1.1	0.8	1.1	1.0	0.1	1.9	0.2	1.3	0.5	1.6
cromita	3.3	0.8	2.3	0.4	-	0.5	2.3	0.1	-	-
magnetita	-	1.9	1.5	2.2	-	0.1	1.4	3.0	2.2	2.4
hematita	-	-	-	-	10.1	-	-	-	1.8	-
outros	-	-	-	-	2.2	-	-	-	-	-
ID	82.6	83.9	85.4	86.7	38.1	79.5	94.3	82.1	90.2	66.3
Na+K/Al	0.73	0.91	0.89	0.91	0.42	0.77	1.00	0.88	1.03	0.79
Na ₂ O/Na ₂ O + K ₂ O	0.56	0.49	0.53	0.55	0.55	0.52	0.44	0.48	0.58	0.55

Amostra Nº	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
Norma										
quartzo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ortoclásio	36.6	35.3	28.8	26.0	-	-	-	28.7	29.2	36.9
albita	39.5	44.6	27.9	38.8	-	-	-	56.6	41.4	28.2
anortita	1.6	1.9	13.0	15.5	21.5	18.5	6.6	10.7	4.3	1.7
nefelina	11.0	7.8	16.6	8.1	14.3	11.6	45.2	-	18.9	27.3
leucita	-	-	-	-	2.5	8.3	12.1	-	-	-
diopsídio	7.2	4.6	4.2	2.4	35.5	32.7	7.3	-	0.3	1.2
hiperstênio	-	-	-	-	0.1	3.1	6.9	2.7	-	-
olivina	1.1	2.0	5.6	2.4	21.4	20.6	11.6	2.3	3.1	2.6
acmita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
wollastonita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
apatita	0.4	0.5	1.0	0.9	0.7	0.6	4.6	0.4	-	0.1
ilmenita	0.7	0.8	1.0	1.1	1.0	1.3	1.3	0.6	0.5	0.4
cromita	-	-	-	-	-	-	-	0.1	-	-
magnetita	1.5	2.0	1.4	4.1	2.6	2.7	3.9	1.6	1.9	1.2
hematita	-	-	-	0.2	-	-	-	-	-	-
outros	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ID	87.2	87.8	73.4	73.0	16.8	20.0	57.4	85.4	89.6	92.5
Na+K/Al	1.06	1.05	0.81	0.76	0.36	0.48	0.84	0.84	0.95	1.03
Na ₂ O/ Na ₂ O+K ₂ O	0.51	0.52	0.51	0.57	0.83	0.55	0.76	0.56	0.62	0.57

Amostra Nº	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106
Norma										
quartzo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.7
ortoclásio	38.7	39.8	33.4	42.3	40.1	35.9	48.7	47.2	45.1	7.1
albita	43.8	42.2	31.6	11.1	14.3	18.6	12.1	9.1	32.7	76.2
anortita	5.0	5.6	3.5	6.2	4.9	6.0	0.1	-	8.7	6.7
nefelina	5.8	8.3	27.2	32.4	34.8	32.8	31.0	30.4	9.6	-
leucita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
diopsídio	0.1	-	-	3.1	1.2	2.0	3.3	2.2	-	-
hiperstênio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.5
olivina	3.7	4.5	2.8	0.3	0.5	0.6	-	-	0.8	-
acmita	-	-	-	-	-	-	-	7.4	-	-
MS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CS	-	-	-	-	-	-	-	1.4	1.4	-
wollastonita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
apatita	0.3	0.2	0.1	0.3	0.3	0.3	0.2	-	0.2	0.1
ilmenita	0.5	0.2	0.4	1.0	0.7	0.8	0.4	0.8	1.3	0.8
cromita	-	0.1	0.2	-	-	-	-	-	0.4	4.9
magnetita	1.6	1.0	2.0	1.5	1.8	1.5	1.1	1.1	4.3	1.6
hematita	-	-	-	1.4	1.0	1.0	2.3	-	-	1.4
outros	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ID	88.4	90.3	92.2	85.9	89.3	87.3	91.9	86.8	87.5	86.2
Na+K/Al	1.00	0.99	0.97	0.98	0.99	0.95	1.12	1.2	0.96	0.62
Na ₂ O/ Na ₂ O+K ₂ O	0.48	0.48	0.60	0.50	0.54	0.57	0.46	0.49	0.42	0.87

Amostra Nº	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116
Norma	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116
quartzo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ortoclásio	40.0	42.5	43.4	46.1	45.9	37.1	40.3	44.0	47.3	44.8
albita	-	5.1	4.7	2.5	2.5	-	14.3	16.1	14.0	20.1
anortita	-	-	-	-	-	-	1.8	4.3	2.1	10.5
nefelina	34.1	36.6	31.0	32.7	33.2	40.1	34.7	30.5	30.0	24.5
leucita	6.1	-	-	-	-	0.6	-	-	-	-
diopsídio	7.0	4.1	6.5	5.5	5.6	5.5	2.3	-	-	2.3
hiperstênio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
olivina	0.4	2.3	1.3	2.7	2.6	1.2	-	1.0	3.2	-
acmita	9.4	7.9	11.2	8.0	8.1	12.3	-	-	-	-
MS	1.4	0.1	-	1.2	0.7	-	-	-	-	-
CS	-	-	-	-	-	-	0.3	0.3	0.3	1.4
wollastonita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
apatita	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.6	0.4	0.2	2.2	0.3
ilmenita	0.8	0.7	0.9	0.7	0.7	0.2	0.1	0.2	0.9	1.2
cromita	-	-	-	-	-	-	-	0.9	1.0	-
magnetita	-	-	0.4	-	-	-	-	-	0.3	4.4
hematita	-	-	-	-	-	1.5	4.8	3.7	2.0	-
outros	-	-	-	-	-	0.3	0.5	0.3	-	-
ID	80.3	84.3	79.2	81.4	81.7	77.9	89.4	90.7	91.4	89.5
Na+K/Al	1.27	1.18	1.24	1.25	1.23	1.20	1.04	0.98	1.11	1.26
Na ₂ O/ Na ₂ O+K ₂ O	0.50	0.54	0.52	0.50	0.50	0.59	0.54	0.50	0.47	0.47

Amostra Nº	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
Norma										
quartzo	-	-	-	39.0	-	-	-	-	-	-
ortoclásio	41.4	34.6	37.1	3.9	58.5	24.3	56.2	49.2	7.1	41.6
albita	-	28.0	20.8	-	4.6	46.2	9.8	3.1	-	-
anortita	-	5.2	4.0	-	0.1	4.5	8.2	-	9.9	-
nefelina	36.2	22.7	31.8	-	28.5	19.3	22.9	31.5	29.1	42.2
leucita	2.0	-	-	-	-	-	-	-	1.0	0.3
diopsídio	4.1	0.7	0.8	-	-	-	-	2.2	38.0	5.0
hiperstênio	-	-	-	0.5	-	-	-	-	-	-
olivina	3.2	1.3	-	-	0.3	0.1	3.1	-	1.1	0.2
acmita	10.9	-	-	13.2	-	-	-	11.6	-	8.7
MS	1.1	1.1	1.1	23.3	23.3	23.3	23.3	-	-	0.6
CS	1.4	1.4	0.7	-	-	-	-	0.8	0.8	0.8
wollastonita	-	-	-	4.7	-	-	-	-	-	-
apatita	0.1	0.5	-	-	0.2	0.6	-	0.2	2.3	0.3
ilmenita	0.5	0.2	0.1	0.1	0.3	0.1	0.3	0.1	2.8	0.6
cromita	-	-	-	-	0.7	3.8	0.7	-	-	-
magnetita	-	-	-	-	1.8	0.3	0.5	-	7.5	-
hematita	-	5.4	3.4	-	4.6	2.1	1.2	0.3	0.7	-
outros	-	0.9	1.0	-	-	-	-	0.7	-	-
ID	79.7	85.4	89.8	42.9	91.7	90.0	89.0	83.9	37.3	84.3
Na+K/Al	1.26	0.97	0.99	41.1	1.14	0.78	1.0	1.26	0.70	1.18
Na ₂ O/ Na ₂ O+K ₂ O	0.54	0.56	0.57	0.53	0.37	0.68	0.36	0.48	0.79	0.57

Amostra Nº Norma	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136
quartzo	-	-	11.3	-	-	-	-	-	-	2.8
ortoclásio	38.2	-	34.2	44.6	32.8	33.9	77.6	45.1	-	36.0
albita	-	-	43.0	7.0	-	-	4.3	4.6	-	24.9
anortita	-	0.9	4.4	2.5	-	-	0.5	-	15.0	4.5
nefelina	41.5	35.5	-	34.8	41.4	42.1	8.2	38.9	24.8	-
leucita	3.7	12.1	-	-	9.5	7.6	-	-	7.2	-
diopsídio	5.6	15.2	-	4.8	4.8	6.9	-	4.8	30.4	-
hiperstênio	-	9.4	4.1	-	-	-	-	-	3.7	11.8
olivina	0.1	17.4	-	2.8	0.8	-	0.8	2.4	6.7	-
acmita	8.9	-	-	-	6.8	7.1	-	1.9	-	-
MS	0.6	0.6	0.6	0.6	2.7	-	-	-	-	-
CS	0.8	0.8	-	-	-	0.5	0.5	0.5	0.5	-
wollastonita	-	-	1.1	-	-	-	-	-	-	-
apatita	0.2	1.8	0.1	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	1.5	1.7
ilmenita	0.8	0.2	0.2	0.1	0.6	0.5	0.6	0.1	4.0	1.2
cromita	-	-	-	-	-	-	5.3	-	-	6.4
magnetita	-	7.1	1.1	2.6	-	0.7	-	1.8	6.3	-
hematita	-	-	-	-	-	-	2.9	-	-	8.6
outros	-	-	-	-	-	-	0.1	-	-	3.4
ID	83.5	47.6	88.6	86.5	83.8	83.7	90.3	88.7	32.1	63.8
Na+K/Al	1.19	0.95	1.01	1.06	1.23	1.16	1.07	1.12	0.60	0.73
Na ₂ O/ Na ₂ O+K ₂ O	0.56	0.73	0.45	0.49	0.56	0.54	0.13	0.51	0.75	0.31

Amostra Nº	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151
Norma	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151
quartzo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ortoclásio	35.4	42.6	43.5	48.1	12.8	8.6	13.6	12.2	26.8	5.4
albita	2.5	11.8	13.3	34.0	12.4	5.7	-	5.2	-	1.7
anortita	7.3	8.4	7.8	5.5	16.2	12.4	16.9	14.4	12.1	9.4
nefelina	27.1	23.1	21.9	4.2	6.6	3.3	7.3	10.5	18.5	1.8
leucita	-	-	-	-	-	-	3.3	-	1.3	-
diopsídio	13.4	8.0	9.8	4.5	30.7	42.7	30.3	39.6	26.4	41.0
hiperstênio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
olivina	-	-	0.1	0.9	6.5	16.3	17.4	7.3	-	36.7
acmita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CS	4.3	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	2.4	2.4
wollastonita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
apatita	-	-	-	-	0.2	0.1	0.2	-	-	0.1
ilmenita	5.0	2.2	1.6	1.1	12.4	7.0	6.3	3.8	5.1	2.0
cromita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
magnetita	3.6	2.6	1.7	1.3	1.7	3.6	4.3	6.6	7.0	1.5
hematita	0.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
outros	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ID	65.1	77.6	78.8	86.4	31.9	17.7	24.2	28.0	46.7	9.1
Na+K/Al	0.95	0.96	0.98	1.06	0.57	0.50	0.57	0.59	0.82	0.42
Na ₂ O/ Na ₂ O+K ₂ O	0.47	0.44	0.43	0.36	0.55	0.46	0.31	0.55	0.42	0.37

Amostra Nº	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161
Norma										
quartzo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ortoclásio	-	4.1	7.4	-	0.8	0.1	0.1	-	-	-
albita	-	-	5.3	-	0.7	-	0.1	-	-	-
anortita	14.1	11.3	6.1	7.7	0.3	-	1.0	1.0	6.1	0.7
nefelina	1.5	4.9	2.0	1.3	-	-	-	0.1	0.1	0.5
leucita	0.2	0.2	-	0.1	-	-	-	-	0.1	-
diopsídio	67.4	66.8	58.8	62.1	1.3	1.4	2.2	-	45.6	-
hiperstênio	1.0	-	-	2.2	1.8	4.4	0.2	0.3	1.8	30.0
olivina	11.2	5.9	13.1	15.0	87.5	86.0	92.3	96.2	37.0	62.4
acmita	-	-	-	-	-	0.9	-	-	-	-
MS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CS	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
wollastonita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
apatita	-	0.1	-	-	0.1	0.1	-	-	-	0.2
ilmenita	2.3	4.0	2.9	3.6	0.3	0.2	0.1	0.1	1.9	0.6
cromita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
magnetita	2.1	2.3	4.1	5.4	4.6	4.4	3.8	2.1	5.1	3.3
hematita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
outros	-	-	-	-	-	0.2	-	-	-	-
ID	1.7	9.4	9.4	1.3	1.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Na+K/Al	9.09	0.39	0.65	0.11	0.80	(39.0)	0.08	0.07	0.01	0.39
Na ₂ O/ Na ₂ O+K ₂ O	0.82	0.55	0.44	0.96	0.39	0.50	0.50	0.50	0.50	0.81

Amostra Nº	162	163	164	165	166	167	168	169	170
Norma									
quartzo	-	-	-	-	-	8.8	1.7	-	44.0
ortoclásio	-	-	-	25.1	37.5	13.7	52.0	8.5	7.6
albita	-	-	-	26.6	13.8	4.1	7.6	-	14.5
anortita	3.1	13.4	13.0	7.6	5.3	-	-	-	13.4
nefelina	0.1	4.3	0.3	14.2	6.0	-	-	-	-
leucita	0.9	0.6	0.15	-	-	-	-	-	-
diopsídio	1.5	53.9	54.0	16.1	17.7	-	-	33.9	-
hiperstênio	0.2	4.2	8.5	-	-	11.9	7.6	-	5.3
olivina	90.3	4.5	8.5	0.2	5.4	-	-	18.0	-
acmita	-	-	-	-	-	35.7	19.1	34.2	-
wollastonita	-	-	-	-	-	14.6	6.4	-	-
MS	2.4	-	-	-	1.5	-	-	-	-
CS	2.4	-	0.8	0.8	-	-	-	-	-
apatita	-	0.3	0.1	1.9	6.6	3.0	2.6	-	-
ilmenita	1.1	6.2	5.8	3.1	1.1	1.6	0.8	0.1	0.1
magnetita	0.5	10.7	1.2	3.1	3.9	6.1	1.7	-	-
hematita	-	1.3	7.2	1.0	2.3	-	-	2.9	14.3
outros	-	-	-	-	-	-	-	2.0	-
ID	1.0	5.02	0.49	66.1	57.3	26.6	61.3	8.6	66.2
Na/Na+K	-	0.21	0.03	0.86	1.05	3.43	1.71	6.32	0.42
Na ₂ O/Na ₂ O%K ₂ O	0.09	0.86	0.67	0.57	0.29	0.70	0.28	0.70	0.56

CAPÍTULO 3

ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIANTE

3.1. ANÁLISE FATORIAL

3.1.1. HISTÓRICO E CONCEITOS

A origem das técnicas fatoriais data do início do século, com os conceitos matemáticos introduzidos por Spearman (1904). Posteriormente, um grupo de psicólogos americanos deram uma grande contribuição à teoria e prática dessa técnica estatística. Cooley e Lohnes (1962) e Wilks (1962) abordaram detalhes matemáticos sobre o assunto. Mertie (1961), com base nos programas das ciências psicológicas propôs manipulações dos dados geológicos utilizando conceitos matemáticos similares. Imbrie e Purdie (1962) propuseram certas modificações as quais propiciaram o uso dessa técnica em geologia e publicaram inúmeros trabalhos (Imbrie, 1964; Imbrie e Van Andel, 1964; Manson e Imbrie, 1964). Aplicações geológicas de Análise Fatorial podem ser vistas também em Imbrie e Purdy (1962), Klován (1966) e Kock e Link (1971).

A aplicação de Análise Fatorial ao tratamento de dados petroquímicos é descrita sucintamente em Manson (1967) e Prinz (1967), que estudaram as características geoquímicas de rochas basálticas de distribuição mundial. Seus trabalhos constituem importantes referências globais. McIntire (1969) ilustra importante exemplo do uso dessa técnica em geologia utilizando o caso do plagioclásio.

Vários trabalhos sobre Análise Fatorial têm sido publicados recentemente, no "Mathematical Geology" destacando-se aqueles de Miesch (1969), Vistelius et al. (1970c), Size (1973), Reymont e Neufville (1974). Miesch (op.cit.) fez uma simulação para examinar o potencial dos métodos fatoriais na análise e inter-

pretação de dados geoquímicos. Esse autor analisou amostras de tektitos de origem lunar e determinou os fatores responsáveis pela composição desses materiais propondo técnicas de rotação fatorial tomando a variável MgO como referencial. Vistelius (op.cit.) estudou a composição modal de 72 amostras de rochas graníticas através do PCA (Análise de Componente Principal). Essa análise mostrou que determinados minerais respondem pela maior variação composicional desses granitos podendo-se então definir determinados processos genéticos responsáveis pela formação desses minerais. Size (op.cit.) utilizou a Análise Fatorial no tratamento de dados modais do Complexo Sienítico de Red Hill, determinando que o primeiro fator responde por mais de 80% da variância total do sistema e representa pelo menos a combinação de 5 variáveis e explicou o significado petrogenético dessa variação composicional. Reymont e Neufville (op.cit.) usaram a técnica da Análise Fatorial para analisar um problema relacionado com a migração dos continentes. Utilizaram espécies de ostrácodes dos dois continentes, Brasil e África analisando as semelhanças e diferenças entre os dois grupos. Utilizaram a técnica de "PCA" para verificar o peso das variáveis na variância total do sistema e na definição do autovetor, procedendo a padronização no cálculo dos vetores mas não efetuando rotação vetorial. Podolsky (1975) utilizou também o "PCA" na análise de variação da composição química de rochas granito-alcálicas na parte central da Península de Kola interpretando os valores com base geológica e selecionando as hipóteses de origem mais condizentes. Demonstrou que os processos de geração de granitos alcalinos e metassomatitos são diferentes e condicionados por diversos fatores.

No Brasil destacam-se os trabalhos de Bettencourt e Landim (1974), Macedo e Ruegg (1974a, 1974b), Suslick (1978) e Yamamoto et al. (1980). Bettencourt e Landim (op.cit.) utilizaram a Análise Fatorial no estudo geoquímico de óxidos e elementos traços de rochas calcárias do Grupo Açungui inferindo a distribuição dos elementos químicos e o seu controle genético. Macedo e Ruegg (op.cit.) aplicaram a Análise Fatorial ao estudo dos elementos principais e traços das rochas basálticas da Bacia do Paraná de-

terminando os fatores que descrevem a variabilidade das análises químicas dessas rochas e comparando os resultados com aqueles obtidos em Manson (op.cit.). Suslick (op.cit.) utilizou a Análise Fatorial como uma técnica estatística auxiliar para análises de dados geoquímicos e Yamamoto et al. (op.cit.) também a utilizaram na análise do Complexo Alcalino de Anitápolis, SC, obtendo resultados satisfatórios na elucidação da gênese dessas rochas. A aplicação da Análise Fatorial ao estudo descritivo da variabilidade composicional das rochas alcalinas do Brasil Meridional é mais uma tentativa de uso dessa técnica na análise de dados químicos e petrográficos, dando continuidade aos trabalhos desenvolvidos nas últimas décadas no Brasil.

A Análise Fatorial consiste na interpretação da estrutura de uma matriz de variância-covariância obtida de uma coleção de observações multivariantes. A técnica utilizada é a extração dos autovalores ("eigenvalues") e autovetores ("eigenvectors") da matriz de correlação ou covariância-variância.

O PCA ou Análise de Componente Principal é uma variedade simplificada da Análise Fatorial e consiste na transformação linear de m variáveis originais em n novas variáveis onde cada nova variável é uma combinação linear da antiga. O processo é desenvolvido de tal modo que requer que cada nova variável obtida responda tanto quanto possível pela variância total do sistema. Nada é dito acerca de probabilidades ou hipóteses porque essa técnica não é um procedimento estatístico, sensu strictu mas uma manipulação matemática. É uma técnica que consiste em encontrar os eixos da elipsóide e medir as suas magnitudes. A matriz de variância-covariância é simétrica e os autovalores representam os comprimentos dos eixos da elipse e os autovetores correspondem à inclinação dos mesmos. Os autovetores são perpendiculares entre si e os dois eixos da elipsóide passam a representar a matriz. Cada eixo explica uma determinada porcentagem da variância total do sistema sendo cada observação original convertida em novo valor ("score") pela projeção nos eixos principais então determinados. Os elementos dos autovetores usados para computar esses novos valo-

res são chamados pesos fatoriais ("factor loadings") e são simples coeficientes de equações lineares determinados pelos autovalores.

Na Análise Fatorial propriamente dita a operação de determinação dos autovalores é realizada numa matriz variância-covariância padronizada. Isto significa que não apenas todas as variáveis têm igual peso mas converte os principais componentes em fatores. Além disso, na Análise Fatorial as relações entre uma série de m variáveis refletem a correlação de cada uma das variáveis com p fatores não correlacionáveis mutuamente, i. e., $p < m$ e a variância das m variáveis é derivada da variância dos p fatores.

A Análise Fatorial ainda diferente do PCA exige a operação de normalização, ou seja, deve-se multiplicar cada elemento no autovetor normalizado pela raiz quadrada do autovetor correspondente. O resultado é um fator, um vetor de peso proporcional às quantidades da variância total que representam. Os elementos no fator são referidos como pesos fatoriais ("factor loadings") e as orientações dos fatores são as mesmas que os autovetores originais e os seus comprimentos são iguais às raízes quadradas dos autovalores. Esses representam a proporção da variância total responsável pelos autovetores. Então os comprimentos dos fatores representam os autovalores de modo que os fatores também representam as variâncias. Se os pesos fatoriais são colocados em forma de matriz tem-se uma matriz fatorial e se eleva ao quadrado os elementos na matriz fatorial somando-se esses elementos tem-se as comunalidades ("communalities"), e como se trabalha com variáveis padronizadas essas comunalidades totalizam a unidade (=1). A magnitude dessas comunalidades depende do número de fatores que é retido e esse número constitui uma polêmica entre os teóricos da Análise Fatorial (o mais recomendável é reter 2 ou 3 fatores porque é o número máximo que se pode representar em diagramas).

A Rotação Fatorial utilizada no presente trabalho é do tipo "Kaiser's Varimax" que consiste em movimentar cada eixo

fatorial a uma posição tal que as projeções de cada variável sobre os eixos fatoriais sejam próximas das extremidades ou origens. O método ajusta os pesos fatoriais de tal modo que estes fiquem próximos de 1 ou 0. O critério varimax envolve maximização da variança dos pesos fatoriais sobre os fatores. A maximização da variança implica em também maximizar a margem de pesos fatoriais os quais tendem a produzir. A técnica para obtenção desses resultados é por tentativa e não existe esquema analítico para fazê-lo. As posições das variáveis com relação umas às outras não se alteram mas apenas suas posições em relação aos fatores. Os comprimentos dos vetores são função de quantidade da variança original de cada variável retida nos fatores. "Plota-se" então os "scores" sobre os fatores rotados e esses valores representam estimativas das contribuições dos vários fatores para cada observação original. Uma vez que os fatores são também estimados a partir desses mesmos dados, a computação dos fatores normalizados ("factor scores") é um processo um tanto circular, embora seja utilizado com bons resultados em ciências naturais e notadamente em geologia, determinando diagramas que podem ser comparados aos clássicos diagramas de variação, como será visto oportunamente.

Manson (op.cit.) resume a resolução matemática de dados multivariáveis através da equação:

$$X(N, n) = A(N, m) \cdot F(m, n) + E(N, n)$$

N = número de observações (análises químicas)

n = número de variáveis (óxidos)

$X(N, m)$ = matriz inicial de dados com os teores de n elementos em cada uma das N amostras

m = um número $< n$, correspondendo ao número mínimo de fatores capaz de exprimir a variabilidade dos dados. Os fatores devem responder pela porcentagem máxima de variabilidade dos dados e o número de fatores deve ser o menor possível

$A(N, m)$ = matriz de coeficientes fatoriais que descrevem as N análises em termos de m fatores

$F(m, n)$ = matriz de pesos fatoriais os quais descrevem a composição de cada um dos m fatores com combinação da n variáveis

$E(N, n)$ = matriz de variabilidade não representada por A e F . Esta matriz deve ter o valor mais próximo possível de zero.

Para serem alcançados os objetivos acima expostos são necessários vários artifícios de cálculo e complexa interpretação matemática. Esquemáticamente pode-se estabelecer os seguintes passos para obter os fatores, como mencionado por Macedo e Ruegg (1975a, 1975b) e Bettencourt e Landim (op.cit.).

1. Extrair da matriz inicial de dados uma matriz de coeficiente de similaridade. Estes podem ser coeficiente de distância, coeficiente de correlação, etc. Em geral, é utilizado o coeficiente de correlação Produto Momento de Pearson.

2. Calcular os valores característicos da matriz de coeficiente de similaridade e por meio deles decidir quantos fatores são necessários para explicar a similaridade dos dados, ou seja, calcular os autovalores e decidir sobre o número de fatores que controlam o sistema.

3. Calcular a matriz fatorial inicial (de pesos fatoriais) para tantos fatores quantos forem determinados no estágio anterior.

4. Calcular a matriz fatorial rotada tentando atribuir aos fatores significado geológico, ou seja, fazer girar os fatores de modo a tornar os pesos fatoriais mais evidentes.

5. Calcular a matriz de estimação de fatores que será utilizada para obter os coeficientes fatoriais a partir da matriz inicial, ou seja, calcular os "factor scores" pela multiplicação de matriz inicial pela matriz fatorial rotada.

Miesch (1969) expressa a Análise Fatorial através de um modelo de forma:

$$X_{ij} = \alpha_{yi} F_{i1} + \alpha_2 F_{i2} + \dots$$

onde $\alpha_{1,2}$ = peso fatorial ("factor loading")

$F_{1,2}$ = fator normalizado ("factor score")

A matriz de correlação é representada por um grupo de valores em que cada vetor representa uma variável química e o coseno do ângulo entre qualquer dois vetores é igual à correlação entre as variáveis que ele representa. O agrupamento vetorial pode ser representado por um gráfico bidimensional e os pesos fatoriais "plotados" em relação a dois eixos ortogonais (O problema real consiste em determinar esses pesos fatoriais).

Para a determinação dos fatores fundamentais condicionadores de um conjunto de variáveis utiliza-se normalmente o Método dos Componentes Principais. Esse procedimento analítico utiliza as informações obtidas na matriz de coeficiente de similaridade (estágio 2) para referir as variáveis a um novo conjunto de eixos, de acordo com técnica descrita por Bettencourt e Landim (op. cit.).

3.1.2. APLICAÇÃO

Para o cálculos das matrizes e fatores pertinentes à Análise Fatorial das rochas alcalinas do Brasil Meridional foi utilizado o programa "Factor" da SPSS ("Special Package for Social Sciences"), versão 5.09.022, disponível no Centro de Computação da Universidade de São Paulo. Esse programa fornece os seguintes resultados:

- Matriz de correlação entre variáveis.

- Autovalores e % de variação de cada autovalor selecionando aqueles maiores do que a unidade.

- Matriz fatorial e as communalidades para as diferentes variáveis em função do número de fatores selecionados.

- Matriz de coeficientes fatoriais.

- Matriz de pesos fatoriais.

Para os diversos maciços alcalinos foram determinadas todas essas etapas mencionadas. Os dados foram padronizados e os vetores normalizados à semelhança da Análise Fatorial propriamente dita mas não foi efetuada sempre uma rotação fatorial porque o objetivo principal dessa técnica era apenas de verificar as relações entre variáveis (Figuras 52 a 57). Para as rochas alcalinas no seu conjunto e para as rochas basálticas procedeu-se a uma rotação fatorial segundo o método "varimax", aumentando o peso das variáveis sobre os fatores (Figuras 52 e 53). Foram traçados também os diagramas de projeção das amostras sobre os fatores (Figuras 57 a 59).

Os resultados são apresentados a seguir, detalhando-se as sequências de operações para o conjunto de rochas alcalinas (sub item 3.1.2.1.) e apresentando os demais resultados em forma de resumo para evitar redundância.

3.1.2.1. Resultados para o conjunto das rochas alcalinas

A Tabela 20 mostra a matriz de coeficientes de correlação entre variáveis mostrando correlação positiva entre SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O e K_2O (grupo 1) e forte correlação positiva entre as variáveis CaO , MgO e Fe_{tot} (grupo 2). A Figura 52 mostra a posição das variáveis em relação aos fatores principais (I e II) e o ângulo entre variáveis, cujos cosenos representam os coeficientes de correlação. Desse modo, tomando-se o SiO_2 como referencial os maiores coeficientes de correlação são os referentes aos CaO , MgO e Fe_{tot} embora apresentando correlação negativa com o SiO_2 . Portanto, diagramas de variação que expressam um parâmetro máfico x

FIGURA 52 - Gráfico de Análise Fatorial para as rochas alcalinas do Brasil Meridional: a com rotação fatorial, b sem rotação fatorial varimax (Verifica-se correlação positiva entre SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O e K_2O e correlação negativa entre esse grupo de variáveis e as demais e o forte peso do fator I em relação ao fator II).

TABELA 20 - Matriz de Coeficientes de Correlação entre Variáveis para as rochas alcalinas do Brasil Meridional. (Dados obtidos do Programa "Factor" da "SPSS").

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe _{tot}	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
SiO ₂	1.00000	-0.53572	0.44989	-0.72039	-0.01208	-0.60106	-0.78623	0.36448	0.47234
TiO ₂	-0.53572	1.00000	-0.54105	0.53949	-0.10654	0.41677	0.62052	-0.52327	-0.47245
Al ₂ O ₃	0.44939	-0.54105	1.00000	-0.69878	0.10702	-0.83995	-0.78160	0.75231	0.63089
Fe _{tot}	-0.72039	0.52949	-0.69876	1.00000	0.04457	0.62572	0.75156	-0.59784	-0.67232
MnO	-0.01208	-0.10654	0.10702	0.04457	1.00000	-0.07536	-0.10438	0.15129	0.08075
MgO	-0.60106	0.41677	-0.83995	0.62572	-0.07536	1.00000	0.79259	-0.75165	-0.69841
CaO	-0.78623	0.52652	-0.78160	0.75156	-0.10438	0.79259	1.00000	-0.69481	-0.76365
Na ₂ O	0.36448	-0.52327	0.75231	-0.59784	0.15129	-0.75165	-0.69481	1.00000	0.60598
K ₂ O	0.47234	-0.47245	0.63089	-0.67232	0.08075	-0.69841	-0.76365	0.60598	1.00000

SiO₂ deve ter grande poder discriminante.

VARIÁVEL	COMUNALIDADE	FATOR	AUTOVALOR	% DE VAR.	% ACUM
SiO ₂	0.94812	1	5.47573	60.8	60.8
TiO ₂	0.64775	2	1.06894	11.9	72.7
Al ₂ O ₃	0.94151	3	0.78465	8.7	81.4
Fe _{tot}	0.89645	4	0.56916	6.3	87.8
MnO	0.09100	5	0.41469	4.6	92.4
MgO	0.93592	6	0.30452	3.4	95.8
CaO	0.94888	7	0.24242	2.7	98.4
Na ₂ O	0.81931	8	0.12672	1.4	99.9
K ₂ O	0.86012	9	0.01317	0.1	100.0

QUADRO 2 - Valores de comunalidade e percentagem de variância atribuída a cada fator (Dados obtidos do programa "Factor" da "SPSS").

O Quadro 2 mostra a percentagem de variância de cada fator demonstrando que apenas os dois primeiros apresentam autovalores > 1, sendo portanto os únicos selecionados para representar as variáveis. Verifica-se ainda que o fator I é responsável por 60.8% da variância do sistema e o fator II por 11.9% dessa variância.

VARIÁVEL	COMUNALIDADE	FATOR	AUTOVALOR	% DE VAR.	% ACUM
SiO ₂	0.99961	1	5.23402	87.9	87.9
TiO ₂	0.40082	2	0.71807	12.1	100.0
Al ₂ O ₃	0.82622				
Fe _{tot}	0.69492				
MnO	0.02942				
MgO	0.76583				
CaO	0.90440				
Na ₂ O	0.73464				
K ₂ O	0.59622				

QUADRO 3 - Valores de comunalidade e percentagem de variância atribuída aos dois fatores selecionados (Dados obtidos do Programa "Factor" de "SPSS").

O Quadro 3 mostra as communalidades das variáveis sendo as maiores contribuições, em ordem decrescente, das variáveis SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , MgO , Fe_{tot} , K_2O , TiO_2 e MnO .

	FATOR 1	FATOR 2
SiO_2	-0.76061	-0.64691
TiO_2	0.62967	0.06587
Al_2O_3	-0.86207	0.28818
Fe_{tot}	0.81945	0.15308
MnO	-0.08794	0.14727
MgO	0.85901	-0.16712
CaO	0.94670	0.09032
Na_2O	-0.78384	0.34675
K_2O	-0.76685	0.09032

QUADRO 4 - Matriz Fatorial obtida após seleção dos dois fatores principais. (Dados obtidos do Programa "Factor" da "SPSS").

O Quadro 4 mostra a matriz fatorial obtida após seleção dos dois fatores principais e a contribuição de cada variável em relação a cada fator. Desse modo, para o fator I as variáveis de maior peso são: CaO , Al_2O_3 , MgO e Fe_{tot} , enquanto para o fator II são SiO_2 , Na_2O , Al_2O_3 . A Figura 52a expressa essa contribuição considerando a projeção das variáveis sobre os fatores

	FATOR I	FATOR II
SiO_2	-0.99293	-0.11700
TiO_2	0.56015	-0.29504
Al_2O_3	-0.55670	0.71854
Fe_{tot}	0.00869	0.17131
MgO	0.62141	-0.61618
CaO	0.83734	-0.45084
Na_2O	-0.45912	0.72378
K_2O	-0.58744	0.50113

QUADRO 5 - Matriz Fatorial após rotação fatorial. (Dados obtidos do Programa "Factor" da "SPSS").

O Quadro 5 mostra a matriz de coeficientes fatoriais após a rotação fatorial, gerando a Figura 52b. Esse gráfico reflete o peso das variáveis CaO e Fe_{tot} na definição do fator I e Al₂O₃ na definição do fator II.

	FATOR 1	FATOR 2
SiO ₂	-2.47812	-2.70164
TiO ₂	-0.42779	-0.49263
Al ₂ O ₃	-1.54634	-1.32453
Fe _{tot}	-0.99929	-1.23155
MnO	0.07405	0.08658
MgO	-1.50141	-1.81441
CaO	-1.31340	-1.98611
Na ₂ O	-0.68506	-0.46675
K ₂ O	-0.95647	-0.95592

QUADRO 6 - Matriz de coeficientes Fatoriais. (Dados obtidos do Programa "Factor" da "SPSS").

O Quadro 6 mostra a matriz de coeficientes fatoriais através da qual calcula-se os pesos fatoriais das amostras sobre os fatores, originando a Figura 57a. Esse gráfico reflete também o peso das variáveis CaO e Fe_{tot} na definição dos grupos pois os nefelina sienitos destacam-se das rochas gábricas e piroxenitos. Desse modo, o gráfico da projeção das amostras sobre os fatores atua como um diagrama de variação mostrando um certo sentido da evolução petrográfica.

3.1.2.2. Para os basaltos (Figura 53)

Correlação positiva: SiO_2 , Na_2O e K_2O (grupo 1)
Correlação positiva: CaO , Fe_{tot} , MgO (grupo 2)
Correlação negativa entre variáveis do grupo 1 e 2 (Figura 3 e Tabela 21).
Correlação nula: Al_2O_3
Fator 1: responsável por 39.4% da variância
Fator 2: responsável por 19.3% da variância
Fator 3: responsável por 11.0% da variância
Contribuição das variáveis em relação aos fatores:
Fator 1: SiO_2 , CaO , K_2O
Fator 2: TiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , MgO
Comunalidades: SiO_2 , CaO , K_2O

3.1.2.3. Maciço de Iporã (Figuras 54 e 58)

Correlação positiva: SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O e K_2O
Correlação positiva: Fe_{tot} , MgO
Correlação nula: MnO e CaO em relação às demais variáveis
Fator 1: 55.2% da variância total.
Fator 2: 19.5%
Fator 3: 13.6%
Comunalidades: Al_2O_3 , MgO , K_2O , Fe_{tot} , SiO_2

3.1.2.4. Maciço de São Sebastião (Figuras 54 e 58)

Correlação positiva: SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O e K_2O
Correlação positiva: Fe_{tot} , MgO , CaO e TiO_2
Fator 1: 65% da variância total
Fator 2: 16.4%
Fator 3: 10.8%
Comunalidades: CaO , MgO , MnO , K_2O , Fe_{tot}

3.1.2.5. Maciço de Poços de Caldas (Figuras 55 e 57)

Correlação positiva: SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , K_2O
Correlação positiva: Fe_{tot} , MgO , CaO , TiO_2
Fator 1: 55,1% da variância total.

FIGURA 53 - Gráfico de Análise Fatorial para as rochas basálticas da Bacia do Paraná: a com rotação fatorial, b sem rotação fatorial varimax (Verifica-se correlação positiva entre SiO_2 , Na_2O e K_2O , correlação nula com Al_2O_3 e negativa com o CaO e o menor peso dos fatores em relação às rochas alcalinas).

TABELA 21 - Matriz de Coeficientes de Correlação entre Variáveis (rochas basálticas do Brasil Meridional).

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe _{tot}	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
SiO ₂	1.00	-0.53	-0.06	-0.38	-0.37	-0.27	-0.61	0.32	0.77
TiO ₂	-0.53	1.00	-0.31	0.30	0.43	-0.10	0.31	0.03	-0.28
Al ₂ O ₃	-0.06	-0.31	1.00	-0.20	-0.13	0.11	-0.02	-0.15	-0.02
Fe _{tot}	-0.38	0.30	-0.20	1.00	0.14	0.11	0.28	-0.17	-0.33
MnO	-0.37	0.43	-0.13	0.14	1.00	-0.04	0.39	0.05	-0.25
MgO	-0.27	-0.10	0.11	0.11	-0.04	1.00	0.29	-0.32	-0.27
CaO	-0.11	0.31	-0.02	0.28	0.39	0.29	1.00	-0.47	-0.81
Na ₂ O	0.12	0.03	-0.15	-0.17	0.05	-0.32	-0.47	1.00	0.51
K ₂ O	0.77	-0.28	-0.02	-0.33	-0.25	-0.27	-0.61	0.51	1.00

Fator 2: 13,8%

Fator 3: 11.6%

Comunalidades: MnO, CaO, MgO, Na₂O, Fe_{tot}

3.1.2.6. Maciço de Tunas (Figuras 55 e 59)

Correlação positiva: SiO₂, Na₂O, K₂O

Correlação positiva: Al₂O₃, Fe_{tot}, MgO, CaO, TiO₂

Alta correlação negativa do SiO₂ com Al₂O₃

Fator 1: Responsável por 66% da variância.

Fator 2: 13.7%

Comunalidades: SiO₂, K₂O, TiO₂, Fe_{tot}

3.1.2.7. Maciço de Itapirapuã (Figuras 55 e 59)

Correlação positiva: SiO₂, Al₂O₃, K₂O

Correlação positiva: Fe_{tot}, MgO, CaO, MnO

Correlação nula: Na₂O

Fator 1: responsável por 71.7% da variância.

Fator 2: 12.3%

Comunalidades: Na₂O, CaO, TiO₂, SiO₂, Al₂O₃

3.1.2.8. Para as rochas alcalinas em geral - Elementos Traços (Figura 56)

Correlação positiva: La, Nb, Zr, Be, Ga, Sr

Correlação negativa: V, Ni, Cr, Co

Fator 1: 24.6% da variância.

Fator 2: 15.7%

Fator 3: 12.8%

Fator 4: 11,2%

Fator 5: 8.5%

Comunalidades: Ni, Co, Cr, Cu, La

3.1.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

De acordo com as observações dos dados e gráficos acima pode-se estabelecer algumas considerações:

FIGURA 54 - Gráfico da Análise Fatorial para as rochas alcalinas de Iporã (a) e São Sebastião (b). Verifica-se em ambos os casos correlação positiva de SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O e diferente comportamento para CaO e TiO_2 .

FIGURA 55 - Gráfico da Análise Fatorial para as rochas alcalinas dos Maciços de Itapirapuã (a) e Tunas (b). Verifica-se a inversão das posições das variáveis em Itapirapuã e o comportamento independente do Na_2O enquanto em Tunas o Al_2O_3 apresenta correlação negativa com o SiO_2 , Na_2O e K_2O .

FIGURA 56 - Gráfico de Análise Fatorial para as rochas alcalinas do Brasil Meridional (a) em relação aos elementos traços (b) e para o Maciço de Poços de Caldas (Verifica-se uma correlação nula entre SiO₂ e Na₂O em Poços de Caldas e correlação positiva entre Nb, Zr, Be, La, Sr e entre Ni, V, Cr para o conjunto das rochas alcalinas do Brasil Meridional).

- A análise fatorial é uma técnica adequada para representação da composição química de uma província petrográfica ou maciço. A representação espacial das variáveis e as suas posições em relação aos principais fatores fornece uma idéia simplificada da composição química dessas províncias e maciços.

- Em todos os maciços alcalinos um único fator é responsável por grande parte da variância do sistema (55 a 70%), mostrando variáveis com altos coeficientes de correlação. Contudo, o peso das variáveis em relação ao fator principal varia. O comportamento dos basaltos é diferente sendo a contribuição de cada fator pequena.

- Para as rochas alcalinas existe em geral uma forte correlação positiva entre SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O e K_2O , com exceção do Maciço de Tunas onde a alumina apresenta correlação negativa com esses óxidos e forte correlação positiva com CaO , MgO e Fe_{tot} (comportamento mais próximo dos basaltos).

- O Maciço de Itapirapuã apresenta um comportamento anômalo em relação ao Na_2O , variável independente de SiO_2 , K_2O e Al_2O_3 e uma inversão em relação à posição dessas três últimas variáveis.

- Considerando o conjunto de rochas alcalinas e basálticas verifica-se uma correlação positiva entre as variáveis SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O e K_2O e correlação negativa entre essas variáveis e os outros óxidos para as rochas alcalinas enquanto para os basaltos esse comportamento não se verifica (Correlação positiva entre SiO_2 , Na_2O e K_2O e negativa em relação aos outros óxidos).

- Os gráficos de projeção das amostras em relação aos fatores podem ser utilizados para verificar o grau de diferenciação química dos maciços ou províncias. Observa-se por exemplo que a diferenciação nos Maciços de São Sebastião e Poços de Caldas é muito menor do que nos outros maciços. Nesse sentido é con

FIGURA 57 - Gráfico de Projeção das amostras nos Eixos Fatoriais: a) para as Rochas Alcalinas do Brasil Meridional, b) para o Maciço do Poços de Caldas (Verifica-se a pouca diferença do conjunto de rochas alcalinas). Amostras 1, 30, 60, 85 = gabros alcalinos. Amostras 45, 65, 70, 75, 80, 160 = piroxenitos. Amostras 5, 10, 35, 50, 135 e 150 = sienitos alcalinos. Outras amostras: nefelina sienitos e rochas relacionadas.

FIGURA 58 - Gráfico de Projeção das Amostras nos Eixos Fatoriais: a - para o Maciço de Iporã, b - para o Maciço de São Sebastião (Verifica-se a pouca diferenciação do Maciço de São Sebastião em relação a Iporã. Amostras 1, 2, 3 e 4 = sienitos. Amostras 5, 6, 7, 8 e 9 = gabros. Amostras 10 a 15 = piroxenitos e amostras 15, 16, 17, 18 e 21 = dunitos).

FIGURA 59 - Gráfico de Projeção das Amostras nos Eixos Fatoriais: a - para o Maciço de Tunas, b - para o Maciço de Itapirapuã (Verifica-se a discriminação de grupos em ambos os casos. Em Itapirapuã o grupo da direita constitui os nefelina sienitos, destacado do grupo da esquerda, melanita-nefelina sienitos. Em Tunas, as rochas gábricas, à direita, destacam-se dos sienitos alcalinos, à esquerda).

veniente comparar os resultados obtidos com aqueles considerados na petrologia (Figuras 57 a 59).

3.2. ANÁLISE DE AGRUPAMENTO ("CLUSTER ANALYSIS")

3.2.1. CONCEITOS

Várias técnicas podem ser usadas para se determinar inicialmente a similaridade entre amostras e/ou variáveis: Coeficiente de Correlação Produto Momento de Pearson, Coeficiente de Correlação Não Paramétrico de Spearman, Coeficiente de Distância, Coeficiente Coseno de Teta, Coeficiente de Equiparação e outros. Nesse trabalho serão utilizados o Coeficiente de Distância e o Coeficiente de Correlação Produto Momento de Pearson. Referências sobre o assunto constam em Krumbein e Graybill (1967), Lafitte (1972) e Davis (1973).

O Coeficiente de Distância expressa o grau de similaridade referente à distância em um espaço n-dimensional, baseando-se na fórmula generalizada do teorema de Pitágoras, ou seja, quanto menor a distância, maior o grau de similaridade e vice-versa. A distância D entre dois pontos é expressa num sistema de coordenadas cartesianas:

$$D = \text{Raiz} [(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2]$$

X_1 , X_2 , Y_1 , Y_2 são os valores das coordenadas de dois pontos. Para a distância entre dois pontos, num espaço multidimensional, a fórmula generalizada é:

$$D = \text{Raiz} [\sum (X_{i1} - X_{i2})^2]$$

De acordo com Bettencourt e Landim (1974), os passos seguintes para a obtenção dos grupos entre amostras são:

1) Parte-se de uma matriz de dados

As linhas representam as p amostras e as colunas representam as variáveis. Para os dados de análise química de rochas tem-se:

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	-----	K ₂ O
1	-	-	-		-
2	-	-	-		-
⋮	⋮	⋮	⋮		⋮
n	-	-	-		-

2) Calcula-se a função distância entre todos os possíveis pares de amostras. Então obtém-se uma matriz inicial de coeficientes de similaridade, p x p, simétrica, baseada nos valores de coeficientes de distância acima discutidos.

3) Procura-se o coeficiente de distância mais baixo, indicativo da mais alta similaridade entre ambos. Esse valor é registrado e as médias dos dados desse par constituem uma nova amostra, resultando numa matriz de dimensão p-1 x p-1, até a obtenção de uma matriz 2 x 2.

4) Traça-se um dendrograma. Como esse gráfico é uma simplificação em 2 dimensões de uma relação n dimensional é inevitável que apareçam algumas distorções quanto à similaridade. A medida de tal distorção pode ser obtida por um coeficiente de correlação, dito cofenético, entre os valores da matriz inicial de similaridade e aqueles do dendrograma.

O Coeficiente de Correlação mede o grau de associação entre valores pela representação de pontos num sistema de coordenadas e suas respectivas posições em relação a uma linha reta. Esse coeficiente denominado, no caso, de correlação de Pearson é expresso como a razão entre a covariância de X e Y e o produto dos desvios padrões de X e Y, segundo a fórmula:

$$r_{xy} = \cos e_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{[(\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2)(\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2)]^{1/2}}$$

onde:

X_i = i-ésima observação da variável X
 Y_i = i-ésima observação da variável Y
 N = número de observação
 $\bar{X}$ = média da variável X
 $\bar{Y}$ = média da variável Y

Quando a similaridade ocorre, $e = 0$ e $\cos e = 1.00$. Quando não ocorre, $e = 90$ e $\cos e = 0$. Os passos para determinação dos "clusters" são os mesmos definidos para os correspondentes aos coeficientes de distância (só que, no item 3 procura-se o coeficiente de correlação mais alto, indicativo da mais alta similaridade entre os pares de valores). Esse valor é registrado e as médias dos dados desse par constituem uma nova amostra, resultando numa matrix de dimensão $p - 1 \times p - 1$, até a obtenção de uma matriz 2×2 .

As relações entre grupos são também expressas através de um diagrama em forma de árvore (dendrograma). Devido aos processos de ponderação, através de cálculo de coeficientes de correlação média entre os diversos elementos e os grupos é introduzida uma deformação nos coeficientes que não são mais exatamente os mesmos no dendrograma e na matriz original.

O grau de distorção introduzido pelos cálculos efetuados para o traçado dos dendrogramas não foi testado, ou seja, não foram calculados os coeficientes cofenéticos derivados desses diagramas, comparados aos coeficientes originais.

Macedo (1979), ao testar essas correlações achou valores da ordem de 0.72 a 0.74. Esses valores indicam distorção durante o processo de cálculo e demonstram que embora o método de

análise de agrupamento seja útil para visualizar as relações expostas por uma tabela de correlações, deve ser acompanhado de técnicas mais avançadas, para melhor conhecimento das relações entre as variáveis e/ou amostras.

3.2.2. APLICAÇÃO

Os cálculos para o estudo de análises de agrupamento foram realizados através do programa "CLUSTER", adaptado de Davis (1973). Os coeficientes de correlação e distância deram origem aos dendrogramas das Figuras 60, 61 e 62.

Para as rochas alcalinas do Brasil Meridional obteve-se uma matriz de coeficientes de correlação muito altos. No dendrograma anexo (Figura 60), constam os valores obtidos. No grupo 1 e 2 onde está reunida a maioria dessas amostras o coeficiente mínimo de correlação entre amostras é de 0.93. Situam-se aí os nefelina sienitos e gabros alcalinos, na seguinte ordem: melteigito, malignito, melanita-nefelina sienitos, ijolitos, essexitos, gabros alcalinos, nefelina sienitos e rochas relacionadas.

No grupo 3, cujo coeficiente de correlação com o grupo 1 é de 0.7950, situam-se os piroxenitos e alguns teralitos.

No grupo 4, situam-se as amostras de natureza mais ultramáfica, ou seja, os dunitos e werhlitos.

Numa primeira aproximação pode-se utilizar dos resultados obtidos pela análise dos agrupamentos para estabelecer um critério de seleção ("screen") para as rochas alcalinas e limitar assim campos composicionais dessas rochas. Esse grupo selecionado corresponderia aos grupos 1 e 2 obtidos da análise de agrupamento, eliminando principalmente as rochas de natureza ultramáfica. Os seus limites composicionais seriam: SiO_2 : (42 a 62%); Al_2O_3 : 12 a 24%; Fe_{tot} : 2 a 10%; MgO : 0 a 6%; CaO : 0 a 14%; Na_2O : 4 a 10%; K_2O : 1 a 9%. Os histogramas relativos a essas rochas são apresentados no capítulo quatro (Figura 69).

FIGURA 60 - Dendrograma para as rochas alcalinas do Brasil Meridional (coeficiente de correlação). Grupos 1 e 2: melteigito, malignito, gabros alcalinos e rochas relacionadas. Grupo 3: piroxenitos. Grupo 4: donitos e werhlitos.

FIGURA 61 - Dendrograma para as rochas alcalinas do Brasil Meridional (Coeficiente de Distância). Grupo 1: gabros alcalinos, essexitos, teralitos, melteigitos e ijolitos. Grupo 2: rochas ultramáfico-alcalinas. Grupo 3: nefelina sienitos e rochas relacionadas.

Os resultados obtidos para as amostras separadas pelo coeficiente de distância são ilustrados através do dendrograma (Figura 61).

Grupo 1: gabros, essexitos, teralitos, melteigitos e ijolitos, limitados por valores de coeficientes de 0.15 a 0.25 (rochas gábricas alcalinas).

Grupo 2: ultramáficas (jacupiranguitos, piroxenitos e dunitos) limitadas por coeficientes de distância da ordem de 0.25 a 0.36 (rochas ultramáficas alcalinas).

Grupo 3: nefelina sienitos e rochas afins, destacados dos grupo anteriores pelo coeficiente de distância de 0.54.

O dendrograma anexo (Figura 61) mostra a separação entre grupos e os valores obtidos para os respectivos coeficientes de distância. Observa-se uma melhor separação obtida quando se trabalha com os coeficientes de correlação, havendo uma graduação entre os membros mais máficos até menos máficos, no primeiro caso, com uma separação brusca dos tipos ultramáficos. No segundo, as rochas gábricas destacam-se dos nefelina sienitos pela presença do grupo intermediário, constituído pelas ultramáficas.

A análise de agrupamento foi utilizada também para a comparação entre as rochas consideradas alcalinas e aquelas definidas como basálticas, segundo Ruegg (1975a). O objetivo principal do uso dessa técnica foi então o de verificar a sua acuidade na separação entre esses dois grupos de rocha, além de verificar os prováveis campos de superposição entre essas espécies petrográficas. No caso foi utilizado o coeficiente de correlação entre amostras, tendo sido obtidos os seguintes resultados: a) A análise de agrupamento revelou a existência de dois grupos principais de rochas. O grupo 1 constituído de rochas alcalinas e o grupo 2 constituído principalmente de basaltos e diabásios. b) A passagem do grupo 1 para o grupo 2 dá-se através de rochas consideradas ainda como basálticas segundo Ruegg (1975a), indicando a

1. 456 - 0 - 206

1. 456 - 0 - 206

FIGURA 62 - Dendrograma para as rochas alcalinas e basálticas do Brasil Meridional. Grupo 1: rochas alcalinas. Grupo 2: rochas basálticas (alguns gabros alcalinos). Grupo 3: rochas ultramáficas-alcalinas.

existência de basaltos e diabásios alcalinos, como uma transição. Esse grupo de rocha, intermediário entre as alcalinas e basálticas, é contudo insignificante quando comparado com o global das amostras, como pode ser visualizado no dendrograma anexo (Figura 62). c) O grupo 1 é separado do grupo 2 por um coeficiente de similaridade em torno de 1.36. d) Algumas rochas alcalinas, principalmente gábricas e ultramáficas, estão associadas às amostras do grupo 2, constituindo um subgrupo com coeficientes os mais baixos, demonstrando a pouca eficácia da técnica na discriminação entre rochas máficas, de natureza normal e alcalina. e) Algumas rochas alcalinas anômalas constituem um subgrupo pouco significativo destacado do grupo 1.

Os resultados obtidos, de um modo geral, indicam que essa técnica tem um efeito descritivo muito importante, substituindo nomes e qualificações referentes a amostras de rochas, embora sujeita à distorção produzida pelo não cálculo dos coeficientes cofenéticos.

3.3. ANÁLISE DISCRIMINANTE

3.3.1. CONCEITOS

A Análise Discriminante Linear é uma técnica estatística que consiste em calcular funções classificatórias com o objetivo de descrever grupos de populações definidos como sendo diferentes (ultramáficas e nefelina sienitos, por exemplo). Os grupos são definidos com base em todas as variáveis que contribuem para a discriminação entre grupos e a função discriminante considera a dispersão ou variância dessas variáveis. Descrições de Análise Discriminante podem ser vistas em Miller e Kahn (1962), Krumbein e Graybill (1965) e Davis (1973).

O cálculo da Análise Discriminante consiste em substituir o conjunto inicial das diversas medidas feitas para um indivíduo por um único valor D_i , definido como uma combinação linear dessas medidas. De uma forma genérica:

$$D_i = \lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2 + \dots + \lambda_p x_p$$

Conhecido D_i este será comparado com um certo D_o , ou seja, o valor situado ao longo da linha expressa pela função discriminante a meio caminho entre os centros dos dois grupos, com a finalidade de verificar a qual deles o indivíduo pertence. Esse processo exige um conhecimento a priori das relações entre grupos à diferença da Análise de Agrupamento, cujos grupos são definidos a partir da própria técnica.

Para o cálculo das funções discriminantes faz-se necessária a solução do sistema de equações lineares, segundo o cálculo matricial:

$$[V_p^2] [\lambda_p] = [R_p]$$

onde:

$[V_p^2]$ = matriz $p \times p$ de variância-covariância combinada das p variáveis

$[\lambda]$ = vetor coluna, $p \times 1$, representando os coeficientes desconhecidos

$[R_p]$ = vetor coluna, $p \times 1$, das "p" diferenças entre as médias das variáveis de dois grupos.

Para o cálculo da matriz combinada tem-se:

$$[V_p^2] = \frac{[V_A] + [V_B]}{n_A + n_B - 2}$$

Para o cálculo de $[R_p]$ encontra-se as diferenças entre médias dos grupos.

Para a determinação dos coeficientes λ_p que irão

constituir a equação da função discriminante, determina-se o inverso da matriz de variâncias - covariâncias combinadas e em seguida multiplica-se essa matriz pelo vetor da diferença entre médias:

$$[\lambda_p] = [V_p^2]^{-1} \cdot [R_p]$$

O valor central do grupo A é determinado por:

$$D_A = \lambda_1 \bar{X}_{A1} + \lambda_2 \bar{X}_{A2} + \dots + \lambda_p \bar{X}_{Ap}$$

e do grupo B por:

$$D_B = \lambda_1 \bar{X}_{B1} + \lambda_2 \bar{X}_{B2} + \dots + \lambda_p \bar{X}_{Bp}$$

O índice determinante, D_O , ou seja, o ponto médio entre os dois grupos A e B é expresso segundo:

$$D_O = \lambda_1 \left(\frac{\bar{X}_{A1} + \bar{X}_{B1}}{2} \right) + \lambda_2 \left(\frac{\bar{X}_{A2} + \bar{X}_{B2}}{2} \right) + \dots + \lambda_p \left(\frac{\bar{X}_{Ap} + \bar{X}_{Bp}}{2} \right)$$

Para testar a significância da função encontrada, ou seja, para verificar se os dois grupos considerados pertencem a uma mesma população ou a populações distintas, calcula-se a distância entre as duas médias multivariantes, $D_A - D_B$. Essa medida é conhecida como distância generalizada de "Mahalanobis", ou D^2 , e é expressa em unidade de variância combinada. Esse valor (D^2) é usado na seguinte expressão de distribuição F:

$$F = \left[\frac{n_A + n_B - p - 1}{(n_A + n_B - 2)p} \right] \left[\frac{n_A}{n_A + n_B} \right] D^2$$

com p graus de liberdade para o numerador e $n_A + n_B - p - 1$ para o denominador. A hipótese nula a ser testada estabelece que as duas médias multivariantes são iguais, ou que a distância entre ambos os grupos é igual a zero.

$$H_0 : [R_p] = 0$$

$$H_1 : [R_p] \neq 0$$

A contribuição relativa em percentagem de cada variável para o distanciamento entre os dois grupos é fornecida pela expressão:

$$C_p = \frac{\lambda_p R_p}{D^2} \times 100$$

C_p mede apenas a contribuição direta da variável, sem levar em consideração o seu interrelacionamento com as demais existentes.

Uma aplicação interessante da técnica de Análise Discriminante em petrografia e geoquímica pode ser descrita com base nos trabalhos de Whitehead e Govett (1974). Esses autores tentaram distinguir diferentes distribuições de Pb, Zn em rocha quartzo pórfiro mineralizada.

Foram então determinadas as distâncias generalizadas de Mahalanobis: D^2 e o nível de significância da separação entre os dois grupos para 99% de segurança, constatando-se a existência de duas populações diferentes

3.3.2. APLICAÇÃO

A aplicação da Análise Discriminante no estudo da composição química das rochas alcalinas do Brasil Meridional revelou os seguintes resultados, conforme os grupos previamente escolhidos, ou seja:

3.3.2.1. Amostras separadas pelo coeficiente de correlação através da Análise de agrupamento.

3.3.2.2. Amostras separadas pelo coeficiente de dis-

tância através da análise de agrupamento.

3.3.2.1. Grupo A: constituído de 40 amostras (ultramáficas)

Grupo B: constituído de 160 amostras (nefelina sienitos e correspondentes intrusivos)

A hipótese nula, no caso é a de que os dois grupos são realmente diferentes. Os valores centrais dos grupos A e B são:

$$D_A = 36.73$$

$$D_B = 51.92$$

$$D^2 = 15.19.041$$

$$F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$$

$$D(0) = 44.32$$

A Função Discriminante linear é:

$$0.445 \text{ SiO}_2 + 0.991 \text{ TiO}_2 + 0.027 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.539 \text{ Fe}_{\text{tot}} + 0.889 \text{ MgO} + 0.583 \text{ CaO} + 0.180 \text{ Na}_2\text{O} + 0.494 \text{ K}_2\text{O}.$$

Contribuição de cada variável na discriminação:

$$C_{\text{SiO}_2} = \frac{0.446 \times (-10.735)}{15.19} = 31.5$$

$$C_{\text{TiO}_2} = 9.3\% \quad C_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 2.1\%$$

$$C_{Fe_{tot}} = 3.28$$

$$C_{MgO} = 93.6\% \cdot C_{CaO} = 28.1\% \cdot C_{Na_2O} = -5.3\%$$

$$C_{K_2O} = -14.0\%$$

As variáveis que mais contribuem para a discriminação dos grupos são: MgO , SiO_2 , CaO e Fe_{tot} , sendo praticamente nulas as contribuições de Na_2O , K_2O e Al_2O_3 .

Os efeitos negativos do SiO_2 são contrários aos positivos das outras variáveis. O peso da variável MgO é significativo. Considerando-se o erro analítico desse óxido de baixa concentração, verifica-se que os resultados devem ser aceitos com cautela.

O Quadro anexo mostra os resultados das amostras transformadas em relação às posições de D_A , D_O e D_B . Algumas amostras classificadas pela Análise de Agrupamento como pertencente ao grupo A passaram ao grupo B, por causa de nova posição em relação a D_O . A proporção dessas amostras é contudo insignificante demonstrando que os grupos previamente escolhidos foram bem discriminados por essa técnica multivariante.

	D_A		D_O		D_B
Nefelina sienitos	Ijolitos		Piroxenitos		Dunitos
Pulaskitos	Gabros alcalinos		Melateralitos		Peridotitos
Nordmarkitos	Sienodioritos		Teralitos		Piroxenitos
99 amostras	36.73	63 amostras	44.32	20 amostras	36.73 18 amostras

QUADRO 8 - Esquema de posição dos vários tipos petrográficos em relação a D_O , D_A e D_B .

As amostras ultramáficas em geral posicionam-se à esquerda de D_B com valores de D até 68.95. Incluem-se aí a maioria dos dunitos, peridotitos e jacupiranguitos, totalizando 18 amostras.

Os melateralitos e teralitos encontram-se compreendidos entre D_A e D_O , embora estejam incluídos nesses intervalos alguns piroxenitos de transição.

Entre D_O e D_A incluem-se as rochas alcalinas intermediárias, principalmente os ijolitos, sienogabros, gabros alcalinos, sienodioritos e dioritos, num total de 63 amostras.

À esquerda de D_A situam-se as amostras alcalinas mais ácidas, do tipo sienitos alcalinos, nefelina sienitos, quartzos sienitos, pulaskitos, fonólitos, foiaitos.

Observa-se portanto a acuidade da técnica que consiste em linhas gerais, em determinar um índice que posiciona a rocha em relação ao grupo, além de enquadrá-la em grupos distintos. É verdade que existe superposição de amostras nos vários grupos, além de confusão de posição entre espécies de rochas do mesmo grupo. Representa contudo uma característica importante de simplificar e coordenar grande número de dados num modelo simples e lógico de representação. Outro esquema válido para representar os resultados obtidos da Análise Discriminante encontra-se na Figura 63, em analogia ao trabalho de Isnard et al. (1972). Esta Figura representa os dois grupos obtidos pela Análise Discriminante (discriminados pelo coeficiente de correlação). Verifica-se uma área de superposição entre os grupos e a assimetria das curvas (reflexo do diferente número de amostras nos grupos), bem como o posicionamento das rochas dos vários maciços em relação a D_O , D_A e D_B .

3.3.2.2. A Análise Discriminante com grupos previamente separados pela análise de agrupamento (coeficiente de distância) revelou o seguinte resultado:

FIGURA 63 - Percentagem de frequência das rochas alcalinas separadas pela Análise Discriminante (caso 1) e esquema da posição das amostras dos vários maciços em relação a D_0 , D_A e D_B .

Grupo A - 71 amostras

Grupo B - 129 amostras

Valor de D_A = -11.32

Valor de D_B = -4.76

D^2 = 11.90084

F = 65.71643

$F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$

D_O = -8.07

A Função Discriminante linear é:

$$\begin{aligned} & -0.07434 \text{ SiO}_2 - 0.32066 \text{ TiO}_2 + 0.23607 \text{ Al}_2\text{O}_3 + \\ & 0.63540 \text{ Fe}_{\text{tot}} + 0.24457 \text{ MgO} + 0.37336 \text{ CaO} + \\ & 0.007592 \text{ Na}_2\text{O} - 0.74819 \text{ K}_2\text{O} \end{aligned}$$

Contribuição de cada variável

$$C_{\text{SiO}_2} = \frac{-0.07434 \times (-11.82)}{11.90} = 7.4\%$$

$$C_{\text{TiO}_2} = -3.5\% \quad C_{\text{Al}_2\text{O}_3} = -15.14$$

$$C_{\text{Fe}_{\text{tot}}} = 34.5\% \quad C_{\text{MgO}} = 21.82$$

$$C_{\text{CaO}} = 24.5\% \quad C_{\text{Na}_2\text{O}} = 2.0\%$$

$$C_{K_2O} = 27.5\%$$

Observa-se forte contribuição das variáveis: Fe_{tot} , CaO, K_2O , MgO; pouca contribuição das variáveis Al_2O_3 e MgO e contribuição praticamente nula de SiO_2 , TiO_2 e Na_2O . Por outro lado, a superposição de amostras em ambos os grupos é maior, indicando a menor eficiência discriminante do coeficiente de distância em relação ao coeficiente de correlação.

Elaborando também um esquema de posição para as amostras de rocha, discriminadas inicialmente pelos coeficientes de distância e testados pela Análise Discriminante, os resultados obtidos são melhor visualizados.

	D_A	D_O	D_B
Nefelina sienitos	Dioritos	Teralitos	Werhlitos
Pulaskitos	Sienodioritos	Essexitos	Piroxenitos
Nordmarkitos	Sienitos	Gabros alcalinos	Dunitos
100 amostras	-11.32 43 amostras	-8.07 20 amostras	-4.76 40 amostras

QUADRO 9 - Esquema de posição dos vários tipos petrográficos em relação a D_O , D_A e D_B .

As espécies de rochas alcalinas intermediárias, dos tipos gabros, teralitos e sienodioritos, acham-se bem posicionadas entre D_A — D_O — D_B , ficando os membros extremos, ultramáficos e alcalinos, à direita e esquerda de D_B e D_A . O fato das variáveis terem um peso aproximadamente igual talvez obscureça a discriminação entre amostras e responda pela superposição destas entre grupos.

FIGURA 64 - Percentagem de frequência das rochas alcalinas separadas pela Análise Discriminante (caso 2) e esquema de posição das amostras dos vários maciços em relação a D_0 , D_A e D_B .

A Figura 64 representa também os dois grupos discriminados pela técnica da Análise Discriminante, previamente definidos através da técnica de análise de agrupamento e coeficiente de distância como coeficiente de similaridade. Verifica-se uma maior área de superposição entre os grupos, se comparado à Figura 63 e também o posicionamento dos vários maciços em relação aos parâmetros D_O , D_A e D_B .

3.4. A INTERAÇÃO DA ESTATÍSTICA MULTIVARIANTE COM OS CÁLCULOS PETROLÓGICOS

De um modo geral as várias técnicas multivariantes utilizadas neste capítulo tiveram como objetivo maior formalizar o conjunto de dados químicos e petrográficos dispersos na literatura geológica sobre as rochas alcalinas do Brasil Meridional. Desse modo não foram selecionadas previamente determinadas variáveis mas foram estas consideradas no seu conjunto. Na verdade entendemos que o aprofundamento dessa interação poderia resultar em novos gráficos multivariantes obtidos a partir de hipóteses prévias, embora esta lacuna já esteja preenchida em parte, considerando os índices e gráficos da petrologia (Capítulo 2).

É conveniente explicitar que a Análise Discriminante e a Análise de Agrupamento não mostraram nenhuma discriminação de grupos geotectônicos, geocronológicos ou petrológicos, agrupando as amostras apenas de acordo com determinados coeficientes de similaridade, os quais refletem a resultante de um conjunto de variáveis. Somente a Análise Fatorial selecionou diretamente determinadas variáveis como sendo de maior peso ou de maior contribuição na definição dos fatores, contribuindo para a definição de gráficos adequados de projeção das amostras em relação aos fatores. Esse foi o motivo para selecionar essa técnica como aquela que poderia contribuir diretamente para elucidar a petrogênese das rochas alcalinas, embora não devamos perder de vista a formalização em si, que é muito mais um meio do que um objetivo,

constituindo a característica principal da Informática Geológica.

Vale ainda mencionar um exemplo típico da interação dos gráficos da Petrologia com a Análise Estatística Multivariante utilizando o exemplo de Upton (1974), o qual traça um Diagrama $\text{SiO}_2/\text{Alk}_2$ aplicado à Província do Sul da Groelândia onde foram plotadas 300 amostras de rochas ígneas e numa terceira dimensão valores de ID e quartzo ou nefelina normativa (Figura 65). Em analogia a este gráfico foram traçados através do Programa "Trend" (Amaral, 1967b): a) Mapa de localização dos pontos segundo razão Álcalis/ SiO_2 ; b) Mapa de isovalores dos dados em relação ao quartzo e nefelina normativas; c) Mapa dos isovalores dos dados em relação aos ID; d) Superfície de tendência do 1º grau, mostrando um ajuste razoável dessa superfície, tanto para os valores de ID como para o quartzo ou nefelina normativos, com altos coeficientes de correlação (Figura 66).

Comparando esses valores com os resultados obtidos por Upton (op.cit.) verifica-se um campo bem delimitado definido pela Província Alcalina do Brasil Meridional, o qual pode ser interpretado, à semelhança de Gardar, como consequência do fracionamento do feldspato alcalino e os extremos de composição mais alcalina, como refletindo diferentes graus de acumulação de nefelina ou sodalita.

Ainda a interação entre as técnicas multivariantes e a Petrologia evidencia-se nos esquemas classificatórios e descritivos petrográficos. Desse modo, dois conceitos modernos, o geométrico e o semântico refletem a necessidade dessa interação:

O conceito geométrico estabelece que uma rocha pode ser representada por um ponto num espaço multidimensional, onde as coordenadas do ponto representam as proporções dos constituintes químicos da rocha. Duas rochas de composição similar estariam representadas por pontos situados muito próximos um do outro e uma série distinta de rochas formaria agrupamentos igualmente

FIGURA 65 - Diagrama Álcali-Silica mostrando o limite composicional das rochas alcalinas do Brasil Meridional, os traços dos planos de subsaturação e supersaturação e dos Índices de Diferenciação.

FIGURA 66 - Diagrama Álcali-sílica mostrando os limites composicionais para as rochas ígneas da Província de Gardar e o traço do Plano Crítico de Subsaturação e o contorno dos Índices de Diferenciação (Upton, 1974).

te distintos de pontos separados por zonas de transição. No exemplo bivariante um ponto seria definido por duas variáveis enquanto as curvas de igual densidade de pontos indicariam agrupamentos presentes." Brotzen (1975) refere-se a esses aspectos da representação espacial de grupos de rocha relacionados, mostrando que em distribuições multivariantes não é sempre possível visualizar os agrupamentos, principalmente quando se trabalha com um número significativo de variáveis.

Outro conceito importante que subordina o uso das técnicas multivariantes é o referente a códigos semânticos, mencionados por Hubaux (1971). Assim, a descrição ou classificação de uma rocha pode ser interpretada como um problema de semântica na comunidade científica. Nesse sentido, "a substituição de nomes e qualificações referentes a uma rocha, por códigos, tem a vantagem de padronizar os sistemas de classificação e limitar a rocha num espaço, envolvido por números e índices, procurando sempre que possível, eliminar superposições espaciais dessas rochas, definindo e codificando seus campos composicionais". Desse modo, o objetivo da análise estatística multivariante é também agrupar e discriminar grupos de rocha e a escolha de variáveis adequadas permitiria uma melhor individualização desses grupos.

Outro aspecto a ser considerado é o relativo à seleção de variáveis através de técnicas multivariantes, permitindo escolher a priori os gráficos da petrologia de melhor poder discriminante. Nesse sentido verificou-se através da Análise Fatorial que existe uma forte correlação negativa entre SiO_2 e, CaO , Fe_{tot} e MgO e uma média correlação positiva de SiO_2 com Na_2O e K_2O . Assim, os melhores gráficos da petrologia seriam aqueles que confrontassem essas altas correlações, como por exemplo, $\text{CaO} \times \text{Na}_2\text{O}$, K_2O (Gráficos Triangulares Ca, Na, K) ou $\text{SiO}_2 \times \text{CaO}, \text{Fe}_{\text{tot}}, \text{MgO}$ (Gráficos QLM), sendo os gráficos $\text{SiO}_2/\text{Álcals}$ de pequeno poder discriminante devido à média correlação entre as variáveis.

C A P Í T U L O 4

ANÁLISE ESTATÍSTICA UNIVARIANTE

4.1. CONCEITOS BÁSICOS

Para melhor analisar os resultados apresentados, convém fazer uma revisão teórica sobre alguns conceitos de distribuição de frequência de elementos químicos e modelos teóricos de distribuição.

Ahrens (1953, 1954, 1957) nos primeiros trabalhos referentes à distribuição de frequência dos elementos químicos em minerais e rochas propôs uma "lei" que seria fundamental referente à natureza da distribuição das concentrações dos elementos: "A concentração de um elemento é distribuída lognormalmente numa rocha ígnea específica". Suas idéias deram origem a vários artigos críticos como os de Aubrey (1956), Miller e Goldberg (1955), Vistelius (1960) e Shaw (1961).

Miller e Goldberg (op.cit) e Aubrey (op.cit) mostraram que a distribuição lognormal não pode ser sempre obedecida para todos os constituintes maiores de uma rocha. Sugeriram então, na análise dos dados, o uso de testes estatísticos para verificar o grau de confiança desses dados em relação ao padrão lognormal, atribuindo a Ahrens interpretações intuitivas.

Vistelius (1960) analisou os resultados apresentados por Ahrens (op.cit) e chamou atenção de alguns aspectos: falta de adequação das classes em relação ao número de graus de liberdade, reafirmando regras da estatística que não foram consideradas por Ahrens. Na concepção desse autor, todas as rochas do mundo seriam uma coleção de resultados de uma ampla margem de estágios dos processos geoquímicos e sua distribuição seria assimétrica. Desse modo, todos os basaltos do mundo constituem uma co-

leção dos resultados de séries de estágios dos processos geoquímicos e a amplitude das curvas de distribuição seria mais estreita do que aquela para todas as rochas consideradas no seu conjunto, ou seja, distribuições "locais" são normais enquanto distribuições "agrupadas" são assimétricas. Assim, o padrão de distribuição Na_2O para as rochas ígneas do mundo tem grande assimetria positiva e não é logarítmica e para 200 rochas basálticas do mundo apresentam uma assimetria menor do que a anterior.

Shaw (op.cit.) resumiu as críticas a Ahrens considerando que os dados eram insuficientes para estabelecer qualquer lei. Testes estatísticos não foram utilizados para estabelecer o grau de confiança entre a lei proposta e a distribuição de frequência, os diagramas de classe não consideraram o melhor intervalo de classe e não mostrou se a Lei de Ahrens era descritiva ou se implicaria em relação causal de algum modelo teórico. A assimetria positiva nas curvas de distribuição de frequência requeria uma tendência negativa para outras, uma vez que a soma dos constituintes totaliza 100. Seria necessário entender claramente a natureza e os limites de uma dada população antes de encontrar um modelo para explicá-la.

Posteriormente para Ahrens (1963a) ficou claro que a distribuição lognormal ou próxima da lognormal abrangeria um grande número de elementos traços, o que também foi sugerido por autores posteriores críticos. Quanto à distribuição dos elementos maiores outros resultados foram obtidos. Por exemplo, para os granitos do Japão obteve os seguintes padrões de distribuição: SiO_2 - assimétrico negativo; K_2O - assimétrico negativo; Na_2O - próximo à normalidade; Al_2O_3 , MgO , Fe_2O_3 e TiO_2 - assimétricos positivos. A assimetria negativa do SiO_2 concordaria com os argumentos de que não é possível para todos os constituintes haver uma distribuição assimétrica positiva. Assim, dividiu esses elementos maiores em 4 categorias: Assimétricos positivos ou lognormais, Assimétricos negativos, Normais ou Aproximadamente Normais e Incertos. Em trabalhos posteriores (1963b, 1964, 1966) tentou estabelecer relações entre as distribuições probabilísticas do

SiO_2 e K em vários tipos de rocha e os processos de cristalização fracionada. Explicou ainda a assimetria negativa verificada como consequência de duas ou mais distribuições truncadas. Analisou o problema da superposição e truncamento de populações truncadas mostrando que no caso da superposição a resultante seria uma reta e no caso de duas populações normais a resultante seria duas retas. Analisou ainda o problema da inclinação das retas de frequência acumulada com base na dispersão das concentrações (essa inclinação forneceria uma medida de dispersão de concentração, comparando as dispersões dos elementos para basaltos e granitos). Num trabalho de comparação gráfica de dispersão relativa de alguns dos constituintes de rocha obteve os seguintes resultados: elementos com baixa concentração apresentam maior dispersão, ou quanto mais abundante o elemento menor a dispersão. Comparou ainda a distribuição de alguns elementos em rocha analisando as dispersões dos elementos e os efeitos dos processos mineralógicos nessas distribuições (por exemplo, o Sr desvia-se da normalidade a partir de uma certa concentração mínima).

Rooke (1963) trabalhou com duas populações distintas: a) Complexo de rochas mais jovens, não orogênicas; b) Embasamento mais antigo. Segundo esse autor um estudo de província geoquímica requeriria que fossem feitas comparações entre grupos de análises de tipos de rochas similares, de diferentes localidades, a fim de assegurar-se sobre as concordâncias ou disparidades entre esses grupos. Ao definir essas duas populações observou as suas limitações em relação ao tempo, espaço e tectonismo. Ao trabalhar com 130 rochas ígneas ácidas da África observou os seguintes aspectos: a) considerou primeiro o padrão para o grupo total de amostras; b) considerou os grupos separadamente; c) observou que cada população pode ser decomposta numa série de linhas retas com descontinuidades, indicando distribuições normais justapostas truncadas, de acordo com o verificado por Ahrens (1963). De qualquer modo as duas populações comparadas eram muito diferentes e os traçados dos histogramas e curvas de distribuição de frequência acumulada indicaram essas disparidades.

Vistelius (1960) estabelece algumas considerações sobre a Análise Estatística Univariante em geologia, sintetizadas através de algumas premissas: a grande maioria dos fenômenos geológicos são probabilísticos e portanto as investigações geológicas devem começar com o estudo dos valores de frequência das medidas numéricas dos elementos de uma população. Formula-se então um modelo dos processos o qual produzirá a probabilidade para os valores da variável aleatória em consideração. Uma comparação entre a função de distribuição de probabilidade e a distribuição de frequência dará uma medida de concordância entre o modelo proposto e a distribuição observada. A concordância é uma medida da falta de contradição do modelo com relação às observações e de nenhum modo prova a validade desse modelo. Além disso nada garante a unicidade do modelo teórico para explicar um fenômeno. Critérios numéricos específicos podem portanto ser usados para estabelecer a concordância entre a teoria e a prática, em função de uma certa probabilidade.

Lepeltelie (1969) reviu a bibliografia sobre o assunto, principalmente no seu aspecto formal, adotando o padrão de distribuição lognormal para a concentração dos elementos traços. Esse autor fez as seguintes considerações sobre o assunto: quando se trabalha com um grande número de dados geoquímicos, o primeiro passo é encontrar que tipo de melhor padrão de distribuição se ajusta às várias séries de observações. O padrão lognormal parece ser o mais adequado aos resultados de geoquímica, ou seja, mais frequente que o normal. As várias etapas de pesquisa para atingir-se os objetivos seriam: a) seleção de uma população tão grande e homogênea quanto possível; b) agrupar os valores em número adequado de classes; c) calcular as frequências de ocorrência em cada classe e "plotá-las" em relação aos limites das classes (traçar histogramas); d) traçar curvas de frequência; e) traçar curvas de frequência acumulada; f) substituir a escala aritmética ordinária por uma escala probabilística. O autor discute ainda o caso da identificação de populações não homogêneas pelas curvas de distribuição de frequência acumulada e caracterizada pelas inflexões das retas (no papel de probabilidade) e

estabelece técnicas para separação da população principal em relação às secundárias.

Sinclair (1974) retoma os trabalhos anteriores de Lepeltelier e mostra técnicas para cálculo de valores anômalos em dados geoquímicos. Usa um procedimento arbitrário que pode ser usado para qualquer distribuição multimodal com densidade de distribuição apropriada. A técnica tem por fim proporcionar a partição de distribuições multimodais desde que as populações tenham distribuição normal ou lognormal. A estimativa das proporções dessas populações é dada por um ponto de inflexão ou mudança na direção de curvatura, baseada no fato de que $P_m = P_a f_a + P_b f_b$, ou seja, a probabilidade de uma mistura é igual a soma das probabilidades dos componentes ponderados.

Parslow (1974) discute técnicas de análise de distribuição de frequência bimodal, bem como os efeitos da posição de um ponto de inflexão, da curvatura da sigmóide resultante, multimodalidade e precisão gráfica e analítica.

Nos últimos anos houve uma retomada da discussão sobre a distribuição dos elementos na forma de concentração em rochas ígneas. Alguns pesquisadores com formação geomatemática apropriaram-se de modelos para uma explicação teórica do fenômeno. Narebski (1974) mostrou que os padrões de distribuição de concentração dos elementos maiores nas rochas espelíticas da Europa correspondem a normalidade enquanto elementos traços desenvolvem padrões lognormais. Kawabe (1977) descreve um modelo estocástico de cristalização fracionada para os basaltos do geossinclínio japonês. Segundo esse autor, as curvas de distribuição de frequência empírica fornecem inferências geoquímicas sobre a formação das rochas apenas se associadas a um modelo probabilístico adequado para a sua formação. De outro modo serão apenas descritivas. Mostrou também que os padrões de concentração não podem ser sempre expressos por um tipo particular de função mas dependem dos coeficientes de partição. O modelo foi aplicado para as concentrações de Ni e Cr, obtendo um padrão de distribuição normal. Retoma por

tanto o modelo estocástico para fenômenos geológicos, aplicando-o à diferenciação magmática por cristalização fracionada. Manson (1967) utilizou histogramas modais para representar as distribuições dos minerais em rochas basálticas em escala mundial e também para representar as frequências dos elementos maiores nestas rochas, e Prinz (1967) analisou a frequência dos elementos traços nas rochas basálticas do mundo através de histogramas modais.

O traçado de histogramas e gráficos de frequência acumulada, a determinação dos parâmetros estatísticos (média, desvio padrão, simetria e curtose), além da determinação das funções de distribuição (se normal ou lognormal), principalmente para os elementos maiores das rochas alcalinas do Brasil Meridional, levam em consideração os pressupostos dos trabalhos teóricos dos vários geoquímicos mencionados. No entanto, nenhum modelo teórico foi considerado porque a falta de estabelecimento de um plano amostral não permite fazer inferências sobre a população com base probabilística.

Numa abordagem fundamentalmente descritiva considera-se como objetivos principais do presente capítulo, determinar: a) o valor médio da população; b) como o valor médio caracteriza a população (se a variância populacional é grande ou pequena); c) em que extensão as médias amostrais podem representar a população; d) se essas médias variam sistematicamente ao longo de uma linha ou área e se existem gradientes presentes no fenômeno.

4.2. CÁLCULO DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA AS ROCHAS ALCALINAS

O objetivo desse item é descrever as estatísticas amostrais (média e dispersão) das rochas alcalinas do Brasil Meridional, utilizando como medidas numéricas as percentagens em peso dos elementos maiores e as concentrações em ppm dos elementos menores, para o conjunto de rochas, para cada maciço e tipo petro-

gráfico e, comparar os resultados globais obtidos com aqueles da literatura clássica e confrontar com as rochas basálticas da Bacia do Paraná geotectonicamente correlacionáveis.

Para determinar essas estatísticas amostrais foram analisados os dados brutos, utilizando-se como medida de tendência central principalmente a média aritmética e como medida de dispersão, o desvio padrão e/ou variância. Para isso foram utilizados os programas SPSS, versão 5/09/022, do Centro de Computação da Universidade de São Paulo. Os resultados obtidos encontram-se nas Tabelas 22 a 26.

As Tabelas 22 e 23 mostram os valores de médias, desvio padrão, simetria e curtose para as rochas alcalinas no seu conjunto, discriminadas em sub-conjuntos definidos pelas amostras, separadas pelo coeficiente de correlação, coeficiente de distância e anteriores e posteriores aos casos G-1 e W-1. A Tabela 24 compara os valores globais das rochas alcalinas com as rochas basálticas definidas por Ruegg (1975a).

Dos resultados obtidos depreende-se que a relação $\text{Na}_2\text{O} : \text{K}_2\text{O}$ é aproximadamente 1 : 1 para as rochas no seu conjunto, sendo esse mesmo valor diferente para as amostras discriminadas em grupos e sub-grupos. As amostras anteriores e posteriores a G-1 e W-1 revelaram praticamente os mesmos valores, indicando que os prováveis erros amostrais ou/e analíticos não são muito significativos. Para o SiO_2 o erro é de 1%, para o K_2O é de 5%, para o Al_2O_3 , Fe_{tot} , CaO , Na_2O é de 10% e para o MgO (baixa concentração), os erros são mais significativos (aproximadamente 25%).

As estatísticas descritivas para os basaltos toleíticos comparadas com aquelas para as rochas alcalinas mostram um teor praticamente semelhante para o SiO_2 , em ambos os tipos de rocha e o caráter acentuadamente cálcico e ferro-magnesiano dos basaltos.

A Tabela 25 apresenta as médias amostrais para os

TABELA 22 - Dados de Média e Desvio padrão para as rochas alcalinas no seu conjunto e discriminadas pelo coeficiente de correlação, distância e posteriores e anteriores a G-1 e W-1.

% peso óxidos	Rochas Alcalinas (Total)		Disc. coef. Cor.		Disc. coef. Dist.		Post. G-1 e W-1		Ant. G-1 e W-1	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
SiO_2	51.65	6.81	53.82	6.27	55.08	4.85	51.29	6.70	52.96	7.66
TiO_2	1.32	1.65	-	-	-	-	1.25	1.27	1.54	2.61
Al_2O_3	17.02	5.63	18.99	3.51	19.68	2.52	17.23	5.32	16.23	6.64
Fe_{tot}	7.52	4.85	6.55	3.31	5.45	1.95	7.40	3.34	7.92	5.37
MnO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MgO	3.73	5.33	1.65	2.11	1.03	1.17	3.95	5.65	2.89	3.91
CaO	5.78	5.34	3.98	3.63	2.64	2.05	5.93	5.22	5.20	5.80
Na_2O	5.68	2.65	6.60	1.90	6.86	1.73	5.67	2.72	5.70	2.39
K_2O	5.05	2.55	5.66	2.20	6.31	1.74	5.02	2.59	5.14	2.43

TABELA 23 - Dados de Simetria e Curtose para rochas alcalinas do Brasil Meridional discriminadas segundo coef. de cor., coef. dist., anteriores e posteriores a G-1 e W-1.

% peso óxidos	Rochas Alcalinas (175)		R. Alc. Disc. coef. cor. (130)		R. Alc. Disc. coef. dist. (110)		R. Alc. post. G-1 e W-1		R. Alc. Ant. G-1 e W-1	
	SIM	CURTOSE	SIM	CURT.	SIM	CURT.	SIM	CURTOSE	SIM	CURT.
SiO ₂	-0.034 normal	-0.301	-0.163 normal	0.063	0.446 lognormal	0.454	0.220 normal	-0.286	-0.883 normal	0.388
TiO ₂	3.73	18.82	-	-	-	-	2.369	8.038	3.292	10.440
Al ₂ O ₃	-1.23 normal	0.58	-1.92	6.38	-0.87	1.22	-1.159	0.554	-1.172	0.034
Fe _{tot}	1.08 (0.01) lognormal	0.97 (-0.52)	1.57 (0.19) lognormal	3.25 (-0.04)	0.778 (-0.25) lognormal	0.690 (0.06)	0.609 (-0.25)	-0.411 (-0.43)	1.234 (0.59)	0.286 (-0.85)
NiO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MgO	1.93 lognormal	3.04	2.76 (-0.17) lognormal	9.99 (1.31)	3.54	17.43	1.851 (-0.22)	2.572 (-0.06) lognormal	1.875 (-0.73)	2.291 (1.49)
CaO	1.03	-0.001	1.22	0.21	1.71	2.58	0.800 (-1.20) lognormal	-0.577 (3.81)	1.719 (0.74)	1.798 (-0.71)
Na ₂ O	-0.46 normal	-0.67	-0.35 normal	0.02	-0.367 normal	0.657	-0.417 normal	-0.776	-0.678 normal	-0.205
K ₂ O	-0.21 normal	-0.54	-0.236 normal	0.134	-0.031 normal	1.833	-0.128 normal	-0.501	-0.605 normal	-0.731

* Os números entre parênteses referem-se aos resultados em escala logarítmica. Os números em duplo parênteses referem-se ao número de amostras.

TABELA 24 - Dados de Média, Desvio Padrão, Simetria e Curtose para rochas alcalinas do Brasil Meridional, comparadas com rochas basálticas.

% peso óxidos	Basaltos e diabásicos				Rochas alcalinas			
	Média (μ)	Desvio Padrão (σ)	Sim.	Curtose	Média (μ)	Desvio Padrão (σ)	Sim.	Curt.
SiO_2	51.34	5.37	1.524	2.433	51.65	6.81	-0.034 <i>normal</i>	-0.301
TiO_2	2.59	1.05	-0.312	-0.519	1.32	1.65	3.73	18.802
Al_2O_3	13.31	1.71	0.058 <i>normal</i>	1.486	17.02	5.63	-1.23 <i>normal</i>	0.58
Fe_{tot}	13.69	4.18	4.68	53.12	7.52	4.85	(0.01) <i>lognormal</i>	(-0.52)
MgO	4.70	3.89	11.24	151.52	3.73	5.33	(-0.30) <i>lognormal</i>	(0.22)
CaO	8.01	2.16	-0.747 <i>normal</i>	1.429	5.78	5.34	1.03	-0.001
Na_2O	2.69	0.59	-0.231	2.78	5.68	2.65	-0.46 <i>normal</i>	-0.67
K_2O	1.67	0.98	2.16	8.17	5.05	2.55	-0.21 <i>normal</i>	-0.54

* Os números entre parênteses referem-se aos resultados em escala logarítmica.

TABELA 25 - Dados de Média e Desvio padrão para as várias unidades petrográficas/maciços e áreas aproximadas dessas unidades discriminadas nos mapas geológicos.

MACIÇOS		I T A P I R A P U Ā										J U Q U I Ā							
TIPOS PET.	%	MELTEIGITO		MALIGNITO		MELANITA NEFELINA SIENITO		NEFELINA SIENITO		TINGUAITO		NEFELINA SIENITO		PIROXENITO		IJOLITO		MELTEI- GITO	
		μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
SiO_2		40.9	-	43.4	-	46.45	1.8	57.86	2.2	52.75	0.3	52.20	3.6	41.45	0.25	42.2	0.79	38.60	-
TiO_2		2.75	-	2.15	-	1.11	0.2	0.39	0.2	0.46	0.2	0.86	0.2	1.86	0.5	0.88	0.65	2.72	-
Al_2O_3		16.11	-	17.70	-	18.21	1.2	21.97	1.6	22.05	0.6	19.04	0.8	6.58	0	15.63	1.57	10.37	-
Fe_{tot}		9.67	-	8.69	-	7.74	1.7	4.62	1.4	3.85	0.5	5.58	1.1	15.28	0.23	11.32	3.5	13.86	-
MgO		5.82	-	3.24	-	1.28	0.6	0.24	0.2	0.15	0.0	1.12	0.6	15.76	3.9	5.77	2.09	12.93	-
CaO		15.50	-	12.40	-	8.33	1.9	2.78	0.9	1.46	0.3	3.97	1.8	14.61	2.9	11.45	1.7	13.46	-
Na_2O		7.13	-	6.96	-	7.42	1.1	8.75	1.5	5.53	5.8	6.90	0.7	2.72	1.0	6.73	1.08	1.94	-
K_2O		2.26	-	3.47	-	5.94	1.5	7.21	1.1	6.31	0.8	7.42	0.8	0.52	0.5	4.07	0.8	3.55	-
Nº AM (A.Q.)		1		1		7		8		2		5		2		3		1	
% ÁREA U. PET.		N Æ O D I S C R I M I N A D A (principalmente nefelina sienitos)										10 - 15		70%		10 - 5		-	

MACIÇOS	T U N A S												POÇOS DE CALDAS					
TIPOS PET.	SIENITOS ALCALINOS		PULASKITOS		FOIAITOS		GABROS ALCALINOS		SIENODIORITOS		DIORITOS		FONÓLITOS		TINGUAITOS		FOIAITOS	
% ÓXIDOS	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
SiO ₂	61.62	1.4	60.80	1.1	60.48	-	47.95	1.9	55.51	1.1	56.68	0.3	52.56	1.2	52.93	1.1	52.35	0.9
TiO ₂	0.66	0.2	0.47	0.2	0.15	-	2.35	1.1	1.16	0.3	1.72	0.7	0.557	0.2	0.569	0.1	0.503	0.3
Al ₂ O ₃	19.26	1.5	18.17	1.7	17.86	-	22.58	1.7	21.51	0.7	17.9	3.5	21.33	1.3	20.55	2.5	21.57	1.5
Fe _{tot}	5.09	1.5	6.47	1.3	-	-	9.20	1.2	6.82	0.2	7.70	2.1	5.07	0.8	6.34	0.9	5.09	1.9
MgO	0.55	0.5	0.83	0.6	0.87	-	3.79	1.9	2.07	0.8	1.20	0.5	0.63	0.4	0.46	0.5	0.59	0.5
CaO	1.59	0.1	1.09	0.7	0.10	-	8.48	2.5	3.59	0.7	6.42	0.6	1.74	0.3	1.64	0.3	1.42	0.6
Na ₂ O	5.74	0.0	6.82	0.4	8.90	-	4.05	0.7	6.08	0.3	5.61	0.1	7.76	1.3	8.36	0.6	7.93	1.4
K ₂ O	4.83	0.9	4.77	0.4	4.05	-	1.02	0.5	2.91	0.5	1.92	0.3	7.60	0.7	7.66	0.5	7.39	1.6
Nº AM A.Q.)	3		4		1		5		3		2		9		9		12	
% ÁREA/ U. PET.	70%						10-15%		15 - 10 %				70 - 80 %				30 - 20%	

MACIÇOS		S A N T A F É														SÃO SEBASTIÃO			
TIPOS PET.		DUNITO		PERIDOTITO		PIROXENITO		MISSOURITO		MALIGNITO		ESSEXITO		LEUCITA PERIDOTITO		PULASKITO		NEFELINA SIENITO	
% ÓXIDOS		μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
SiO ₂		36.33	0.8	44.46	3.6	50.57	2.8	47.45	2.2	47.59	1.1	43.54	0.3	48.40	1.7	58.40	0.3	58.14	2.5
TiO ₂		0.10	0.0	1.49	1.3	1.74	0.9	1.74	0.4	4.03	0.4	4.26	0.6	0.98	0.2	0.69	0.2	0.79	0.0
Al ₂ O ₃		0.16	0.0	1.19	0.4	1.92	0.2	4.87	2.6	10.60	2.0	8.75	1.0	3.62	2.9	20.20	1.8	19.28	0.3
Fe _{tot}		13.14	1.6	13.52	5.4	6.92	2.8	9.23	1.0	11.48	0.9	12.90	0.8	9.33	2.1	3.89	0.2	4.87	1.1
MgO		41.10	1.2	24.26	4.4	16.17	0.8	18.51	6.9	6.75	1.4	9.63	1.6	21.50	1.8	1.25	1.2	1.25	0.3
CaO		1.49	0.0	13.04	2.6	20.53	0.9	13.25	1.9	10.06	2.1	13.38	1.3	13.62	1.4	2.49	0.3	1.91	0.0
Na ₂ O		0.02	0.0	0.13	0.1	0.32	0.2	0.63	0.2	2.09	0.6	1.53	0.3	0.30	0.0	5.75	0.2	6.30	0.1
K ₂ O		0.05	0.0	0.14	0.1	0.12	0.1	2.46	1.4	4.99	1.5	2.97	1.1	1.02	1.2	5.20	0.8	5.32	0.2
Nº AM. (A.Q.)		2		4		2		3		2		2		2		2		2	
% ÁREA/ AN. PET.		90%						10%						Não discriminado					

MACIÇOS		I P O R Ã												I T A T I A I A				
TIPOS PET. % OXIDOS	SIENITO		GABRO		TERALITO		PIROXENITO		DUNITO		WERHLITO		NEFELINA SIENITO		QUARTZO SIENITO			
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ		
SiO ₂	52.36	5.9	43.04	0.3	43.04	1.8	45.92	1.9	35.97	1.7	38.78	2.6	58.40	1.9	62.34	6.3		
TiO ₂	1.78	1.2	6.72	2.7	3.53	1.2	2.11	0.6	0.16	0.1	0.92	0.4	0.77	0.2	0.64	0.4		
Al ₂ O ₃	18.98	1.2	10.02	3.1	11.39	0.1	5.14	1.2	0.32	0.2	1.39	0.8	20.19	1.7	17.11	2.8		
Fe _{tot}	5.95	2.3	13.04	2.2	23.16	0.6	9.93	1.7	11.70	0.7	11.66	0.8	2.88	0.5	3.30	3.3		
MgO	1.15	0.8	9.70	2.9	10.40	1.9	16.27	3.3	42.06	2.0	31.16	6.9	0.91	0.4	0.74	0.4		
CaO	4.57	2.2	11.76	1.3	11.72	1.2	17.38	3.3	0.55	0.1	14.62	12.0	1.63	0.3	1.47	0.7		
Na ₂ O	5.20	0.5	1.87	0.9	1.90	0.8	0.58	0.4	0.06	0.1	0.05	0.1	7.18	1.6	5.76	1.1		
K ₂ O	7.10	0.9	1.75	0.5	2.46	0.6	0.59	0.5	0.07	0.1	0.08	0.1	6.32	0.1	6.78	0.7		
Nº AM (A.Q.)	4		2		2		5		4		3		3		3			
% ÁREA/ U. PET.	30 - 40%						10%		60 - 50 %						80		20	

vários tipos petrográficos e o número de amostras para defini-los enquanto a Tabela 26 apresenta os valores globais discriminados para cada maciço, os quais não são muito significativos, porque a amostragem é tendenciosa e não proporcional à variância amostral e à área desse maciço. Por exemplo, o Maciço de Tunas, com cerca de 80% da área constituída por sienitos alcalinos tem aí apenas 03 amostras das 18 analisadas, tendo sido descritas 05 amostras de gabros alcalinos apesar dessa unidade petrográfica constituir apenas 05% da área mapeada. O mesmo acontece com os maciços alcalinos de Juquiã e Iporã, cujas áreas maiores são ocupadas pelas rochas ultramáficas, apesar do número de amostras não expressar essa compartimentação geológica. Por enquanto, esses dados são descritos para efeito de ilustração e comparação com outros definidos na literatura.

Vale considerar que as informações sobre as estatísticas descritivas serão melhor registradas no item seguinte, quando forem definidas as frequências de distribuição dos vários elementos em forma de óxidos para os vários grupos e sub-grupos de rochas alcalinas do Brasil Meridional e suas respectivas curvas de frequência acumuladas comparadas.

Os cálculos de dispersão apresentados nas tabelas mencionadas acima são também importantes na análise de variância amostral para o estabelecimento de planos amostrais, ou seja, na determinação do número e espaçamento entre amostras a serem coletadas, como discutido no item 1.3. Por exemplo, considerando o SiO_2 como referencial, a variância para os maciços ultramáficos alcalinos (Juquiã, Iporã e Santa Fé) é maior do que os tipos mais diferenciados. Quanto ao Al_2O_3 a sua maior variância é para o maciço de Iporã, o mesmo acontecendo com as variáveis Na_2O e K_2O . Nesse último maciço o sienito é o tipo petrográfico mais diferenciado em relação ao SiO_2 e os gabros em relação a Al_2O_3 , Na_2O e K_2O .

Foram feitas tentativas também para determinar as estatísticas descritivas dos vários grupos geotectônicos propostos por Herz (1977) mas os resultados obtidos mostraram padrões

TABELA 26 - Dados de média e desvio padrão para os vários elementos em forma de óxidos, % em peso, para os vários maciços alcalinos do Brasil Meridional.

MACIÇOS	SiO ₂			TiO ₂			Al ₂ O ₃			Fe _{tot}		
	μ	σ	σ/μ	μ	σ	σ/μ	μ	σ	σ/μ	μ	σ	σ/μ
ITAPIRAPUÃ	48.94	4.01	0.08	0.88	0.67	0.72	20.06	2.46	0.12	6.16	2.33	0.38
TUNAS	56.01	5.72	0.10	1.26	1.01	0.80	20.08	2.51	0.12	7.11	1.90	
JUQUIÃ	46.28	6.20	0.13	1.21	0.77	0.63	15.04	5.04	0.33	9.66	4.59	0.47
IPANEMA	52.75	6.41	0.12	1.06	0.55	0.52	7.47	4.88	0.65	15.21	5.36	0.35
S. SEBASTIÃO	56.08	6.51	0.11	0.71	0.37	0.51	19.11	2.47	0.12	6.35	3.08	0.48
ITATIAIA	61.08	4.45	0.07	0.71	0.34	0.47	18.37	2.36	0.13	2.98	0.84	0.28
P. DE CALDAS	52.40	4.86	0.09	0.65	0.63	0.96	20.30	2.70	0.13	5.93	2.71	0.45
IPORÃ	43.10	6.47	0.15	2.02	2.03	1.00	7.05	6.75	0.96	10.64	2.84	0.26
BASALTOS + DIABÁSICOS	51.34	5.37	0.10	2.59	1.05	0.40	13.31	1.71	0.12	13.69	4.18	0.30
ALCALINAS (175)	51.65	6.81	0.13	1.32	1.65	1.23	17.02	5.63	0.33	7.52	4.85	0.64
ALCALINAS DISCRIMINADAS PELO COEF. COR.	53.32	6.27	0.17	-	-	-	18.99	3.51	0.18	6.55	3.31	0.50

MACIÇOS	MgO			CaO			Na ₂ O			K ₂ O		
	μ	σ	σ/μ	μ	σ	σ/μ	μ	σ	σ/μ	μ	σ	σ/μ
ITAPIRAPUÃ	0.96	1.10	1.14	5.76	3.97	0.69	8.22	1.46	0.17	6.19	1.74	0.28
TUNAS	1.85	1.67	0.90	4.18	3.48	0.83	5.73	1.36	0.24	3.07	1.70	0.55
JUQUIÃ	6.12	6.35	1.03	8.82	5.16	0.58	5.64	2.23	0.39	4.90	2.81	0.57
IPANEMA	5.40	5.13	0.95	7.08	2.51	0.35	3.41	1.46	0.43	3.98	3.18	0.79
S. SEBASTIÃO	2.39	3.53	1.47	4.01	4.24	1.05	6.06	1.77	0.29	4.94	1.70	0.34
ITATIAIA	0.88	0.52	0.58	1.54	0.43	0.64	6.48	1.31	0.20	6.46	0.61	0.09
P. DE CALDAS	1.22	1.75	1.43	2.46	2.74	1.11	7.29	1.88	0.25	6.99	2.07	0.29
IPORÃ	20.35	15.76	0.74	9.68	7.81	0.80	1.42	1.85	1.30	1.87	2.64	1.41
BASALTOS + DIABÁSICOS	4.70	3.89	0.82	8.01	2.16	0.21	2.69	0.59	0.22	1.67	0.98	0.58
ALCALINAS (175)	3.73	5.33	1.43	5.78	-	-	5.68	2.65	0.46	5.05	2.55	0.50
ALCALINAS DISCRIMINADAS PELO COEF. COR.	1.65	2.11	1.28	3.98	3.63	0.91	6.60	1.90	0.28	5.66	2.20	0.38

anômalos, provavelmente devido ao número insignificante de amostras em alguns grupos. Contudo, as estatísticas amostrais para os grupos plutônicos, intrusivos e extrusivos, separadamente, indicaram padrões similares de distribuição e valores coincidentes entre esses e o conjunto total de rochas.

Em relação aos elementos traços foram determinadas as médias para os vários elementos em ppm, para a Província Alcalina do Brasil Meridional e esses resultados foram comparados com os vários maciços do mundo (Sorensen, 1974a), verificando que se aproximam mais do Maciço de Khibina (Península de Kola), de índice agpático semelhante (Tabela 27).

Os dados de média para os elementos traços foram considerados tanto para o conjunto de rochas alcalinas como para os vários grupos, de acordo com Herz (op. cit.), ou seja: a) rochas alcalinas de idade entre 65-110 M.A., correspondendo ao Maciço de Itapirapuã; b) rochas alcalinas do Cinturão GO-MG, de idade entre 64 - 91 M.A., correspondendo ao Maciço de Poços de Caldas; c) rochas alcalinas do litoral RJ-SP, de idade entre 51-81 M.A.. Apesar do número pequeno de amostras, algumas tendências de concentração podem ser consideradas, sem base probabilística, à semelhança dos elementos maiores.

A concentração de alguns elementos traços têm importância petrogenética considerável, servindo como indicadora geoquímica da origem de determinados tipos petrográficos alcalinos. Desse modo, vale comparar os resultados obtidos com aqueles da literatura para elucidar algumas questões.

Comparando as médias obtidas de alguns elementos traços das rochas alcalinas do Brasil Meridional com aquelas obtidas para outras províncias do mundo, verifica-se que para os elementos Nb, Zr e Be, as médias são próximas daquelas do Maciço de Khibina, menores do que para os Maciços de Ilímaussaq e Lovozero (Kola) e em geral maiores do que os maciços miasquíticos clássicos. Para o caso particular de Poços de Caldas os resultados ob-

TABELA 27 - Média para as concentrações em ppm dos elementos traços para as rochas alcalinas do Brasil Meridional comparada com os Maciços de Khibina, Poços de Caldas, Itapirapuã e Litoral RJ.

(Média)	Rochas Alcalinas	Maciço Khibina	Maciço Poços de Caldas	Maciço Itapirapuã	Litoral Rio de Janeiro
Nb	240	151	261	167	293
Zr	1201	625	1642	435	1094
Y	76	-	93	61	64
Co	4	13	3	5	4
Ni	9	45	4	8	9
Ga	20	33	22	27	12
Be	7	30	6	7	5
V	70	52	56	148	11
Sc	7	-	12	3	7
Cr	57	-	9	10	18
La	258	-	450	167	-
Ba	1210	1190	906	2285	349
Sr	839	1070	1384	674	-

TABELA 28 - Dados da média, desvio padrão, simetria e curtose para as concentrações em ppm de elementos traços em rochas alcalinas do Brasil Meridional.

E S C A L A N O R M A L					E S C A L A L O G A R Í T M I C A				Função
Elemento	Média	σ	Sim.	Curtose	Média	σ	Sim.	Curtose	Distribuição
Nb	240	135	1.328	2.268	5.32	0.61	-0.875	1.755	Ass. neg.
Zr	1201	1084	2.161	6.151	6.69	1.10	-2.559	14.129	Ass. neg.
Y	76	87	5.103	34.408	3.71	1.52	-1.591	1.678	Ass. neg.
Co	4	72	4.178	18.287	0.65	1.12	1.675	1.841	Ass. pos.
Ni	9	37	6.730	47.483	1.09	1.18	1.341	2.574	Ass. pos.
Ga	20	9	0.112	-0.532	2.88	0.58	-1.000	0.325	Normal
Be	7	6	1.072	2.507	1.62	0.99	-0.621	-0.877	Lognor.
V	70	84	1.562	2.288	2.96	2.08	-9.456	-1.355	Ass. neg.
Se	7	13	2.925	11.616	1.09	1.36	0.685	-1.124	Lognor.
Cr	57	383	8.820	76.485	1.99	1.38	1.159	3.818	Ass. pos.
La	258	316	3.642	19.955	3.98	2.68	-0.744	-1.276	Lognor.
Ba	1210	1635	2.522	8.085	6.02	1.78	-0.538	-0.606	Lognor.
Sc	839	877	2.475	7.485	6.19	1.20	-0.858	0.501	Ass. neg.

tidos estão mais próximos dos maciços agpaíticos do mundo, com maiores concentrações dos elementos dos últimos períodos de cristalização magmática. Por outro lado, o Maciço de Itapirapuã é mais rico em elementos dos estágios iniciais de cristalização (Co, Ni, V, Ba).

4.3. OS HISTOGRAMAS E AS CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DOS ELEMENTOS QUÍMICOS

Os histogramas e curvas de frequência acumulada para os vários elementos em forma de óxidos, encontram-se representados nas Figuras 67 a 72.

Os histogramas apresentados mostram a distribuição desses elementos para as rochas alcalinas no seu conjunto, para essas rochas discriminadas pelo coeficiente de correlação e posteriores a G-1 e W-1. Observa-se nesses gráficos a possível presença de populações heterogêneas, como era de esperar-se, devido aos limites da população. Assim para o conjunto das rochas alcalinas do Brasil Meridional tem-se um pico entre 52 - 54% para o SiO_2 , correspondente à população principal e outros secundários entre 42 - 44% e 58 - 60%, embora haja uma tendência geral para o padrão normal. O Al_2O_3 apresenta uma população principal entre 18 - 22% e uma assimetria negativa, enquanto o Na_2O e K_2O apresentam claramente a presença de populações superimpostas e o CaO e Fe_{tot} assimetria positiva. Os histogramas para as amostras discriminadas pelo coeficiente de correlação têm maior poder de resolução, ou seja, elimina mais o efeito das populações secundárias, embora ainda permaneça uma mistura de populações. Esses gráficos mostram portanto nitidamente a presença de uma população principal para os vários óxidos mas o fato de estar superimposta ou truncada em relação às populações secundárias, impede-nos de estabelecer com certeza os seus limites.

As curvas de frequência acumulada para os vários

FIGURA 67 - Histograma dos elementos maiores das rochas alcalinas do Brasil Meridional: 175 amostras (Observa-se a plurimodalidade populacional para a maior parte dos óxidos e uma população principal bem definida).

FIGURA 68 - Histogramas dos elementos maiores das rochas alcalinas posteriores a G-1 e W-1.

FIGURA 69 - Histogramas dos elementos maiores das rochas alcalinas separadas pela Análise de Agrupamento (coeficiente de correlação): 133 amostras (ver Figura 63).

FIGURA 70 - Histogramas dos elementos maiores das rochas alcalinas separadas pela Análise de Agrupamento (coeficiente de distância): 110 amostras (ver Figura 64).

FIGURA 71 - Histogramas dos elementos maiores das rochas basálticas da Bacia do Paraná (228 amostras).

FIGURA 72 - Histogramas dos elementos traços das rochas alcalinas do Brasil Meridional.

óxidos em forma de % encontram-se nas Figuras 73 a 78. Desprezando-se as caudas, como estabelecido por Sinclair (op. cit.), verifica-se: a) o padrão acentuadamente normal para o SiO_2 quer se considere o conjunto de rochas ou aquelas discriminadas pelos coeficientes de correlação e distância. Mesmo assim, observa-se várias inflexões mostrando a possível mistura de populações, provavelmente resultante de uma soma de populações normais; b) um padrão de assimetria negativo para o Al_2O_3 , além de inflexões e provável superposição de população, sendo que um padrão normal para esse óxido é obtido quando se trabalha com as amostras discriminadas pelo coeficiente de correlação; c) padrões normais para o Na_2O e K_2O embora com pontos de inflexão, mostrando a superposição de populações; d) padrões assimétricos positivos para o CaO e Fe_{tot} os quais se caracterizam por padrões lognormais melhor visualizados em escala logarítmica.

Os testes de normalidade foram utilizados para cada elemento em forma de óxido, utilizando-se os dados de simetria e curtose e as "Tabelas de Pearson" para esses valores num intervalo de confiança de 5%. Os resultados obtidos indicam para o conjunto de rochas alcalinas do Brasil Meridional um padrão normal para o SiO_2 , Na_2O e K_2O e lognormal para o Fe_{tot} e MgO , assimétrico negativo para o Al_2O_3 e levemente positivo para o CaO (Tabelas 23 e 24).

Quando se trabalha com as alcalinas discriminadas pelo coeficiente de correlação, observa-se que as dispersões para os vários elementos em forma de óxidos tornam-se muito menores obtidos para Al_2O_3 , Na_2O e CaO , tornando-se aproximadamente iguais em ambos os casos para o Fe_{tot} . O coeficiente de correlação pode portanto servir de critério de seleção ("screen") para discriminar dentro do conjunto total de alcalinas um determinado grupo com intervalo de composição significativo. Considerações maiores serão referidas no capítulo sobre estatística multivariante.

Convém ainda assinalar que nas curvas de distribuição de frequência acumulada para os vários óxidos é também no-

FIGURA 73 - Curvas de frequência acumulada do SiO_2 para os diversos grupos de rochas alcalinas e basálticas.

FIGURA 74 - Curvas de frequência acumulada do Al_2O_3 para os diversos grupos de rochas alcalinas e basálticas.

FIGURA 75 - Curvas de frequência acumuladas do Fe_{tot} para os diversos grupos de rochas alcalinas e basálticas.

FIGURA 76 - Curvas de frequência acumulada do CaO para os diversos grupos de rochas alcalinas e basálticas.

FIGURA 77 - Curvas de frequência acumulada do Na_2O para os diversos grupos de rochas alcalinas e basálticas.

FIGURA 78 - Curvas de frequência acumulada do K_2O para os diversos grupos de rochas alcalinas e basálticas.

tável a presença de populações heterogêneas mas o fato das populações principais estarem superimpostas ou truncadas em relação às populações secundárias, impede-nos de utilizar as técnicas gráficas estabelecidas por Sinclair (op. cit.) e Parslow (op. cit.) que são demais complicadas para esses casos. Foram contudo utilizadas experimentalmente para o Na_2O , obtendo-se uma população principal (56% dos valores), com médias de 6.4% e desvio padrão de 1.2, resultados que podem ser visualizados grosseiramente nos histogramas.

Quando se compara os histogramas e curvas de frequência acumulada para o conjunto de rochas alcalinas do Brasil Meridional e as rochas basálticas da Bacia do Paraná, observa-se algumas diferenças marcantes entre esses dois tipos petrográficos, as quais serão discutidas a seguir. Essa comparação entre os modelos estabelecidos para os basaltos toleíticos e as rochas alcalinas faz-se necessária, numa abordagem bem genérica, em analogia ao estabelecido por Rooke (op. cit.). Considerando cada elemento em forma de Óxido pode-se deduzir (Figuras 73 a 78):

- SiO_2 : Tendência à normalidade para as alcalinas
Assimetria positiva para os basaltos
Média igual para ambos os grupos
Dispersão semelhante para ambos os grupos
(Figura 73).
- Al_2O_3 : Assimetria negativa para as alcalinas
Tendência à normalidade para os basaltos e diabásios
Média para as alcalinas maior do que basaltos e diabásios
Dispersão das alcalinas maior do que rochas basálticas
(Figura 74).
- Fe_{tot} : Padrão lognormal para as alcalinas
Assimetria positiva para as rochas basálticas
Média para os basaltos e diabásios maior do que alcalinas.

Dispersão das alcalinas pouco maior do que basaltos e diabásios (Figura 75).

- CaO: Assimetria levemente positiva para as alcalinas
Assimetria negativa para os basaltos e diabásios
Média para os basaltos e diabásios maior do que as alcalinas
Dispersão para as alcalinas maior do que basaltos e diabásios (Figura 76).
- Na₂O: Padrão normal para as alcalinas
Assimetria levemente negativa para os basaltos e diabásios
Média para as alcalinas maior do que basaltos e diabásios
Dispersão das alcalinas maior do que basaltos e diabásios (Figura 77).
- K₂O: Padrão normal para as alcalinas
Assimetria positiva para os basaltos e diabásios
Média para as alcalinas maior do que basaltos e diabásios
Dispersão para as alcalinas maior do que basaltos e diabásios (Figura 78).

Verifica-se também, numa primeira aproximação, que as populações heterogêneas são frequentes para ambos os grupos de rocha, indicando que, quer se trabalhe com populações conceituais supostamente homogêneas (rochas basálticas), ou com aquelas aparentemente heterogêneas (rochas alcalinas), a presença de populações amostrais heterogêneas pode ocorrer.

Quanto aos elementos traços foram determinados os valores de simetria e curtose para os 83 dados amostrais (Tabela 28), revelando uma tendência normal para o Ga e lognormal para o Be e o Ba e ainda numa escala lognormal, padrões assimétricos negativos para o Nb, Zr, Y, V, La e Sr e assimétricos positivos para Ni, Co, Sc e Ca enquanto o Sr, La e Sc apresentam um padrão quase lognormal de acordo com os testes de normalidade. Vale con

siderar que nas rochas alcalinas o Ga associa-se ao Fe^{+3} e o Be substitui o Si e Al.

4.4. OS HISTOGRAMAS MODAIS

Considerando os minerais essenciais nas rochas alcalinas, como feldspato alcalino e feldspatóide, pode-se tentar estabelecer o número possível de populações petrográficas com base na análise dos histogramas.

Em relação ao Feldspato Alcalino observa-se fundamentalmente 3 populações: a primeira, desprovida praticamente desse mineral (em geral rica em plagioclásio), representando aproximadamente 20 - 30% do conjunto de rochas e constituindo as rochas alcalinas máficas e ultramáficas (Iporá, Santa Fé e Anitápolis). A segunda com Feldspato Alcalino predominante (80 - 90%) representa as alcalinas de Búzios, Ipanema, Itatiaia, Anitápolis, Tunas e a terceira, com Feldspato Alcalino na margem de 40 - 50% (Poços e Itapirapuã). O Maciço de Anitópolis apresenta rochas abrangendo as três sub-populações. Comparando com os gráficos QLM e QAPE fica novamente patente o comportamento de Tunas, diferente de Itapirapuã e Poços de Caldas e o comportamento também diferenciado das rochas máficas-ultramáficas (Figura 79).

Quanto ao histograma quartzo-nefelina modais, observa-se um pico no intervalo de 0 a -10 (0 - 10% de Ne) abrangendo também as rochas saturadas. A superposição de rochas máficas e ultramáficas saturadas com sienitos alcalinos e nefelina sienitos pobres em feldspatóides impede a distinção entre populações utilizando como critérios essas variáveis. Analisando contudo os maciços individualmente observa-se a existência de mais de uma população em vários casos. Por exemplo, em Juquiá há um mínimo para rochas saturadas e outro entre -20 e -30% de nefelina. Em Monte do Trigo há um mínimo entre -40 e -30 e o outro entre 0 e -10%. Em Itatiaia existem dois mínimos, um deles saturado e o outro en-

FIGURA 79 - Histogramas modais para as rochas alcalinas do Brasil Meridional e para os diversos maciços alcalinos, em relação a percentagem de feldspato.

FIGURA 80 - Histogramas Modais para as rochas alcalinas do Brasil Meridional e para os diversos maciços alcalinos em relação à percentagem de quartzo e nefelina (zonas hachuradas correspondem às amostras saturadas).

tre -20 e -30%. A distribuição anômala do histograma nefelina-quartzo mereceria uma análise mais aprofundada (ver Figura 80).

4.5. A INTERAÇÃO DA ESTATÍSTICA UNIVARIANTE COM OS CÁLCULOS PETROLÓGICOS

Burri (1964) refere-se aos histogramas e Curvas de Frequência Acumulada como métodos de Representação Gráfica de uma Única Variável de rochas pertencentes a uma série petrográfica ou província em pesquisa. A Figura 81 ilustra o uso de histograma para discriminar as várias populações de rochas alcalinas do Brasil Meridional em relação ao índice de Niggli, qz, cuja definição aparece no capítulo 2.

Esse gráfico foi utilizado também para comparação desses resultados com aqueles resultantes da distribuição de rochas alcalinas e basálticas do Brasil Meridional. Verifica-se então uma curva unimodal para as rochas basálticas e bimodal para as rochas alcalinas, delimitando portanto 3 populações de rochas ígneas na Província Meridional do Brasil, em relação ao índice qz (ver Figura 90).

Esse exemplo ilustra a interação potencial da Geoestatística Univariante com os Cálculos Petroquímicos Clássicos para elucidação de problemas petrológicos.

Outro exemplo dessa interação é ilustrado por Chayes (1966) para representar as rochas da Província da Europa Central e França, delimitando uma lacuna composicional na margem de ID entre 65 - 70%, no histograma de distribuição de frequência, dando uma interpretação petrológica a esse intervalo composicional. Gráfico semelhante foi traçado para a Província Alcalina do Brasil Meridional tendo-se verificado um mínimo nessa margem de composição, o qual será discutido adequadamente no capítulo 5 (ver Figura 82).

FIGURA 81 - Histograma discriminando as várias populações de rochas alcalinas do Brasil Meridional, em relação ao Índice de Niggli, qz.

FIGURA 82 - Histogramas relacionando número de análises a % SiO₂ e I.D. a) Para a Província de Gardar (Upton, 1974). b) Para as Rochas Alcalinas do Brasil Meridional (Verificar os mínimos entre 50 - 55% e 65 - 72% de SiO₂ e 60 - 65% de I.D.).

CAPÍTULO 5

CONTRIBUIÇÃO À PETROGÊNESE

5.1. A EVOLUÇÃO DO CONCEITO DE PROVÍNCIA PETROGRÁFICA ALCALINA

O termo Província Petrográfica foi usado em sentido restrito por Turner e Vernhoogen (1960) como uma determinada área limitada geograficamente e no tempo e geneticamente relacionada. Esse conceito tem grande expressão na literatura mundial.

Entretanto o conceito de Província Petrográfica é interpretado de modo diferente pelos diversos autores da literatura mundial. Wimmenauer (1974) denomina de Província Alcalina da Europa Central e França às manifestações alcalinas de idades extremamente variadas (Cretáceo Superior a Pleistoceno) e extensão do oeste dos Pireneus até o Maciço Central Francês, SE e W da Alemanha, Boemia e Silésia. Esse autor divide essa província em subprovíncias e distritos. A única feição que parece limitar esse conceito é de natureza geográfica. Upton (1974) considera a Província Alcalina do SW da Groenlândia e autores soviéticos definem a Província de Kola onde se encontram manifestações alcalinas associadas a outras não alcalinas, de idade variando desde pré-cambriana até paleozóica.

Herz (1977) refere-se às ocorrências alcalinas do Brasil Meridional como constituindo uma das mais clássicas províncias petrográficas do mundo. Anteriormente, autores como Leinz (1940), Melcher (1966 a, b), Amaral et al. (1967) consideram o conjunto dessas ocorrências como pertencente a uma mesma província apesar de apresentarem provavelmente diferentes níveis de conduto em exposição, como refere-se especificamente Melcher (op. cit.).

Ulbrich e Gomes (1981) consideram o conceito de província como relacionado a uma área restrita geograficamente on

de as manifestações ígneas apresentam claras relações tanto genéticas como temporais. Esses autores subdividem as ocorrências brasileiras em pelo menos 10 províncias para cuja identificação utilizaram critérios geográficos, associações petrográficas e idades bem definidos.

Loureiro e Valderano (1982) definem a "província petrográfica alcalina" do Brasil englobando nela todas as ocorrências alcalinas brasileiras, desde as antigas da Amazônia até as subrecentes e dividem essa província alcalina em subprovíncias, segundo critérios adicionais baseados essencialmente em idades e localização geográfica.

É também consenso entre os geotectônicos que as rochas alcalinas estão localizadas principalmente em regiões tectonicamente estáveis da crosta (plataforma e escudos), sendo menos importante nos cinturões orogenéticos (Sorensen, 1974a). Em geral o magmatismo alcalino tem longa duração e está diretamente relacionado com feições estruturais maiores, como, grabens regionais, zonas de falhamentos em blocos, monoclinais fechados, etc (Bailey, 1974a). O relacionamento entre a atividade ígnea alcalina na Sibéria e as zonas de falhas abissais foi salientado por Butakova (1974), que considera o magmatismo alcalino nessa região sendo ativado por processos tectônicos e magmáticos intensos, em cinturões orogenéticos vizinhos.

No Brasil, autores diversos mostram as relações entre as grandes unidades estruturais e o posicionamento dos maciços alcalinos do Brasil Meridional. O magmatismo alcalino estaria relacionado aos grandes fenômenos geológicos que iniciaram no jurássico inferior e correlacionáveis com a separação dos continentes. Almeida (1967, 1969) considera que o magmatismo alcalino da região meridional da plataforma Sul-Americana resultou de importante processo diastrófico nela manifestado a partir do jurássico, a Reativação Wealdeniana. Esse fenômeno realizou-se após demorado período de calma tectônica que se apresentou na plataforma a partir do Carbonífero Superior, caracterizando-se pela reati

vação de antigos falhamentos e manifestando-se através de extenso vulcanismo basáltico toleítico com seus "derivados ácidos" que preenchem a Bacia do Paraná. Após tectonismo e relativa quiescência processou-se a primeira fase de vulcanismo alcalino contemporâneo aos basaltos da Bacia do Paraná. Essa Reativação Wealdeniana estaria relacionada com a abertura do Oceano Atlântico sul, segundo consenso da maior parte dos geólogos geotectônicos.

Almeida (1983) considera algumas características gerais da distribuição geográfica das rochas alcalinas, qual seja, estão situadas ao sul do paralelo 15°, espalhando-se em grande área da plataforma Sul-Americana, em três situações geográficas distintas: a) Províncias Marginais à Bacia do Paraná (Província Poços de Caldas, Província Alto Paranaíba, Província Rio Verde-Iporá, Província do Arco de Ponta Grossa); b) Província Marginal à Bacia de Santos (Província Serra do Mar); c) Províncias Alcalinas do Craton Amazônico. Esse autor considera significativa a distribuição geográfica das alcalinas em arranjos lineares mostrando que cada grupo geográfico compreende rochas alcalinas e associações que mantêm entre si relações petrográficas próprias e pertencem a determinado intervalo de idade. Essas rochas na sua maior parte se relacionam a feições tectônicas locais, decorrendo daí o conceito de província alcalina.

Entendemos que o conceito mais amplo de Província Petrográfica é consagrado na literatura mundial, considerando os trabalhos dos diversos autores, tais como, Upton, Wimmenauer, Pavlenko (op. cit.) e outros. Desse modo, a utilização dos termos província e subprovíncia de Loureiro e Valderano (op. cit.) seria mais adequada do que o conceito restrito estabelecido por Ulbrich e Gomes (1981) (sem questionar as características geológicas gerais de cada província, ou subprovíncia, definidas por esses autores). Desse modo, seria mais conveniente considerar a Província Alcalina do Brasil Meridional como limitada pela Reativação Wealdeniana, subdividindo-a em subprovíncias: a) Subprovíncia Marginal à Bacia do Paraná; b) Subprovíncia Marginal à Bacia de Santos e c) Subprovíncia do Craton da Amazônia. Desse modo a sub-

província Serra do Mar seria subdividida em vários distritos (Itatiaia, São Sebastião, Ilha do Monte de Trigo e outros).

A seguir serão descritas as principais características petrográficas dessas (sub)províncias tendo como base principalmente, o recente trabalho de Almeida (1983) e acrescentando convenientemente as presentes informações da autora referentes ao tratamento dos dados numéricos químicos e petrográficos, sintetizado e ilustrado em esquemas gráficos clássicos e estatísticos (Ver Figura 83).

5.2. AS (SUB)PROVÍNCIAS ALCALINAS DO BRASIL MERIDIONAL

5.2.1. PROVÍNCIA DE POÇOS DE CALDAS

O maciço alcalino de Poços de Caldas foi caracterizado tectonicamente como uma província alcalina marginal à Bacia do Paraná (Almeida, 1983). Representa o maior complexo de rochas alcalinas existente na América do Sul. Tem cerca de 800 km² e foi estudado por Ellert (1959). Representa intrusões neocretácicas a eocênicas em sedimentos da borda da Bacia do Paraná.

Determinações K/Ar apresentadas por Amaral et al. (1967) e Bushee (1974) indicaram valores entre 60 e 87 M.A. sendo os mais antigos correspondentes às rochas ankaratríticas.

Petrograficamente apresenta-se constituído de fónólitos, tinguaítos e nefelina sienitos, ocorrendo localmente lujauritos e chibínitos (Ulbrich et al., 1979). Os tinguaítos constituem um dique anelar quase contínuo.

Almeida (1983) considera significativo o fato da província alcalina de Poços de Caldas situar-se na zona de virgacção das estruturas antigas que se dirigem para NW e SW acompanhando os cinturões granulítico e costeiro.

FIGURA 83 - Distribuição das principais Províncias Alcalinas do Brasil Meridional de acordo com Almeida (1983).

As análises modais efetuadas pelos diversos autores (Figura 45) indicam composições fundamentalmente constituídas de feldspato alcalino e feldspatóide (principalmente do tipo nefelina). A quase totalidade das amostras situa-se no lado AF do duplo triângulo de Streckeisen (Sorensen, 1974b). Os histogramas modais indicam uma predominância de rochas com modas entre 40 - 60% de feldspato alcalino e 20 - 30% de nefelina (Figuras 79 e 80).

Do ponto de vista petroquímico caracteriza-se por uma composição normativa predominante de ortoclásio, nefelina e albita, eventualmente anortita e pequena proporção de máficos do tipo olivina (ou hiperstênio). Os minerais opacos e a apatita estão sempre presentes (Tabela 19).

Os índices agpaíticos ($\text{Na} + \text{K}/\text{Al}$) são relativamente altos e da ordem de 0.9 a 1.3 enquanto as relações $\text{Na}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ são baixas, da ordem de 0.5, indicando os baixos teores de K_2O relativos aos álcalis. Os índices de diferenciação (ID) são relativamente altos e superiores a 80, correspondendo aos diferenciados finais de Bowen (1937).

Os principais diagramas de variação indicam uma diferenciação em sílica e álcalis pouco pronunciada, o mesmo sucedendo com a relação R/Si. Apenas algumas amostras constituindo lavas piroxeníticas encontram-se deslocadas em relação ao conjunto de rochas (Figuras 85 e 86). Os gráficos triangulares FMA e NaCaK apresentam também um comportamento que é reflexo da mineralogia, ou seja, pouca diferenciação em relação aos vértices F e M e dispersão acentuada em Na e Ca (ΔNaCaK).

Com referência ao gráfico triangular normativo de Niggli, QLM, verifica-se que a maior parte das amostras encontra-se situada no ΔFRL formando um conjunto também pouco variado mineralogicamente e próximo ao lado FL (paragênese feldspato-feldspatóide). Ainda no triângulo de Bowen QNeKp estas rochas caem fora do vale térmico definido por Bowen, deslocado no sentido Kp.

A análise Fatorial mostra uma correlação positiva entre o SiO_2 , K_2O e Al_2O_3 e forte correlação negativa com o grupo CaO , MgO , Fe_{tot} e TiO_2 . O Na_2O apresenta um comportamento relativamente independente (Figura 57). O gráfico de projeção dos "scores" nos fatores indica novamente uma diferenciação pouco pronunciada.

A composição média do maciço (Tabela 25) mostra valores de SiO_2 da ordem de 52%, Al_2O_3 em torno de 20%, Na_2O e K_2O de 7%, Fe_{tot} de 6% e MgO e CaO , respectivamente, 1 e 2.5%. As composições médias dos fonólitos, tinguaítos e foiaítos são pouco variadas.

Os altos teores de elementos traços, tais como: Zr, Sr, Y, La e outros acompanham os altos índices agpaíticos dominantes nas rochas do maciço, ao mesmo tempo que apresentam um empobrecimento em Ni, Co, Cr, à semelhança de outros maciços agpaíticos do mundo, os quais caracterizam-se pela abundância de minerais acessórios raros, tais como, eudialita, rinkita, elpidita, astrofilita, lamprofilita e outros (Ulbrich et al., 1979), os quais se formam em ambientes peralcalinos ricos em elementos raros. Em magmas deste tipo o Al é principalmente absorvido na formação de feldspatos e feldspatóides e o excesso de álcalis libera-se para formar tanto os máficos alcalinos como os silicatos mencionados.

A não existência de carbonatitos corrobora a incompatibilidade entre agpaítos e aqueles, de acordo com Heinrich (1966), sendo estes enriquecidos em Cl, F e S mas pobres em CO_2 .

5.2.2. PROVÍNCIA RIO VERDE-IPORÁ

De acordo com Guimarães et al. (1968) as rochas alcalinas dessas províncias estão incluídas coletivamente como Grupo Iporá, abrangendo uma faixa com cerca de 70 km de largura e 250 km de extensão entre a região de Rio Verde e o Rio Araguaia. A orientação segundo N30 W é também a direção média dos grandes

falhamentos que deram acesso ao magma alcalino.

A província situa-se à borda NNE da Bacia do Paraná e possui mais de duas dezenas de complexos alcalinos, numerosos diques e produtos vulcânicos locais.

As intrusões alcalinas de Iporá estão relacionadas a uma tectônica de "rifts", datada do Cretáceo Superior (Danni, 1974) e estão constituídas principalmente por dunitos, peridotitos, diversos piroxenitos, essexitos, teralitos, gabros, álcali-gabros, tinguaítos, nefelina sienitos, nordmarkitos e produtos de fenitização. Existem referências também a diques de carbonatito, alaskito e lamprófiro na província.

Ulbrich e Gomes (1981) enquandram essas ocorrências alcalinas no grupo de província do tipo máfica - ultramáfica (sem carbonatito) de Goiás, com idade aproximada de 84 M.A.

As análises modais efetuadas por Danni (1974) indicam uma composição bem variada para esse grupo de rocha, distribuídas nos lados AF e PF do duplo triângulo de Streckeisen correspondendo aos sienitos alcalinos (foiaitos), teralitos e gabros alcalinos, algumas abrangidas nos campos dos plagioclásios e essexitos. Danni (op. cit.) traçou uma linha de evolução dos gabros alcalinos aos foiaitos (Figura 87).

Esse comportamento de composição variada manifesta-se também através das análises normativas (Tabela 19) as quais indicam uma predominância de ortoclásio, nefelina e diopsídio para os membros mais félsicos (anortita sempre presente) e membros constituídos de olivina e diopsídio como componentes principais representando as rochas de natureza ultramáfica.

Os índices de Diferenciação são sempre menores do que 80, mesmo entre os diferenciados alcalinos e as razões $\text{Na}_2\text{O} / (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ variam entre 0.4 e 0.5. Os índices agpaíticos são sempre menores do que a unidade reforçando a natureza miasquítica da série alcalina.

Os diagramas sílica/álcalis e R/Si mostram também a ampla margem de composição da província com algumas amostras de rochas ultramáficas situadas além do traço do plano crítico de saturação, no campo de basaltos (Figuras 85 e 86). Em relação ao triângulo QLM de Niggli-Burri este apresenta uma forte dispersão das amostras situadas nos Δ PRM e FRL respectivamente, abrangendo os membros máfico-ultramáfico e diferenciados nefelínicos (Figura 87).

Danni (1974) calculou a composição média das rochas, considerando as espessuras das diversas unidades chegando a um resultado próximo à composição do pirolito (Green e Ringwood, 1967). Cálculos da composição média não ponderal (Tabela 25) mostram valores da ordem de 43% de SiO_2 , 7% de Al_2O_3 , 20% de MgO , 10% de Fe_{tot} , CaO , 1 a 2% de Na_2O e K_2O . Esses valores são um pouco exagerados porque o peso das rochas menos máficas é proporcionalmente grande.

A Análise Fatorial indica um comportamento das variáveis bem coerente, com correlação positiva entre SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O e K_2O e excepcionalmente fraca correlação entre Fe_{tot} , CaO e MgO à diferença de outros maciços e do conjunto de rochas alcalinas, provavelmente devido à interferência dos membros ultramáficos não alcalinos considerados na Análise Fatorial. O gráfico da projeção das amostras nos fatores indica uma delimitação de vários campos composicionais abrangendo os sienitos, dunitos, piroxenitos, gabros, sienogabros e werhlito mas sem nenhuma expressão genética.

Danni (op. cit.) explica o processo de formação dos diferenciados alcalinos através da cristalização fracionada e descreve amostras de "cumulatus" onde é evidente a ordem de cristalização: olivina, piroxênio, plagioclásio expressa na sucessão dunito - werhlito - piroxenito e gabro. Essas idéias estão de acordo com os conhecimentos atuais de que as rochas ultrabásicas alcalinas não podem ser derivadas de magmas do tipo basáltico alcalino por nenhum processo de diferenciação. Os magmas parentais

destas séries de rocha devem ser de caráter ultramáfico, ricos em álcalis e voláteis (magmas do tipo nefelinito, olivina nefelinito e olivina-melilita nefelinito). A atuação dos elementos móveis e voláteis (principalmente H_2O e CO_2) controlaria o tipo e a evolução desses magmas. Nesse argumento é de considerável importância a associação dos maciços ultramáficos e carbonatitos.

5.2.3. PROVÍNCIA DO ARCO DE PONTA GROSSA

O Arco de Ponta Grossa é uma grande estrutura soerguida, com eixo dirigido a NW que adentra a Bacia do Paraná entre os Estados de São Paulo e Santa Catarina (Almeida, 1983). De um modo geral essas estruturas orientam-se em direções aproximadamente NE, sendo portanto transversais ao eixo do arco e às grandes fraturas e falhas normais mesozóicas.

A integração dos dados aeromagnetométricos e geológicos resultou em proposta de configuração do Arco de Ponta Grossa (Ferreira, 1982) e na definição de seus limites (Figura 83), com os Alinhamentos de Guapiara, S. Jerônimo, Curuva e do Rio Alonzo (limite setentrional) e Alinhamento do Rio Piqueri (limite meridional). Esses alinhamentos constituem feições tectônicas com aproximadamente 600 km de extensão e largura entre 20 e 100 km e refletem ou limitam áreas com grande densidade de diques e soleiras de diabásio sendo consideradas como feições profundas que atingiram o manto superior e por isso constituem as principais fontes de extravasamento de lavas básicas e condicionantes de rochas alcalinas. O magmatismo basáltico iniciou-se em fins do jurássico mas teve o seu clímax entre 120 - 130 M.A. (Amaral et al., 1966). Quanto às rochas alcalinas são conhecidas cerca de 15 intrusões simples no Arco de Ponta Grossa. Constituem corpos de disposição concêntrica, sendo o Maciço de Jacupiranga, um dos maiores, com cerca de 65 km² de área.

As intrusões alcalinas do sul de São Paulo e Paraná (Tunas, Itapirapuã, Mato Preto, Banhadão) alinham-se segundo NW, paralelamente ao eixo do arco e ao alinhamento de Guapiara.

Pertencem também a esse alinhamento as intrusões de Jacupiranga e Juquiá (Algarte, 1972).

As idades dos maciços alcalinos do Arco de Ponta Grossa foram determinadas sendo contudo ainda insuficientes, com exceção de Jacupiranga. Sabe-se contudo que se posicionaram no Cretáceo Inferior (idade maior do que 100 M.A.), sendo portanto contemporânea ao magmatismo basáltico (Amaral et al., 1967).

Petrograficamente a composição desses maciços é muito variada predominando rochas alcalinas gabróides e ultramáficas, como piroxenitos, jacupiranguitos, peridotitos, essexitos, ijolitos, nefelinitos, malignitos, teralitos, etc. Carbonatitos ocorrem em algumas intrusões (Jacupiranga, Juquiá). Há intrusões em que predominam rochas félsicas (Tunas, Cananéia e outras).

As análises modais das rochas dessa província acusaram pelo menos três tendências de composição: a) representada por rochas alcalinas do Maciço de Tunas, situadas principalmente no lado AP do duplo triângulo de Streckeisen; b) uma outra tendência representada pelas rochas do Maciço de Itapirapuã, constituída de feldspatóides e feldspatos alcalinos (lado AF do Duplo Triângulo de Streckeisen); c) uma terceira tendência representada pelos Maciços de Anitápolis, Jacupiranga e Juquiá, abrangendo rochas tanto no lado AF como AP e ainda os foiditos (Figuras 84 e 87).

As análises normativas mostram também resultados bem elucidativos com características distintas para Itapirapuã e Tunas. As rochas do Maciço de Itapirapuã são constituídas principalmente de ortoclásio, albita, nefelina, diopsídio e opacos (eventualmente leucita, anortita, hiperstênio e/ou olivina). Enquanto as rochas do Maciço de Tunas são constituídas de ortoclásio, albita, anortita e eventualmente nefelina, diopsídio e hiperstênio. A presença de anortita em lugar do diopsídio indica uma proporção de alumínio suficiente para formar esse primeiro mineral. Com relação ao Maciço de Juquiá verifica-se um comportamento diferente

FIGURA 84 - Diagramas QAPF, QML e QNeKp para as rochas alcalinas dos Maciços de Tunas (cruzes) e Itapirapuã (pontos) mostrando os diferentes campos composicionais.

para os corpos máficos-ultramáficos, constituídos principalmente de nefelina, leucita, diopsídio (eventualmente hiperstênio e opacos) e as rochas leucocráticas, constituídas de ortoclásio, albита, nefelina, anortita e diopsídio, mostrando o excesso em cálcio e a formação tanto do diopsídio como da anortita (Tabela 19).

Os índices Agpaíticos do Maciço de Itapirapuã e Juquiá são maiores do que o de Tunas e as razões $\text{Na}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ são menores para estes mostrando baixas proporções em K_2O em rochas alcalinas do Maciço de Tunas.

O comportamento químico diferencial dos Maciços de Tunas e Itapirapuã manifesta-se também em quase todos os gráficos derivados de análises químicas e normativas. As razões $\text{SiO}_2/\text{Álcalis} + \text{K} + \text{Na}/\text{K} + \text{Na} + \text{Ca}$ mostram diferenças marcantes entre os dois maciços. Com relação a Juquiá, novamente esse maciço apresenta-se com características mais próximas do Maciço de Itapirapuã para os diferenciados sálicos (Figuras 85 e 86).

As composições químicas médias dos três maciços (Itapirapuã, Tunas e Juquiá) são bem diferentes (Tabela 25), sendo que o Maciço de Tunas apresenta os maiores teores em SiO_2 , Fe_{tot} e MgO e menores de álcalis e CaO . O Maciço de Juquiá tem caráter acentuadamente mais cálcico e ferro-magnésiano.

A Análise Fatorial indica também diferenças marcantes entre os dois maciços principais. No caso de Itapirapuã o componente Al_2O_3 apresenta correlações positivas com SiO_2 e K_2O enquanto em Tunas o mesmo componente (Al_2O_3) apresenta altas correlações positivas com CaO , MgO e Fe_{tot} . Outro comportamento anômalo apresentado refere-se a não correlação do Na_2O com outros óxidos, apresentando-se como variável independente para o Maciço de Itapirapuã.

Ainda considerando os gráficos triangulares normativos QLM e Q Ne Kp (Figuras 84, 87 e 88), verifica-se os diferentes campos composicionais para os três maciços principais. Inte-

FIGURA 85 - Diagrama Alkali/Silica mostrando os campos composicionais dos Maciços Alcalinos de Tunas e Itapirapuã (Província Arco de Ponta Grossa), Poços de Caldas, São Sebastião e Itatiaia (Província Serra do Mar), Província de Iporá (cruzes) e das rochas basálticas da Bacia do Paraná.

FIGURA 86 - Diagrama R/Si para as rochas alcalinas do Brasil Meridional e os campos composicionais dos diversos maciços (A = média para os basaltos).

ressante seria investigar a razão geológica condicionante dessa diferenciação geoquímica ou se estas representam apenas os diferentes níveis de erosão em exposição.

5.2.4. PROVÍNCIA DE IPANEMA

A província alcalina de Ipanema caracterizada como independente recentemente por Almeida (1983) situa-se numa área de ocorrência sedimentar, a oeste de Sorocaba (SP).

O maciço de Ipanema constitui um corpo isolado das alcalinas do Arco de Ponta Grossa e da Serra do Mar. Aflora em área de 8 km², num soerguimento tectônico. Estudos geofísicos indicam a extensão da intrusão por dezenas de quilômetros e um grande volume em profundidade (Davino, 1976).

Leinz (1940) descreve a petrografia da província caracterizando as rochas alcalinas como ortoclásio egrinito, ortoclásio lusitanito, umptekito, nordmarkito e shonkinito.

A idade dessa província é em média de 123 M.A. (Amorim et al., 1967).

De acordo com Almeida (1983) a intrusão alcalina de Ipanema foi controlada pela reativação cretácica de falhas à borda da Bacia do Paraná. Fraturas NW podem ter contribuído para o posicionamento desses corpos.

O número incipiente de amostras descrito por Leinz (1940) não permite caracterizar petrograficamente a província mas apenas fazer algumas considerações:

- No duplo triângulo QAPF as amostras de rochas de Ipanema situam-se principalmente no vértice A (sem fósides ou plagioclásio). A única amostra de nordmarkito situa-se no lado AQ.

- No triângulo FMA as amostras situam-se no lado AM (sem fôides). Os nordmarquitos estão próximos ao vértice A e o umptekito, egirinito e shonkinito pórfiro dispõem-se no lado AM deste triângulo.

- Do ponto de vista químico constitui uma ocorrência peralcalina e metaluminosa, com altos índices agpaíticos (luisitanito, egirinito, etc), com exceção de shonkinito.

- As análises normativas revelaram normas com pouco ou nenhum quartzo e constituídas fundamentalmente de: ortoclásio, albita, nefelina, pouco anortita, diopsídio ou hiperstênio, acmita, ± olivina. Portanto com uma composição muito variada e um caráter alcalino acentuado (Tabela 19).

5.2.5. PROVÍNCIA SERRA DO MAR

A província Serra do Mar, caracterizada por Almeida (1983) desenvolveu-se numa área que sofreu um soerguimento crustal entre o jurássico superior e o cretáceo inferior.

O magmatismo alcalino da sub-província manifestou-se através de cerca de trinta intrusões isoladas principais entre as quais se destacam as do Itatiaia, Passa Quatro, as três de São Sebastião, Tinguá, Gericinó-Mendanha, Rio Bonito, Itauna, Sobrinho, Tanguá e Morro de São João. Além delas ocorrem numerosos diques associados ou não às intrusões maiores e pequenos corpos isolados.

As datações geocronológicas indicam que as alcalinas da província são da segunda fase do magmatismo, com idades entre o Senoniano Inferior e o Eoceno (Amaral et al., 1967).

A relação das intrusões alcalinas com direções predominantemente NE-ENE das estruturas antigas do embasamento é indubitável, de acordo com Almeida (op. cit.). Diante desse fato esse autor considera que "o magmatismo alcalino neocretáceo-eo

cênico processou-se obedecendo às direções de antiga fraqueza crustal, em falhas profundas reativadas e outras então surgidas nessas mesmas direções". Esse magmatismo precedeu ao desenvolvimento do sistema de "rifts valleys" terciários da região. Almeida (op. cit.) chama a atenção dos seguintes fatos: 1) todas as alcalinas neocretácicas-eocénicas da região costeira e ilhas entre o Paraná, São Paulo (Arco de Ponta Grossa) e o Rio de Janeiro situam-se dentro de uma faixa que raramente atinge 150 km, continente adentro; 2) as intrusões estão dispostas numa área crustal que entre o final do Cretáceo Inferior e o Quaternário foram sujeitas a movimentos verticais opostos de blocos na crosta atlântica do continente. Estes dois fatos seriam muito sugestivos para que se considere a possibilidade de uma relação genética entre o soerguimento da área elevada e a geração do magma alcalino, de acordo com o modelo proposto por Martin (1968) para explicar a localização das alcalinas em relação à borda da Bacia do Paraná e da zona subsidente da faixa costeira.

Outro fato que deve ser considerado ainda segundo Almeida (op. cit.) é a existência dos enxames de diques subparalelos de diabásio e outros de composição toleítica na área da província, particularmente frequentes e extensos na região costeira, no vale do Paraíba do Sul, Serra do Mar e Depressão da Guanabara. Aparentemente preenchem fraturas e falhas pré-devonianas reativadas por esforços transversalmente à costa e de idade eocretácica pré-aptina (Amaral et al., 1967). "Seria importante salientar as semelhanças entre esse magmatismo basáltico no Arco de Ponta Grossa e Serra da Mantiqueira levando a conclusão de que a evolução das duas estruturas foi paralela" (Almeida, 1983).

Petrograficamente as rochas alcalinas da província são sobretudo de caráter félsico, embora rochas máficas ocorram localmente em diques e outros corpos de pequena expressão. Os tipos petrográficos mais comuns são nefelina sienitos, nordmarkitos, pulaskitos, umptekitos, quartzo sienitos, foiaitos, álcali sienitos, traquitos, shonkinitos, fonólitos, tinguaítos e localmente granitos alcalinos (Itatiaia), monzonitos (Soarinho), malig

nitos (Morro de São João), litchfielditos (Canaã) e solvsbergitos (Marapicu). Rochas máficas ocorrem localmente sob a forma de corpos não tabulares, como os essexitos e teralitos da Ilha de São Sebastião (Freitas, 1974b) e excepcionalmente ocorrem rochas ultramáficas do maciço de Ponte Nova (Cavalcante et al., 1979) e desconhecem-se carbonatitos.

As análises modais da província (Figuras 46 e 47) referem-se a Itatiaia, Ilha de Búzios, Monte do Trigo e algumas avaliadas de São Sebastião. Verifica-se três campos composicionais principais: a) lado QA do duplo triângulo modal representado pelas alcalinas da Ilha de Búzios e alguns quartzo sienitos e granitos do Itatiaia; b) lado AF representado pelos nefelina sienitos do Itatiaia, São Sebastião e Monte do Trigo; c) lado AP e AP representado pelas alcalinas saturadas e insaturadas de São Sebastião e Monte do Trigo.

Com referência às relações $\text{SiO}_2/\text{Álcalis}$ verifica-se para o Maciço de São Sebastião um campo composicional com uma pequena área em comum com Tunas e a maioria constituindo um conjunto independente, entre as áreas abrangidas pelos maciços de Tunas e Itapirapuã, com exceção de algumas amostras máficas (gabros, teralitos e essexitos: Figura 85).

O gráfico R/Si mostra também um campo composicional independente entre os conjuntos de Tunas e Itapirapuã, com exceção também de algumas amostras máficas de São Sebastião (Figura 86).

No triângulo Q Ne Kp de Bowen (1937) as amostras caem no vale térmico definido pelo autor, à semelhança de Tunas e diferentemente de Itapirapuã e Poços de Caldas (Figura 88).

Análises normativas das rochas de São Sebastião indicam composições predominantes de ortoclásio, albita e pouca anortita, nefelina, raras amostras com quartzo, olivina, diopsídio ou hiperstênio. Índices de Diferenciação (ID) variados mas

predominando entre 80 - 90 (com exceção de poucas amostras máficas). Os Índices Agpaíticos raramente são maiores do que 1.0 e geralmente em torno de 0.8 a 1.0 e razões $\text{Na}_2\text{O}/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ em torno de 0.5 a 0.6 indicando altos teores de K em relação a Na, à semelhança do Maciço de Tunas (Tabela 19).

As médias de composição química para o Maciço de São Sebastião revelaram teores relativamente elevados para SiO_2 (56%), Al_2O_3 (19%), Na_2O (6%) e K_2O (5%) e baixos para MgO (2.3%), CaO (4%) e Fe_{tot} (6%) e teores ainda mais elevados para os óxidos SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O e K_2O para o Maciço de Itatiaia.

A Análise Fatorial para o Maciço de São Sebastião indicou uma alta correlação positiva entre SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O e K_2O e uma forte correlação negativa com o grupo CaO , Fe_{tot} , MgO , comportamento semelhante ao do conjunto das rochas alcalinas do Brasil Meridional.

O gráfico das projeções das amostras em relação aos fatores mostra uma diferenciação pouco pronunciada à semelhança de outros gráficos da petrologia clássica.

5.3. ORIGEM DAS ASSOCIAÇÕES PETROGRÁFICAS

Qualquer teoria petrogenética tem que levar em consideração os diferentes mecanismos de formação das rochas alcalinas.

Há geralmente um consenso de que estas rochas não podem ser produto da diferenciação de um único magma parental desde que ocorrem em muitas associações (Harris e Bailey, 1974; MacDonald, 1974, Carmichael et al., 1974).

Turner e Verhoogen (1960) referem-se a uma tendência das rochas das províncias petrográficas de coincidirem com al

um tipo padrão de associação. Estas associações características de rocha encontram-se em localidades muito dispersas e repetem-se de acordo com os mesmos princípios genéticos.

Scheynman et al. (1961) distinguem três tipos de associações genéticas: 1) Associação alcalina ultrabásica constituída de rochas ultramáficas ricas em olivina e/ou piroxênio. As fases posteriores consistem de ijolito-melteigito, sienito e nefelina sienito, rochas com melilita e carbonatito. 2) Associação gabróide alcalina constituída de gabro alcalino associado com sienito, nefelina sienito e ocasionalmente granito alcalino. Ijolito-urtito também ocorre e as rochas félsicas parecem ser derivadas de magmas basáltico alcalino. 3) Associação granitóide alcalina constituída principalmente de granitos alcalinos associados com sienitos alcalinos e nefelina sienitos.

Essas três associações parecem ser produto de três tipos principais de magmas parentais: ultramáfico-nefelínico, basalto alcalino e granítico. Sorensen (1974b) comenta que um certo número de ocorrência não pode ser classificada nesses grupos, abrindo espaço para uma nova proposição mais abrangente.

Ulbrich e Gomes (1981) propõem oito tipos de associações petrográficas: I) Associação sienítica saturada a insaturada. II) Associação sienítica peralcalina. III) Associação máfica-ultramáfica associada a rochas mais félsicas e espécimes peralcalinas insaturadas, sub-dividida em várias linhagens com e sem carbonatitos. IV) Associação máfica-ultramáfica com gabro alcalino. V) Associação basalto alcalino-traquito-fonólito. VI) Associação granito-sienito alcalino. VII) Associação vulcânica muito insaturada e peralcalina. VIII) Associação persódica. Estas duas últimas associações não têm significado entre as ocorrências descritas do Brasil Meridional.

É também aceito entre os petrólogos que os magmas alcalinos formam-se nas partes profundas da crosta ou superiores do manto terrestre (por fusão parcial do material do manto) ou são

derivados desses magmas parentais por algum processo de fracionamento. Nesse sentido, muitos autores consideram um magma basáltico parental. Magmas peridotítico ou kimberlíticos são considerados como primários em algumas províncias alcalinas e granitos alcalinos podem desenvolver-se como produto residual do magma sienítico saturado, embora grandes volumes de granitos alcalinos são provavelmente de origem anatética (Borodin, 1974). Quanto às teorias que explicam a origem e evolução das rochas alcalinas por simples assimilação de rochas encaixantes (rochas carbonáticas, argilitos, sedimentos salinos e outros), são de importância subordinada, estando limitadas a exemplos particulares já que em geral rochas alcalinas praticamente idênticas invadem rochas de estrutura e composição química muito variáveis. Isso indica que o caráter alcalino do magma foi adquirido antes de sua colocação. O papel dos voláteis e mineralizadores tem sido também repetidamente responsável pelo desenvolvimento de tendências alcalinas em magmas subalcalinos.

É importante reforçar e analisar o Papel da Cristalização Fracionada na Formação de Rochas Alcalinas já que este processo é admitido como o principal na gênese destas rochas. Quanto ao Magma Parental Básico, autores como Kuno (1968) e Coombs e Wilkinson (1969) forneceram uma síntese das principais tendências de cristalização fracionada deste mostrando que há um contínuo espectro de linhagens de líquidos fêmicos e sálicos, dependendo da composição do magma parental.

Wimmenauer (1974) comenta que rochas básicas alcalinas, particularmente olivina basaltos foram a fonte das rochas magmáticas da Província da França e Europa Central. De acordo com este autor a "plotação" das análises de basaltos dos mais importantes distritos no diagrama AlK_2/SiO_2 mostram claramente a filiação das rochas a partir dos basaltos alcalinos. A maioria apresenta predominância de nefelina normativa. Desse modo os olivina toleitos de Vogelsberg seriam o resultado da cristalização fracionada ou fusão a diferentes níveis de profundidade e, com o decréscimo desta, a composição dos magmas passaria gradativamente pa

ra olivina basalto alcalino e finalmente para basalto toleítico". A cristalização diferencial e a assimilação de rochas siálicas contribuiria para a evolução dos magmas parental. Na Península de Gardar o magma primário extravasou produzindo basaltos alcalinos e os vários graus de fracionamento de clinopiroxênios atesta essa diferenciação. Na Península de Kola, Kukhareenko et al. 1969 (in Gerasimovsky, 1974), demonstra que as composições dos magmas primários das associações alcalinas são análogas aos dos olivina basalto alcalinos ou melilita basalto. A alcalinidade pronunciada do magma basáltico primário reflete, de acordo com dados experimentais, características abissais (Green e Ringwood, 1967).

Na Província Alcalina do Brasil Meridional não existem basaltos tipicamente alcalinos mas apenas enormes massas de basaltos toleíticos, eventualmente com olivina e desprovidos de nefelina na norma CIPW, embora sejam tectonicamente correlacionáveis ao magmatismo alcalino (Herz, 1977; Almeida, 1983) e contemporâneos à 1ª fase deste magmatismo. Diagramas AlK_2O/SiO_2 e QLM mostram contudo a não existência de uma lacuna composicional rígida entre os dois grupos de rocha (Figuras 85 a 87). Vale mencionar os estudos experimentais de Yoder e Tilley (1962) no sistema $Fe-Di-Ne-SiO_2$, os quais determinando uma barreira térmica na passagem de líquidos de composição toleítica e alcalina sob condições de cristalização fracionada crustal. Green (1969) mostrou contudo as relações possíveis entre fusões parciais de pirolito sob condições seca e úmida, com produção de certos tipos de magmas mostrando os campos de estabilidade dos álcali-olivina basaltos, olivinas basaltos e olivina toleíticos.

É necessário portanto que se estabeleça relações petrogenéticas mais claras entre esse fluxo de basalto toleítico e o magmatismo alcalino do Brasil Meridional. Nesse sentido é importante considerar as informações de Carmichael et al. (1974) que consideram que seria necessário grandes volumes de magmas básicos alcalinos para produzir diferenciados sieníticos com feldspatoides. Deve-se ainda considerar que os basaltos toleíticos são as únicas rochas plagioclásicas regionais de expressão, os quais po

FIGURA 87 - Diagramas QAPF e QLM mostrando os vários campos composicionais dos maciços alcalinos de Tunas, Itapirapuã, Poços de Caldas, São Sebastião e rochas basálticas do Brasil Meridional.

deriam derivar dos olivina basaltos. Nesse sentido, é conveniente utilizar as hipóteses de Harris (1957) que sugeriu a possibilidade de formarem-se basaltos sódicos subsaturados através da cristalização fracionada do magma toleítico primário modificado por reações com olivina e outros minerais do manto (ver Almeida, 1961). Outro dado pertinente ao magma basáltico alcalino parental refere-se a existência de rochas básicas alcalinas de composição equivalente a estas em alguns maciços, tais como, Itapirapuã, Tunas, São Sebastião, Iporá e outros. Gomes e Dutra (1970) mostram que os processos de cristalização fracionada parecem ser de importância principal na formação dessas rochas e Danni (1974) interpreta um magma original de composição ultrabásica à semelhança de Scheynmann (1961).

Outro aspecto importante relacionado com a cristalização fracionada refere-se à Lacuna Composicional mencionada por Chayes (1963), existente na Província Continental de Gardar, no intervalo de composição de $53 < \text{SiO}_2 < 57$ e $\text{ID} = 66 - 68$ ("Daly Gap"), atribuída como de importância petrogenética desde que se considere a cristalização fracionada de basalto - traquito. Esse significado tem sido refutado (La Maitre, 1968), mostrando que essa lacuna era devido a discriminações nos processos eruptivos e não à escassez de magmas intermediários.

Com relação à Província Magmática do Brasil Meridional verifica-se duas populações principais de ID, com modas respectivamente de 85 - 90 e 25 - 35 e uma escassez de composição na margem de 50 - 55 e 60 - 65% (magmas intermediários). Quanto à lacuna composicional de SiO_2 entre 50 - 55 existe um mínimo aparente de pouca expressão, sem provável grande significado e valores de frequência menores para SiO_2 entre 65 - 70% correspondendo a rochas alcalinas saturadas a supersaturadas (Figura 88).

Quanto ao Fracionamento de Magmas Sálidos convém considerar que a maioria dos autores (Carmichael et al., 1974 e Wilkinson, 1974) concordam que o volume consideravelmente menor de rochas félsicas associadas a basaltos alcalinos representa dis

FIGURA 88 - Histograma de I.D. para as rochas alcalinas (zonas hachuradas) e basálticas do Brasil Meridional mostrando a lacuna composicional no intervalo de 60 - 65%.

tintos estágios de diferenciação de magmas basálticos alcalinos e argumentos importantes são oferecidos pelos diagramas de variação

Bowen (1937) mostrou que quando a composição sálica (normativa) de certas lavas alcalinas do Este da África, projetadas no sistema Quartzo-Nefelina-Kaliófilita são restritas ao vale térmico da superfície "líquidus" e interpreta esse fato como uma evidência de que o equilíbrio cristal-líquidos residuais do fracionamento do magma básico foi atingido.

As feições mais importantes do sistema anidro Ne-Ls-Q de Bowen seriam de que os magmas fortemente insaturados não podem produzir diferenciados que contenham sílica livre e vice-versa, por um processo normal de diferenciação, devido à barreira térmica existente, separando os campos dos feldspatóides e quartzo. No caso de líquidos de composição não extremas pode-se contudo produzir transições entre composições saturadas e insaturadas, as quais se explicam por processos de fracionamento de cristais, principalmente feldspatos. O efeito de P_{H_2O} no sistema consiste em reduzir o campo da leucita e abaixar as temperaturas mínimas (Edgar, 1974) e os componentes voláteis reduzem o campo da leucita e deslocam as linhas cotéticas para composições mais alcalinas. Estando o campo da leucita tanto na parte supersaturada do sistema quanto na insaturada possibilita a coexistência das duas fases divergentes. Outra conclusão importante a respeito do fracionamento desses líquidos deve-se a Mac Donald (1974), o qual mostra que a composição do feldspato alcalino controla o caminho do fracionamento dos magmas. Assim, pequenos desvios estequiométricos podem influir na evolução dos magmas. Na região de Gardar, sienitos com pequenas quantidades de ne normativa produzem uma tendência supersaturada e outra insaturada.

Na Província Alcalina do Brasil Meridional, observa-se duas tendências dos diferenciados sálicos. A primeira representada pelas rochas alcalinas do Maciço de Tunas e Província Serra do Mar (Itatiaia e São Sebastião), constitui um campo coincidente com a área determinada experimentalmente por Bowen (op.

cit.). A outra tendência é representada pelos Maciços de Itapirapuã, Poços de Caldas e Iporã e constitui um campo deslocado em direção à kaliofilita (Figura 89). De acordo com Wyllie (1963), um aumento na quantidade dos componentes voláteis no magma pode resultar no aumento da acidez da fusão. "A cristalização fracionada sob condições de altos potenciais químicos de componentes ácidos voláteis pode conduzir a geração de magma alcalino residual devido a expansão dos campos de cristalização das fases cristalinhas mais ácidas."

Outra consequência direta deste diagrama refere-se aos diferenciados ácidos do Maciço de Itatiaia onde ocorrem sienitos supersaturados coexistindo com sienitos insaturados. À semelhança da região de Gardar, a passagem de um líquido supersaturado a saturado é difícil de explicar pelos conceitos físico-químicos teóricos, como visto acima.

Ainda em relação aos líquidos siálicos vários autores (ver Almeida, 1961) admitem a possibilidade de existirem magmas fêmicos alcalinos de caráter primário originados por fusão direta de componentes do manto e em situações tais que teriam acesso às geóclases. Não seriam tais magmas derivados dos olivina basaltos ou toleitos mas proviriam de processos diferenciais havidos no manto, nas zonas de grandes falhamentos. A composição e a espessura da crosta influiria na natureza e diferenciação de tais magmas que tenderiam a enriquecer-se em potássio ao atravessarem as massas continentais mas conservariam sua natureza sódica subsaturada original. Nesse sentido é interessante verificar as diferentes razões $\text{Na}_2\text{O}/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$, como sugerido por Herz (1977), obtidas em Tunas, Itapirapuã e em outros maciços da Província Serra do Mar (Tabela 19). É interessante considerar as duas populações de rochas alcalinas também obtidas quando se trabalha com o índice qz de Niggli: a primeira com um máximo correspondente a -90 e a outra a -60. Se comparadas com as rochas basálticas, com um máximo a -10, verifica-se a delimitação de três populações magmáticas no Brasil Meridional (Figura 90).

FIGURA 89 - Diagrama QNeKp mostrando os vários campos composicionais dos diferenciados alcalinos dos Maciços de Tunas, Itapirapuã, Poços de Caldas e São Sebastião, em relação ao vale térmico de Bowen (1937).

FIGURA 90 - Comparação entre os resultados gráficos de distribuição de qz para as rochas jovens do Atlântico e Pacífico e as rochas alcalinas e basálticas do Brasil Meridional (Observa-se a delimitação de 3 populações de rochas magmáticas).

Sorensen (1974b) chama a atenção do fato dos sienitos alcalinos e feldspatoídicos e seus equivalentes vulcânicos serem membros de um grande número de associações petrológicas parecendo ser produto de uma variedade de processos. O fato do basalto alcalino e traquito-fonólito alternarem-se em algumas províncias vulcânicas leva a conclusão de que esses magmas podem ser erupções intermitentes de diferentes níveis de câmaras magmáticas interestratificadas (ou são de origem independente por anatexia do manto ou da crosta terrestre profunda).

Para os maciços alcalinos félsicos, geralmente do tipo miasquítico da Serra do Mar, a explicação mais plausível seria de que estes magmas geradores representam diferentes níveis de câmaras magmáticas relacionadas com o magmatismo alcalino que afetou a Plataforma Brasileira (Reativação Wealdeniana), a partir do jurássico. A formação destas rochas a partir de fusões parciais não parece muito plausível apesar de que grande parte dessas rochas alcalinas situam-se nas regiões de baixa temperatura do sistema residual. Os outros processos teriam importância secundária na formação das rochas alcalinas.

Quanto à natureza de rochas agpaíticas presentes no Brasil Meridional (Poços de Caldas), uma sequência de fenômenos pertinentes a estas rochas pode ser explicada através do sistema $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$. Esse sistema exprime as principais características das rochas peralcalinas que dão acmita e metassilicato de sódio na norma (Bailey e Schairer, 1966). O grau de peralcalinidade alcançado pelos líquidos residuais dependerá da composição original do magma e também da sua história de cristalização. Líquidos peralcalinos formam-se a partir de um magma originalmente peralcalino como de um magma alcalino "normal" cuja evolução esteja acompanhada pelo fracionamento de alguns minerais (Ulbrich, M.N.C., 1982).

O fracionamento do feldspato alcalino terá uma grande influência na natureza desses líquidos residuais, sendo que é o mineral dominante nos traquitos, riólitos e fonólitos acompa-

nhado por quantidades menores de quartzo ou feldspatóides. O desenvolvimento de resíduos alcalinos é possível em qualquer suite na qual há fracionamento de feldspato e deficiência de Al_2O_3 com relação a Na_2O , K_2O e CaO . Essa diferença será produzida mediante a atuação do "efeito do plagioclásio", ou seja, como a albita pura não pode precipitar-se de líquidos que contém Ca, a cristalização do plagioclásio deixará silicato alcalino potencial no magma. Qualquer rocha que contenha di ou wo na norma tem composição que permite a ação do "efeito do plagioclásio" (Bailey e Schairer, op. cit.)

De acordo com Edgar (1974) os estudos experimentais no sistema residual peralcalino indicam que a presença de silicatos de sódio potenciais nos líquidos residuais é um pré-requisito para a formação da acmita (egirina). As tendências de evolução do líquido neste sistema dependerá largamente da fusão incongruente do metassilicato de sódio.

Voltando às características das rochas agpaíticas estas podem estar portanto geneticamente relacionadas com as miasquíticas. O fracionamento de feldspato alcalino e clinopiroxênio "tipo miasquítico" (egirina-augita, diopsídio-hedembergita) produzirá a formação de egirina, ou seja, de líquidos agpaíticos embora magmas agpaíticos não possam produzir derivados miasquíticos. Egirinas e silicatos de sódio e elementos raros "incompatíveis" serão os últimos minerais a cristalizar-se de líquidos peralcalinos.

Quanto a incompatibilidade entre agpaitos e carbonatitos poder-se-ia explicar considerando a atuação do CO_2 nos líquidos residuais. Apesar de os agpaitos serem consideravelmente ricos em voláteis (Cl, F, S) são pobres em CO_2 . O CO_2 poderia sob certas condições acumular-se na câmara magmática resultando na colocação da fração carbonática e remoção de Na e K, responsáveis pela formação do magma alcalino.

Kogarko (1974) mostra que o fracionamento líquido não é um fator importante na gênese de rochas alcalinas porém nos

últimos estágios de cristalização destes magmas pode-se formar um segundo líquido imiscível que consiste principalmente de sais e componentes voláteis. Deste modo o caráter agpaítico de Poços de Caldas não impede sua relação genética a níveis subcrustais com outros magmas alcalinos da Província Meridional do Brasil.

Quanto às rochas ultrabásicas alcalinas não podem ser derivadas de tipo basáltico alcalino por nenhum processo de diferenciação. Portanto os magmas parentais destas suites de rocha devem ser de caráter ultramáfico, ricos em álcalis e voláteis (nefelinito, olivina nefelinito).

A atuação dos elementos móveis e voláteis (H_2O e CO_2) controla o tipo e a evolução dos magmas nefeliníticos. Estudos experimentais (Green e Ringwood, 1967) indicam que a adição de H_2O à composição do tipo peridotito aumenta o campo de estabilidade da olivina no líquido enquanto o aumento da pressão diminui a sua estabilidade à pressões de 10 - 12 Kb (moderadas) e este mineral não é mais estável. Estas experiências explicam a presença da olivina nos nefelinitos e a ausência deste mineral nos melteigitos.

A presença de CO_2 nos magmas nefelinicos é evidente e é demonstrada não só pela associação das rochas da suite ultrabásica com carbonatito mas pelo caráter "carbonático" dos produtos piroclásticos de algumas efusivas nefelinicas e a abundância de CO_2 em lavas fundidas nefelinicas. A concentração de voláteis, especialmente CO_2 , também explicaria a passagem de melilita nefelinitos a melilitos com diminuição de SiO_2 e maiores concentrações de óxidos de metais, principalmente CaO (Bailey 1974b). É consenso entre os petrólogos que os voláteis (H_2O e CO_2) são muito solúveis nos magmas subsaturados e a baixa viscosidade desses magmas facilitaria o afundamento de cristais durante a cristalização (Upton, 1974). Desse modo, um magma ultrabásico alcalino produziria uma sequência estratificada que iria dar dunitos basais e piroxenitos-urtitos e até nefelina sienitos, como mencionado por Danni (1974).

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. CAPÍTULO 1 (OS DADOS)

Dados referentes a cerca de 200 análises químicas de rochas alcalinas de maciços do Brasil Meridional, compiladas no presente trabalho, consitituem a amostra preliminar, sem seleção prévia, que serviu como base para um tratamento interpretativo.

Esses dados foram publicados em diferentes épocas, por autores diferentes e alguns não foram sequer localizados em mapas geológicos, enquanto outros não foram estudados petrograficamente.

A densidade amostral para cada maciço é diferente, sendo as maiores densidades referentes aos trabalhos onde foram elaboradas teses recentes, Tunas, Itapirapuã, Juquiá, Iporá e Santa Fé, reforçando a necessidade de considerar esses trabalhos como os de melhor qualidade analítica. Verifica-se ainda que as menores densidades amostrais referem-se aos maiores maciços em área, Itatiaia, Poços de Caldas, São Sebastião, Jacupiranga, Tapira e Salitre, o que não impede que essas amostras sejam estatisticamente consistentes.

Foi discutido que o erro amostral tende a ser grande porque o número de amostras por unidade petrográfica e por maciço é em geral pequeno (alguns são desprovidos de amostras) e porque esse número não é proporcional à variância amostral a nível de unidade petrográfica e maciço.

O erro analítico tende a ser também grande porque as amostras foram analisadas em diferentes laboratórios e em diferentes épocas, embora esses erros possam ser avaliados criticamen

te por técnicas estatísticas e evidências geológicas.

Apesar dos erros amostrais e analíticos, referentes às análises químicas, os dados de concentração de elementos maiores, determinados por métodos clássicos, podem ser utilizados para computar as estatísticas amostrais e obter-se dados de síntese. Nesse caso, as inferências a respeito das populações são inteiramente subjetivas, sem base probabilística. Esses dados podem contudo ser utilizados na reavaliação dos dados químicos da Província Alcalina do Brasil Meridional, à semelhança de algumas províncias mundiais.

A população alvo (ou visada) considerada para efeito conceitual foi representada por todas as rochas alcalinas que ocorreram numa determinada época geológica (cretáceo-mesozóica), sob um mesmo controle geotectônico (reativação Wealdeniana), num determinado espaço geográfico (Brasil Meridional). Em algumas situações essas populações foram restritas a ocorrências locais, tais como, determinados maciços e unidades petrográficas, limitando-se o campo de estudo e tornando essa população móvel no decorrer do trabalho. Foi considerado também o aspecto intrínseco da amostragem em geologia que pode não ser representativa desde que algumas unidades petrográficas não afloram, assim como não foram considerados dados de sondagem.

Os cálculos da Análise de Variância para o estabelecimento de um Plano Amostral requereria que os dados e as variáveis fossem listados em linhas e colunas sendo então calculadas as médias quadráticas e as somatórias quadráticas para essas linhas e colunas (entre níveis e variáveis), até chegar-se ao cálculo da variância total do conjunto. O número e o espaçamento das amostras em cada nível deveria ser proporcional à variância desse nível. Os níveis hierárquicos estabelecidos deveriam ser Maciço, Unidade Petrográfica e Amostras, podendo ser estabelecidos ainda outros, dependendo do tipo de detalhe. Nesse caso, os dados preliminares para o estabelecimento do Plano Amostral poderiam ser utilizados na estimativa do número e espaçamento de amostras num

Plano Amostral Racional. Esse plano amostral proposto deveria ser elaborado em analogia com aqueles adotados para rochas sedimentares estratificadas, sendo multinível. O modelo estatístico utilizado seria casual, o qual estabelece que o número de amostras dentro de uma unidade petrográfica e dessas unidades num determinado maciço é aleatório.

Foi demonstrado que é possível apropriar-se de modelos matemáticos para avaliar a magnitude dos erros amostrais e analíticos de uma série de dados compilados, de diferentes autores. Nesse sentido a média geral do erro amostral de todas as rochas e localidades tende a ser nula quando o número de localidades e amostras aumenta, e a média dos componentes do erro amostral é constante para cada localidade quando aumenta o número de localidade por espécie. A variância ou posição do erro amostral tende a ser a mesma para cada localidade quando o número de amostras por localidade aumenta. Os erros amostrais para uma dada localidade amostral tendem à distribuição normal. No caso dos erros analíticos essas relações são mais complicadas.

Análises dos erros analíticos foram efetuadas com base em trabalhos clássicos sobre análises de rochas por métodos tradicionais de determinação (os célebres padrões G-1 e W-1). Desse modo, a dispersão na determinação de óxidos em amostras de diferentes laboratórios é relativamente grande e as réplicas amostrais seriam necessárias para restringir os erros analíticos.

Com relação aos elementos traços foram considerados cerca de 83 dados amostrais, referentes a cerca de 13 elementos cada um, de diferentes procedências mas determinados num mesmo laboratório e pelo mesmo método, o da espectrometria ótica. Essas amostras foram distribuídas entre os Maciços de Poços de Caldas, Itapirapuã e alguns maciços do Litoral RJ-SP.

Por outro lado, foram também consideradas uma série de análises modais, cerca de 200 (duzentas), publicadas por diferentes petrógrafos de renome e muitas delas estudadas pelo mes

mo analista. Essas análises foram utilizadas para comparação com as composições mineralógicas normativas, de acordo com procedimento seguido em publicações petrográficas de várias províncias alcalinas mundiais. Essa comparação entre composição química e mineralógica é muito plausível nos estudos petrográficos e fornece informações valiosas sobre a composição geral de uma determinada associação ou maciço.

Do mesmo modo que os dados de análise química, esses dados modais não foram coletados segundo um Plano Amostral mas foram também compilados. Assim, aqui também, maciços de grandes áreas e com uma variância amostral grande, como Poços de Caldas apresentaram um número pequeno de análises modais e outros, de dimensão grande, como Tapira e Salitre, não apresentaram dados quantitativos referentes a composições mineralógicas modais.

6.2. CAPÍTULO 2 (CÁLCULOS E DIAGRAMAS DA PETROLOGIA)

A partir das análises químicas foram determinados os parâmetros e índices petrológicos (números de Niggli, índices QLM, composições normativas, % catiônicas e índices agpáticos) e traçados os diagramas de variação de acordo com hipóteses geológicas definidas: rochas do mesmo maciço, para o conjunto de rochas alcalinas do Brasil Meridional e eventualmente para grupos geotectônicos ou geocronológicos.

Os Diagramas de Variação foram selecionados principalmente em função da literatura, dando prioridade para aqueles já escolhidos para definir outras províncias mundiais, tais como, os diagramas triangulares QLM (Niggli-Burri), os gráficos $\text{SiO}_2/\text{Alcalis}$ e Si/R , os diagramas triangulares FMA e NaCaK catiônicos e QN e Kp de Bowen.

O diagrama $\text{SiO}_2/\text{Alcalis}$, aplicado às rochas alcalinas do Brasil Meridional mostrou uma concentração de pontos, em

geral acima do traço do plano crítico de saturação, com exceção de algumas amostras ultramáficas de Iporá e Sante Fê, algumas raras amostras mais ácidas de Itatiaia e Poços de Caldas e uma relativa dispersão de pontos. Comparando esses resultados com aqueles apresentados para as rochas basálticas observa-se que não há uma delimitação brusca entre os dois campos composicionais mas uma continuidade, inclusive com superposição de rochas basálticas e algumas alcalinas de Tunas, São Sebastião e Iporá, o que demonstra não haver rigidamente um espaço de rochas basáltico - toleíticas idealmente separado das rochas alcalinas por um plano crítico de saturação. Com relação aos maciços individuais observa-se tendências paralelas para os Maciços de Itapirapuã e Tunas e parcial superposição de campos entre Itatiaia e São Sebastião, Poços de Caldas e Itapirapuã e grande dispersão para o maciço de Iporá.

O diagrama R/Si utilizado para representar a Província Alcalina do Brasil Meridional mostra que essas rochas, quando consideradas em conjunto, apresentam-se bem diferenciadas, apresentando valores de R e Si, em ampla margem de composição, do mesmo modo que o Diagrama $\text{SiO}_2/\text{Álcalis}$. As tendências para Itapirapuã e Tunas são também bem distintas e paralelas e os Maciços de Poços de Caldas e São Sebastião são pouco diferenciados em relação a esses parâmetros considerados, enquanto aqueles ultramáficos alcalinos como Juquiá e Iporá apresentam uma forte dispersão de pontos. O Maciço de Itatiaia tem um comportamento semelhante ao de São Sebastião quando tratado em relação às variáveis R e Si.

O Diagrama QLM apresenta resultados bem definidos para a Província Alcalina do Brasil Meridional, com a maioria das amostras no triângulo FRL, com paragênese feldspato x feldspatóide (Monte do Trigo, Poços de Caldas e São Sebastião). Algumas amostras situam-se no triângulo PRF constituindo a paragênese feldspato x piroxênio, desprovida de quartzo (abaixo da linha de saturação). Nesse caso estão as rochas do Maciço de Tunas e raras do Maciço de São Sebastião, o mesmo ocorrendo com as rochas basálticas da Bacia do Paraná. Mais raramente as rochas alcalinas acham

-se posicionadas no triângulo PRM, correspondendo à paragênese alcalino-ultramáfica (piroxenitos) e no triângulo RML, correspondendo às paragêneses de gabros e teralitos.

Quando plotados no Diagrama de Bowen Q Ne Kp, de acordo com suas composições químicas, essas rochas mostram também resultados interessantes. Aquelas do Litoral RJ-SP, caem no vale térmico determinado por Bowen, o mesmo acontecendo com as rochas do maciço de Tunas. As rochas alcalinas dos Maciços de Itapirapuã e Poços de Caldas situam-se contudo fora da área determinada experimentalmente por Bowen mostrando que esses diferentes posicionamentos podem ser reflexo de diferentes pressões de voláteis nos processos finais de cristalização fracionada.

Os Diagramas triangulares FMA e NaCaK foram também utilizados para caracterizar a Província Alcalina do Brasil Meridional tendo sido obtidos os seguintes resultados: o Diagrama FMA para o conjunto de rochas alcalinas mostra uma grande dispersão de pontos em relação a FM (componentes ferro magnesianos), indicando a presença de mais de uma tendência. Com relação aos maciços individuais os resultados obtidos mostram que para o maciço de Poços de Caldas há uma diferenciação pouco pronunciada de M em direção ao extremo alcalino enquanto para São Sebastião a diferenciação é maior. Para o maciço de Tunas parece existir mais de uma tendência, com dispersão de pontos em relação aos componentes F e M, enquanto Itapirapuã apresenta uma tendência pronunciada de diferenciação de M em relação aos diferenciados alcalinos. Amostras de Tunas caem próximas das basálticas mostrando um comportamento comum desse maciço, repetitivo também em relação a outros gráficos. Com relação ao gráfico CaNaK há uma forte dispersão de pontos e uma superposição em relação a algumas rochas basálticas. Com relação aos maciços individuais, o Maciço de Tunas apresenta uma tendência bem definida e forte dispersão para Itapirapuã e Poços de Caldas. Uma certa diferenciação é também evidenciada para Iporá enquanto os Maciços de Itatiaia e São Sebastião apresentam comportamentos anômalos, sem constituírem uma tendência mas com uma área de concentração de pontos.

O Diagrama QAPF mostrou uma concentração de pontos no lado AF do duplo triângulo de Streckeisen correspondendo a uma composição Feldspato Alcalino x Feldspatóide, predominante entre as amostras estudadas e refletindo possivelmente o comportamento geral da população de rochas alcalinas. Nesse campo de composição estão as rochas dos Maciços de Itapirapuã, Poços de Caldas, Monte do Trigo e algumas dos Maciços de Iporã, Juquiã, São Sebastião, as quais correspondem aos sienitos com feldspatóides (fóides sienitos ou fóides-álcali sienitos do IUGS). Outro campo notável de composição é representado pelos Maciços de Iporã e Santa Fé, em amostras bem distribuídas ao longo do triângulo APF, sub saturadas portanto e correspondentes tanto a fóides sienitos e álcali-fóide sienitos como a fóide monzonitos e fóide monzodiorito/monzogabro (essexitos e teralitos), ou seja de composição correspondente aos sienitos feldspatóides e gabros alcalinos. Quanto ao Maciço de Tunas este apresenta três campos de composição principais (rochas supersaturadas, rochas gábricas e nefelina sienitos) e é pequena a proporção de rochas com associação plagioclásio x fóides.

A combinação entre os gráficos, principalmente QLM e QAPF, permite estabelecer pelo menos 05 (cinco) campos composicionais para as rochas alcalinas do Brasil Meridional: o campo a (Rochas Alcalinas do Maciço de Itapirapuã), constituído principalmente de nefelina sienitos, bem delimitado nos diagramas QLM, QAPF, $\text{SiO}_2/\text{Álcalis}$, R/Si e QNe Kp , além de apresentar tendências bem definidas nos diagramas triangulares FMA e Na Ca K. Essas rochas apresentam teores variados em feldspato alcalino, com moda entre 40 e 50% e teores variados em feldspatóides, com moda entre 40 e 30% e apresentam provavelmente condições de cristalização sob altas pressões de voláteis, situando-se os diferenciados fora da área delimitada por Bowen no diagrama QNeKp . Essas rochas apresentam altos teores de Ba e Nb, Zr, V, Ga e Sr, da ordem de grandeza dos maciços alcalinos intermediários a agpaíticos.

O campo b é constituído pela associação sienitos alcalinos, sienodioritos, sienogabros, representada pelo Maciço

de Tunas, bem caracterizado nos diagramas QLM, $\text{SiO}_2/\text{Álcalis}$, R/Si e com alguma superposição de campo com as rochas basálticas da Bacia do Paraná. Essas amostras situam-se no campo de pressões definido por Bowen no Diagrama QNeKp e tem composição modal variada, com teores em feldspato apresentando uma moda no intervalo de 80 - 90% e baixos teores em feldspatóides, com predominância de rochas saturadas e raras amostras supersaturadas. A maior parte dessas amostras situam-se pois no lado AP do duplo triângulo de Streckeisen.

O campo c é constituído pelas associações ultramáficas-alcalinas representada pelo Maciço de Iporá. As rochas desse maciço apresentam-se bem diferenciadas em relação aos parâmetros $\text{SiO}_2/\text{Álcalis}$ e Si-R, bem como em relação ao gráfico triangular NaCaK e composição modal representada tanto no lado FP do duplo triângulo de Streckeisen, correspondendo associação do tipo gabros alcalinos, como associações sienítico - feldspatóides, lado AF. Os raros diferenciados alcalinos situam-se fora da área delimitada por Bowen, no diagrama QNeKp, correspondente a maiores pressões de voláteis.

O Maciço de São Sebastião pode ser considerado, com algumas ressalvas, um novo campo d, sendo caracterizado por diferenças pouco pronunciadas em relação aos campos anteriores, inclusive com alguma superposição com os campos a e b. Por exemplo, em relação ao gráfico triangular QLM, há uma área de ligação entre os dois conjuntos a e b, o mesmo ocorrendo para os diagramas $\text{SiO}_2/\text{Álcalis}$ e R/Si. Com relação aos diferenciados situam-se as amostras na área delimitada por Bowen, parecendo refletir o comportamento geral para as rochas do litoral RJ-SP. Em relação ao gráfico FMA apresenta uma tendência bem definida embora não constitua um maciço diferenciado em relação aos membros calco-alcalinos. Não se dispõe de dados sobre composições modais computadas com precisão embora tenham essas sido avaliadas, apresentando uma margem ampla de composição correspondendo aos membros gábricos alcalinos e sienitos com feldspatóides.

O Maciço de Itatiaia constitui ainda um novo campo de composição e, parte dele contido nos campos b e d. As características principais das rochas do Maciço de Itatiaia são a pouca diferenciação Sílica/Álcalis, o mesmo ocorrendo em relação a R/Si. Em relação ao gráfico QLM coincide em parte com o campo d, com exceção de algumas amostras supersaturadas que caem acima de FP (linha de saturação). Em relação à área de Bowen, algumas amostras situam-se dentro e outras fora do campo de pressões normais. A composição modal é variada nos teores em feldspato, com moda entre 70 - 90% (caráter saturado), com teores baixos em nefelina e algumas amostras supersaturadas, correspondendo a quartzosienitos até granitos alcalinos.

A maioria das rochas alcalinas de Poços de Caldas constitui um campo de composição coincidente ou abrangido por a. Quanto ao campo de Juquiá é em parte semelhante a a e c, embora os resultados modais sejam um tanto contraditórios com os dados químicos, porque enquanto a moda corresponde à linha AF do duplo triângulo de Streckeisen, a composição normativa referente ao gráfico QLM reflete uma associação petrográfica bem diferenciada. Nesse caso, provavelmente não foi sempre computado o plagioclásio nas análises modais, às vezes camuflado, em intercrescimentos com o feldspato alcalino.

Quanto às rochas basálticas apresentam um campo de composição bem distinto das alcalinas, embora haja alguma superposição e, a passagem de um composição para outra não seja sempre brusca mas contínua e existam alguns vazios composicionais entre os dois grupos de rocha. Nesse sentido é válido pesquisar o significado dessas lacunas de composição.

6.3. CAPÍTULO 3 (ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIANTE)

Várias técnicas estatísticas multivariantes, tais como: Coeficientes de Correlação e Distância, Análise de Agrupa-

mento, Análise Discriminante e Análise Fatorial, referentes aos dados químicos das rochas alcalinas do Brasil Meridional foram utilizadas para agrupar e discriminar grupos de rochas.

Os símbolos e algoritmos da estatística multivariante revelaram ser bastante úteis na representação gráfica e descrição do quimismo dessas rochas.

Os resultados obtidos para a Análise de Agrupamento mostraram ser bem satisfatórios na separação entre grupos de rochas. Utilizando-se o Coeficiente de Distância como medida de similaridade, foram determinados 03 subgrupos para o conjunto de dados químicos: o primeiro representado por gabros alcalinos (essexitos e teralitos) e membros da série ijolítica, limitado por coeficientes entre 0.15 e 0.25. O segundo constituído de rochas ultramáficas alcalinas, como jacupiranguitos, piroxenitos e dunitos, limitados por coeficientes da ordem de 0.25 a 0.36 e o terceiro, constituído de nefelina sienitos, sienitos alcalinos, quartzo sienitos e rochas afins, limitado por coeficientes de distância entre 0.36 a 0.54.

O dendrograma obtido mostra a eficácia desta técnica estatística como critério classificatório entre amostras.

Por outro lado, utilizando-se o Coeficiente de Correlação como coeficiente de similaridade obteve-se também 03 subgrupos entre as rochas alcalinas do Brasil Meridional: o grupo 01, abrangendo a maioria das amostras, com coeficiente mínimo de correlação de ordem de 0.93. Situam-se aí os nefelina sienitos e gabros alcalinos, em transição gradativa, na seguinte ordem de acordo com os coeficientes de correlação: melteigito, malignito, melanita-nefelina sienitos, ijolitos, essexitos, gabros alcalinos, nefelina sienitos e rochas relacionadas, numa ordem decrescente de basicidade. No grupo 02, cuja correlação com o grupo 01 é de 0.7950, situam-se os piroxenitos e alguns teralitos. No grupo 03, tem-se os dunitos e werhlitos, apresentando correlação com o grupo 2 em torno de 0.65.

Observa-se uma melhor separação obtida quando se trabalha com os coeficientes de correlação havendo uma gradação entre os membros mais máficos até os alcalinos mais silicosos, no primeiro caso. No segundo caso, as rochas gábricas destacam - se dos nefelina sienitos pela presença do grupo intermediário, constituído pelas ultramáficas.

A Análise de Agrupamento foi também utilizada para comparação entre as rochas alcalinas e basálticas da Bacia do Paraná, para testar a eficácia da técnica e verificar o posicionamento de algumas amostras basálticas com características de associação alcalina em relação ao grupo mais nitidamente alcalino, tendo sido obtidos os seguintes resultados: a) a Análise de Agrupamento revelou a existência de dois grupos principais de rocha: o grupo 01 constituído de rochas alcalinas e o grupo 02 constituído principalmente de basaltos e diabásicos; b) a passagem do grupo 01 para o grupo 02 dá-se através de rochas consideradas ainda como basálticas, embora com características de membros alcalinos. Esse grupo intermediário entre as rochas alcalinas e basálticas é contudo insignificante quando comparado com o global das amostras, como pode ser visualizado no dendrograma; c) o grupo alcalino é separado do basáltico por um coeficiente de 1.36; d) algumas rochas alcalinas principalmente gábricas e ultramáficas, estão associadas às amostras do grupo 02, constituindo um subgrupo com coeficientes os mais baixos, demonstrando a pouca eficácia da técnica na discriminação entre rochas máficas, de natureza normal e alcalina; e) algumas rochas anômalas constituem um grupo pouco significativo, destacado do grupo 01.

Os resultados obtidos da Análise de Agrupamento permitiram pois reunir um grande número de amostras em grupos e sub-grupos composicionais e indexá-las de acordo com determinados coeficientes. O uso dessa técnica, mesmo sem efeito probabilístico e meramente descritivo já a justifica, porque codifica o espaço de uma amostra eliminando superposições subjetivas e uniformizando a linguagem geológica. Tem portanto um efeito classificatório evidente. Por outro lado, parece não haver qualquer condicio

namento espacial ou geotectônico na definição dos grupos e subgrupos composicionais, das rochas alcalinas analisadas.

A Análise Discriminante foi também utilizada como técnica classificatória auxiliar, para testar a eficácia da Análise de Agrupamento na separação entre grupos de rocha. Os grupos utilizados para análises foram aqueles previamente separados pela Análise de Agrupamento, tanto utilizando Coeficiente de Correlação como Distância, como coeficientes de similaridade. No primeiro caso, os grupos principais testados foram: grupo A, constituído de 40 amostras (máficas-ultramáficas) e grupo B, constituído de 160 amostras de nefelina sienitos, sienitos alcalinos e rochas relacionadas. Para verificar se os dois grupos eram de fato diferentes foi testada a hipótese de semelhança (teste de hipótese) sendo constatado que de fato eram diferentes (dentro de altos níveis de significância) e que as variáveis que mais contribuíam para separá-los eram MgO , SiO_2 , CaO e Fe_{tot} , sendo praticamente nulas as contribuições das variáveis Al_2O_3 , Na_2O e K_2O . Esses resultados são compatíveis com a separação dos grupos tendo como base a basicidade e não a alcalinidade.

Com relação aos grupos previamente separados por Análise de Agrupamento, Coeficiente de Distância, verifica-se: Grupo A: 70 amostras e Grupo B: 130 amostras, enquanto as variáveis que mais contribuíram para a separação dos grupos são: Fe_{tot} , CaO , K_2O , MgO . Por outro lado a superposição entre amostras é maior, indicando a menor eficácia do coeficiente de distância em relação ao coeficiente de correlação como medida discriminante. No esquema de posição das amostras (em relação às distâncias entre grupos) os gabros alcalinos ficam situados entre D_O e D_B enquanto os nefelina sienitos e rochas relacionadas situam-se entre D_O e D_A e as rochas ultramáficas estão associadas com as máficas mas situam-se no extremo da série. Algumas amostras foram relocadas pela Análise Discriminante porque estavam mal situadas em relação aos grupos.

Para cada grupo foram calculadas as médias, va-

rianças, coeficientes das variáveis e frequência amostral além dos valores D_O , D_A e D_B , sendo portanto uma técnica classificatória muito importante, consistindo, em linhas gerais em determinar um índice que posiciona a rocha em relação ao grupo discriminado.

A Análise Fatorial revelou ser uma técnica apropriada para o estabelecimento das relações entre variáveis e amostras mostrando a influência de cada variável e de cada fator no quimismo dos diversos maciços e associações.

Foram determinados para os diversos maciços alcalinos: a) as matrizes de correlação entre variáveis; b) os fatores e % de variação explicada por cada fator; c) matriz fatorial e as comunalidades para as diferentes variáveis em função do número de fatores selecionados; d) matriz de coeficiente fatorial; e) matriz de pesos fatoriais.

A técnica utilizada foi a Análise Fatorial propriamente dita sendo os dados padronizados e os vetores normalizados embora nem sempre tenha sido procedida a Rotação Fatorial.

Por outro lado foram comparados também os resultados gerais para as rochas alcalinas e basálticas e reprojeta das amostras em relação aos fatores principais em gráficos bidimensionais.

De acordo com as observações dos dados e gráficos analisados verifica-se o seguinte:

- A Análise Fatorial é uma técnica apropriada para representar a composição química de uma província petrográfica ou maciço. A representação espacial das variáveis e as suas posições em relação aos principais fatores fornece uma idéia simplificada da composição química dessas províncias e maciços.

- Em todos os maciços alcalinos analisados um único fator é responsável por grande parte da variância do sistema

(55 - 70%), mostrando variáveis com altos coeficientes de correlação.

- Para as rochas alcalinas existe em geral uma correlação positiva entre SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O e K_2O , com exceção do Maciço de Tunas onde a alumina apresenta correlação positiva com CaO , MgO e Fe_{tot} . O Maciço de Itapirapuã apresenta um comportamento anômalo em relação ao Na_2O , variável de comportamento, independente da variação do SiO_2 , Al_2O_3 e K_2O e uma inversão em relação a posição dessas três variáveis em relação aos fatores principais.

- Considerando-se o conjunto de rochas alcalinas e basálticas verifica-se uma correlação positiva entre as variáveis SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O e K_2O e correlação negativa entre essas variáveis e os outros óxidos, para as rochas alcalinas, enquanto para os basaltos esse comportamento não se verifica, havendo uma correlação positiva entre a sílica e os álcalis e negativa em relação a alumina.

- Os gráficos de projeção das amostras em relação aos fatores podem ser utilizados para verificar o grau de diferenciação química dos maciços ou províncias. Observa-se por exemplo que a diferenciação nos Maciços de São Sebastião e Poços de Caldas é muito menor do que nos outros maciços. Nesse sentido é conveniente comparar os resultados obtidos com aqueles da petrologia.

A técnica de Análise Fatorial tem portanto um efeito tanto similar aos diagramas de variação da Petrologia, re-combinando os índices químicos para cada amostra e posicionando-a num espaço geométrico. Tem ainda uma vantagem em relação aos diagramas de variação porque pode eventualmente ser utilizado para testar hipóteses estabelecidas. Desse modo, a Análise Fatorial aplicada às rochas alcalinas do Brasil Meridional apresentou resultados bem nítidos, demonstrando que um único fator controla quase que totalmente a variação química dessas rochas, sendo este repre-

sentado principalmente pela contribuição das variáveis CaO , Al_2O_3 e MgO .

6.4. CAPÍTULO 4 (ANÁLISE ESTATÍSTICA UNIVARIANTE)

Foram determinadas as estatísticas amostrais descritivas para as rochas alcalinas do Brasil Meridional com base nos conceitos de população e amostragem. Nesse sentido foram apresentados os resultados de média e dispersão para vários tipos petrográficos, maciços e até unidades geotectônicas.

Assim, as médias para as rochas alcalinas em geral revelaram valores bem próximos, quer se trabalhe com análises anteriores ou posteriores a G-1 e W-1. Também os dados referentes a amostras de rochas intrusivas e extrusivas são semelhantes, comprovando de uma certa forma a reprodutibilidade dos valores e a ausência de erros significativos. As variâncias para os elementos de menor concentração foram maiores, como era de se esperar e da mesma ordem de grandeza das próprias médias computadas. As relações σ/μ são muito próximas entre si para os mesmos elementos e as respectivas médias semelhantes dentro de cada conjunto. As médias para as amostras discriminadas pelos coeficientes de correlação e distância apresentaram valores para SiO_2 , Na_2O e K_2O maiores do que para a amostra total das rochas alcalinas porque essas técnicas discriminatórias eliminam as amostras ultramáficas alcalinas do grupo principal. Os resultados de médias e desvio padrão para as rochas alcalinas foram comparados com aqueles para as rochas basálticas, para efeito estatístico descritivo, mesmo sabendo a priori tratar-se de grupos petrográficos distintos. Desse modo, embora os teores em SiO_2 sejam da mesma ordem de grandeza os outros elementos apresentam valores completamente diversos. Assim, as rochas alcalinas apresentaram valores altos para Al_2O_3 , Na_2O , K_2O e as rochas basálticas valores mais elevados para CaO , MgO , Fe_{tot} e TiO_2 . Por outro lado, a heterogeneidade das rochas alcalinas pode ser visualizada pelos valores de σ para os diversos elementos,

comparados com os basaltos. Desse modo, mais uma vez justificar-se-ia o estabelecimento de um Plano Amostral Multinível para essas rochas à diferença de rochas basálticas, cujo plano amostral é equiprovável simples tendo em vista o maior grau de homogeneidade.

Foram ainda computadas as médias para os vários elementos em relação aos diversos maciços embora nesses cálculos não tenham sido considerados os pesos de cada ocorrência ou unidade petrográfica, apresentando pois desvios consideráveis em relação aos valores reais. Os maciços mais diferenciados segundo esses critérios seriam: Itatiaia, São Sebastião, Ipanema e Poços de Caldas.

Cálculos de composição média para as várias unidades petrográficas de cada maciço foram determinados e apresentados os respectivos números de análises e a área de ocorrência, possibilitando estimar a composição média ponderal desses maciços. Observa-se então as discrepâncias na distribuição das análises: o Maciço de Juquiá, composto predominantemente de piroxenitos, tem apenas 02 análises descritas para esse grupo petrográfico, em detrimento dos nefelina sienitos, de baixa área de ocorrência e maior número de análises. Em Santa Fé, o número de análises de missouritos e malignitos é desproporcional às suas áreas de ocorrência quando comparado com os piroxenitos alcalinos. Em Tunas, o número de análises dos gabros alcalinos é também grande em relação a área de ocorrência, provocando uma distorção nos cálculos das médias.

Histogramas e gráficos de frequência acumulada foram traçados para os vários elementos em forma de óxidos. Esses histogramas mostraram a distribuição desses elementos para as rochas alcalinas no seu conjunto, para essas rochas discriminadas pelos coeficientes de correlação e distância, e posteriores a G-1 e W-1. Observa-se nesses gráficos a possível presença de populações heterogêneas, como era de se esperar, devido aos limites amplos da população. Assim, para o conjunto das rochas alcalinas

tem-se um pico entre 52 - 54% para o SiO_2 , correspondente à população principal e outros secundários entre 42 - 44% (correspondente a rocha ultramáfica-alcalina) e ainda outros entre 58 - 60% correspondente aos diferenciados mais ácidos, embora haja uma tendência geral para o padrão normal. O Al_2O_3 apresenta uma população principal entre 18 - 22% e uma assimetria positiva enquanto o Na_2O e K_2O apresentaram populações superimpostas mas tendendo a normalidade e o CaO e Fe_{tot} apresentaram uma tendência a lognormalidade. Os histogramas para as amostras discriminadas pelos coeficientes de correlação têm maior poder de resolução, ou seja, eliminam o efeito das populações secundárias, embora ainda permaneça uma mistura de populações.

As curvas de frequência acumulada para os vários óxidos em forma de % encontram-se também publicadas e percebe-se o padrão acentuadamente normal para o SiO_2 , assimetria negativa para o Al_2O_3 e padrões normais para o Na_2O e K_2O , embora com pontos de inflexão, como reflexo da superposição de populações. Não foram utilizadas técnicas de separação entre as diversas populações por serem demais complicadas para esses casos, e também por insuficiência de dados.

Quando se confronta os histogramas e curvas de frequência para os vários grupos de rochas alcalinas e basálticas observa-se as diferenças marcantes entre esses dois grupos petrográficos. O uso desses gráficos teve o objetivo de melhor ilustrar essas diferenças, como é natural, em trabalhos geoquímicos, reforçando tendências já esperadas. Assim, o SiO_2 para os dois grupos de rochas, é semelhante e a dispersão idem. Para o Al_2O_3 há uma assimetria negativa para as rochas alcalinas e tendência à normalidade para os basaltos e diabásios. O Fe_{tot} é lognormal para as alcalinas e possui assimetria positiva para as rochas basálticas. O CaO apresenta assimetria positiva para as alcalinas e negativa para as rochas basálticas. Os elementos em forma de óxido, como o Na_2O e o K_2O , são normais para as alcalinas e apresentam respectivamente assimetria negativa e positiva para as rochas basálticas. Verifica-se também que as populações heterogêneas são fre-

quentes em ambos os grupos de rocha, indicando que, quer se trabalhe com rochas supostamente homogêneas ou heterogêneas, a presença de populações superimpostas pode ocorrer.

Por outro lado, verifica-se que esse gráfico é um dos mais ilustrativos na representação da composição química de um maciço, mostrando relações de médias, desvios padrões, dispersão, inflexão, composições extremas, heterogeneidade de populações, sendo por conseguinte muito elucidativo.

Quanto aos elementos traços, os valores de média foram calculados para o conjunto de dados e para os Maciços de Poços de Caldas, Itapirapuã e Sub-Província de litoral RJ-SP, separadamente, verificando-se maiores valores de Nb, Zr para Poços de Caldas e Litoral RJ-SP e valores maiores de Ga, V, Ba e Sr para o Maciço de Itapirapuã. Por sua vez, os valores de elementos traços para o maciço de Itapirapuã são mais próximos aos de Kibina enquanto Poços de Caldas tem maiores concentrações para Zr, Sr e tem caráter agpaítico mais acentuado.

Os padrões de distribuição de frequência foram também calculados para cada elemento, embora o número de amostras (83) seja irrisório, observa-se tendência à lognormalidade para o Be, La e Ba e normal para o Ga.

Ainda em relação a histogramas de distribuição de frequência, verifica-se que quando traçados em relação ao número qz, como expressão de saturação, parecem discriminar claramente o grupo de rochas alcalinas em duas subpopulações, uma com a moda de qz entre -90 e -80 e a outra entre -40 e -30, à diferença do grupo de rochas basálticas com moda de qz entre 0 a -10. Em relação ao ID observa-se um padrão assimétrico negativo quando se trabalha com rochas alcalinas e um padrão normal quando se trabalha com rochas basálticas.

Os histogramas modais podem ser utilizados para e feito comparativo com os diagramas químicos e mineralógico-norma-

tivos. Com relação a distribuição dos feldspatos observa-se três subpopulações para o conjunto de rochas alcalinas: uma delas com pico entre 0 - 10% de feldspato, correspondente as amostras de rocha ultramáfica-alcalinas, a outra com um pico entre 40 - 50% correspondendo ao Maciço de Poços de Caldas e Itapirapuã e a terceira entre 80 - 90%, correspondendo ao maciço de Itatiaia e Tunas. O Maciço de Anitápolis, em termos de distribuição de feldspatos, reflete o comportamento geral para as rochas alcalinas, apresentando também 3 sub-populações. Em relação às % de quartzo e nefelina modais tem-se um comportamento anômalo, com modas geralmente correspondendo aos membros saturados.

Os resultados preliminares das funções de distribuição para os vários elementos, em forma de óxidos, dessas rochas, demonstram que, do ponto de vista químico, as rochas alcalinas podem ser reduzidas a modelos simples e até menos complexo, do que aqueles referentes aos basaltos toleíticos da Bacia do Paraná. Assim, as funções de distribuição dos elementos maiores, tais como, SiO_2 , Na_2O e K_2O revelam padrões de simetria normais ou próximos da normalidade, quer se trabalhe com o conjunto de rochas (província alcalina do Brasil Meridional), ou com os sub-grupos petrográficos, comportamento esse também diferente das rochas basálticas da província toleítica do Brasil Meridional.

Com referência aos padrões das funções de distribuição dos elementos, foram feitas digressões a respeito, questionando se seriam casuais, ou se teriam expressão probabilística. Nesse sentido foram retomadas da literatura hipóteses referentes aos processos estocásticos de cristalização fracionada, questionados por vários autores.

A interação entre os gráficos da petrologia e as técnicas univariantes é bem ilustrada através do diagrama de distribuição de "Índice de Diferenciação" o qual pode ser utilizado na interpretação petrogenética da província, através da análise do significado dos mínimos composicionais.

6.5. CAPÍTULO 5 (CONTRIBUIÇÃO À PETROGÊNESE)

Foi efetuada a integração dos dados formalizados em modelos geotectônicos e petrogenéticos vigentes. Foi também analisado o conceito de província petrográfica e revista essa aplicação conceitual aplicada à Província Alcalina do Brasil Meridional. Tentou-se mostrar as relações estabelecidas pelos geotectônicos, entre as grandes unidades estruturais e o posicionamento dos maciços alcalinos, considerando o já referido relacionamento intrínseco da grande atividade alcalina mesozóica e o importante processo diastrófico manifestado na plataforma Sul-Americana, a Reativação Wealdeniana.

Desse modo, achamos mais adequado integrar essa atividade alcalina relacionada com a Reativação Waldeniana, numa única Província, qual seja, a Província Alcalina do Brasil Meridional, reforçando a proposta da subdivisão em subprovíncias e distritos, à semelhança de proposições semelhantes em outras províncias mundiais. As subprovíncias do Brasil Meridional poderiam ser então: a) Subprovíncias Marginais à Bacia do Paraná (Distrito Poços de Caldas, Distrito Rio Verde-Iporã, Distrito Alto Paranaíba, Distrito Ponta Grossa); b) Subprovíncia Marginal à Bacia de Santos (Distrito Serra do Mar); c) Subprovíncia Alcalina do Craton Amazônico.

Para efeito de descrição das várias províncias foi mantida contudo a nomenclatura da literatura nacional. As características geológicas e petrográficas das diversas províncias foram então sintetizadas e os dados pertinentes a cada uma delas (obtidos do tratamento dos dados químicos e petrográficos), foram acrescentados às informações já conhecidas.

Para a "Província" (sub-província) de Poços de Caldas verificou-se a pouca diferenciação sílica/álcalis, o mesmo acontecendo com a razão R/Si. Esse comportamento manifestou-se também em relação ao diagrama triangular QLM enquanto em relação ao diagrama de Bowen as rochas desse maciço encontram-se desloca-

das no sentido da Kaliofilita. Dados da Análise Fatorial foram também analisados mostrando o comportamento anômalo do Na_2O , constituindo uma variável relativamente independente das demais. Os altos teores de elementos traços Zr, Sr, Y, L acompanham os altos índices agpaíticos dominantes, ao mesmo tempo que mostram um empobrecimento em Ni, Co, Cr.

As intrusões alcalinas de Iporá foram consideradas no estudo da "Província" Rio Verde-Iporá mostrando, em linhas gerais, uma composição bem variada para esse grupo de rochas, com posição esta manifestada através das composições modais, normativas, Índice de Diferenciação, Diagrama Si/R e $\text{SiO}_2/\text{Alk}_2$, QLM e outros. A Análise Fatorial revelou uma composição das variáveis bem coerente, com forte correlação positiva entre SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O e K_2O .

A "Província" do Arco de Ponta Grossa foi considerada de acordo com os seus limites atuais, sendo considerados para análise dos dados, aqueles pertinentes principalmente aos Maciços de Tunas, Itapirapuã, Jacupiranga e Juquiá. A análise dos dados evidenciaram três campos composicionais para as rochas da província: a) Itapirapuã; b) Tunas; c) Maciços ultramáfico-alcalinos (Juquiá e Jacupiranga). O comportamento diferencial dos Maciços de Tunas e Itapirapuã manifesta-se em quase todos os gráficos derivados de análises químicas e normativas, além da Análise Fatorial. Neste último gráfico verifica-se uma alta correlação positiva do Al_2O_3 com SiO_2 e K_2O em Itapirapuã, enquanto em Tunas o Al_2O_3 apresenta alta correlação positiva com CaO, MgO e Fe_{tot} . Em relação às razões $\text{Na}_2\text{O}/\text{Alk}_2$, o comportamento diferente destes dois maciços é também muito claro mostrando provavelmente diferentes espessuras de crosta atravessadas pelo magma ao atingir a superfície. É válido portanto pesquisar o significado dessa diferenciação químico-petrográfica, devido ao posicionamento tectônico bem próximo destes dois maciços.

Foram acrescentadas poucas informações à Província de Ipanema devido ao número incipiente de amostras na literatura.

tura embora tenha sido chamada atenção para o seu caráter peralcalino e metaluminoso, com altos índices agpaíticos.

Quanto à "Província" Serra do Mar foram sintetizadas as características petrográficas principais das rochas da Província, acentuando o seu caráter félsico e analisando os vários campos composicionais, desde supersaturado (Itatiaia, Ilha de Búzios) a insaturado (São Sebastião, Monte do Trigo, Itatiaia). Foram também delimitados os vários campos composicionais dos diferenciados siálicos mostrando a relativa independência dos Maciços de São Sebastião e Itatiaia e o comportamento dos diferenciados finais caindo no Vale Térmico de Bowen. Os gráficos da Análise Fatorial mostraram um campo normal das variáveis, com altas correlações positivas entre SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O e K_2O .

Os vários mecanismos de formação das rochas alcalinas foram discutidos com base em dados experimentais e hipóteses petrogenéticas definidas, discorrendo sobre as grandes associações petrográficas e a sua repetição no tempo e no espaço e a gênese dessas principais associações. Desse modo, foi reforçado o papel da cristalização fracionada na formação de rochas alcalinas e o caráter do Magma Parental. Nesse sentido, foi considerado o magma parental básico e então integradas as informações referentes ao Magmatismo do Brasil Meridional, mostrando a não existência de basaltos tipicamente alcalinos mas apenas enormes massas de basaltos toleíticos, eventualmente com olivina na norma CIPW, embora sejam tectonicamente relacionados ao magmatismo alcalino. Os campos composicionais destes basaltos e rochas alcalinas foram então formalizados e demarcados nos vários gráficos e Diagramas de Variação.

Outro aspecto importante relacionado com a cristalização fracionada refere-se à lacuna composicional na margem de Índice de Diferenciação, entre 65 - 70% e SiO_2 entre 53 - 57%. Com relação à Província Magmática do Brasil Meridional foram traçados histogramas e analisados os mínimos aparentes, estabelecendo significado petrológico relativo aos mesmos.

Quanto às associações alcalinas siálicas foi analisada a coexistência das fases supersaturadas e insaturadas do I tat ia ia e o posicionamento dos diferenciados no Triângulo QNe Kp mostrando que as pressões dos voláteis têm efeito na composição destes e ainda que a composição do feldspato alcalino controla o caminho do fracionamento dos magmas. Nesse sentido as rochas dos Maciços de Itapirapuã e Poços de Caldas apresentam-se deslocadas em relação à área experimental de Bowen.

Foram ainda discutidas as várias teorias petrogenéticas relativas à diferenciação magmática nos vários níveis das câmaras e quanto às rochas agpaíticas (caso específico do Maciço de Poços de Caldas), foi questionado se o seu grau de peralcalinidade poderia ter sido alcançado pelos líquidos residuais mostrando que pode este magma estar relacionado com o miasquítico. A incompatibilidade entre agpaito e carbonatito foi também considerada e explicada como devido à atuação do CO_2 nos líquidos.

Quanto às associações ultramáfico-alcalinas foi interpretada como proveniente do magma também desta natureza, rico em voláteis, mostrando que a atuação dos elementos móveis, como CO_2 e H_2O , controla o tipo e a evolução deste. A presença do CO_2 nesse tipo de magma é evidente e é demonstrada pelas associações das rochas desta associação com os carbonatitos, caso especificamente referido aos Maciços de Juquiá e Jacupiranga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHRENS, L.H. - 1953 - A fundamental law of geochemistry. *Nature*, 172(4390):1148.
- AHRENS, L.H. - 1954a - The lognormal distribution of the elements. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 5:49-73.
- AHRENS, L.H. - 1954b - The lognormal distribution of the elements (2). *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 6:121-131.
- AHRENS, L.H. - 1957 - Lognormal Distributions, III. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 11:205-212.
- AHRENS, L.H. - 1963a - Lognormal Type distributions, III. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 27:333-343.
- AHRENS, L.H. - 1963b - Lognormal Type distributions in igneous rocks, 27:877-890.
- AHRENS, L.H. - 1963c - Element distributions in igneous rocks - VI. Negative Skewness of SiO_2 and K, 27:929-938.
- AHRENS, L.H. - 1964 - Element distribution in igneous rocks - VII (A reconnaissance survey of the distribution of SiO_2 in granitic and basaltic rocks). *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 28:71-110.
- AHRENS, L.H. - 1966 - Element distributions in specific igneous rocks - VIII. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 30:109-122.
- ALMEIDA, E.B.de - 1977 - Geology of bauxite deposits of the Poços de Caldas District, State of Minas Gerais, Brazil. Ph.D. Dissertation. University of Stanford. 273p.

- ALMEIDA, F.F.M.de - 1961 - Geologia e Petrologia da Ilha de Trinde, Brazil. Div.Geol.Miner., Monogr., 18:1-107.
- ALMEIDA, F.F.M.de - 1967 - Origem e evolução da plataforma brasileira. Bol.Div.Geol.Min., 241, 36p., Rio de Janeiro.
- ALMEIDA, F.F.M.de - 1969 - Diferenciação tectônica da plataforma brasileira. An. XXIII Congr.Bras.Geol., 23:29-46, Salvador.
- ALMEIDA, F.F.M.de - 1971 - Condicionamento tectônico do magmatismo alcalino mesozóico do Sul do Brasil e do Paraguai Oriental. An.Acad.brasil.Ciênc., 43:835-836.
- ALMEIDA, F.F.M.de - 1976 - The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil. An.Acad.brasil.Ciênc., Supplement, 48:15-26.
- ALMEIDA, F.F.M.de - 1980 - Tectônica da Bacia do Paraná no Brasil. São Paulo, IPT, 187. (Relatório IPT, 14091, Paulipetro).
- ALMEIDA, F.F.M.de - 1983 - Relações tectônicas das Rochas Alcalinas Mesozóicas da Região Meridional da Plataforma Sul-Americana. Rev.Bras.Geoc., 13(3):139-158.
- AMARAL, G.; CORDANI, U.G.; KAWASHITA, K.; REYNOLDS, J.H. - 1966 - Potassium-argon dates of basaltic rocks from southern Brazil. Geochim.et Cosmochim., Acta, 30:159-189.
- AMARAL, G. - 1967 - Programa para cálculos petroquímicos (Norma e Valores de Niggli) em computador. An. XXI Congr.Bras.Geol., 113-118, Curitiba.
- AMARAL, G.; BUSHEE, J.; CORDANI, U.G.; KAWASHITA, K.; REYNOLDS, J.H. - 1967 - Potassium-argon ages of alkaline rocks from the southern Brazil. Geochim.et Cosmochim., Acta, 31:117-142.

- AMARAL, G. - 1978 - Potassium-argon age studies on the Jacupiranga Alkaline District, State of São Paulo, Brazil. Anais do I Simpósio Internacional de Carbonatitos, Poços de Caldas, Brasil, 257-302.
- AUBREY, K.V. - 1956 - Frequency distributions of elements in igneous rocks. Geochim. et Cosmochim., Acta, 9:83-89.
- BAILEY, D.K. e SCHAIRER, J.F. - 1966 - The system $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ at 1 atm and the petrogenesis of alkaline rocks. J. Petrol., 7:14-170.
- BAILEY, D.K. - 1974a - Continental rifting and alkaline magmatism. In: Sorensen, H. (ed.) The Alkaline Rocks, Wiley, N.Y., 148-159.
- BAILEY, D.K. - 1974b - Nephelinites and ijolites. Ibid, 53-66.
- BARBOSA, O. - 1933 - Eruptivas de Lajes, Santa Catarina. Série Geol. e Min. do Min. de Agric., Bol., 69:15-18, Rio de Janeiro.
- BETTENCOURT, T.S. e LANDIM, P.M.B. - 1974 - Estudo Geoquímico de Óxidos e Elementos Traços de Rochas Calcárias do Grupo Açungui pela Análise Fatorial. An. XVIII Congr. Bras. Geol., 2:153-160, Porto Alegre.
- BJORNBERG, A.J.S. e ELLERT, R. - 1955 - Observações geológicas sobre a Ilha de Búzios. An. Acad. brasil. Ciênc., 27(2):169-182.
- BORLEY, G.D. - 1974 - Oceanic islands. In: Sorensen, H. (ed.) The Alkaline rocks, Wiley, N.Y., 206-220.
- BORN, H. - 1971a - Complexo alcalino de Juquiã. An. XXV Congr. Bras. Geol., 1:223-225, São Paulo.
- BORN, H. - 1971b - O Complexo Alcalino de Juquiã. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, USP. 176p.

- BORODIN, L.S. e PAVLENKO, A.S. - 1974 - The role of metasomatic process in the formation of alkaline rocks. In: Sorensen, H. (ed.) The Alkaline Rocks, John Wiley, N.Y., 515-534.
- BOWDEN, P. e TURNER, D.C. - 1974 - Peralkaline and associated ring-complexes in the Nigeria Niger Province, West Africa. In: Sorensen, H. (ed.) The Alkaline Rocks, Wiley, N.Y., 331-351.
- BOWEN, N.L. - 1937 - Recent High Temperature Research on Silicates and its significance in Igneous Geology. Am.Jour.of Sci., 233-234:1-21.
- BROTZEN, O. - 1975 - Analysis of Multivariate Point Distributions and Chemical Grouping of Rocks. Math.Geol., 7(3):191-214.
- BURRI, J.R. - 1964 - Petrochemical Calculations: based on equivalents (Methods of Paul Niggli). Jerusalem, Israel. Program for Scientific Translations, 304p.
- BUSHEE, J. - 1974 - Potassium-argon ages of some alkaline rocks from southern Brazil. Ph.D.Dissertation, University of California at Berkeley. 145p.
- BUTAKOVA, F.L. - 1974 - Regional distribution and tectonics of the alkaline rocks of Siberia. In: Sorensen, H. (ed.). The Alkaline Rocks, Wiley, N.Y., 172-183.
- CARMICHAEL, I.S.E.; TURNER, F.J.; VERHOOGEN, J. - 1974 - Igneous Petrology. McGraw Hill, N.Y., 739.
- CAVALCANTE, J.C. et al. - 1979 - Projeto Sapucaí. Relatório Final, Brasília, DNPM, 292p. (série Geologia, 5. Sec.Geol.Básica, nº 2).
- CHAYES, F. - 1963 - Relative abundance of intermediate members of oceanic members of oceanic basaltic-trachyte association. J. Geol.Res., 68(5):1519-1534.

- CHAYES, F. - 1964 - Variance-covariance relations in some published Harker diagrams of volcanic suites. *J.Petrol.*, 5:219-237.
- CHAYES, F. e KRUSKAL, W. - 1966 - An Approximate Statistical Test for Correlation Between proportions. *Journ.Geol.*, 74:692-702.
- COOMBS, D.S. e WILKINSON, J.F.G. - 1969 - Volcanic lineags and fractionnation trends in some undersaturated volcanic rocks and shallow intrusives from the East Otago Volcanic Province (New Zealand) and related rocks. *J.Petrol.*, 10:440-501.
- COUTINHO, J.M.V. e MELCHER, G.C. - 1973 - Levantamento Geológico e Petrográfico da Ilha de Monte do Trigo (Litoral norte de São Paulo, Brasil). *Rev.Bras.Geol.*, 3:243-256.
- DANNI, J.C.M. - 1974 - Géologie des complexes ultrabasiques alcalins de la Région d'Iporá, Goiás, Brésil. D.Sc.Thesis, Université de Paris-Sud, Centre d'Orsay (unpublished)
- DAVINO, A. - 1976 - Estudos geológicos e geofísicos da Serra de A raçoaba e arredores. *An.Acad.brasil.Ciênc.*, 48(3):531-545.
- DAVIS, J.C. - 1973 - Statistics and Data Analysis in Geology. Wiley Internat.Edition, N.Y. 550p.
- EDGAR, A.G. - 1974 - Experimental Studies. In: Sorensen, H.(ed.) The Alkaline Rocks. John Wiley, N.Y., 355-389.
- ELLERT, R. - 1959 - Contribuição à geologia do maciço alcalino de Poços de Caldas. *Bol.Fac.Fil.Ciênc.Letras, Univ.de São Paulo, SP*, 237:5-63. (Geol.18).
- FAIRBAIRN, H.W. - 1951 - A cooperative investigation of precision and accurance in Chemical Spectrochemical Survey, Bull. 980p.
- FERMOR, L.L. - 1934 - On the chemical composition of the Deccan trap flows of Cinga. *Indian Geol.Survey Rec.*, 68:355.

- FERREIRA, F.J.F. - 1983 - Alinhamentos estruturais magnéticos da região centro-ocidental da Bacia do Paraná e seu significado tectônico. IPT, 143-166, Publ. nº 1217, São Paulo.
- FREITAS, R.O. - 1947a - Eruptivas Alcalinas de Cananéia. Bol.Fac. Fil.Ciênc.Letras, 91, Geologia 4.
- FREITAS, R.O. - 1947b - Geologia e Petrologia da Ilha de São Sebastião. Bol.Fac.Fil.Ciênc.Letras, 85, Geologia 3.
- FUCK, M.A. - 1972 - Geologia do Maciço Alcalino de Tunas, Paraná, Brasil. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, USP. (não publicada).
- FÚLFARO, U.J.; SAAD, A.R.; SANTOS, M.V.; VIANNA, R.B. - 1982 - Compartimentação e evolução tectônica da Bacia do Paraná. Rev. Bras.Geoc., 12(4): 490-561.
- GERASIMOVSKY, V.I.; VOLKOV, V.P.; KOGARKO, L.M.; POLYANOV, A. I. - 1974 - Kola Peninsula. In: Sorensen, H. (ed.). The Alkaline Rocks, Wiley, N.Y., 206-220.
- GOMES, C.B. - 1967 - Petrologia do Maciço Alcalino de Itapirapuã, SP. Tese de Doutorado, IGUSP. 167p.
- GOMES, C.B. e DUTRA, C.V. - 1970 - Some Geochemical features of the alkaline rocks of Itapirapuã, SP. An.Acad.brasil.Ciênc., 42(3):531-534.
- GREEN, J. e POLDERVAART, A. - 1955 - Some basaltic provinces. Geochim.et Cosmochim., Acta, 7:177-188.
- GREEN, J. e POLDERVAART, A. - 1958 - Petrochemical fields and trends. Geochim.et Cosmochim., Acta, 13:87-122.
- GREEN, D.H. - 1969 - The origin of basaltic and nephelinic magmas in the earth's mantle.

- GREEN, D.H. e RINGWOOD, E.A. - 1967 - The genesis of basaltic magmas. *Contr.Mineral.Petrology*, 15:103-190.
- GRIFFITHS, J.C. - 1974a - Problem of Sampling in geoscience. *Geol. Min.and Metall.Sampling - Proc.Inst.Min.Metall.*
- GRIFFITHS, J.C. - 1974b - Operator variation in experimental research. *Journ.of Geol.*, 62(1):74-91.
- GUIMARÃES, D. - 1960 - Fundamentos das rochas ígneas do Brasil. *Div.Fom.Prod.Min.*, *Bol.*, 107:1-410.
- GUIMARÃES, D. e DUTRA, C.V. - 1962 - Contribuição à geoquímica das rochas alcalinas do Brasil. *DNPM-DFPM*, *Bol.*, 112:45-76.
- GUIMARÃES, G.; GLASER, I.; MARQUES, V.J. - 1968 - Sobre a ocorrência de rochas alcalinas na região de Iporá, Goiás. *Min. Met.*, Rio de Janeiro, 48(283):11-15.
- HARDER, E.C. - 1952 - Exemple of bauxite deposits illustrating variations in origin, in Symposium on problems of clay and laterite genesis. *Am.Inst.Min.Metall.Eng.*, New York, 35-65.
- HARRIS, P.G. - 1957 - Zone refining and the origin of potassic basalts. *Geochim.et Cosmochim.*, *Acta*, 12:195-208.
- HARRIS, P.G. e BAILEY, D.K. - 1974 - Origin of alkaline magmas as a result of anatexis. In: Sorensen, H. (ed.). *The Alkaline Rocks*, John Wiley, N.Y., 427-442.
- HEINRICH, E.W. - 1966 - The geology of carbonatites. Rand McNally & Co., Chicago, USA.
- HENNIES, W.T. e HASUI, Y. - 1968a - Geocronologia das rochas eruptivas alcalinas da Ilha de São Sebastião. *An. XXII Congr.Bras. Geol.*, 145-148, Belo Horizonte.

- HENNIES, W.T. - 1968b - Tabelas de Análises Químicas de rochas. (não publicado).
- HERZ, N. e DUTRA, C.V. - 1960 - Minor element abundance in a part of the Brazilian Shield. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 21:81-98.
- HERZ, N. - 1977 - Timing of spreading in the South Atlantic. Information from Brazilian Alkaline rocks. *Geol. Soc. of Am. Bull.*, 88:101-112.
- HUBAUX, - 1971 - Scheme for a Quick Description of Rocks. *Math. Geology*, 3(3):317-320.
- IMBRIE, J. e PURDY, E.G. - 1962 - Classification of modern Bahamian carbonate sediments. *Memoir of the American Association of Petroleum Geologists*, Tulsa, Okla.
- IMBRIE, J. - 1964 - Factor Analysis Model in Paleoecology. John Wiley and Sons, New York. 432p.
- ISNARD, P.; MALLET, J.L.; CAZES, P.; SATTRAN, L. - 1972 - Correlation Géologiques des Données. In: Laffitte (ed.), Manson et Cie, 379-533.
- JOHANNSEN, A. - 1938 - A descriptive petrography of the igneous rocks. Vol. I, Univ. Chicago Press, Chicago.
- JUNG, J. e BROUSSE, R. - 1959 - Classification modale des rochas éruptives. Ed. Masson et Cie. 120p.
- KAWABE, I. - 1977 - A Stochastic Model of Fractional Crystallization and its Application to the Japanese Geosynclinal Basalt. *Math. Geol.*, 9(1):39-53.
- KENNEDY, W.G. - 1934 - Trends of differentiation in basaltic magmas. *Amer. J. Sci.*, 25:239-256.

- KLOVAN, J.E. - 1966 - Rand Q-mode Factor Analysis in Concepts in Geoestistics. Springer-Verlag. Edited by R.B. Mc Cammeron.
- KOCH Jr., G.S. e LINK, R.F. - 1971 - Statistical Analysis of Geological Data. Wiley, N.Y., vol. 1 e 2.
- KOGARKO, L.N. - 1974 - Role of volatiles. In: Sorensen, H. (ed.) John Wiley, N.Y., 474-485.
- KRAUSKOPF, K.B. - 1968 - A Tale of Ten Plutons. In: Claud, P. (ed.) Adventures in Earth History, W.H. Freeman and Company, 54-70.
- KRUMBEIN, W.C. e SLACK, A. - 1956 - Statistical Analysis of low level radioactivity of Pennsylvanian Black fissile shale in Illinois. Bull. of the Geol. Soc. of America, 67:739-762.
- KRUMBEIN, W.C. e TUKEI, J.W. - 1962 - Multivariate Analysis. Journ. of Sedim. Petrology, 26(4):322-337.
- KRUMBEIN, W.C. e GRAYBILL, W.A. - 1965 - An Introduction to Statistical Models in Geology. New York, McGraw Hill. 475p.
- KUNO, H. - 1950 - Petrology of Hakone and the adjacent areas, Japan. Geol. Soc. America Bull., 61:957-1020.
- KUNO, H. - 1968 - Differentiation of basalt magmas. In: Hesse, H.H. and Poldervaart, A. Eds. Basalts: The Poldervaart Treatise on Rocks of Basaltic Composition, 2:623-688, Intersciences, N.Y.
- LACROIX, A. - 1928 - La constitution lithologique des Iles volcaniques de La Polynésie Australienne. Acad. Sci. Paris Mém., 59:1-82.
- LAFITTE, P. - 1972 - Traité d'informatique géologique. Paris, Masson.
- LANDIM, P.M.B. e FRANKS, L.A. - 1968 - Distinction between tills and other diamictites based on textural characteristics. Journ. of Sed. Petrology, 38(4):1213-1223.

LARSEN, E.S. - 1948 - Batholith of Southern California. Geol.Soc. America Mem., 29:203-204.

LEINZ, V. - 1940 - Petrologia das jazidas de apatita de Ipanema. Bol.DNPM-DFPM, 40(88):1-52.

LEPELTELIER, C. - 1969 - A simplified statistical treatment of Geochimical Data by Graphical Representation. Econ.Geology, 64:538-550.

LOUREIRO, F.E.L. e VALDERANO, M.H.W. - 1982 - A província alcalina carbonática Brasil-Angola e seus principais aspectos econômicos. An. XXXII Congr.Bras.Geol., 1049-1060, Salvador.

Mac DONALD, G.A. - 1949 - Petrography of the islands of Hawaii. U. S.Geol.Survey Prof.Paper, 214-D:74, nº 2.

Mac DONALD, G.A. e KATSURA, T. - 1964 - Chemical composition of Hawaiian lavas. J.Petrol., 51:82-133.

Mac DONALD, R. - 1974 - The role of fractional crystallization. In: Sorensen, H. (ed.), John Wiley, N.Y., 422-459.

MACEDO, A.B. e RUEGG, N.R. - 1974a - Aplicação da análise fatorial ao estudo de elementos principais nas rochas basálticas da Bacia do Paraná. An. XXVIII Congr.Bras.Geol., 7:143-151, Porto Alegre.

MACEDO, A.B. e RUEGG, N.R. - 1974b - A variação de elementos traços nas rochas basálticas da Bacia do Paraná estudada por meio da análise fatorial. An. XXVIII Congr.Bras.Geol., 7:49-56, Porto Alegre.

MACEDO, A.B. - 1979 - Estudo Estatístico das Relações entre Elementos Principais e Traços em rochas basálticas da Bacia do Paraná. Ms.Tese, Instituto de Geociências, USP. 170p.

- MANSON, V. e IMBRIE, J. - 1964 - Fortran program for factor and vector analysis of geologic data using an IBM 7090 or 7094/1401 computer system. Kansas Geol.Survey Spec.Dist., Pub. 13, 46p.
- MANSON, V. - 1967 - Geochemistry of basaltic rocks major elements In: Hess, H.H. Basalts, the Poldervaart Treatise on rocks of basaltic composition, New York, Interscience, v.1:211-265.
- MARTIN, H. - 1978 - Upper mantle and the evolution of the Parná and Karoos basin. An.Acad.brasil.Ciênc., 40(supl.):149-157.
- McINTIRE, W.L. - 1963 - Trace element partition coefficients - a review of theory and applications to geology. Geochim.et Cosmochim., Acta, 27:1209-1264.
- McINTIRE, D.B. - 1969 - Introduction to the study of data matrices. In: Fernner, P. (ed.) Models of geologic processes. Washington, American Geological Institute.
- MELCHER, G.C. - 1954 - Nota sobre o distrito alcalino de Jacupiranga, São Paulo, Brazil. Div.Geologia, Notas Prel., nº 84, 20p.
- MELCHER, G.C. - 1965a - O Carbonatito de Jacupiranga. Bol.FacFil. Ciênc.Letras, Bol. 282, Geologia, 21:1-73, USP.
- MELCHER, G.C. - 1966a - Mineralizações associadas aos sienitos nefelínicos e carbonatitos. SEDEGEO, Vol.Especial, CAEG, 11-36, Porto Alegre.
- MELCHER, G.C. e COUTINHO, J.M.V. - 1966b - Alcalinas e Carbonatito de Anitápolis. Bol.Soc.Bras.Geol., 15:59-93.
- MERTIE, J.B. - 1961 - Analytical classification and quadriplanar charting of analysis with nine or more components. Am.Mineralogist, 46:613-628.

- MIESCH, A.T. - 1967a - Effects of sampling and analytical error in geochemical prospecting in Press, G.A., Stanford Univ, Pubs. Geol.Sci., 9(1):156-170.
- MIESCH, A.T. - 1967b - Statistical Studies in field geochemistry Geological Survey Professional Paper. A classification of geochemical error and discussion of their effects in data interpretation. In: United States Government printing office. Washington.
- MIESCH, A.T. - 1969 - Critical Review of Some Multivariate Procedures in the Analysis of geochemical Data. Math.Geol., 1(2): 171-184.
- MILLER, R.L. e GOLDBERG, E.D. - 1955 - The normal distribution in geochemistry. Geochim.et Cosmochim., Acta, 8:53-62.
- MONIZ, A.C. - 1969 - Estudo Mineralógico de argilas do maciço alcalino de Poços de Caldas, MG-SP: nota preliminar. Bol.Mineralógico, 6:31-40, Recife.
- NAREBSKI, W. - 1974 - A statistical study of specific petrochemical features of some spilitic series. In: Spilites and spilitic rocks. Springer-Verlag, Berlin, 127-159.
- NIGGLI, P. - 1943 - Gesteinschemismus und Mineralchemismus, II. Die Pyroxene der magmatischen Verstarung, Schweiz.Min.Petr.Mitt., 23:538-607.
- NOCKOLDS, S.R. - 1954 - Average chemical compositions of some igneous rocks. Bull.of the Geol.Soc.of Am., 65:1007-1032.
- NOCKOLDS, S.R. e ALLEN, R. - 1954 - The geochemistry of some igneous rocks series: Part II. Geochim.et Cosmochim., Acta, 5: 245-285.

- OLSON, L.S. e POTTER, P.E. - 1954 - Variance components of cross bedding direction in some basal Pennsylvanian sandstone of the eastern interior basin: statistical methods. Journ.of Geol., 62(1):56-73.
- PARSLOW, G.R. - 1974 - Determination of Background and threshold in Exploration Geochemistry. Journ.of Geoch., Exploration, 3: 319-336.
- PAVLENKO, A.S. - 1974 - The Mongol-Tuva Province of alkaline rocks. In: Sorensen, H. (ed.) The Alkaline Rocks. John Wiley, N.Y., 171-293.
- PEARCE, T.H. - 1968 - A Contribution to the theory of Variation Diagram.Contr.Mineral.and Petrol., 19:142-157.
- PHILPOTTS, A.R. - 1974 - The Monteregeian Provinces. In: Sorensen, H. (ed.) The Alkaline Rocks. John Wiley, N.Y., 293-310.
- PODOL'SKY, Y.V. - 1975 - Variation of Chemical Composition of Alkaline Granitic Rocks in the Central Part of the Kola Peninsula. Math.Geol., 7(3):215-236.
- POTTER, P.E. e OLSON, J.S. - 1965 - Variance components of cross-bedding direction in some basal Pennsylvanian sandstones of the eastern interior basin. Journ.Geol., 63:429-451.
- PRINZ, M. - 1967 - Geochemistry of Basaltic Rocks: trace elements. In: Hesse, H.H. Basalts, the Poldervaart Treatise on rocks of basaltic composition. New York, Interscience, 1:271-323.
- REYMENT, R.A. e NEUFVILLE, E.M.H. - 1974 - Multivariate Analysis of Populations Split by Continental Drift. Math.Geol., 6(2): 173-181.
- RIBEIRO FILHO, E. - 1967 - Maciços de Itatiaia e Passa Quatro. Bol.Fac.Fil.Ciênc.Letras, Geologia, 22:5-93.

- ROOKE, - 1963 - Element distribution in some solid igneous rocks of Africa. *Geochim. et Cosmochim., Acta*, 23:1187-1197.
- RUEGG, N. - 1969 - Aspectos geoquímicos, mineralógicos e petrográficos de rochas basálticas da Bacia do Paraná. Tese de Doutorado, Fac.Fil.Ciênc.Letras, USP. 172p.
- RUEGG, N.R. - 1975a - Modelos de variação química na província basáltica do Brasil Meridional. Tese de Livre Docência. Inst. Geoc., USP, 2v., 309p. (inédito)
- RUEGG, N.R. - 1975b - Natureza serial do magmatismo basáltico da Bacia do Paraná. *Naturalia*, Fac.Fil.Ciênc.Letras, São José do Rio Preto, SP, 1:141-152.
- RUEGG, N.R. - 1975b - Características de distribuição e teor de elementos principais em rochas basálticas da Bacia do Paraná. *Bol.IG, Inst.Geoc., USP*, 7:81-106.
- RUEGG, N.R. - 1976b - Características de distribuição e teor de elementos traços dosados em rochas basálticas da Bacia do Paraná. *Naturalia*, Inst.Bioc.Letras e Ciênc.Exatas, S.J.Rio Preto, SP, 2:23-45.
- SAHA, A.K. e RAO, S.V.L. - 1971 - Quantitative Discrimination Between Magmatic Units of the Singhbhum Granite. *Math.Geol.*, 3(2): 123-133.
- SCHEYNMANN, Y.M.; APEL'TSIN, F.R.; NECHAYEVA, Y.A. - 1961 - Alkaline intrusion, their mode of occurrence and associated mineralization. 177p. Moscou (Revisão comentada em inglês por *Internat.Rev.*, 5:451-457.
- SHAW, D.M. - 1961 - Element distribution laws in geochemistry. *Geochim. et Cosmochim., Acta*, 23:116-134.

- SHAW, D.M. - 1964 - Interpretation géochimique des elements et traces dans les roches cristallines. Paris, Masson.
- SINCLAIR, A.J. - 1974 - Selection of threshold values in geochemical Data using probability graphics. Journ.of Geoch.Exploration, 3:129-149.
- SIZE, W.B. - 1973 - Interpretation of Factor Analysis on Modal Data from the Red Hill Syenitic Complex. Math.Geol., 5(2): 191-197.
- SOARES, R.M.C. - 1984 - Aplicação de algumas técnicas estatísticas multivariantes em petrografia. Exame de Qualificação, Tema II, Inst.Geoc., USP. 42p.
- SOKAL, R.R. e SNEATH, P.H. - 1963 - Principles of Numerical Taxonomy. London and S.Francisco Freeman. 359p.
- SORENSEN, H. - 1974a - Akali syenites, feldspathoidal syenites and related lavas. In: Sorensen, H. (ed.) The Alkaline Rocks, John Wiley, N.Y., 22-52.
- SORENSEN, H. - 1974b - Glossary of alkaline and related rocks. In: Sorensen, H. (ed.) The Alkaline Rocks, Wiley, N.Y., 558-577.
- SORENSEN, H. - 1974c - Origin of the Alkaline Rocks. Summary and Retrospect. In: Sorensen, H. (ed.) The Alkaline Rocks, John Wiley, N.Y., 535-539.
- SORENSEN, H. - 1974d - Alkaline Province, Introduction. In: Sorensen, H. (ed.) The Alkaline Rocks, Wiley, N.Y., 205-206.
- SOUZA, A.M. - 1978 - Mineralogia e petrologia de complexo ultramáfico e alcalino de Santa Fé, Goiás. Ms.Tese, Universidade Federal do Pará, 122p.

- STRECKEISEN, A. - 1967 - Classification and nomenclature of igneous rocks. N.Jb.Miner.Abh., 107(2):144-214.
- SUSLICK, S.B. - 1978 - Estudo Metodológico de Técnicas Estatísticas para análise de dados geoquímicos. Ms.Tese, Instituto de Geociências, USP. 116p.
- THORNTON, C.P. e TUTTLE, O.F. - 1960 - Chemistry of igneous rocks, Differentiation Index. Am.J.Sci., 258:664-684.
- TURNER, F.J. e VERHOOGEN, J. - 1960 - Igneous and Metamorphic Petrology. Mc Graw Hill, New York.
- UPTON, B.G.J. - 1974 - The alkaline province of South-West Greenland. In: Sorensen, H. (ed.) The Alkaline Rocks, John Wiley, N.Y., 221-237.
- ULBRICH, H.H.G.T.; ULBRICH, M.N.L.; KAHN, H.; ULACH, S.; BAGNOLI, E. - 1979 - Estrutura e petrologia dos nefelina sienitos do maciço alcalino de Poços de Caldas, MG-SP. (unpublished)
- ULBRICH, H.H.G.T. e GOMES, C.B. - 1981 - Alkaline rocks from Continental Brazil. Earth Sci.Rev., 17:135-154.
- ULBRICH, M.N.C. - 1982 - Petrologia das associações alcalinas características: máficas, ultramáficas, perpotássicas, sieníticas e graníticas. Exame de Qualificação, Tema III. 59p.
- VISTELIUS, A.B. - 1960a - The skew frequency distribution and fundamental law of the geochemistry process. Journ.of Geol., 68(1):1-122.
- VISTELIUS, A.B. - 1960b - On the origin of Variation in the Composition of Granitic Rocks of Chile and Bolivia. Math.Geol., 1(2):113-114.

- VISTELIUS, A.B. e SARMANOV, V. - 1961 - On the correlation in ferromagnesian micas. *J.Geol.*, 69:145-153.
- VISTELIUS, A.B. - 1970a - Some lessons of the G-1 e W-1. *Math. Geology*, 3(3):323-326.
- VISTELIUS, A.B. - 1970b - Statistical Model of Silicate Analysis and Results of Investigation of G-1 and W-1 samples. *Math.Geol.*, 2(1):1-14.
- VISTELIUS, A.B.; IVANOV, D.N.; KURODA, Y.; RUIZ FULLER, C. - 1970c - Variation of Modal Composition of Granitic Rocks in Some Regions Around the Pacif. *Math.Geol.*, 2(1):63-80.
- WALKER, F. - 1930 - The crinanite sills of the Shiant Isles. *Geol. Soc.London Quat.Journ.*, 86:388-390.
- WASHINGTON, S. - 1917 - Chemical Analysis of igneous rocks published from 1884 to 1913, inclusive: *U.S.Geol.Survey Prof.Paper*, 99. 1201p.
- WILKINSON, J.F.G. - 1974 - The mineralogy and petrography of alkaline basaltic rocks. In: Sorensen, H. (ed.) *The Alkaline Rocks*, John Wiley, N.Y., 87-95.
- WIMMENAUER, W. - 1974 - The alkaline province of Central Europe and France. In: Sorensen, H. (ed.) *John Wiley, N.Y.*, 238-170.
- WYLLIE, P.J. - 1963 - Effects of the changes of slope in liquidus and solidus paths in the system diopside - anorthite - albite. *Min.Soc.Am.Spec.paper*, 1:204-212.
- YAMAMOTO, J.K.; GOULART, E.P.; HASUI, Y. - 1980 - Análise Estatística dos Dados Químicos Complexo Alcalino de Anitápolis, SC. *An. XXXI Congr.Bras.Geol.*, 2:1272-1283.

YODER, H.S. e TILLEY, C.E. - 1962 - Origin of basalt magma: an
experimental study of natural and synthetic rock system. J. Pe
trol., 3:342-352.