

CAPÍTULO 1

ASPECTOS GERAIS DOS CARBONATITOS

C. B. Gomes

Resumo

Este capítulo busca oferecer informações sobre a evolução histórica do conceito de carbonatitos e as controvérsias iniciais que caracterizaram a definição e a aceitação do termo. Objetiva também discutir os critérios gerais empregados na classificação dessas rochas, sendo o de natureza química o mais difundido internacionalmente.

1.1. Introdução

Carbonatitos começaram a ganhar destaque na literatura internacional no século XX, quando rochas carbonáticas presentes em distritos alcalinos passaram a ser interpretadas como sendo de origem magmática, endossando, assim, opinião há muito emitida por Brøgger (1921) — tido na literatura como o grande mentor dessa hipótese —, em seus estudos sobre a geologia e a petrologia do complexo carbonatítico de Fen, na Noruega. Ali, Brøgger definiu e usou o termo carbonatito, além de sugerir pela primeira vez a existência de magma carbonatítico, ainda que Högbom (1895) já tivesse, na realidade, descrito muitos anos antes a presença de diques de rochas ígneas com presença significativa de carbonatos nos trabalhos realizados na ilha de Alnö, na costa nordeste da Suécia. Bowen (1924), Daly (1933) e Shand (1943), petrólogos de grande prestígio internacional à época, foram alguns dos pesquisadores que manifestaram maior ceticismo à ousada proposição de considerar os assim chamados “calcários ígneos”, até então vistos como representando megaxenólitos de material sedimentar, como de formação magmática. Os questionamentos à hipótese foram de tal ordem que levaram Johannsen (1939) a deixar de incluir no seu famoso compêndio sobre a descrição das rochas ígneas um dos maiores, senão o maior, livros de referência sobre a sua classificação sistemática na ocasião — os termos *søvito* e *rauhaugito*, respectivamente carbonatitos ricos em cálcio e magnésio, como novos tipos petrográficos magmáticos. Von Eckermann, que iniciou os trabalhos de mapeamento geológico no distrito carbonatítico de Alnö em 1935, interrompidos por ocasião da Segunda Guerra Mundial, publicou em 1948 a sua monografia clássica sobre a ocorrência, tida como a obra com maior riqueza de detalhes em química, petrologia e estrutura produzida desde os estudos de Brøgger (1921) em Fen. O autor não hesitou em chamar os carbonatitos de rochas ígneas e admitir seus magmas como gerados por diferenciação normal em condições de alta pressão de vapor, temperaturas razoavelmente baixas (400-600°C) e grande abundância em álcalis, sobretudo em potássio. Sustentou, ainda, que esses álcalis seriam responsáveis por processos metassomáticos envolvendo fenitização, especialmente das encaixantes regionais, e formação das rochas alcalinas silicáticas associadas. As dúvidas até então reinantes sobre as condições físicas de colocação dos carbonatitos e da viabilidade da existência de magmas carbonatíticos encontraram respostas irrefutáveis nas pesquisas pioneiras de petrologia experimental desenvolvidas por Wyllie e Tuttle (1960a, 1960b, 1962) nos laboratórios da Universidade Estadual da Pensilvânia, nos Estados Unidos. Esses trabalhos revolucionaram os conceitos sobre o tema,

confirmando a possibilidade de formação de magmas carbonatíticos de baixa temperatura e demonstrando que fundidos com grande diversidade composicional são capazes de precipitar calcita em condições variáveis de pressão e temperatura, com os fundidos podendo persistir até temperaturas da ordem de 600°C. Os resultados serviram ainda para colocar um ponto final na mais polêmica teoria vigente à época para a gênese das rochas alcalinas insaturadas em sílica, a de assimilação de calcário, defendida por Shand (1943). A descoberta de lavas carbonatíticas ricas em sódio (*natrocarbonatitos*) no vulcão ativo de Oldoinyo Lengai, na Tanzânia (Guest, 1956; Dawson, 1962), foi um marco de grande importância científica e histórica e – ao lado do enorme progresso alcançado nos estudos baseados principalmente em dados experimentais (p. ex., Koster van Groos e Wyllie, 1963; Gittins e Tuttle, 1964; Bailey e Schairer, 1966, entre outros) e, sobretudo, em geoquímica isotópica (C, O, Sr), nos quais se tornaram evidentes as diferenças de abundância em Sr nas razões desse elemento em carbonatitos e calcários sedimentares – levou à consolidação e à aceitação final da origem magmática para os carbonatitos. Presentemente, sabe-se que a concentração em elementos terras raras (ETR) pode ser utilizada para discriminar entre carbonatos de rochas de origem sedimentar e ígnea. Em geral, o conteúdo de ETR nos carbonatos sedimentares raramente é superior a 200 ppm, enquanto nos carbonatitos varia de 500 a >10000 ppm (Loubet *et al.*, 1972; Eby, 1975; Möller *et al.*, 1980). Mais comprovações sobre a origem magmática viriam com os trabalhos experimentais realizados a partir da década dos 1970 (p. ex., Wyllie e Huang, 1976) e, especialmente, os de Kjarsgaard e Hamilton (1989) sobre o sistema carbonatítico-silicático, comprovando que um líquido carbonatítico pode se separar por imiscibilidade de um fundido silicático enriquecido em CO₂ em determinadas condições de pressão e temperatura. Na mesma ocasião, Gittins (1989), um dos grandes nomes da petrologia moderna, admitiu que os carbonatitos poderiam ser originados por meio de baixo grau de fusão parcial do manto superior. Estudos isotópicos têm confirmado que fontes mantélicas astenosféricas ou litosféricas (ou ambas) exerceram um papel importante na gênese de muitos carbonatitos. Mas, por outro lado, há que se reconhecer, como ressaltado por Bell (1989) e Bell e Blenkinsop (1989), que eles também promoveram alguma confusão nas relações envolvendo carbonatitos e rochas alcalinas associadas. Os dados existentes indicam claramente que carbonatitos podem se derivar das mesmas fontes responsáveis pela formação das alcalinas associadas, mas que nem todas essas rochas silicáticas possuem a mesma origem dos carbonatitos. Os avanços alcançados nos últimos anos com base principalmente em isótopos de Sr-Nd-Pb, no comportamento dos isótopos estáveis, na composição de gases nobres e em trabalhos experimentais sobre equilíbrio de fases têm confirmado, de forma inequívoca, que os carbonatitos são derivados do manto e que não apresentam quase sinais de contaminação pela crosta (Jones *et al.*, 2013). Várias publicações reunindo livros-textos e artigos de revisão sobre a mineralogia, geoquímica e origem dos carbonatitos estão disponíveis na literatura internacional, com destaque, entre eles, para os seguintes: Heinrich (1966), Tuttle e Gittins (1966), Gittins (1989), Bell (1989), Mitchell (2005), Woolley e Church (2005), Woolley e Kjarsgaard (2008) e Jones *et al.* (2013).

Na atualidade, um tema, dentre outros relacionados à gênese dos carbonatitos, vem despertando a atenção dos pesquisadores que se dedicam à petrologia do magmatismo alcalino: a relação entre os carbonatitos e as rochas silicáticas que ocorrem temporal e espacialmente lado a lado em muitos dos complexos conhecidos na literatura. Como é bem estabelecido, carbonatitos são comumente associados a determinadas rochas silicáticas, especialmente aquelas que apresentam pronunciadas afinidades alcalinas, como os nefelinitos, ijolitos, fonolitos e nefelina

sienitos. Woolley e Kjarsgaard (2008) ressaltaram que essa associação é uma das mais abundantes na natureza e tem sido geralmente considerada como indicativa da consanguinidade entre os carbonatitos e as rochas silicáticas associadas¹.

1.2. Definição

Carbonatitos são definidos no sistema de classificação das rochas ígneas da União Internacional de Ciências Geológicas (IUGS, na sigla em inglês) como uma rocha composta por mais de 50% de carbonato modal primário (isto é, magmático) e que possui menos de 20% de SiO₂ (Le Maitre, 2002). Geoquimicamente, eles têm como principais características as altas abundâncias em Sr, Ba, P e ETR (Nelson *et al.*, 1988). Como o sistema acima não tem conotação genética, disso resulta, segundo Mitchell (2005), que o termo acaba por englobar largo espectro de rochas plutônicas ricas em calcita ou dolomita, de veios de calcita formados por processos hidrotermais nos estágios tardios de cristalização de qualquer tipo de magma, de veios de “albita carbonatito” (Garson *et al.*, 1984) ou mesmo de veios tardios em analcima basanitos (Tomkeieff, 1928). Assim, a inclusão de diversos tipos de rochas modalmente similares, mas geneticamente diferentes, dentro do mesmo grupo pode levar a falsas e indesejáveis interpretações petrogenéticas, como já apontado por Mitchell (1979, 1986) para a relação kimberlito-carbonatito-rocha alcalina.

Procurando suprir as deficiências mostradas pela mencionada classificação, Mitchell (1986) definiu carbonatitos como correspondendo a qualquer tipo de rocha que contenha quantidade de carbonato magmático primário arbitrariamente superior a 30%, independentemente do seu teor em sílica. Segundo o autor, com essa nova definição procura-se reconhecer que um magma que forma carbonatito pode gerar, por meio de diferenciação, uma suíte de rochas relacionadas geneticamente nas quais o conteúdo de carbonato varia significativamente. Assim, mais importante que a proporção do mineral é o fato de que a suíte de rochas dele portadora tenha sido derivada do mesmo magma. Outras considerações sobre o item definição dos carbonatitos foram feitas por Mitchell (2005), apontando impropriedades e inconveniências no emprego de certos termos indesejáveis, como “silicocarbonatitos” (Brøgger, 1921; Percora, 1956; Gittins *et al.*, 2005), em que não há especificação da natureza do mineral silicático presente e que poderiam implicar que essas rochas não estão geneticamente ligadas a carbonatitos, quando em realidade elas ocorrem em íntima associação. Situação análoga é mostrada pelos carbonatitos contendo quantidades variáveis de fosfatos e óxidos. Assim, para Mitchell (2005), um dado complexo carbonatítico deve ser entendido como um conjunto de rochas que, embora modalmente diferentes, tenham sido submetidas a uma origem magmática comum. Como consequência, o termo carbonatito pode ser usado como um nome para designar um

1 É comum na literatura a referência a carbonatitos associados a rochas alcalinas silicáticas na pressuposição da existência de relação genética em que os carbonatitos são tidos como derivados de magmas silicáticos por cristalização fracionada ou imiscibilidade líquida, ou então, que ambos os grupos de rochas compartilharam um magma progenitor comum. Essa visão genética, dominante e embasada especialmente em grande número de investigações em petrologia experimental, é questionada por alguns autores (p. ex., Gittins e Harmer, 2003), que entendem ser essa associação mais espacial que de preferência genética, e resultado da presença de dois magmas gerados separadamente que usaram o mesmo sistema de acesso para alcançar a crosta desde os seus sítios de formação no manto. O tema é controverso, e as evidências são, em geral, sugeridas com base em dados de petrologia experimental, relações de campo e estudos isotópicos não excluindo uma ou outra teoria, razão pela qual aqueles autores propuseram para as rochas alcalinas a conveniência do emprego do termo “acompanhando”, que não implica maior comprometimento quanto à gênese, em lugar de “associadas” às rochas carbonatíticas. Esse entendimento, contudo, não é compartilhado por muitos pesquisadores, que têm procurado demonstrar que essa relação não é fortuita e está presente em grande número de ocorrências. O tema será tratado mais adiante no capítulo 5, o das associações petrográficas.

tipo de rocha específico, como também para caracterizar uma suíte de rochas geneticamente relacionadas e que incluem carbonatitos variados.

Do exposto, verifica-se que a tarefa de definição de carbonatitos baseada tão somente em dados mineralógicos apresenta certas limitações, o que tem levado alguns pesquisadores a incluir outros critérios, principalmente os de natureza química, a fim de chegar-se a propostas de definição que sejam menos questionáveis. Como exemplo, cite-se o trabalho de Barker (1996), que procurou relacionar um conjunto de evidências que, embora não conclusivas, uma vez juntas poderiam se constituir em elementos importantes para o trabalho de definição dos carbonatitos. Algumas dessas evidências, e outras mais, foram compiladas por Comin-Chiaramonti *et al.* (2007a) e são mencionadas a seguir:

- 1) informações de campo, traduzidas na forma subcircular/oval ou, ainda, na estrutura anelar de alguns complexos alcalinos, com os carbonatitos ocupando em geral as suas porções centrais;
- 2) associação com rochas silicáticas ricas em melilita e nefelina, e com kimberlitos e fenitos;
- 3) presença de calcita com teores de $\text{SrO} \geq 1\%$ em peso;
- 4) presença de perovskita, pirocloro, fluorocarbonatos de ETR e apatita com altas concentrações em SiO_2 , superiores a 2% em peso;
- 5) enriquecimento em Sr, Ba, Nb, U, Th, P e ETR (com alto fracionamento ETRL vs. ETRP) e empobrecimento em outros elementos (p. ex., K, Rb, Zr, Hf e Ti) em relação ao manto primitivo e crosta continental (Woolley e Kempe, 1989);
- 6) razão inicial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ similar àquela das rochas alcalinas silicáticas associadas (Castorina *et al.*, 1997);
- 7) isótopos estáveis (C-O) no campo dos carbonatitos primários (Taylor *et al.*, 1967; Keller e Hoefs, 1995) ou seguindo tendências de fracionamento isotópico bem distintas (Speziale *et al.*, 1997).

1.3. Classificação

Como é de conhecimento generalizado, a variação expressiva presente na mineralogia e na química dos carbonatitos, fator responsável pelo emprego na literatura de grande diversidade de nomes para designar essas rochas, levanta sérias dúvidas sobre o real significado da apresentação de uma composição média de análises. A proposta sugerida por Streckeisen (1978) baseia-se em concentrações modais dos minerais, com os carbonatitos sendo divididos nos seguintes grupos:

- 1) calcita carbonatito (søvito, com granulação grossa; alvikito, com granulação média a fina);
- 2) dolomita carbonatito (beforsito); e
- 3) ferrocarbonatito (essencialmente composto de minerais ricos em ferro)

Woolley (1982) observou que essa distinção traz, contudo, alguns problemas práticos resultantes dos seguintes fatores:

- 1) presença de pelo menos duas fases carbonáticas na rocha que cresceram conjuntamente e que exibem texturas de exsolução de grande complexidade;
- 2) ankerita, ocorrendo ao lado de calcita e dolomita, é uma espécie mineral muito mal definida e frequente em carbonatitos, com as composições aparentemente pertencendo a uma série completa de solução sólida que inclui dolomita e passa para dolomita com ferro e ankerita, com uma grande variação na razão Fe/Mg;
- 3) embora siderita tenha sido citada como mineral de ferrocarbonatitos, a literatura não conta com análises do mineral, sendo provável que em muitas das rochas investigadas o carbo-

nato seja de fato rico em Fe e que tenha se alterado posteriormente para uma fase menos rica no elemento e com mais óxidos de ferro.

Essas considerações, ainda que pertinentes, não se constituíram, no entanto, em óbices para que a proposta aprovada pelo comitê de nomenclatura da associação internacional não diferisse muito daquela sugerida por Streckeisen (1978). No livro que reúne as recomendações desse comitê, editado por Le Maitre (2002), distinguem-se as seguintes classes de carbonatitos para rochas com mais de 50% de carbonato na moda:

1) *Calcita carbonatito*, em que o mineral carbonático identificado é *calcita*. Se a rocha for de granulação grossa, ela pode ser chamada de *søvito*; se de granulação média a fina, de *alvikito*.

2) *Dolomita carbonatito*, em que o mineral carbonático identificado é *dolomita*. Pode ser também referido como *beforsito*.

3) *Ferrocarbonatito*, em que o mineral carbonático é rico em Fe.

4) *Natrocarbonatito*, rocha composta essencialmente de carbonatos de sódio, potássio e cálcio. Presentemente, esse tipo de rocha é encontrado unicamente na ocorrência vulcânica de Oldoinyo Lengai, na Tanzânia.

Algumas qualificações aplicadas a rochas portadoras de dolomita em sua composição devem ser usadas para enfatizar a presença de constituintes menores, presentes em menos de 10% em volume. De modo similar, rochas ígneas contendo menos de 10% de minerais carbonáticos devem ser referidas como ijolitos com calcita, peridotitos com dolomita etc., enquanto outras nas quais os minerais representam entre 10% e 50% em volume devem ser chamadas de ijolitos calcíticos, peridotitos dolomíticos etc.

Em seu trabalho de classificação dos carbonatitos, Woolley e Kempe (1989) propuseram também designar as diferentes variedades dessas rochas com base no constituinte mineral carbonático dominante, a ser empregado como mineral prefixo, por exemplo, calcita carbonatito, dolomita carbonatito etc.

Esses critérios de classificação com base essencialmente na composição modal dos carbonatitos apresentam, contudo, algumas dificuldades, como já apontado anteriormente, além de outras como a granulação muito fina das rochas, a impedir a obtenção de análise modal confiável, aliada à presença de carbonatos com soluções sólidas complexas de Ca-Mg-Fe. Como consequência, a alternativa do uso de parâmetros químicos vem sendo empregada com grande frequência na literatura. Um método prático e de fácil aplicação para fins classificatórios é o diagrama ternário proposto por Woolley e Kempe (1989), que reúne os óxidos CaO-MgO-(FeO+Fe₂O₃+MnO) (Figura 1.1), com teores em SiO₂ inferiores a 10%. Ainda que de definição arbitrária, o limite proposto para o campo dos søvitos com 80% CaO, ou mais, é justificado pelo número de análises disponíveis por Woolley (1982) na oportunidade, e a linha divisória separando os magnesiocarbonatitos e os ferrocarbonatitos pela ausência à época de maiores informações sobre as relações envolvendo as fases carbonáticas coexistentes. Essas sugestões foram consideradas plenamente razoáveis, resultando em uma boa aceitação desse método de classificação na literatura especializada.

Para as rochas com teores de SiO₂ superiores a 20%, a recomendação de Le Maitre (2002) é no sentido de utilizar o termo *silicocarbonatito*, originalmente empregado por Brøgger (1921) e mais tarde também adotado por Pecora (1956), para definir a mistura de rochas carbonáticas e silicáticas.

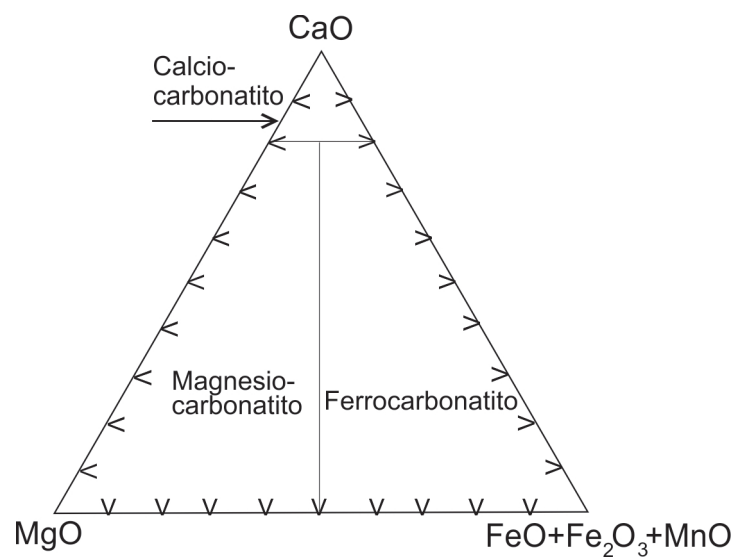


Figura 1.1. Diagrama de classificação química para carbonatitos, com SiO_2 inferior a 20%, em função dos teores dos óxidos CaO - MgO -($\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MnO}$) (Woolley e Kempe, 1989).