

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**GEOLOGIA DO DEPÓSITO DE ÁGATA E AMETISTA DA  
MINA NOVO SÃO JOÃO, SANTANA DO LIVRAMENTO, RS.**

**ADOLPHO HERBERT AUGUSTIN**

ORIENTADOR – Prof. Dr. Gênova Maria Pulz

**BANCA EXAMINADORA**

Dr<sup>a</sup> Adriane Comin Fischer – Departamento Nacional de Produção Mineral

Prof. Dr. Vitor Paulo Pereira – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Francisco Oliveira da Silva – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Dissertação de Mestrado  
apresentada como requisito parcial para  
a obtenção do Título de Mestre em  
Geociências.

Porto Alegre – 2007

## AGRADECIMENTOS

O autor externa seu reconhecimento a diversas pessoas e instituições que fizeram parte dessa caminhada. Sabendo e correndo o risco de ter omitido algum nome, o autor deixa aqui registrada a gratidão a todos aqueles que contribuíram para esta titulação:

- Ao Programa de Pós Graduação em Geociências (PPGGeo), Instituto de Geociências – UFRGS, que com as suas instalações e seu corpo docente de alto nível propiciou um ótimo aprendizado em Geociências;

- A Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela oportunidade de conviver e aprender com os professores dessa renomada instituição de ensino gratuita e de qualidade;

- A CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior (Programa de Pós Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul) pela bolsa de mestrado;

- A FAPERGS - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (Proc. nº 04/0677.8 - PCOR), pelo auxílio financeiro para a realização dos trabalhos de campo, confecção de lâminas e análises ao MEV;

- À Prof. Dr<sup>a</sup> Gênova Maria Pulz, minha orientadora nessa caminhada. Pelas inúmeras discussões, reuniões e sugestões em meus escritos;

- Aos Prof. Dr Adelir José Strieder e Prof. Dr Léo Afraneo Hartmann pelos auxílios financeiros para o projeto e contribuição nos artigos;

- Aos Prof. Dr Pedro Luiz Juchem e Prof. Tânia Mara Martini de Brum pela ótima convivência, ajuda e paciência dados a mim durante todo esse período;

- Ao senhor David Martins, por ter acolhido em sua fazenda e ter permitido o acesso à sua mina, propiciando que esse estudo fosse realizado;

- Aos funcionários dos Laboratórios de Geoquímica, Difração de Raios X, Laminação e Preparação de Amostras, Microscopia Eletrônica de Varredura;

- Aos motoristas do Instituto de Geociências, nossos amigos e companheiros durante todos os trabalhos de campo, senhores Cláudio, Adalto, Jarson e Valter;

- Aos colegas do Programa de Pós-Graduação, Graduação e bolsistas;

- Aos amigos e companheiros de campo Daniel Knijnik, Eduardo Grissolia, Jorge Costa, Roberta Acauan;

- Em especial a minha companheira Luciana Oliveira Dorneles que sempre me deu carinho, apoio e força nas horas em que mais precisei;

- Em especial a minha família pela compreensão, carinho e amizade.

**Índice Geral**

Agradecimentos .....	ii
Índice geral.....	iii
Abstract.....	v
Resumo.....	vi
<b>CAPÍTULO 1 – CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVOS .....</b>	<b>7</b>
<i>1.1 Introdução.....</i>	<i>7</i>
<i>1.2 Caracterização do problema.....</i>	<i>7</i>
<i>1.3 Localização e vias de acesso.....</i>	<i>8</i>
<i>1.4 Objetivos específicos .....</i>	<i>9</i>
<i>1.5 Estruturação da Dissertação.....</i>	<i>9</i>
<b>CAPÍTULO 2 – CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DOS DEPÓSITOS DE AGATA E AMETISTA.....</b>	<b>11</b>
<i>2.1 Introdução.....</i>	<i>11</i>
<i>2.2 Carta editor da revista.....</i>	<i>12</i>
<b><i>GEOLOGIA DO DEPÓSITO DE ÁGATA E AMETISTA, MINA NOVO SÃO JOÃO, SANTANA DO LIVRAMENTO, RS.....</i></b>	<b><i>13</i></b>
Abstract .....	14
Sumário .....	15
Introdução.....	16
Metodologia .....	17
Geologia Regional.....	17
Geologia Local.....	19
Formação Botucatu .....	20
Formação Serra Geral .....	20
Petrografia dos Arenitos .....	21
Petrografia dos Basaltos.....	22
Geodos.....	24
Discussão.....	25
Conclusões .....	27
Agradecimentos .....	27
Referências Bibliográficas.....	28
Legenda das Figuras .....	33
Figuras.....	35

<b>CAPÍTULO 3 – CARACTERÍSTICAS GEMOLÓGICAS DA ÁGATA E DA AMETISTA DOS DEPÓSITOS COLUVIONARES .....</b>	<b>44</b>
3.1 <i>Introdução</i> .....	44
3.2 <i>Carta editor da revista</i> .....	45
<i>GEMMOLOGICAL CHARACTERISTICS OF AMETHYST AND AGATE FROM COLLUVIUM DEPOSITS IN THE SOUTHERN PARANÁ CONTINENTAL FLOOD BASALT PROVINCE, BRAZIL</i> .....	46
Summary .....	47
Abstract .....	48
Introduction .....	49
Regional geological setting.....	49
Local geological setting.....	51
Colluvial amethyst deposit.....	51
Analytical procedures .....	52
Physical properties .....	53
Agate types.....	53
Inclusions .....	54
Discussion and conclusions .....	56
References .....	58
Acknowledgements.....	61
Figure captions.....	62
Table caption.....	64
Table 1.....	65
Table 2.....	65
Figuras.....	66
<b>CAPÍTULO 4 – GEOLOGIA DAS OCORRÊNCIAS .....</b>	<b>76</b>
4.1 <i>Introdução</i> .....	76
<i>GEOLOGIA DAS OCORRÊNCIAS DE AMETISTA DA REGIÃO DE SANTANA DO LIVRAMENTO, SUDOESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL, BRASIL</i> .....	77
<b>CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>82</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>84</b>

## **Abstract**

The Novo São João Mine, located within the boundaries of the city of Santana do Livramento, near the border of Brazil and Uruguay, in the Paraná Basalt Continental Flood Province context, produces agate and amethyst geodes. However, in this mine also some occur varieties of cornaline, colourless and milky quartz. This study presents the data obtained during the geologic mapping of the Novo São João Mine as well as the mineral inclusions identified in the amethyst crystals. The geodes occur in shallow levels of the basaltic rocks (Serra Geral Formation) with magmatic flow structures and fractures. The host-rock is constituted by plagioclase and clinopyroxene, which are associated with variable proportions of ilmenite, apatite, quartz and clayminerals. The rocks of Serra Geral Formation are predominant in the mine geologic setting, although the Botucatu Formation also outcrops in this region. The abrupt contact combined with some relicts structures which are preserved in these stratigraphic units (e.g., flow striation, basalt molds and rocks resembling to peperites) suggest that the extrusion of basaltic lavas the desertic environment ative. The occurrence mode, the size and the shape of geodes are conditioned by open spaces related to the basaltic lavas flow. These dilatation spaces allowed the percolation of the mineralizing fluids and the precipitation of silica minerals, which resulted in the geodes formation with variable filling. The amethyst crystals contain inclusions of goethite, halite, sylvite, fluorite and pyrite. This is the first register of fluorite inclusions in amethyst of the southernmost Brazil. The occurrence of chlorides and fluorides in the studied amethyst suggest that mineralizing solutions are related to geothermal fluids similar to those of the subterranean waters of aquifers in the Paraná Basalt Continental Flood Province context. The occurrence mode and mineral assemblage of the geodes combined dilatation structures of the host-rocks suggest that the geodes formation is related to epigenetic process of the infiltration of hot subterranean water (geothermal fluids). The data obtained in this study suggest the following guides to prospect target-areas to host geodes: (i) rocks with dilatation structures such as magmatic foliation, fractures and pods and (ii) springs of thermal waters in the Paraná Basalt Continental Flood Province context. The data integration suggest that the geologic setting of the studied area is adequate to host several geodes deposits around which future workers can build to evaluation the real economic potential of gems in this region.

## Resumo

A Mina Novo São João está localizada em Santana do Livramento, nas proximidades da fronteira sudoeste do Rio Grande do Sul com Uruguai, inserida no contexto da Província de Basaltos de Platô Continental do Paraná. Nesta região são extraídos comercialmente geodos de ágata e ametista, apesar de também ocorrerem variedades de quartzo incolor, leitoso e cornalina. Este estudo registra os resultados do mapeamento geológico da região da Mina Novo São João e da caracterização das inclusões minerais nos cristais de ametista. Os geodos estão alojados em níveis rasos de rochas basálticas, as quais apresentam estruturas de fluxo magmático e fraturas. A rocha encaixante é afanítica, constituída por plagioclásio e clinopiroxênio, associados com quantidades variáveis de ilmenita, magnetita, apatita, quartzo e argilominerais. Associado com os basaltos da Formação Serra Geral ocorrem rochas da Formação Botucatu. O contato abrupto e as estruturas preservadas nestas unidades estratigráficas, tais como estrias de fluxo, moldes de basalto e rochas tipo peperito, sugerem que os derrames basálticos ocorreram num paleo-ambiente desértico ativo. O modo de ocorrência, o tamanho e a forma dos geodos são condicionados por sítios de dilatância relacionados com o fluxo das lavas basálticas. Estes espaços abertos possibilitaram a percolação de fluidos mineralizantes e a precipitação de minerais de sílica resultando na formação de geodos com preenchimento variável. Os cristais de ametista nos geodos contêm inclusões de goethita, halita, silvita e pirita. Além disto, inclusões de fluorita também ocorrem na gema estudada, as quais foram descritas, pela primeira vez, em cristais de ametista do sul do Brasil. A presença de cloretos e fluoretos sugere que as soluções mineralizantes estão relacionadas com fluidos geotermiais similares àqueles encontrados em águas subterrâneas retiradas de aquíferos da Bacia do Paraná. O modo de ocorrência e as associações minerais dos geodos combinados com as estruturas de dilatância das rochas encaixantes sugerem que a formação dos geodos está relacionada com processos epigenéticos de infiltração de águas subterrâneas aquecidas (fluidos geotermiais). O conjunto de dados sugere que as seguintes feições podem ser utilizadas como guias prospectivos locais para a localização de áreas-alvo propícias a alojar geodos: (i) rochas com estruturas de dilatância abertas, tais como foliação magmática, fraturas e pods; (ii) ocorrência de fontes de águas minerais termais no contexto da Província de Basaltos de Platô Continental; (iii) presença de quartzo-arenito silicificado, pois este litotipo também teria sido afetado pelo evento que depositou sílica nos geodos. A integração dos dados obtidos mostra que o contexto geológico da área estudada é propício para alojar vários depósitos de geodos, os quais merecem ser pesquisado em trabalhos futuros, a fim de obter uma avaliação do potencial econômico para gemas da fronteira sudoeste do RS.

## **CAPÍTULO 1 – CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVOS**

### **1.1 Introdução**

Esta dissertação apresenta o estudo da geologia de uma exploração de geodos de ágata e ametista, conhecida localmente como Mina Novo São João, a qual está situada na fronteira sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul. Atualmente, a extração de geodos é feita em céu aberto utilizando métodos artesanais, com o emprego de tratores e seleção manual dos geodos. Após a extração, os geodos e fragmentos de ágata e ametista são selecionados e separados. Os geodos contendo ágata passam apenas pelo processo de lavagem com jatos de água, mas os que contêm ametista são lavados e recebem uma fina camada de glicerina líquida para realçar o brilho dos cristais. Apesar de apenas os geodos de ágata e ametista serem comercializados atualmente, na área estudada também ocorrem geodos de quartzo incolor e leitoso, assim como fragmentos de cornalina.

### **1.2 Caracterização do problema**

Atualmente, a exploração de gemas no Rio Grande do Sul restringe-se basicamente a ágata e ametista e, é realizada principalmente no norte e centro do estado apesar de serem conhecidas ocorrências destas gemas em outras regiões. Estudos de

mapeamento de detalhe de áreas potenciais para a ocorrência de gemas no Estado do Rio Grande do Sul são relativamente raros. Vários fatores contribuíram para esta situação, dentre eles a abundância de depósitos minerais aflorantes em outros estados brasileiros (por exemplo, esmeraldas e diamantes em Minas Gerais, esmeraldas na Bahia e em Goiás), somados a vocação agro-pecuária do estado Sul-Riograndense.

Na fronteira sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul, há poucos estudos de mapeamento geológico, especialmente com enfoque voltado para a caracterização de controles e guias prospectivos para a exploração de gemas. Com o intuito de contribuir para o preenchimento desta lacuna no conhecimento geológico do Estado do Rio Grande do Sul, a área da Mina Novo São João foi selecionada para estudos de mapeamento de detalhe. Esta pesquisa representa uma das primeiras investigações sistemáticas da caracterização desta região.

Como resultado do caráter pioneiro deste trabalho, muitas questões fundamentais ainda não foram solucionadas, simplesmente porque muitos detalhes cruciais ainda não são disponíveis. Um dos principais objetivos deste estudo é contribuir para o estabelecimento de um *corpus* de dados geológicos básicos em torno dos quais futuros trabalhos poderão ser construídos.

Para concretizar o objetivo geral proposto, os esforços foram canalizados para a obtenção de informações a fim de responder as seguintes questões:

- Qual a rocha hospedeira dos geodos?
- Qual o modo de ocorrência e distribuição dos geodos?
- Qual o preenchimento dos geodos?
- Quais os fatores que poderiam estar relacionados com a formação e preenchimento dos geodos?

### **1.3 Localização e vias de acesso**

A Mina Novo São João está situada na fronteira do Rio Grande do Sul (Brasil) com o Uruguai, no município de Santana do Livramento. O acesso à área, saindo de Porto Alegre é feito pela BR-290 até o município de Rosário do Sul percorrendo aproximadamente 386 km, segue-se em direção ao município de Santana do Livramento pela BR-153, percorrendo aproximadamente 97 km. Deste ponto em diante segue-se pela BR-293, em direção ao município de Quaraí, perfazendo cerca de 30 km dessa BR, entra-se em uma estrada vicinal, que leva até a área, depois de



percorridos aproximadamente 30 km. A área de estudo está localizada entre as coordenadas geográficas 30°38'00" e 30°42'00" S e 56°00'00" e 56°10'00" W (Fig. 1).

#### 1.4 Objetivos específicos

A pesquisa que gerou esta dissertação como produto final visa:

-Oportunizar ao mestrando o aprofundamento em aspectos de mapeamento geológico de detalhe, possibilitando que haja um aperfeiçoamento profissional.

-Elaborar a dissertação de mestrado, contendo dados inéditos que possam ajudar a elucidar algumas das questões sobre a geologia dos depósitos de ágata e ametista da Mina Novo São João, Santana do Livramento, RS.

#### 1.5 Estruturação da Dissertação.

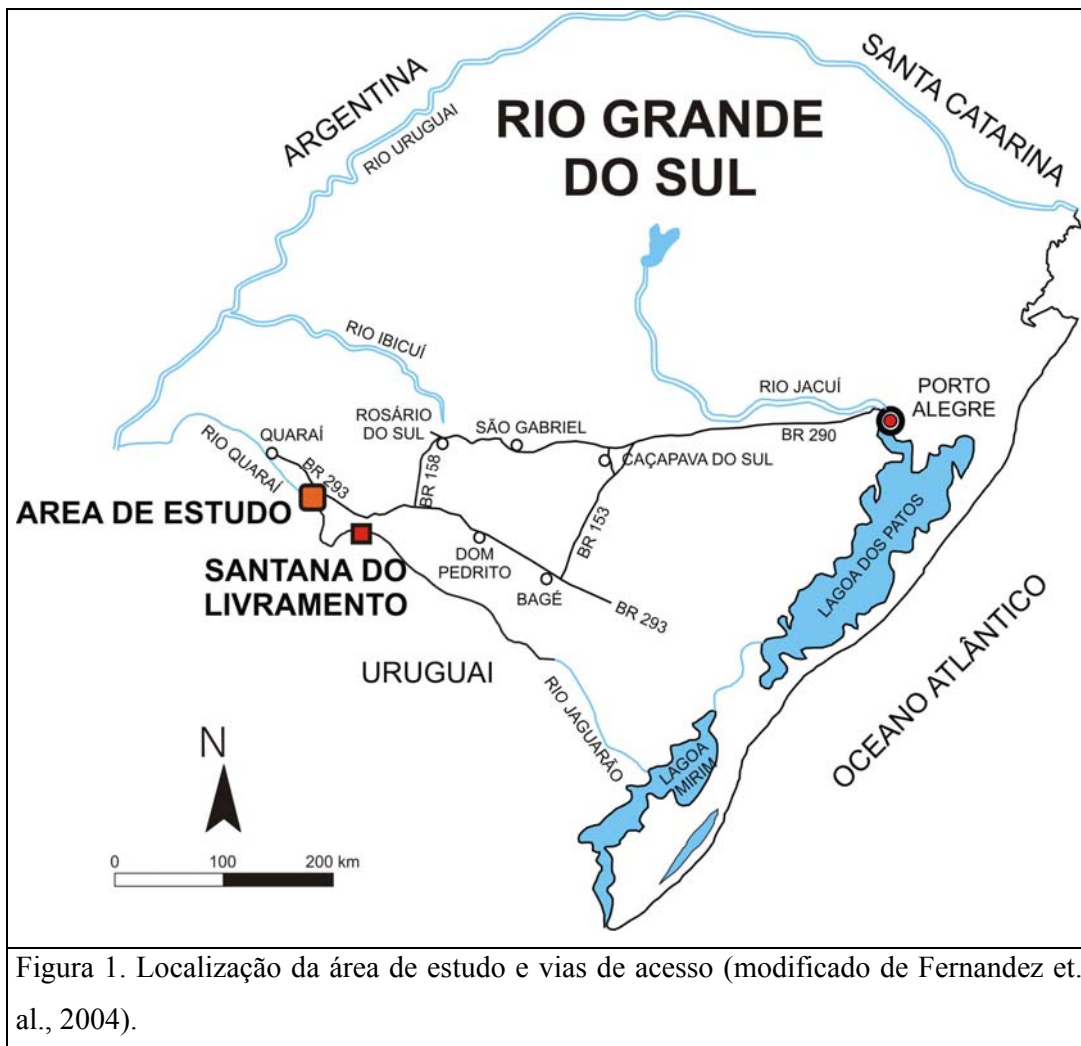
Esta dissertação está estruturada na forma de dois artigos e um trabalho científico apresentado em congresso.

No *capítulo 2* apresenta-se uma cópia do artigo submetido à **Revista Pesquisas em Geociências**. Neste artigo apresentam-se os resultados do mapeamento geológico da área estudada, visando caracterizar o modo de ocorrência dos geodos, a associação de minerais que constitui o preenchimento dos geodos e a identificação de fatores que poderiam estar relacionados com a ocorrência dos geodos.

No *capítulo 3* apresenta-se o artigo submetido à **Revista Ore Geology Reviews**. Este trabalho consiste na caracterização dos minerais que ocorrem nos geodos, com ênfase naqueles inclusos na ametista estudada. A utilização de microscopia eletrônica de varredura acoplada com o sistema de EDS (*Energy Dispersive System*) possibilitou a identificação de inclusões sólidas (fluorita, pirita, etc) nos cristais de ametista. Esta foi a primeira vez que fluorita e pirita foram descritos num cristal de ametista brasileiro. A identificação de inclusões de fluorita, assim como de halita e silvita em cristais de ametista, cresce de importância à medida que estes minerais auxiliam na dedução de algumas características da solução mineralizadora. A presença da associação da fluorita com halita e silvita num mesmo cristal de ametista, sugere que a formação desta gema está relacionada com a percolação de soluções cloradas e fluoretadas.

No *capítulo 4* apresenta-se uma cópia do *Resumo e Pôster* apresentado no **XLIII Congresso Brasileiro de Geologia (Aracajú – 2006)**. Neste trabalho sintetizou-se as principais características da exploração dos geodos estudados, as características gemológicas dos cristais de ametista e os resultados de experimentos de tratamento térmico realizados nos cristais de ametista.

No *capítulo 5* sintetiza-se as principais conclusões deste estudo, com ênfase nos dados obtidos no mapeamento geológico.



## CAPÍTULO 2 – CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DOS DEPÓSITOS DE AGATA E AMETISTA

### 2.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada uma cópia do artigo: “*Geologia do depósito de ágata e ametista, Mina Novo São João, Santana do Livramento, RS*”. Este trabalho foi submetido para publicação na **Revista Pesquisas em Geociências**.

O trabalho será apresentado na íntegra sem nenhuma modificação no conteúdo e redação, segue também a carta do editor chefe.

## 2.2 Carta editor da revista



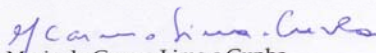
Revista Pesquisas em Geociências

Porto Alegre, 23 de agosto de 2007

Ilmo.Sr.  
Geol.Adolpho Herbert Augustin

Prezado colega  
Acusamos o recebimento do trabalho intitulado "*Geologia do Depósito de Ágata e Ametista Mina Novo São João, Santana do Livramento, RS*", de autoria de A.H. Augustin; G.M. Pulz; P.L. Juchem; T.M.M. Brum & L.A. Hartmann para ser submetido à publicação neste periódico.

Atenciosamente

  
Maria do Carmo Lima e Cunha

Editora Adjunta

Revista Pesquisas em Geociências  
Instituto de Geociências  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
pesquisas@ufrgs.br

**GEOLOGIA DO DEPÓSITO DE ÁGATA E AMETISTA, MINA  
NOVO SÃO JOÃO, SANTANA DO LIVRAMENTO, RS.**

**GEOLOGY OF THE DEPOSIT OF AGATE AND AMETHYST, NOVO  
SÃO JOÃO MINE, SANTANA DO LIVRAMENTO, RS.**

Adolpho Herbert Augustin<sup>1</sup>, Gênova Maria Pulz<sup>1</sup>, Pedro Luiz Juchem<sup>1</sup>,  
Tania Mara Martini de Brum<sup>1</sup>, Léo Afraneo Hartmann<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
Av. Bento Gonçalves 9500; Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

E-mail: [ahaugustin@yahoo.com.br](mailto:ahaugustin@yahoo.com.br)

### **Abstract**

Geodes occur in the Novo São João Mine in Santana do Livramento (Southwestern of Rio Grande do Sul State, South Brazil). The occurrence mode, shape and size of the agate and amethyst geodes are related to dilatation structures in the Serra Geral Formation. The anastomosed horizontal displacement of the lava flow promoted the formation of open spaces within basaltic rocks. These open spaces as well as irregularities related to vertical fractures produced cavities, which are mainly filled by chalcedony and/or quartz geodes, including agate and amethyst varieties. Variable proportions of calcite and clay minerals also fill the geodes. Inclusions of the goethite, halite, sylvite and fluorite into amethyst crystals suggest that the infiltration epigenetic of geothermal fluids in the cavities resulted in amethyst and agate geodes.

Key words: amethyst, geologic mapping, thermal waters.

**Sumário**

Introdução

Metodologia

Geologia Regional

Geologia Local

    Formação Botucatu

    Formação Serra Geral

Petrografia dos Arenitos

Petrografia dos Basaltos

Geodos

Discussão

Conclusões

Agradecimentos

Referências Bibliográficas

Lista de figuras

Figuras

## Introdução

Geodos são cavidades presentes em rochas ígneas ou sedimentares, total ou parcialmente preenchidos por agregados de minerais. A forma arredondada é típica desta feição, apesar de outras formas também serem comuns (e.g. tubulares, bolsões irregulares). Quartzo e calcedônia são os minerais mais comuns nos geodos, mas outras espécies minerais podem ocorrer, como vistos nos geodos em basaltos da região de Morro Reuter – RS, que são preenchidos por zeolitas.

A gênese e preenchimento de geodos são temas de investigação científica desde o início do século passado e segundo Kile (2002) há quatro teorias singenéticas para a gênese de geodos em rochas ígneas: (i) *a teoria da expansão*, que propõe a formação da cavidade do geodo a partir de uma bolha de vapor produzida durante a cristalização da rocha hospedeira. Segundo esta teoria, a cristalização de minerais anidros (e.g. piroxênio e plagioclásio) propicia o acúmulo de soluções aquosas residuais no sistema magmático, que induzem o aumento da pressão de vapor e formação de bolhas coalescentes; (ii) *a teoria do encolhimento/infiltração*, que relaciona a formação de cavidades ao resfriamento e desvitrificação da rocha hospedeira possibilitando a migração de vapor d'água para cavidades produzidas pelo encolhimento tensional durante o resfriamento da lava. Argilominerais precipitariam do vapor, que com o resfriamento perderiam volume por secagem e fraturamento; (iii) *a teoria da deformação*, que relaciona a formação das cavidades com a tensão e deformação durante a cristalização da rocha hospedeira. Sob alta temperatura, colóides de sílica se infiltrariam em planos de cisalhamento, cristalizando em cavidades da rocha durante o resfriamento; (iv) *a teoria de infiltração a altas temperaturas*, a qual propõe que durante o resfriamento do magma há infiltração de sílica em fraturas (planos de cisalhamento tensional) ao longo das quais ocorrem processos de cristalização fracionada rítmica.

Apesar da quase unanimidade em relacionar a formação e preenchimento de geodos com processos singenéticos durante o resfriamento de magmas, há uma hipótese epigenética hidrotermal, conhecida como *teoria de infiltração de sílica a baixa temperatura*. Segundo esta teoria, a formação de geodos está relacionada com a infiltração de fluidos supersaturados em sílica, sob condições de baixa pressão e temperatura inferior a 300 °C, oriundos da mistura de fluidos hidrotermais da rocha



hospedeira com águas subterrâneas (Kile, 2002). A origem epigenética da abertura das cavidades e do seu preenchimento com ágata e ametista foi proposta por Duarte *et al.* (2005) para os geodos em basaltos da Formação Serra Geral do sul do Brasil e Uruguai.

Esta pesquisa visa contribuir para a identificação de condicionantes geológicos, que interferem nos processos de formação e preenchimento de geodos em basalto, a partir do estudo da ocorrência de ágata e ametista na mina Novo São João em Santana do Livramento (sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul, extremo sul do Brasil). A área de estudo está situada entre as coordenadas geográficas 30°38'00" e 30°42'00" S e 56°00'00" e 56°10'00" W (Fig. 1). Neste estudo, o termo “quartzo” refere-se ao quartzo macrocristalino de baixa temperatura ( $\alpha$ -quartzo), enquanto “calcedônia” refere-se ao quartzo microcristalino, quer seja bandado ou não.

### **Metodologia**

Os condicionantes geológicos foram identificados neste estudo a partir de dados de mapeamento geológico em escala 1:50.000, utilizando as cartas topográficas da Diretoria de Serviço Geográfico - Ministério do Exército (Barra do Sarandi e Passo do Ricardinho – números MI 2990/1 e 2990/2), fotografias aéreas, imagens de satélite (LandSat TM falsa cor) e imagens de alta resolução (Google Earth).

Os dados de campo foram complementados em laboratórios de UFRGS com descrições macroscópicas dos constituintes das rochas e dos geodos com a utilização de lupa binocular, microscopia de luz transmitida e de luz refletida, difratometria de raios-X e microscopia eletrônica de varredura (MEV) com sistema de energia dispersiva (EDS) no Centro de Microscopia Eletrônica.

### **Geologia Regional**

A Bacia do Paraná é constituída por um espesso pacote de rochas sedimentares, depositadas sobre a Plataforma Sul-Americana durante o Paleozóico e Mesozóico, e pelas rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. A evolução geológica da Bacia do Paraná foi controlada por fatores climáticos e tectônicos relacionados com a ruptura do supercontinente Gondwana (Minioli, 1971; Sial, 1976; Petri & Fúlfaro, 1983; Zalán *et al.*, 1990; Milani *et al.*, 1997).

No topo da seqüência sedimentar da Bacia do Paraná, ocorre a Formação Botucatu, a qual é sobreposta pela Formação Serra Geral. A Formação Botucatu é constituída por arenitos quartzosos, médios a grossos, com estratificação cruzada tangencial de grande porte, cruzada acanalada e estratificação plano-paralela, típicas de depósitos de dunas (Milani et al., 1997) associados à desertificação da Bacia do Paraná (Zalán et al., 1990; Milani et al., 1997, Scherer, 2000; Scherer & Lavina, 2006). Na fronteira sudoeste do Rio Grande do Sul, a Formação Botucatu é representada por arenitos avermelhados, finos a médios, bimodais, friáveis, com grãos foscos e bem arredondados (Schneider et al., 1974). Os litotipos da Formação Botucatu ocorrem como lentes ora de pequena espessura (<2 m) e reduzida extensão lateral (<20 m), ora com espessura entre 3 e 15 m e grande extensão lateral (centenas de metros). No topo dos depósitos eólicos ocorrem intercalações com lavas basálticas da Formação Serra Geral evidenciando o início do magmatismo associado com a ruptura do Gondwana e abertura do Oceano Atlântico Sul (Milani et al., 1997), sendo que o contato entre estas duas formações é discordante.

Segundo Scherer et al. (2003), estruturas indicativas da movimentação das lavas sobre dunas foram preservadas junto ao contato destas unidades estratigráficas, como exemplificam os estratos de dorso das dunas (topset) e as estruturas do tipo marcas em crescente, estrias e moldes de basaltos, combinados com a presença de brechas vulcânicas com feições similares a peperitos. Estudos petrográficos e geoquímicos (e.g., Petry et al., 2007; Waischel et al., 2007) identificaram rochas com características de peperitos na Formação Serra Geral, o que sugere que o vulcanismo da Formação Serra Geral ocorreu sobre campos ativos de dunas eólicas.

A Formação Serra Geral faz parte da província Paraná-Etendeka, que compreende rochas vulcânicas continentais (Ewart et al., 1998). A formação da província vulcânica é atribuída à combinação de processos de rift continental e ascensão de plumas mantélicas (Peate et al., 1992). As rochas desta província afloram no Brasil, Paraguai, Uruguai, Argentina (Milani, 1997; Kirsten et al., 2000; Wildner et al., 2003) e Namíbia (Ewart et al., 1998). Dados radiométricos de  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ , obtidos em rochas da Formação Serra Geral, indicaram idades que variam de 138 a 119 Ma (Renne, 1992; Turner et al., 1994; Stewart et al., 1996; Wildner, 2004) para o evento vulcânico.

O magmatismo Paraná-Etendeka possui características bimodais (Ewart et al., 1998; Milner et al., 1995) caracterizado pela associação de basaltos e basalto-andesitos com riolitos e riodacitos. Peate et al. (1992) propuseram uma divisão da

estratigrafia basáltica da Bacia do Paraná em baixo-Ti ( $\text{TiO}_2 < 2$  peso %) e alto-Ti ( $\text{TiO}_2 > 2$  peso %). Os tipos de magma Gramado, Ribeira e Esmeralda foram descritos na série magmática baixo-Ti, enquanto os tipos Urubici, Paranapanema e Pitanga foram identificados na série magmática alto-Ti (Peate et al., 1992; Peate, 1997). Wildner et al. (2003) e Wildner (2004) subdividiram o magmatismo Paraná em fácies vulcano-plutônico máfico (Gramado, Paranapanema, Esmeralda, Pitanga, Campo Erê e Lomba Grande) e vulcano intermediário-félsico (Palmas, Chapecó, Várzea do Cedro e Alegrete).

Apenas a Fácies Alegrete caracterizada por Wildner et al. (2003) e Wildner (2004) foi identificada na região de Santana do Livramento. Estes autores descrevem este fácies vulcânico como uma seqüência de 4 a 5 derrames de basalto andesitos a andesitos, que sobrepõem a Formação Botucatu e preservam estruturas de fluxo e autobrechas no topo e na base dos derrames.

Ametista, ágata, água mineral e minerais industriais (basalto para cantaria, revestimento e brita) são os principais bens minerais extraídos da Formação Serra Geral no estado do Rio Grande do Sul. A ametista é extraída comercialmente tanto no norte do estado (Gomes, 1996; Scopel et al., 1998; Juchem, 1999; Fischer, 1999; Fischer, 2004; Proust & Fontaine, 2007), como no sul, na fronteira Brasil-Uruguai (Acauan, 2004; Duarte et al., 2005), sendo a ágata extraída no centro do estado, região de Salto do Jacuí (Heemann, 2005) e também na região de fronteira com o Uruguai, mas existem relatos e estudos sobre ocorrências destas gemas em várias outras regiões do estado.

### **Geologia Local**

As rochas das formações Botucatu e Serra Geral (Fig. 2) são seccionadas na área por lineamentos regionais e locais, ao longo dos quais se encaixam as drenagens, preferencialmente nas direções NW-SE e NE-SW, que são comuns na Bacia do Paraná (Zalán et al., 1990).

A espessura do pacote vulcânico é geralmente inferior a 100 m, podendo apresentar variações locais, provavelmente relacionadas com o paleorelevo sobre o qual as lavas se depositaram e ao tectonismo. Uma característica típica da área de estudo é a descontinuidade dos afloramentos, o que dificulta a identificação dos contatos entre as unidades estratigráficas e entre derrames.

### **Formação Botucatu**

Na área mapeada, as rochas da Formação Botucatu apresentam variações relacionadas ao grau de coesão entre os grãos, o que possibilita identificar macroscopicamente duas variedades: arenito friável e arenito coeso. Os dois tipos de arenitos possuem as características típicas da Formação Botucatu, ou seja, são quartzosos, bimodais com granulometria de fina a média, grãos foscos com bom grau de arredondamento e esfericidade moderada. Apresentam estratificação plano-paralela e cruzada acanalada que é evidenciada por diferença de granulometria entre os grãos.

O arenito friável aflora na porção sul, ocupando cerca de 5% da área mapeada e possui feições do tipo estratificação cruzada acanalada de grande porte. A Formação Serra Geral sobrepõe esta variedade de arenito, sugerindo que os derrames de lava recobriram as dunas, enquanto elas ainda estavam ativas (Fig. 3). O contato entre estas formações pode ser observado em afloramentos próximos ao Rio Quaraí, sugerindo que houve uma contemporaneidade entre estas unidades estratigráficas, como proposto regionalmente por Scherer et al. (2003).

O arenito coeso aflora como camadas descontínuas, principalmente na região oeste e norte da área mapeada, perfazendo cerca de 10% da área total. Esta rocha aflora em diferentes cotas altimétricas, com espessuras de até dois metros, apresentando algumas dezenas a centenas de metros quadrados de extensão (Fig. 4). Apresenta as mesmas características descritas por Scherer et al. (2003) para os sedimentos intertrapes, ou seja, lençóis de areias eólicas e dunas em crescente. No topo das camadas de arenito coeso existem feições, que sugerem a interação de areia seca com as lavas da Formação Serra Geral, tais como marcas em crescente, estrias de fluxo e moldes de basalto. Estas feições também foram identificadas em outras regiões do Rio Grande do Sul por Scherer et al. (2003).

### **Formação Serra Geral**

As rochas vulcânicas representam cerca de 85% do total de afloramentos mapeados (Fig. 2), dos quais aproximadamente 45% são constituídos por basalto a basalto andesitos e o restante por autobrechas. Estas autobrechas ocorrem na parte superior dos derrames e afloram numa extensa área a leste e sudeste do mapa, com

espessura variando de 1 até 5 metros aproximadamente. Estas rochas são constituídas por autoclastos irregulares, por vezes, muito vesiculados e com tamanho de 5 até cerca de 50 cm de dimensão maior. Em geral, os autoclastos são cimentados por uma matriz vulcânica afanítica foliada, ou localmente por uma matriz sedimentar.

A foliação da matriz vulcânica é definida ora pela alternância de bandas com diferentes tons de coloração acastanhada, ora pela quantidade de vesículas, mostrando por vezes dobras assimétricas de possança centimétrica. Em conjunto, estas feições sugerem tratar-se de foliação de fluxo magmático (Fig. 4). A matriz sedimentar das autobrechas foi identificada na porção sudoeste do mapa, e ocorre preenchendo os espaços entre os autoclastos. Estes espaços foram preenchidos de cima para baixo, visto que na parte superior ocorre uma lente de pequena espessura do quartzo-arenito coeso. Em direção à base, a matriz sedimentar desaparece dando lugar a matriz vulcânica.

Os derrames de basalto a basalto andesitos (área oeste e norte) estão representados em superfície por blocos ou lajeados descontínuos, com abundantes fraturas e/ou vesículas, sendo que o tamanho dos blocos e lajeados é variável, em geral inferior a 10 m<sup>2</sup>.

Em seção vertical, pode-se identificar a estruturação e as características dos derrames. Da base para o topo, é possível identificar o arenito friável sobreposto por rochas vulcânicas com diaclases subhorizontais. Em direção ao topo, as diaclases subhorizontais desaparecem dando lugar a estrutura maciça com diaclases verticais. No topo da seqüência aflora uma camada com aproximadamente 5 m de espessura, a qual é constituída por autobrecha com estruturação de fluxo (Fig. 3).

### **Petrografia dos Arenitos**

As duas variedades de arenito são compostas por aproximadamente 90% em volume de quartzo, 5% de feldspato e 5% de minerais pesados, sendo denominado de quartzo-arenito. A granulometria varia de fina a média, com distribuição bimodal do tamanho de grão e seleção moderada. A fábrica é suportada pelos grãos com contatos pontuais a retos, a esfericidade dos grãos é moderada e o arredondamento varia de subangular a bem arredondado. Apresentam estratificação definida por diferença no tamanho dos grãos.

O quartzo-arenito friável apresenta grande porosidade, devido à ausência ou pouca quantidade de cimento, que é constituído basicamente de óxidos e hidróxidos de

ferro. No quartzo-arenito coeso, o cimento é composto por sílica amorfa (opala) e também criptocristalina (calcedônia) o que lhe confere alto grau de coesão, aqui denominado de quartzo-arenito silicificado. O cimento silicoso forma cutículas ao redor dos grãos ou preenche os poros (Fig. 5). O aumento da quantidade de cimento confere a rocha uma aparência vítrea, típica de materiais silicosos.

### **Petrografia dos Basaltos**

Na área de estudo afloram basaltos a basalto andesitos, que foram divididos em dois tipos petrográficos baseados na textura e granulação da rocha (Fig. 6).

**Basalto 1** – este litotipo possui aspecto maciço em amostra de mão, apresenta uma granulação muito fina, sendo os seus constituintes identificados apenas com o auxílio de microscopia. Análises petrográficas indicam tratar-se de uma rocha hipocristalina, porfírica a glomeroporfírica, constituída por uma pequena quantidade (<5% do volume total da rocha) de microfenocristais de plagioclásio e piroxênio dispersos aleatoriamente numa matriz microcristalina. Esta matriz é composta por piroxênio, plagioclásio e minerais opacos. A variação entre o tamanho dos microfenocristais e a matriz define, localmente, uma textura seriada. Apresenta também texturas de desvitrificação, que ocorrem como massas amebóides de cores acastanhadas, constituída por argilominerais. A intensa alteração deste litotipo é indicada pela presença de argilominerais ora intersticial à matriz, ora como alteração dos fenocristais e da própria matriz. Além disto, minerais de sílica, com graus de cristalinidade variável (quartzo, calcedônia, opala), podem ser observados, em baixa proporção, preenchendo fraturas, vesículas e espaços intergranulares da matriz.

O plagioclásio forma microfenocristais, euédricos a subédricos, ripiformes e com dimensão maior variando de 0,2 até 0,5 mm, ora dispersos na matriz ou formando agregados glomeroporfíricos, a determinação da composição qualitativa é prejudicada devido ao tamanho dos grãos.

O piroxênio forma grãos subédricos a euédricos, com até 1 mm de dimensão maior e formando localmente glomeropórfiros. Ao microscópio, mostra-se geralmente muito fraturado e alterado, sob luz polarizada apresenta birrefringência alta e características que levam a crer que deva tratar-se de augita.

Os minerais opacos ocorrem em toda a matriz, como diminutos grãos de cor preta, em geral subédricos, menores que 0,1 mm de aresta, por vezes apresentam

alteração, evidenciada por um filme de cor ocre-avermelhado. Os grãos apresentam propriedades óticas típicas do par ilmenita-magnetita, quando observados com o auxílio de microscopia de luz refletida. A magnetita apresenta poder refletor baixo, cor cinza e caráter isotrópico. A ilmenita também apresenta poder refletor baixo (menor que o da magnetita), cor cinza com tom rosado e anisotropia distinta. Texturas de exsolução entre esses minerais estão representados por lamelas de ilmenita segundo os planos (111) da magnetita. Dados de susceptibilidade magnética aparente ( $K_{ap}$ ) desta rocha, obtidos por Fernandes et al. (2004), forneceram valores maiores que  $15 \times 10^{-3}$  uSi, devido à presença do par magnetita-ilmenita. A apatita ocorre em baixa proporção, disseminada por toda a rocha, como diminutos grãos incolores, euédricos.

**Basalto 2** – macroscopicamente, esta variedade de basalto apresenta coloração acinzentada em superfície inalterada e granulação mais grosseira, permitindo, por vezes, a identificação dos seus minerais constituintes com lupa de mão. A textura predominante é hipocristalina, variando de equigranular a inequigranular. A matriz apresenta textura de desvitrificação, que é caracterizada por massas anédricas constituídas essencialmente por argilominerais. A assembléia mineral é constituída predominantemente por plagioclásio, piroxênio e minerais opacos, os quais ocorrem associados à apatita e quantidades subordinadas de minerais de alteração.

O plagioclásio forma grãos euédricos a subédricos, ripiformes, com tamanhos que variam desde 0,1 até 0,5 mm de dimensão maior, geralmente apresentando macla polissintética. A determinação deste mineral, segundo método Michel-Levy, indica tratar-se de um termo da solução sólida próximo do limite entre andesina-labradorita. Os grãos ocorrem ora dispersos sem orientação preferencial, ora formando pequenos agrupamentos que definem a textura glomeroporfirítica.

Os grãos de piroxênio são em geral subédricos, com até 0,5 mm de dimensão maior. Apresentam comumente maclas simples e extinção oblíqua, essas características levam a crer que possivelmente seja uma augita. Estes cristais são bastante fraturados e apresentam uma película de alteração em tons amarronzados, provavelmente de óxidos de ferro.

A apatita ocorre como diminutos grãos incolores disseminada por toda a rocha, o que dificulta a quantificação de seu volume modal relativo. Os minerais opacos são subédricos a euédricos, com formas tendendo a cúbicas, podem atingir até 0,4 mm de dimensão maior. Ocorrem em menores quantidades que no basalto 1 mas apresentam

dimensões maiores. Sob luz refletida, as características óticas destes minerais são típicas do par ilmenita-magnetita.

### **Geodos**

Os geodos são atualmente explorados em um nível intensamente intemperizado do basalto 1 (Fig. 7), sendo extraídos a profundidades rasas situadas topograficamente a poucos metros abaixo do quartzo-arenito silicificado e acima do nível de basalto maciço com diaclases verticais (Fig. 4).

Dentre as várias estruturas mapeadas, destaca-se a similaridade entre a distribuição, orientação, forma e tamanho dos geodos e as estruturas de dilatância relacionadas com o fluxo magmático horizontal. A forma, dimensão e orientação dos geodos são condicionadas pelas estruturas de dilatância sigmoidal associadas com o anastomosamento do fluxo magmático, como evidenciado pelos espaços abertos na foliação horizontal em torno dos pods magmáticos. O movimento das lavas propiciou à abertura de espaços ao longo da foliação de fluxo, assim como em charneiras de dobras atectônicas e pods magmáticos. De acordo com Ramsay (1967) e Ramsay & Hubert (1987), as estruturas de fluxo magmático são um dos vários tipos de condutos para a canalização e armazenamento de fluidos. Assim sendo, o tamanho e a forma dos geodos estudados estão relacionados com a morfologia e dimensão das estruturas de dilatância, as quais foram preenchidas por fluidos mineralizantes independente da sua cronologia e fonte.

A calcedônia preenche parcial ou totalmente os geodos estudados formando bandas de espessura milimétrica a centimétrica. Na seqüência de cristalização, este mineral é o primeiro produto a preencher o geodo, o qual pode ou não ser seguido por uma ou mais fases de quartzo (incolor ou ametista). De acordo com Frondel (1962) e Kile (2002), a calcedônia bandada precipita a partir de soluções supersaturadas em sílica, ao passo que o quartzo precipita a partir de soluções saturadas em sílica.

Nos geodos de Santana do Livramento, o quartzo é transparente, com cristais euédricos e apresenta linhas paralelas de crescimento ao longo das faces prismáticas e romboédricas, as quais por vezes são truncadas por um material silicoso translúcido ou realçadas por inclusões especialmente de goethita. Nos cristais de quartzo (ametista) foram identificadas inclusões sólidas representadas principalmente por



goethita, associadas com proporções variáveis de fluorita, halita, silvita e pirita (Fig. 8). Além destas inclusões, sobre os cristais estudados crescem ainda calcita e quartzo.

No interior de geodos parcialmente preenchidos, pode ocorrer esmectita, que recobre os cristais de quartzo incolor e ametista (Fig. 9). Estes argilominerais ocorrem em camadas de cor ocre e cinza, em geral com poucos centímetros de espessura. Pequenos pacotes descontínuos de argilominerais, de coloração variando de marrom a preta, também foram identificados sobre as faces de cristais de quartzo. Películas de coloração diversas geralmente recobrem as camadas de calcedônia ou de quartzo no interior dos geodos. Moldes ocos de minerais são encontrados em muitos geodos.

### **Discussão**

Os polimorfos da sílica são freqüentemente encontrados como preenchimento de vesículas em terrenos vulcânicos. Tanto teorias singenéticas como epigenéticas têm sido propostas na tentativa de explicar a gênese de geodos com polimorfos da sílica.

As rochas vulcânicas estudadas apresentam diversas estruturas magmáticas, como vesículas, foliação, dobras e fraturas, que possibilitam a percolação de fluidos. O contato do nível basáltico que aloja os geodos com o arenito coeso é marcado, por vezes, por uma zona brechada descontínua, intensamente argilizada. A zona brechada corresponde ao topo da camada de basalto 1, como sugerido pela presença de autoclastos vesiculares de dimensões variadas. A elevada quantidade de vesículas nos litotipos brechados também favorece a percolação de fluidos, como denota a intensa alteração desta para argilominerais.

Na mina Novo São João, os geodos ocorrem em profundidades rasas (em geral cerca de 10 m abaixo da superfície do terreno) ou afloram em elúvios, colúvios e alúvios. Outra característica dos geodos estudados é a variação na composição e proporção dos minerais que os constituem como denota a associação dos polimorfos da sílica (com diferentes graus de cristalinidade, e.g. quartzo incolor, ametista e calcedônia) com proporções variáveis de calcita e argilominerais, e as inclusões que ocorrem nesses cristais (goethita, pirita, halita, silvita e fluorita). A origem dos cloretos e fluoretos associados com a ametista estudada não foi determinada, contudo as seguintes hipóteses podem ser aventadas:

**(1) Águas termais:** vertentes naturais e poços artesianos de água mineral termal ocorrem em determinados locais da Formação Serra Geral. Dados químicos destas águas indicam que o íon predominante varia de local para local, o que permite classificá-las como bicarbonatadas cálcica a cálcica-magnésiana e bicarbonatada sódica (Araújo et al., 1999), mas também possuem íons de sulfato, cloreto e fluoreto. Por exemplo, águas minerais termais ( $\pm 30$  °C) jorram no município de Irai (norte do Rio Grande do Sul) e nas proximidades de depósitos de ametista. Considerando a composição e temperatura das águas subterrâneas da Formação Serra Geral, pode-se aventar a possibilidade destas serem o agente transportador dos halóides, visto que elas possuem as características físico-químicas adequadas para a solubilização e mobilização destes íons. A presença destes íons favorece a mobilização da sílica, conforme discutido por Hoog et al. (2005) e Dove & Rimstidt (1994), o que possibilita a formação de fluidos com graus de saturação de sílica variável.

**(2) Peperitos:** a ocorrência de rochas do tipo peperito foi mapeada na área estudada, sugerindo a interação de lavas básicas com sedimentos arenosos inconsolidados no paleo-ambiente desértico. A concentração de sais em superfície devido à intensa evaporação é um processo comum em ambientes desérticos. O processo de assimilação de sais derivados de sedimentos inconsolidados durante o extravasamento da lava no paleo-ambiente desértico poderia resultar na associação de peperitos e cloretos. Por outro lado, esta hipótese é pouco provável para a área de estudo, pois inexistem registros de evaporitos no paleo-deserto Botucatu no sul do Brasil. Ademais, inexistente qualquer registro da ocorrência de fluorita em evaporitos.

**(3) Rochas alcalinas:** a associação de ametista com fluorita é conhecida em rochas alcalinas, como exemplificado pelos geodos alojados em basaltos alcalinos na Província de Basaltos Continentais do Deccan. Sob o ponto de vista teórico, a associação de basaltos alcalinos com o vulcanismo Serra Geral é possível, mas inexistente registro de rochas alcalinas na área estudada ou na região.

Em síntese, os dados obtidos neste estudo apontam para um elo entre a percolação de águas termais aquecidas (águas geotermiais?) e a formação de geodos de quartzo e calcedônia. A presença de quartzo- $\alpha$  e argilominerais em geodos, somada à ocorrência destes em profundidades rasas, favorece a hipótese epigenética de infiltração de águas subterrâneas em rochas vulcânicas (Kile, 2002). Contudo, na área estudada as evidências petrográficas sugerem que a infiltração de águas termais foi restrita às estruturas de dilatação da rocha (foliação magmática, fraturas e pods) e por isso, a

alteração hidrotermal é de pequeno porte, estendendo-se por poucos milímetros a centímetros adjacentes à fraturas e à foliação.

### **Conclusões**

A integração do mapeamento geológico com as observações petrográficas e de varredura eletrônica permite concluir que:

A distribuição e o modo de ocorrência dos geodos estudados estão condicionados pelas estruturas do fluxo magmático da rocha hospedeira, tais como foliação e fraturas;

Os geodos estão alojados no basalto 1, pois neste litotipo ocorrem estruturas de dilatância, que possibilitaram a canalização e armazenamento de fluidos hidrotermais (águas subterrâneas termais). Por outro lado, não se descarta a hipótese de que outros tipos de rocha, com estruturas de dilatância favoráveis à percolação de fluidos geotermiais, possam alojar geodos;

Os geodos são preenchidos por quartzo e calcedônia, associados com quantidades subordinadas de calcita e argilominerais e inclusões de goethita, halita, silvita, fluorita e pirita em ametista. Esta associação sugere que fluidos hidrotermais aquosos contendo cloretos e fluoretos contribuíram para a solubilização e mobilização da sílica para os sítios de dilatância na rocha hospedeira;

Em síntese, podemos enumerar os seguintes guias prospectivos locais: a) rochas com estruturas de dilatância abertas, tais como foliação, fraturas, dobras e pods; b) ocorrência de fontes de águas minerais termais; c) presença de quartzo-arenito silicificado, pois este litotipo também teria sido afetado pelo evento que depositou sílica nos geodos.

### **Agradecimentos**

O autor agradece a CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Programa de Pós Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul) pela bolsa de mestrado, e à FAPERGS - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (Proc. nº 04/0677.8 - PCOR), pelo financiamento dos trabalhos de campo e análises.

### Referências Bibliográficas

- Acauan, R.B. 2004. **Caracterização geológica e gemológica das ametistas e ágatas de Santana do Livramento, Sudoeste do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 80 p. Trabalho de conclusão do Curso de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. (Inédito)
- Araújo, L.M.; França, A.B.; Potter, P.E. 1999. Hydrogeology of the Mercosul aquifer system in the Paraná and Chaco-Paraná Basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget aquifer system, USA. **Hydrogeology Journal** 7 : 317–336.
- Bellieni, G., Comin-Chiaramonti, P., Marques, L.S., Melfi, A.J., Piccirillo, E.M., Nardy, A.J.R., Roisenberg, A. 1984. High- and low Ti flood basalts from the Paraná plateau (Brazil): petrogenetic and geochemical aspects bearing on their mantle origin. **Neues Jahrbuch Für Mineralogie: Abhandlungen**. 150 : 273–306.
- Dove, P.M. & Rimstidt, J.D. 1994. Silica-water interactions. In: Heaney P.J.; Prewitt C.T.; Gibbs G.V. (Eds.). **Silica physical behavior, geochemistry and materials applications**, p. 259–308 (Reviews in Mineralogy, vol. 29). Michigan, BookCrafters, Inc.
- Duarte, L.C.; Hartmann, L.A.; Vasconcellos M.A. 2005. Epigenetic geode formation in the world-class amethyst deposits of the southern Paraná Basaltic Province. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE METALOGENIA, 1., Gramado. **Resumos...** Gramado. 1 CD-ROM.
- Ewart, A.; Milner, S. C.; Armstrong, R. A.; Duncan, A. R. 1998. Etendeka volcanism of the Goboboseb mountains and Messum Igneous Complex, Namibia. Part I: geochemical evidence of early cretaceous Tristan Plume Melts and the Role of crustal contamination in the Paraná–Etendeka CFB. **Journal of Petrology**, 39 (2) : 191–225.
- Fernandes, G.A.; Pulz, G.M.; Acauan, R.B. 2004. Critérios geofísicos na prospecção de depósito de ametista e ágata, na região de Santana do livramento, sudoeste do estado do rio grande do sul. In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 16., Porto Alegre. **Resumos...** Porto Alegre. 1 CD-ROM.

- Fischer, A.C. 2004. **Petrografia e geoquímica das fases silicosas dos geodos mineralizados a ametista (Região do Alto Uruguai, RS, Brasil)**. Porto Alegre, 159 p. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Université Toulouse III.
- Fischer, A.C. 1999. **Composição química e possíveis causas da cor da ametista da região do Alto Uruguai, RS**. Ouro Preto, 168 p. Dissertação de Mestrado, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.
- Fron del, C. 1962. **The system of mineralogy, vol. III – Silica minerals**. New York, John Wiley and Sons, Inc. 334 p.
- Gomes, M.E.B. 1996. **Mecanismos de resfriamento, estruturação e processos pós-magmáticos em basaltos da Bacia do Paraná - região de Frederico Westphalen (RS) - Brasil**. Porto Alegre, 264 p. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Heemann, R. 2005. **Modelagem estrutural e tridimensional para prospecção e avaliação dos depósitos de ágata do distrito mineiro de Salto do Jacuí (RS)**. Porto Alegre, 150 p. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Hoog, J.C.M.; Bergen, M.J.; Jacobs, M.H.G. 2005. Vapour-phase crystallisation of silica from SiF<sub>4</sub>-bearing volcanic gases. **Annals of Geophysics**, **48** (4/5) : 775-785.
- Juchem, P.L. 1999. **Mineralogia, geologia e gênese dos depósitos de ametista da região do Alto Uruguai, Rio Grande do Sul**. São Paulo, 225 p. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.
- Kile, D.E. 2002. Occurrence and genesis of thunder eggs containing plume and moss agate from the Del Norte Area, Saguache County, Colorado - Statistical Data Included. **Rocks & Minerals** **77** : 252-68.
- Kirstein, L.A.; Peate, D.W.; Hawkesworth, C.J.; Turner, S.P.; Harris, C.; Mantovani, M.S.M. 2000. Early Cretaceous basaltic and rhyolitic magmatism in southern Uruguay associated with the opening of the South Atlantic. **Journal of Petrology**, **41** (9) : 1413-1438.

- Mantovani, M.S.M., Marques, L.S., De Sousa, M.A., Civetta, L., Atalla, L., Innocenti, F. 1985. Trace element and strontium isotope constraints on the origin and evolution of Paraná continental flood basalts of Santa Catarina State, southern Brazil. **Journal of Petrology**, **26** : 187-209.
- Milani, E.J. 1997. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental**. Porto Alegre, 2V. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Milner, S.C.; Duncan, A.R.; Whittingham, A.M.; Ewart, A. 1995. Trans-Atlantic correlation of eruptive sequences and individual silicic volcanic units within the Paraná-Etendeka igneous province. **Journal of Volcanology and Geothermal Research** **69** : 137-157
- Minioli, B.; Ponçano, W.L.; Oliveira, S.M.B. 1971. Extensão geográfica do vulcanismo basáltico do Brasil Meridional. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, **43** : 433-437.
- Peate, D.W. 1997. The Paraná-Etendeka Province. In: JJ Mahoney & MF Coffin (Eds.). **Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism**. American Geophysical Union, p. 217-245.
- Peate, D.W., Hawkeswort, C.J., Mantovani, M.S.M. 1992. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. **Bulletin of Volcanology**, **55** : 119-139.
- Petri, S.; Fúlfaro, J.V. 1983. **Geologia do Brasil**. São Paulo. T. A. Queiroz, Universidade de São Paulo. 631 p.
- Petry, K., Jerram D.A., Almeida, D.P.M., Zerfass, H. 2007. Volcanic-sedimentary features in the Serra Geral Fm., Paraná Basin, southern Brazil: Examples of dynamic lava-sediment interactions in an arid setting. **Journal of Volcanology and Geothermal Research** **159** : 313-325.

- Proust D.; Fontaine C. 2007. Amethyst-bearing lava flows in the Paraná Basin (Rio Grande do Sul, Brazil): cooling, vesiculation and formation of the geodic cavities. **Geological Magazine** 144 (1) : 53-65.
- Ramsey, J.G. 1967. **Folding and fracturing of rocks**. New York, McGrawHill, 568 p.
- Ramsey, J.G. & Huber, M. I. 1987. **The techniques of modern structural geology**. (V. 2, Folds and fractures). London, Academic Press Inc. 700 p.
- Renne, P.R.; Ernesto, M.; Pacca, I.G.; Coe, R.S.; Glen, J.M.; Prevot, M.; Perrin, M. 1992. The age of Parana flood volcanism, rifting of Gondwanaland, and the Jurassic-Cretaceous boundary. **Science**, 258 : 975-979.
- Roisenberg, A. 1989. **Petrologia e geoquímica do vulcanismo ácido mesozóico da província meridional da Bacia do Paraná**. Porto Alegre, 285 p. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Scherer, C.M.S.; Lavina, E.L.C. 2006. Stratigraphic evolution of a fluvial-eolian succession: The example of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous Guarú and Botucatu formations, Paraná Basin, southernmost Brazil. **Gondwana Research**, 9 : 475-484.
- Scherer, C.M.S.; Caravaca, G.; Sommer, C.A. 2003. Evolução estratigráfica dos depósitos eólicos do grupo São Bento (Cretáceo inferior da Bacia do Paraná) no estado do Rio Grande do Sul. In: ENCONTRO SOBRE A ESTRATIGRAFIA DO RIO GRANDE DO SUL: ESCUDOS E BACIAS, 1., Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, p. 170–176.
- Scherer, C.M.S. 2000. Eolian dunes of the Botucatu Formation (Cretaceous) in Southernmost Brazil: morphology and origin. **Sedimentary Geology**, 137 : 63-84.
- Schmitt, J.C.; Camatti, C.; Barcellos, R.C. 1991. Depósitos de ametista e ágata no estado do Rio Grande do Sul. In: Schobbenhaus, C.; Queiroz, E.T.; Coelho, C.E.S. (eds). **Principais depósitos minerais do Brasil-Gemas e rochas ornamentais**. Brasília, co-edição CPRM/DNPM, 4 (A) p. 271-285.

- Schneider, R.L.; Mühlmann, H.; Tommazi, E.; Medeiros, R.A.; Daemon, R.F.; Nogueira, A.A. 1974. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., Porto Alegre, **Anais...** SBG, p. 41-65.
- Scopel, R.M.; Gomes, M.E.B.; Formoso, M.L.L.; Proust, D. 1998. Derrames portadores de ametistas na região de Frederico Westphalen-Iraí-Planalto-Ametista do Sul, RS-Brasil. In: CONGRESSO URUGUAYO DE GEOLOGIA, 2. Montevideo. **Actas...** Sociedade Uruguaya de Geologia, p. 243-248.
- Sial, A.N. 1976. The post-Paleozoic vulcanism of northeast Brazil and its tectonic significance. **Anais da Academia Brasileira de Ciência**, **48** : 299-311.
- Stewart, K.; Simon, T.; Simon, K.; Hawkesworth, C.; Kirstein, L.; Mantovani, M. 1996. 3-D,  $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$  geochronology in the Paraná continental flood basalt province. **Earth and Planetary Science Letters**, **143** : 95-109.
- Turner, S.; Regelous, M.; Hawkesworth, C.; Mantovani, M. 1994. Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision  $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$  geochronology. **Earth and Planetary Science Letters**, **121** : 333-348.
- Waichel, B.L., Lima, E.F., Sommer, C.A., Lubachesky, R. 2007. Peperite formed by lava flows over sediments: An example from the central Paraná Continental Flood Basalts, Brazil. **Journal of Volcanology and Geothermal Research** **159** : 343-354.
- Wildner, W. 2004. Estratigrafia do magmatismo Serra Geral na Bacia do Paraná – Conceitos básicos e divisão faciológica. In: REUNIÃO ABERTA DA COMISSÃO BRASILEIRA DE ESTRATIGRAFIA. Porto Alegre. **Anais...** SBG, p. 62-77.
- Wildner, W.; Lopes, R.C.; Romanini, S., Camazzato, E. 2003. Contribuição à estratigrafia do magmatismo Serra Geral na Bacia do Paraná. In: ENCONTRO SOBRE A ESTRATIGRAFIA DO RIO GRANDE DO SUL: ESCUDOS E BACIAS, 1., Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, p. 204-210.
- Zalán, P.V.; Wolff, S.; Conceição, J.C.J.; Marques, A.; Astolfi, M.A.M.; Vieira, I.S.; Appi, V.T.; Zanotto, O.A. 1990. Bacia do Paraná. In: Deraja Gabaglia, G.P. & Milani, E.J. (Coord.). **Origem e Evolução de Bacias Sedimentares**. Rio de Janeiro, PETROBRÁS, p. 135-164.



### **Legenda das Figuras**

**Figura 1-** Mapa do Rio Grande do Sul, destacado em vermelho a área de estudo.

**Figura 2-** Mapa geológico da área de estudo.

**Figura 3-** Perfil geológico esquemático. A - perfil geológico esquemático; B - nível de autobrecha; C - basalto com disjunção subhorizontal; D - contato entre a Formação Botucatu e a Formação Serra Geral, em vermelho o contato abrupto.

**Figura 4-** Em A perfil geológico esquemático, sendo I representado pelo quartzo-arenito silicificado (coeso), II nível de brecha alterada, III basalto com estrutura de fluxo magmático, portador de ágata e ametista e IV basalto maciço. B - Fotografia de campo mostrando a estruturação do derrame. C - Fotografia evidenciando o contato entre o quartzo-arenito silicificado e o nível de autobrecha, mostrando a matriz de arenito silicificado entre os clastos.

**Figura 5-** Fotomicrografia de quartzo-arenito da Formação Botucatu (A, C e E em luz natural) e (B, D e F em luz polarizada). A e B - quartzo-arenito friável cimentado por uma pequena quantidade de óxidos e hidróxido, destacando a bimodalidade granulométrica. C, D, E e F -quartzo-arenito silicificado com cimento de calcedônia e bimodalidade granulométrica.

**Figura 6-** Fotomicrografias em luz natural (A e C) e polarizada (B e D) dos litótipos basálticos estudados, destacando a diferença de granulometria entre eles. A e B - basalto 1 com textura porfírica representada por microfenocristais de plagioclásio e clinopiroxênio numa matriz de plagioclásio, piroxênio e minerais opacos (ilmenita-magnetita). C e D - basalto 2 com textura que varia de equigranular a inequigranular, com cristais de plagioclásio, clinopiroxênio e minerais opacos.

**Figura 7-** Fotografias de campo e amostras de mão. A e B - basalto 1, portador de geodos em estruturas de dilatância, dobras e fluxo magmático, em B

apresenta intenso intemperismo. C - geodo de ametista preenchido por esmectita. D - geodo de quartzo com pequenos tufo de argilominerais recobrimdo os cristais. E - cristais de quartzo recobridos por uma película de coloração laranja amaronado. F - geodo de ametista com pequenas esferas de coloração branca compostas de fluorita e quartzo.

**Figura 8-** Microscopia eletrônica de varredura com EDS de amostras de ametista. A - inclusão de fluorita (fl) microcristalina em ametista, esta possui forma de cone. B - ametista com cristais de forma cúbica de silvita (slv) e halita (hl).

**Figura 9-** Difratoograma de argilomineral (esmectita) encontrado dentro da cavidade de geodos.

## Figuras



Figura 1.

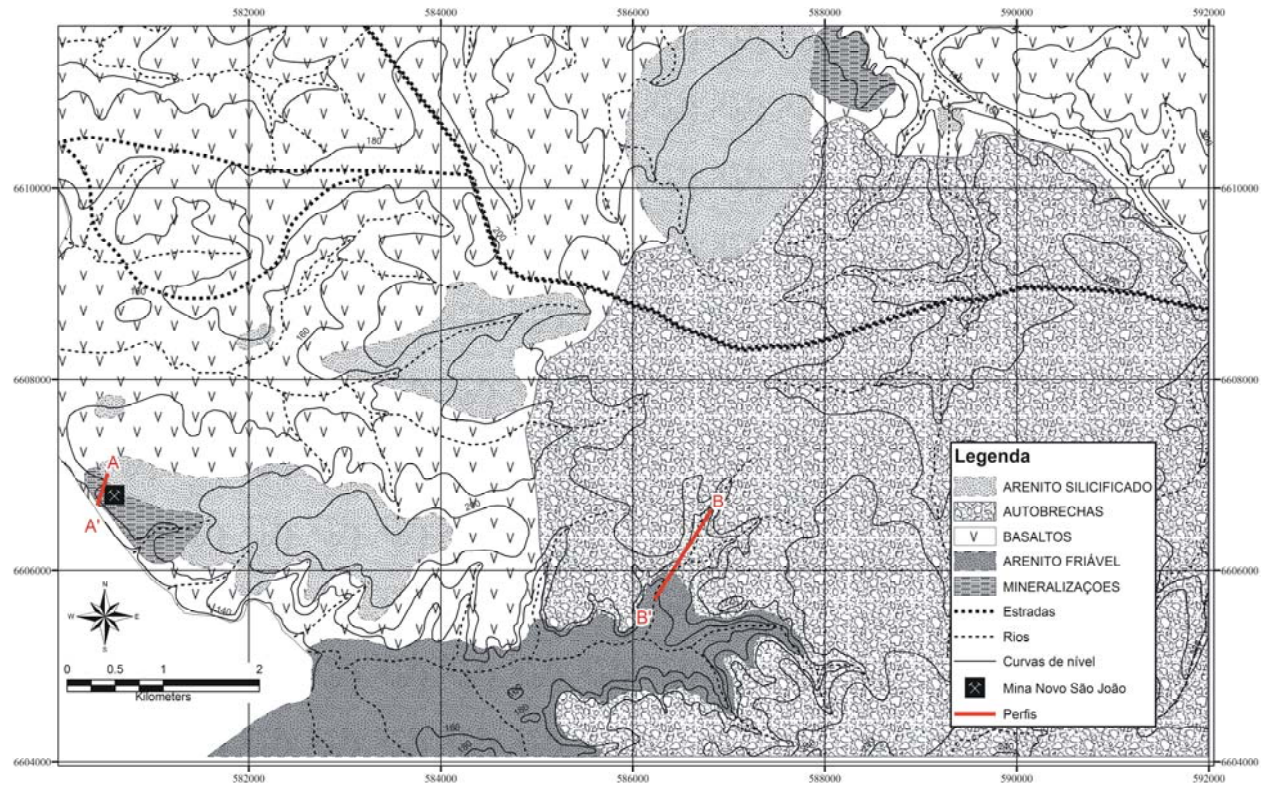


Figura 2.

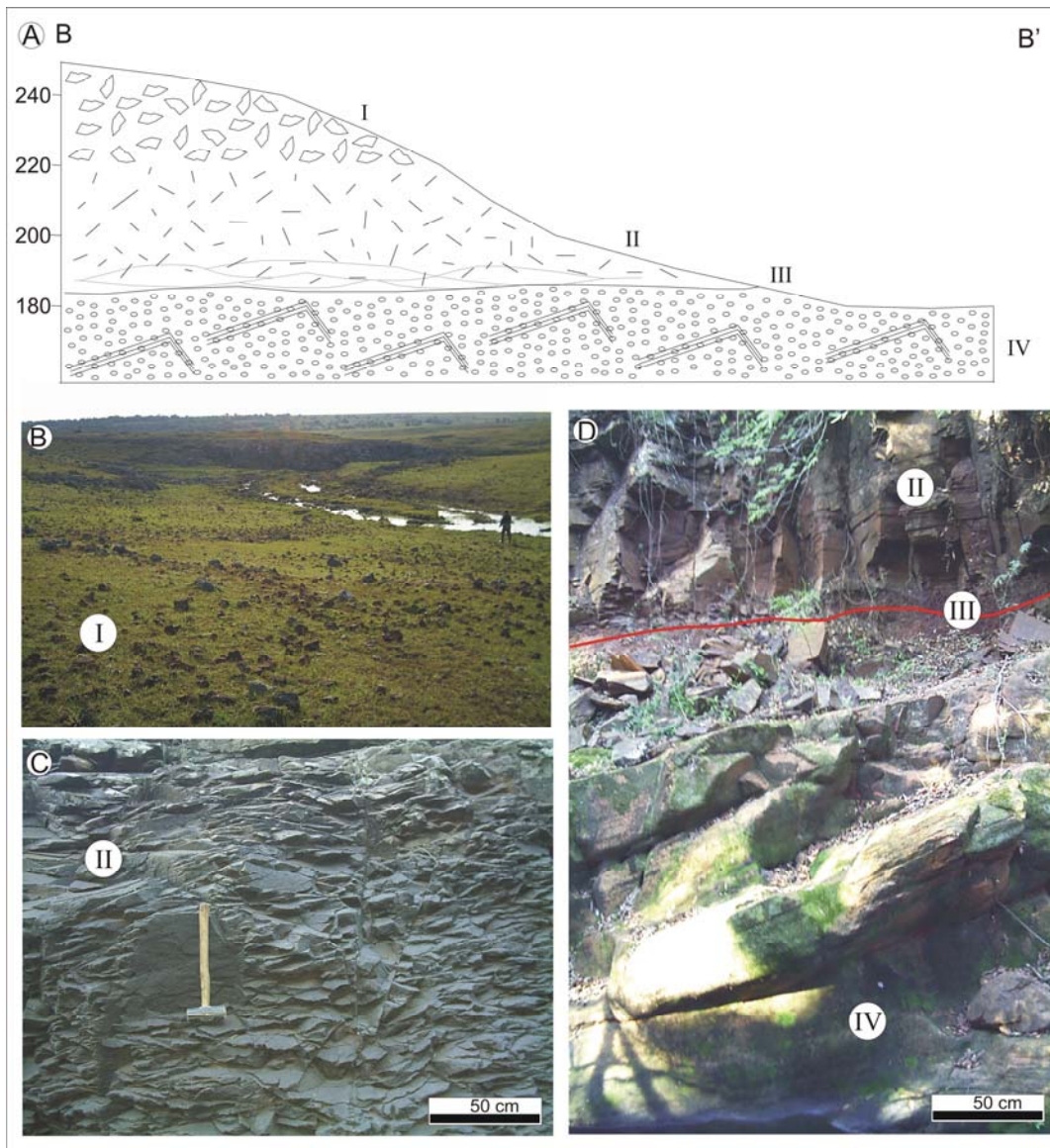


Figura 3.



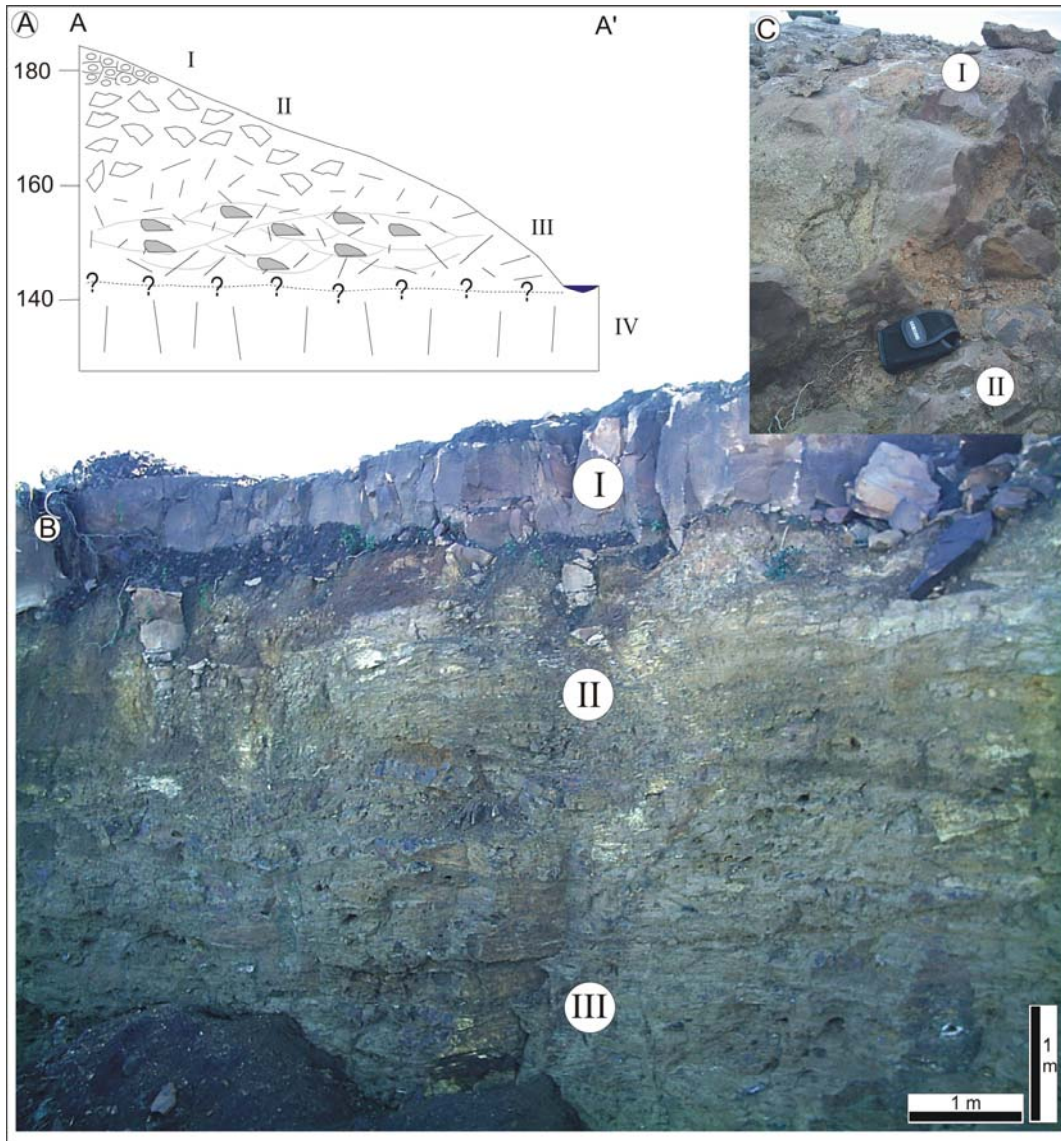


Figura 4.

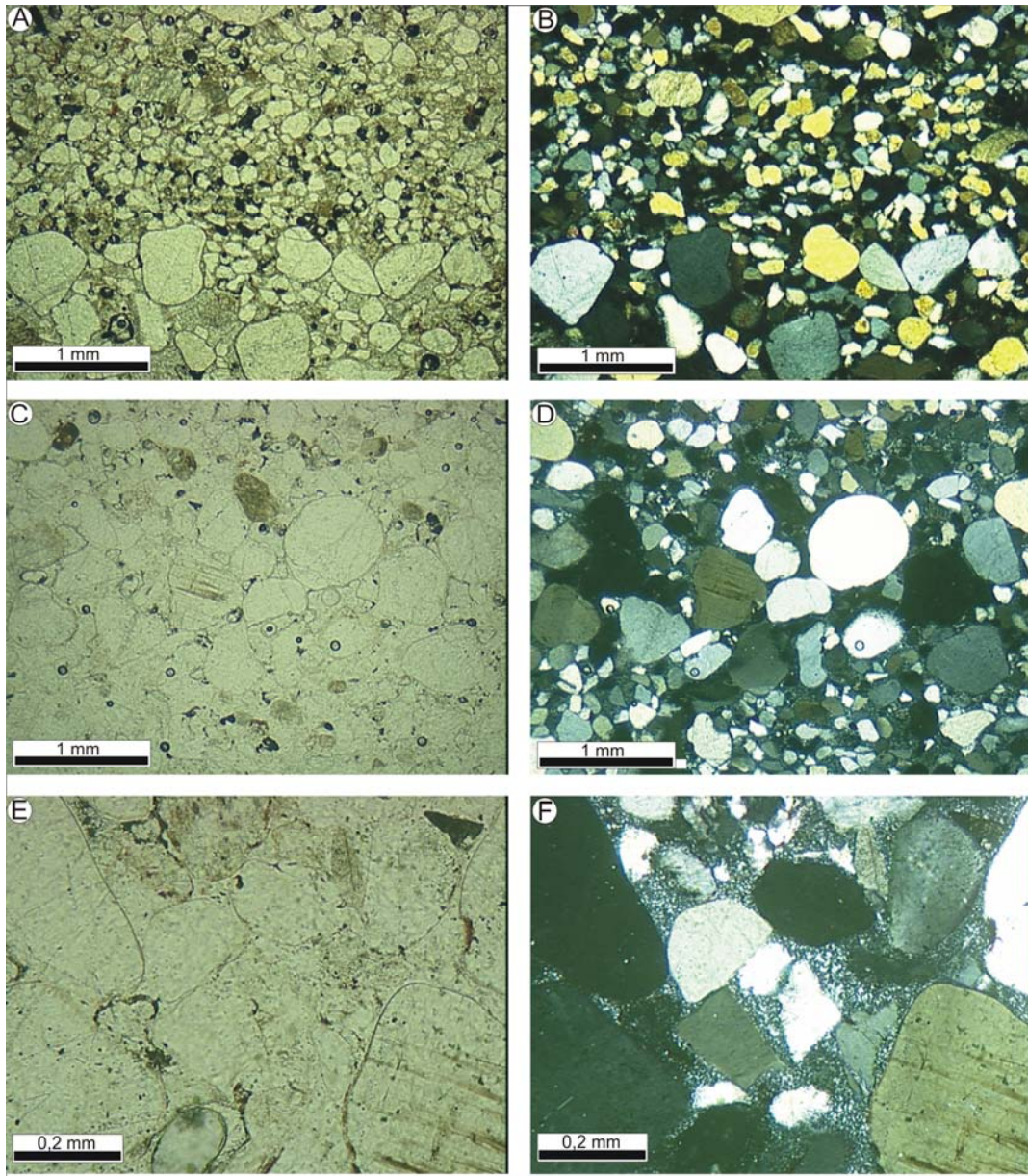


Figura 5.



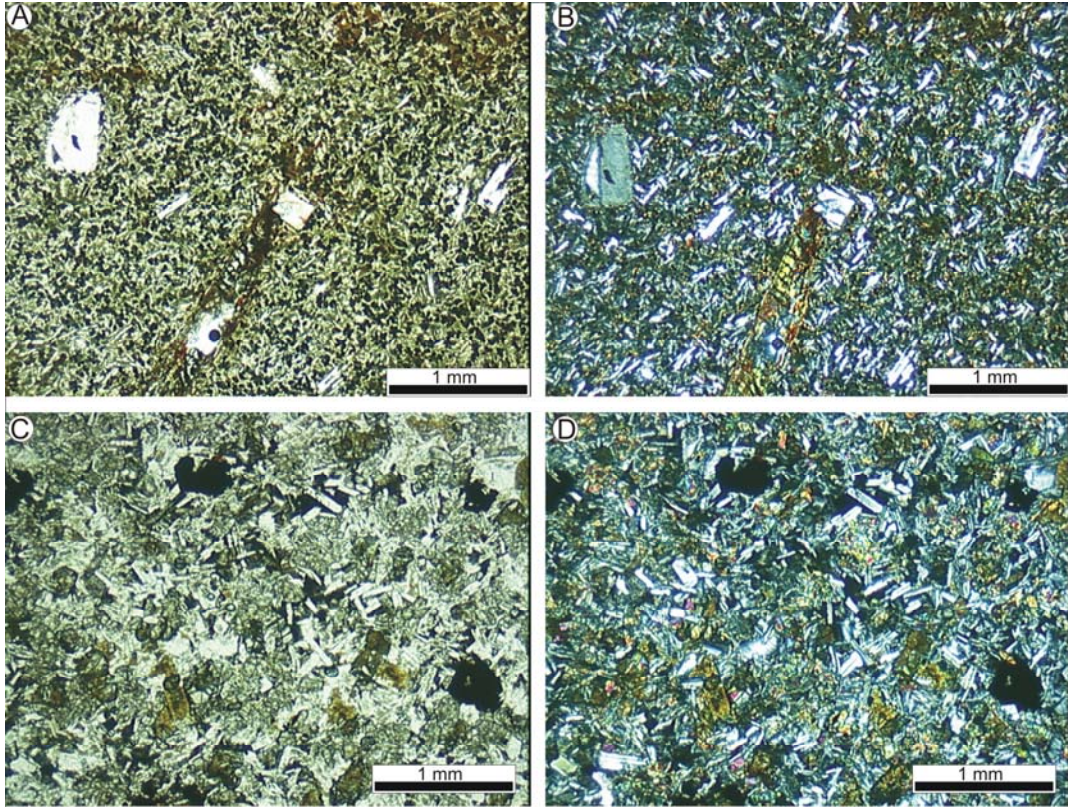


Figura 6.



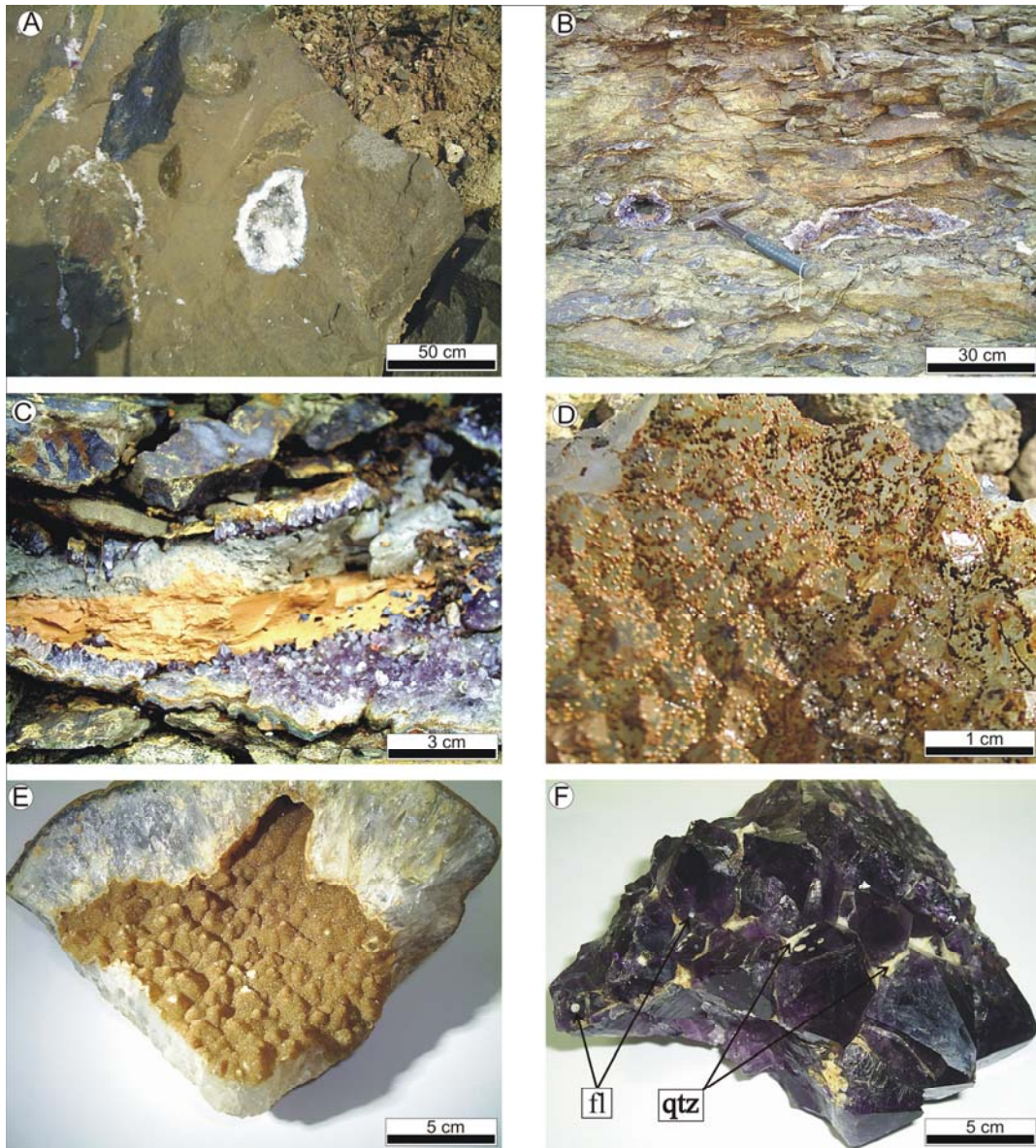


Figura 7.

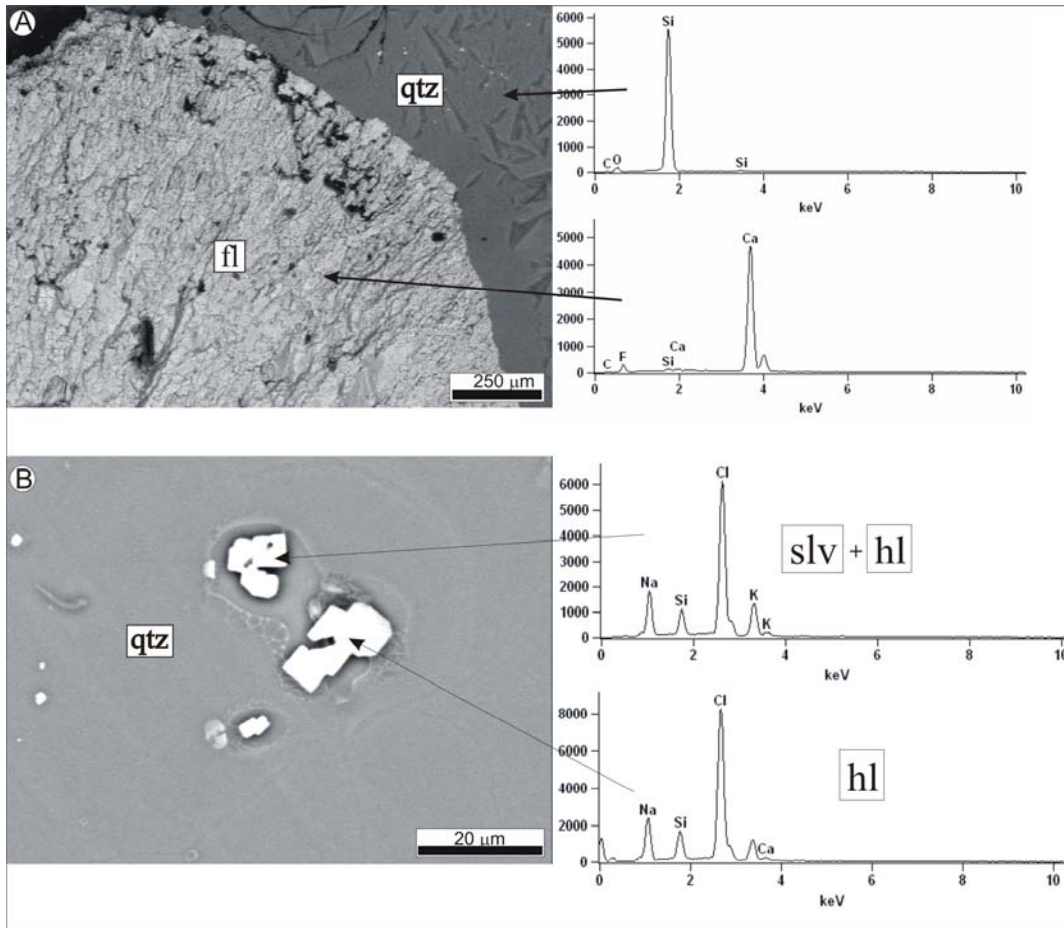


Figura 8.

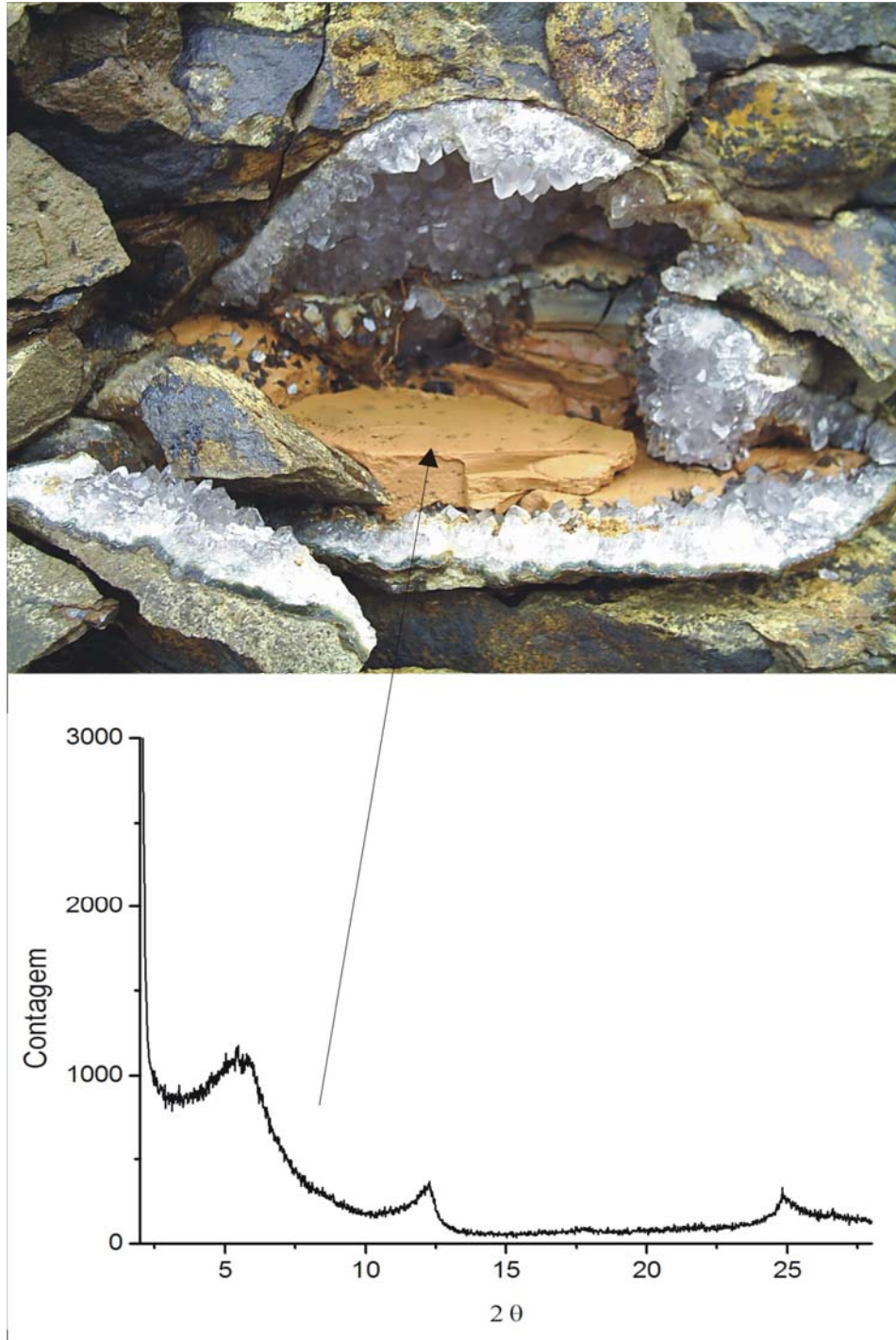


Figura 9.

## **CAPÍTULO 3 – CARACTERÍSTICAS GEMOLÓGICAS DA ÁGATA E DA AMETISTA DOS DEPÓSITOS COLUVIONARES**

### **3.1 Introdução**

Neste capítulo é apresentada uma cópia do artigo: “*Gemmological characteristics of amethyst and agate from colluvium deposits in the southern Paraná Continental Flood Basalt Province, Brazil*”. Este trabalho foi submetido para publicação na **Revista Ore Geology Reviews**.

O trabalho será apresentado na íntegra sem nenhuma modificação no conteúdo e redação, acompanhado da carta do editor.



### 3.2 Carta editor da revista

Genova Maria Pulz  
Instituto de Geociencias  
~~Instituto de Geociencias~~  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Av. Bento Goncalves 9500  
Porto Alegre, Rio Grande do Sul State  
PO Box 15001, 90501-900  
Brazil

Ian Graham  
School of BEES  
~~SCHOOL OF BEES~~  
UNSW  
Sydney, NSW 2052  
Australia

Dear Genova Maria,

Please find enclosed one of the reviewer's comments to your submission for the special issue of Ore Geology Reviews on 'Genesis of gem deposits'. I've been waiting a long time for the second reviewer's comments but they haven't arrived and so I thought it best that we just take into account this reviewer's comments.

Could you please revise your manuscript taking into account and replying to all the reviewer's comments, then send me back the revised manuscript and figures (preferably as Tiff files) on a CDROM. To speed-up the editing process, could also please email me the text as an MSWORD file, and the figures as either pdf or zip files to the following email address:

[i.graham@unsw.edu.au](mailto:i.graham@unsw.edu.au)

Many thanks for your contribution, and looking forward to receiving your revised manuscript.

Yours Sincerely,



Ian T Graham  
Associate Editor  
Ore Geology Reviews

**GEMMOLOGICAL CHARACTERISTICS OF AMETHYST AND  
AGATE FROM COLLUVIUM DEPOSITS IN THE SOUTHERN PARANÁ  
CONTINENTAL FLOOD BASALT PROVINCE, BRAZIL**

Gênova Maria Pulz<sup>1</sup>, Adolpho Herbert Augustin<sup>1</sup>, Roberta Bonnato Acauan<sup>2</sup>, Léo  
Afraneo Hartmann<sup>1</sup>, Tania Mara Martini de Brum<sup>1</sup>, Adelir José Strieder<sup>2</sup>.

1- Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento  
Gonçalves 9500; Porto Alegre, Rio Grande do Sul State, Brazil, P.O. Box  
15001. Postcode 90501-900 E-mail: [genova@portoweb.com.br](mailto:genova@portoweb.com.br).

2- Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento  
Gonçalves 9500; Porto Alegre, Rio Grande do Sul State, Brazil, Postcode  
90501-900

Corresponding author:

Gênova Maria Pulz- Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves 9500; Porto Alegre, Rio Grande do Sul State,  
Brazil, P.O. Box 15001. Postcode 90501-900 Tel: +55-51- 33167297 Fax number: +55-  
51-33167302 E-mail: [genova@portoweb.com.br](mailto:genova@portoweb.com.br).

**Summary**

Abstract

Introduction

Regional geological setting

Local geological setting

Colluvial amethyst deposit

Analytical procedures

Physical properties

Agate types

Inclusions

Discussion and conclusions

References

Acknowledgements

Figure captions

Table caption

Figures

### **Abstract**

The Paraná Continental Flood Basalt Province of southern Brazil is well known for its agate and amethyst deposits in geodes. São João Novo mine in the Rio Grande do Sul southwestern border district produces agate and amethyst geodes from a colluvial deposit derived of lava flows of Serra Geral Formation. Protogenetic, primary and secondary inclusions enclosed in São João Novo gems occur in a few amounts without destroying the transparency and quality of the gems. This is the first time that an assemblage of sylvite, halite and fluorite is described as inclusions in amethyst from southernmost Brazil. This solid inclusions assemblage distinguishes the studied gems from other Brazilian gems, as well as from other gems exploited in the world. In addition, primary inclusions contain the halite, sylvite and fluorite assemblage, which constrains the growth of the gems to acid and saline mineralising solutions. The processes that resulted in the gem geodes genesis and chronology are not well known, but the salt and fluorite inclusions suggest the occurrence of alkaline rocks in the studied area as well as the assimilation of crustal rocks during the eruption of the lava flows (Serra Geral Formation). This is supported by the abundant presence of sandstone xenoliths (Botucatu Formation) in the mine area.

**Key words:** amethyst, agate, colluvial deposit, mineral inclusions.



## **Introduction**

Rio Grande do Sul state in southernmost Brazil is well-known worldwide as a producer of amethyst and agate, which are mainly extracted from the Alto Uruguai and Salto do Jacuí areas. In 1997, the Brazilian Geological Survey (CPRM) surveyed the Southwestern Border Gemmological Province of Rio Grande do Sul state and classified several areas according to their potential to host gem deposits (Fig. 1). These are: (i) *Very highly favourable zones* where gems are exploited as well as areas exploited in the past. The tonnage and the gem quality in these areas are high. (ii) *Highly Favourable zones* correspond to areas without exploitation in the past, but where many occurrences of the gems with expressive tonnage are known. (iii) *Low favourable zones* correspond to those where gem occurrences are known, but the tonnage estimates are low or the gem quality is insignificant. (iv) *Non-economic zones* where no gem occurrence is known, but the geologic context is similar to the mineralised areas. (v) *Barren zones* where the lithostratigraphic and petrological associations are different from mineralised areas.

The studied area is located in the very highly favourable zone of Southwestern Border Gemmological Province of Rio Grande do Sul state. Exploration of these gems started recently in a new occurrence, the São João Novo mine located in the country side of Santana do Livramento town near the border of Brazil with Uruguai. Several features distinguish this new occurrence from those traditionally exploited in southernmost Brazil, as exemplified by the abundant presence of carnelian, and the mode of occurrence of the gems, combined with a wide spectrum of mineral inclusion types in the amethyst and the size of geodes. The objective of this paper is to describe the mineral inclusions in the Santana do Livramento amethyst and agate for the mineralogical characterization of these gems.

## **Regional geological setting**

The southern Paraná Continental Flood Basalts Province is well known for its world-class deposits of amethyst and agate (Gilg et al., 1999). It is part of the large igneous province that extends to central Brazil and Paraguay and even into pre-drift Africa (Etendeka). The extrusion of the basaltic, basaltic andesite and dacite lavas is

related to the activity of the Tristan da Cunha mantle plume, which was active before and during the opening of the South Atlantic Ocean at 135-130 m.y. The extensive basaltic province is a complex association of volcanic and sedimentary rocks (Serra Geral Formation) which evolved mostly during desert conditions and locally humid climate (Waichel et al., 2006). Geochemical compositions of the basalts indicate several types of lavas (e.g., Peate et al., 1992), particularly high-Ti and low-Ti types.

The lavas are underlain by the sedimentary rocks of the intracratonic, Paleozoic Paraná Basin, which is nearly 7,000 m thick at the depocenter in Paraná state. The sedimentary rocks were formed mostly in a continental environment such as river deltas and lakes, but seawater invaded the basin in some occasions. The Botucatu Formation is immediately below the Serra Geral Formation and is made up mostly of sand dunes; it is also intercalated with the Serra Geral Formation basalts (Scherer and Lavina, 2006).

An extensive fault system affected the Paraná Basin after its formation; there are geological indications that the faults were active during lava extrusion. The Botucatu Formation is the main part of the Guarany aquifer, the largest fresh water aquifer in the world, but the Paraná basin is an aquifer as a whole. The several sub-aquifers are interconnected through the faults, which make fluid percolation in the basin a major issue for the origin of the amethyst and agate hosted in the basalts (Gilg et al., 2002).

In the state of Rio Grande do Sul, the lava pile has a maximum thickness (800 m) near the world-class amethyst deposits of Ametista do Sul, but decreases quickly in the south to only 100 m across major NW-directed faults in the Rio Grande Arch. The Southwestern Border Gemmological Province of Rio Grande do Sul state is contained in the basalts of Serra Geral Formation, but it remains disputed whether the small thickness was caused by erosion of the thick top in the last 130 m.y. or whether these mineralised basalts are part of the top of the sequence preceded by a gap of volcanic activity. The Botucatu Formation sandstones are exposed in windows along the border Brazil-Uruguay and covered by lava flows. Amethyst and agate occurs in the basalts in this geological environment of apparent simplicity but which has many controlling factors, including the nature and composition of the flows, nature of the immediate basement of the flows, climate during the flows and mineralising processes, fault activity (seismicity) during and after volcanic activity, nature of the fluids and the complex interplay of these factors.

### **Local geological setting**

The São João Novo mine produces amethyst and agate geodes. Abundant colourless quartz geodes also occur in the mineralised area. The geodes crop out in the colluvium of small hills (less than 200 m high), which are covered by the pampa grasslands. Approximately 2 m of soil layer, alterite and altered rock overlie the lava flows of the Serra Geral Formation.

The host rock assemblage comprises basalts, andesitic basalts and flow breccias (Acauan, 2004) of the Serra Geral Formation (Fig. 2). Locally, meter-thick lenses of sandstones of Botucatu Formation occur intercalated with the basaltic lavas flows (Schmitt et al., 1991).

The geodes are handpicked after a bulldozer levels the colluvium landscape (Fig. 3). The size of geodes varies between 2-3 and 30 cm. A thin clay layer wraps the geodes (amethyst, colourless quartz and agate) and sandstone blocks. Only in a few cases is the clay layer found in the cavities of the fractured geodes or as a colloform green band intercalated between agate bands. According to Scopel et al. (1998), celadonite is the clay mineral that forms the similar colloform green bands in geodes from Alto Uruguai region. In addition, iron oxides (term used here to embrace oxides and oxy-hydroxides) are very common in the colluvium as fine particles or concentrates (nodules, layers or mottles). The most common is goethite.

The amethyst crystals exhibit a wide spectrum of light and dark purple colours. Zoned crystals along c-axis are very common and occur as individual crystals dispersed in the colluvium or filling the geodes cavities. Agate and colourless quartz geodes often occur associated with amethyst geodes.

### **Colluvial amethyst deposit**

Geomorphologic features of the São João Novo mine region show development of colluvium slope around the small hills. The colluvium profile comprises two soil zones (Fig. 4), which are distinguished by differences in mineral composition, texture and structure of soil. These zones overlie alterites of basalt and andesitic basalt.

**A0 zone:** abundant boulders of agate and colourless geodes cover this zone, which are prospective guides to identify this soil zone in the field as well as in remote

sensing procedures. In addition, some boulders and fragments of sandstone clasts occur disseminated in the clay matrix. The general colour of this zone is light reddish due the abundance of clay minerals and sandstone clasts.

Some geodes are fractured, while others are well preserved. The diameter of geodes varies between 2-3 and 30 cm. Although the sandstone boulders are dispersed chaotically, some geodes are oriented parallel to the horizontal structure of the underlying host-rock.

**A1 zone:** This zone is constituted by red clay soil, with black nodules of iron and manganese oxides. The basalt structure is seldom preserved, which is represented by horizontal fractures. Although agate geodes occur in this zone, the quantity of them is smaller than in A0 zone soil profile. Some small vertical fractures are also preserved in A1 zone and filled by sandstones, which appear as sandstone veins with about 5-cm thickness. A typical feature in this zone is the white appearance of agate geodes due the loss of water from pores of agate, as indicated by FTIR analysis (Fig. 5). The diameter of geodes reaches up 40 cm in this soil zone. The filling of geodes comprises agate with overgrowth of colourless quartz druses and very few amethyst druses.

**C-zone (Alterite zone):** This zone comprises alterites of basalt and andesitic basalts. These rocks are exposed in trenches, and show dome structure with horizontal fractures that become curved following the dome shape. The intense weathering of volcanic rocks is evidenced by reddish colour mixed with greenish levels due to the abundance of celadonite and other clay minerals. Relict blocks of basalt exhibit spherical foliation and vertical fractures filled in places by agate and/or colourless quartz. Incrustations of geodes occur in this zone. Agate amygdales are also common in the alterite. The morphology of amygdales varies between oval and spherical. They are seldom concordant to basalt structure orientation. Sandstone layers are often observed intertrapped in the alterite.

### **Analytical procedures**

Gemmological standard tests of the gems were carried out with sodium light (589.3 nm) on gemmological refractrometre (Topcon). The crystal density was determined in distilled water, at room temperature, using a hydrostatic balance (Marte<sup>®</sup>, model A200CT). Mineral inclusions enclosed in the studied gems were observed by

Scanning Electronic Microscopy (SEM) and analysed by Energy Dispersive System (EDS). Crystal samples were covered with carbon film and analysed with Jeol Scanning Microscope (JSM 5800).

The absorption spectra of agate, obtained over a frequency range of 400 to 4000  $\text{cm}^{-1}$  on powders, were carried out with a single-beam infrared spectrometer with Fourier transform (Mattson, Galaxy 3020). The precision of the peak measurements is 4  $\text{cm}^{-1}$ . The agate samples were diluted in KBr in proportions ranging from 1 to 5 wt%.

Soil sampling was undertaken to identify the mineral composition of the mineralised colluvium by XRD (X-ray diffraction). The diffractograms were recorded step by step in the following conditions:  $0.02^\circ$   $2\theta$  steps, 2 s per step, operating voltage 40 kV, current 25 mA,  $\text{CuK}\alpha$  radiation. The angles were measured with a precision of  $0.01^\circ$   $2\theta$ .

### **Physical properties**

Standard gemmological tests were carried out to establish the physical properties of gem samples from the São João Novo mine (Tab. 1). The results indicate that the refractive indices, birefringence, and density are not sufficiently known to serve as reliable means of discrimination between the amethysts from the different deposits of southernmost Brazil.

The dichroism is distinct but not intensive, and alternates between colourless along the c-axis and grey or bluish purple at right angles to the c-axis. The amethyst samples from São João Novo mine are non-reactive under colour filter (Göttingen filter). They also fail to respond to long wave ultraviolet beams. The lack of luminescence is due to the iron content (Webster, 1983).

### **Agate types**

The most conspicuous features of the studied agate are the colour and the banding patterns variations. Although the huge variation of the colours and banding from one geode to another, the studied agate can be subdivided in striped, white, reddish and grey according to the combination of colour and textural pattern in hand sample (Fig. 5) and mode of occurrence of geodes. The filling patterns of agate geodes found in

the studied area are heterogeneous and banded (according to the terminology of Brum et al., 1998).

Striped agate geodes show banding pattern consisting of alternation of white and grey colloform bands. They occur together with white agate in the same level of colluvium profile. The range of size of geodes is between 8 and 23 cm of longest diameter. Some geodes exhibit an inner rim of striped agate and the core is unfilled, while others are completely filled by striped agate. Others show striped agate in the rim zone and amethyst or colourless quartz in the core.

White agate shows heterogeneous banding pattern. The geodes show size and filling similar to the grey agate geodes, but they are found only in the A0-zone of soil profile. FTIR analyses show a decrease of amount of H<sub>2</sub>O molecules structural in the range of 3000-3700 cm<sup>-1</sup> in relation to grey agate (Fig. 5), which suggests that white colour of agate is promoted by the dehydration due the solar exposition.

The red agate corresponds to the carnelian variety and occurs as fragments of heterogeneous banding in prominent red or orange colours. This agate type is common in the A0-zone soil profile, but it also occur as fragments dispersed in the surface or in alluvium deposits related to small streams in the mineralised area. The size of fragments reaches up 10 cm of longest diameter. These carnelian fragments are excellent prospective guides for mineralised zones.

Grey agate represents the most common type of agate in all colluvium profile zones. The heterogeneous textural pattern is common the grey agate geodes. The longest diameter of the geodes filled with grey agate ranges between 10 and 25 cm. Some geodes are completely filled by colloform bands of grey agate, while others show overgrowth of colourless quartz and/or amethyst crystals on agate bands.

### **Inclusions**

The inclusion assemblage enclosed in the amethyst from São João Novo mine has features that are primarily of diagnostic value to distinguish these gems from other mines in the world. Some of the mineral inclusions are trapped accidentally from the mineral suite of the host rocks (termed protogenic inclusions, according to Gübelin, 1989). Others precipitated from the mineralising solutions (primary inclusions) or after the gem formation (secondary inclusions). Among the inclusion varieties only pyrite grains show features that suggest a protogenetic origin in the studied gems (Fig. 7). The

majority of inclusions exhibits features related to growth lines that allow considering them as primary inclusions, as exemplified by sylvite, halite, fluorite and goethite (Figs. 8 and 9). Varieties of secondary inclusions are observed in very few cases such as calcite and quartz crystals (Fig. 10).

Pyrite seems to be a seldom inclusion in the studied gems, which supports its protogenetic origin. This sulphide inclusion was observed in amethyst as well as in colourless quartz crystals. It is scattered randomly throughout the gems, as discrete grains. This sulphide appears as euhedral to subhedral crystals and grey or dark brown colours and metallic lustre in binocular lens (Fig. 8).

Fluorite occurs as clusters with rounded shape and milky white colour, which reach up to 1 cm of diameter. In addition, SEM images reveal that this inclusion has a network structure (Hobbs et al., 1976). Some fluorite crystals occur as inclusions as well as botryoides (up to 5 mm across) on druses of amethyst crystals.

Goethite was observed in amethyst, as well as in colourless quartz and carnelian. This type of mineral inclusion is very common in the studied gems, in special near the growth lines of the crystals. They are either scattered individually or assembled as spherical or ellipsoidal groups. Radiating bundles of goethite needles of dark brown or black colour form each cluster. The dimensions of the clusters are extremely variable and can reach up to 350 x 250  $\mu\text{m}$ .

Sylvite and halite display more or less well-shaped crystals trapped into cavities in the amethyst crystals. Some inclusions occur as a crusty material constituted by disseminations of hopper crystals in the amethyst gem similar those had described by Campbell et al. (2001) enclosed in quartz veins of Capitan Mountains (USA). These two mineral species can be observed together filling the same or different cavities in the same amethyst crystal. Sylvite was identified by K and Cl peaks in EDS analysis. Na and Cl peaks identified halite crystals. These inclusions were observed in several amethyst and carnelian crystals of São João Novo mine.

Calcite occurs as euhedral crystals overgrown on druses of colourless quartz. The size of these secondary inclusions ranges from few millimetres up to 10 cm of longest dimension. A typical feature of this inclusion is its light-green colour and outstanding transparency.

Quartz appears as overgrowing on goethite and fluorite inclusions enclosed in amethyst. A few well-shaped crystals are randomly arranged on the amethyst faces.

## Discussion and conclusions

Brazilian amethyst deposits are hosted in basalts, conglomerates as well as quartzites and granites. Amethyst deposits are hosted in granites (e.g. Altamira, Pará State) and sedimentary rocks (e.g. Grota Coxo, Bahia State; Alto Bonito and Pau d'Arco, Pará State) in north and northeastern Brazil (Fig. 1 and Tab. 2). In northernmost Brazil, the amethyst crystals also fill fractures and fault planes in quartzites and granites. In southernmost Brazil, amethyst and agate are exploited in Alto Uruguai and Salto do Jacuí regions, respectively (Corrêa, 1995; Juchem, 1999; Gilg et al., 1999; Duarte et al., 2003, 2005, among others). The amethyst deposits are hosted in basalts and andesite-basalts (Paraná Continental Flood Basalt Province) in the studied area. The colluvium deposits are related to weathering of host rocks and geomorphologic features of the studied area.

The presence of halite, sylvite and fluorite inclusions allow discriminating the studied amethyst (Tab. 1) from other Brazilian amethysts as well as those from Four Peaks (USA). Although fluorite inclusions in amethyst are known in the gems from Mahodari (India), the association of fluorite with Na-K salts allow distinguishing the studied amethyst from those that are exploited in India.

The protogenetic inclusions were trapped accidentally during the gems growth, and comprise relict minerals from the host rock. Pyrite grains represent the protogenetic inclusions enclosed in São João Novo mine. This is the first time that pyrite inclusions are identified in amethyst crystals from southernmost Brazil deposits. The low amount of these sulphide inclusions promotes a low interference in the transparency and quality of the gem crystals.

The primary inclusions are related to the mineralising processes. This group of inclusions precipitated during the gems growth. Fluorite and salt (halite and sylvite) inclusions assemblage in the studied gems suggest a contamination of basaltic magma by crustal rocks as well as alkaline lavas flows in the studied area. However, alkaline lava flows are unknown in the São João Novo mine area.

On the other hand, there are some evidences of magma contamination such as the presence of sandstone xenoliths in the basaltic lavas. The assimilation processes liberate cognate fluids trapped in the pores of the sandstones, and consequently promotes the liberation of salt components that result in a saline fluid. In addition, the



abundance of goethite inclusions along growth lines in the amethyst suggests that the gem precipitated from acid mineralising solutions.

Some calcite euhedral grains occur on amethyst druses in the geodes. This textural feature suggests that the growth of the carbonate crystals occurred after amethyst formation. Calcite grains in the studied gems represent the secondary inclusions. These inclusions are related to percolation of carbonic and/or aquo-carbonic fluids. Agate comprises the outer rim of the geodes, which is porous and facilitates the infiltration of the meteoric fluid. Hydrologic studies of the Botucatu Formation have demonstrated that the artesian meteoric waters contain proportions of carbonic species that promote the precipitation of calcite and chalcedony (Meng & Maynard, 2001). Consequently, the high porosity of the outer rim of the geodes combined with presence of carbonic meteoric fluids promoted carbonate precipitation on the studied amethyst druses.

Finally, this research shows that the inclusion assemblage of amethyst from Southwestern Border Gemmological Province in Southernmost Brazil is capable of distinguishing the studied gems from other sources. The association of salts (sylvite and halite) and fluorite inclusions distinguish the gems from São João Novo mine from those are exploited in Southernmost Brazilian nowadays.

## References

- ACAUAN, R.B., 2004. Caracterização geológica e gemológica das ametistas e ágatas de Santana do Livramento, Sudoeste do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. Monografia de Conclusão do Curso de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 80 pp. (Unpublished).
- BRAZILIAN GEOLOGIC SURVEY, 1997. Mapa gemológico da fronteira oeste do Rio Grande do Sul. Informe de Recursos Minerais. Série Pedras Preciosas, n.1, SUREG/POA, 3pp.
- BRUM, T.M.M., JUCHEM, P.L., AGOSTINI, I.M., FIORENTINI, J.A., 1998. Classificação da Ágata. In: AGOSTINI, I.M., FIORENTINI, J.A., BRUM, T.M.M., JUCHEM, P.L. (Eds.), Ágata do Rio Grande do Sul. Ministério de Minas e Energia; Departamento Nacional de Produção Mineral, Brasília. Série Difusão Tecnológica, n 5, 272 pp.
- CASSINI, C.T., COSTA, M.L., 1994. A Ametista de Pau D'Arco: Mineralogia, quimismo e inclusões fluidas. In: 4 Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém, Resumos expandidos, pp. 151-154.
- CASSINI, C.T., COSTA, M.L., FUZIKAWA, K., 1999. A ametista de Pau d'Arco, Alto Bonito e Altamira no Estado do Pará. Revista da Escola de Engenharia de Minas 52, 257-262.
- COLLYER, T.A., MÁRTIRES, R.A.C., 1996. O depósito de ametista do Alto Bonito, município de Marabá, Pará. 34 Congresso Brasileiro de Geologia, Anais, Goiânia, vol. 5, pp.2221-2225.
- COLLYER, T.A., MÁRTIRES, R.A.C., MACHADO, J.I.L., 1996. O depósito de ametista de Pau d'Arco, município de Conceição do Araguaia, Pará. 35 Congresso Brasileiro de Geologia, Belém, vol. 1, pp. 374-382.
- CORRÊA, T.E., 1995. Geologia e critérios de prospecção para depósitos de ametistas na região do Alto Uruguai, RS. Porto Alegre. Dissertação de mestrado. Programa de

- Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 134 pp. (Unpublished).
- DUARTE, L.C., HARTMANN, L.A., VASCONCELLOS, M.A.Z., 2005. Epigenetic geode formation in the world-class amethyst deposits of the southern Paraná Basaltic Province. Symposium on Metallogeny, Brazilian Geological Society, Gramado, Brazil, 6 pp. (CD-ROM).
- DUARTE, L.C., JUCHEM, P.L., PULZ, G.M., BRUM, T.M.M.; CHODUR, N., LICCARDO, A., FISCHER, A.C., ACAUAN, R.B., 2003. Aplicações de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e sistema de energia dispersiva (EDS) no estudo de gemas: exemplos brasileiros. *Revista Pesquisas em Geociências* 30, 3-15.
- GILG, H.A., MORTEANI, G., KOSTITSYN, Y., PREINFALK, C., GATTER, I., STRIEDER, A.J., 1999. Genesis of amethyst geodes in basaltic rocks of the Serra Geral Formation (Ametista do Sul, Rio Grande do Sul, Brazil): a fluid inclusion, REE, oxygen, carbon, and Sr isotope study on basalt, quartz, and calcite. *Mineralium Deposita* 38, 1009-1025.
- GÜBELIN, E.J., 1989. Gemological characteristics of Pakistani emeralds. In: Kazmi, A.H., Snee, L.W. (Eds). *Emeralds of Pakistan: Geology, Gemology & Genesis*. New York, Van Nostrand Reinhold Ltda., pp. 75-91.
- JUCHEM, P.L., 1999. Mineralogia, geologia e gênese dos depósitos de ametista da região do Alto Uruguai, Rio Grande do Sul. Tese de doutorado da Universidade de São Paulo, 225 pp. (Unpublished).
- LOWELL, J. & KOIVULA, J. I. 2004. Amethyst from Four Peaks, Arizona. *Gems & Gemology*, 40: 230-238.
- MENG, S.X., MAYNARD, J.B., 2001. Use of statistical analysis to formulate conceptual models of geochemical behavior: water chemical data from the Botucatu aquifer in São Paulo State, Brazil. *Journal of Hydrology* 250, 78-97.

- PEATE, D.W., HAWKESWORTH, C.J., MANTOVANI, M.S.M., 1992. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. *Bulletin of Volcanology* 55: 119-139.
- SCHERER, C.M.S., LAVINA, E.L.C., 2006. Stratigraphic evolution of a fluvial-eolian succession: The example of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous Guar and Botucatu formations, Paraná Basin, Southernmost Brazil. *Gondwana Research* 9: 475-484.
- SCHMITT, J.C., CAMATTI, C., BARCELLOS, R.C., 1991. Depósitos de ametista e gata no estado do Rio Grande do Sul. In: Schobbenhaus, C., Queiroz, E. T., Coelho, C. E. S. (Eds.). *Principais depósitos minerais do Brasil-Gemas e rochas ornamentais*. Brasília, co-edção CPRM/DNPM, v. 4, parte A, 271-285.
- SCOPEL, R.M., GOMES, M.E.B., FORMOSO, M.L.L., PROUST, D., 1998. Derrames portadores de ametistas na região de Frederico Westphalen-Iraí-Planalto-Ametista do Sul, RS-Brasil. In: 2 Congresso Uruguayo de Geologia. *Anais*. pp. 243-248.
- WAICHEL, B.L., LIMA, E.F., LUBACHESKY, R., SOMMER, C.A., 2006. Pahoehoe flows from the Paraná Continental Flood Basalts. *Bulletin of Volcanology* 68, 599-610.
- WEBSTER, R. 1983. *Gems*. 4ed. Butterworth Ltd. England. 1006 pp.

### **Acknowledgements**

This work has been financially supported by Capes - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Programa de Pós Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul) and grant from FAPERGS - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (Proc. n° 04/0677.8 - PCOR).

### Figure captions

**Figure 1-** Geologic map of Southwestern Border Gemmological Province (after CPRM 1997). Inset: map of Brazil showing the location of São João Novo mine (1), Alto Uruguai (2), Grota mine (3), Pau d'arco (4), Alto Bonito (5) and Altamira mine (6).

**Figure 2-** Generalized geological map of São João Novo mine area. Inset: map of South America showing the location of São João Novo mine.

**Figure 3-** (a) Main pit of São João Novo mine. (b) Piles of agate geodes selected by size. (c) Fragments of amethyst geodes selected by colour. (d) Fragment of amethyst geode.

**Figure 4-** Field photograph and colluvium profile sketch showing A0, A1 and C soil zones in the São João Novo mine area.

**Figure 5-** Photographs of agate geode fragments illustrating the agate varieties in the studied area. (a) Stripped agate showing bands with different colour. (b) White agate. (c) Reddish agate fragments (called of carnelian). (d) Grey agate detaching its massive aspect under naked eye.

**Figure 6-** Infrared absorption spectra of single crystal of amethyst at room temperature.

**Figure 7-** Images of protogenetic and primary inclusions into amethyst from São João Novo mine. (a) Photomicrograph of pyrite (py) and goethite (gt) inclusions. (b) SEM image of pyrite inclusion and EDS plot showing Fe, S and Si peaks. The Si peak is probably related to contamination of analyses by amethyst host crystal.

**Figure 8-** BSE images of primary inclusions into the amethyst crystals from the Santana do Livramento. (a) Sylvite and halite inclusions. (b) EDS plot showing Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> peaks of halite. (c) EDS plot showing K<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> peaks of sylvite.

**Figure 9-** Primary inclusions into amethyst from São João Novo mine. (a) BSE image of fluorite (fl). (b) EDS graph of fluorite inclusion showing in (a). (c) BSE image of goethite (gt) crystals along to growth lines. (d) EDS plot of goethite inclusions showing in (c).

**Figure 10-** Secondary inclusions into amethyst from São João Novo mine. (a) Geode fragments showing calcite (cal) secondary inclusions on colourless quartz. (b) SEM image of a well-shaped quartz crystals as overgrowing on goethite (gt) inclusions enclosed in amethyst (am).

**Table caption**

**Table 1-** Physical indices of amethyst from São João Novo mine.

**Table 2-** Characteristics of inclusions in amethyst and agate from Santana do Livramento and other deposits (Lowell & Koivula 2004; Cassini & Costa 1994; Collyer & Mártires 1986; Collyer et al. 1988; Cassini et al. 1999, Duarte et al. 2003).



**Table 1**

<b>Properties</b>	<b>Amethyst</b>
Colour	Light violet to dark violet
Diaphaneity	Transparent to opaque
Zonation	Present according to the faces of the rhombohedra
Hardness	7.00
Specific gravity	2.61-2.65
Refractive indices	$n_e=1.548 - 1.552$ $n_o=1.539 - 1.542$
Birefringence	$\Delta=0.008 - 0.011$
Optical character	Uniaxial negative
Pleochroism	Weak; bluish violet to pinkish violet
UV Fluorescence	Inert to long-wave UV radiation

**Table 2**

<b>Deposit</b>	<b>Mineral inclusions</b>	<b>Host rock</b>
São João Novo Mine (Southern Brazil)	Goethite, Sylvite, Halite, Fluorite, Pyrite, Fe-oxides	Basalt Basalt-andesite
Ametista do Sul (Southern Brazil)	Goethite, Calcite, Chalcedony	Basalt
Pau-d'arco (North Brazil)	Rutile, Carbonate, Hematite	Conglomerate
Alto bonito (North Brazil)	Opaque minerals (hematite?), Calcite (?)	Quartzite
Altamira (North Brazil)	Goethite, Opaque minerals (hematite?)	Granite
Grota Coxo Mine (Northeast Brazil)	Goethite, Hematite	Quartzite
Four Peaks (USA)	Hematite	Quartzite
Mahodari (India)	Fluorite	Basalt

## Figuras

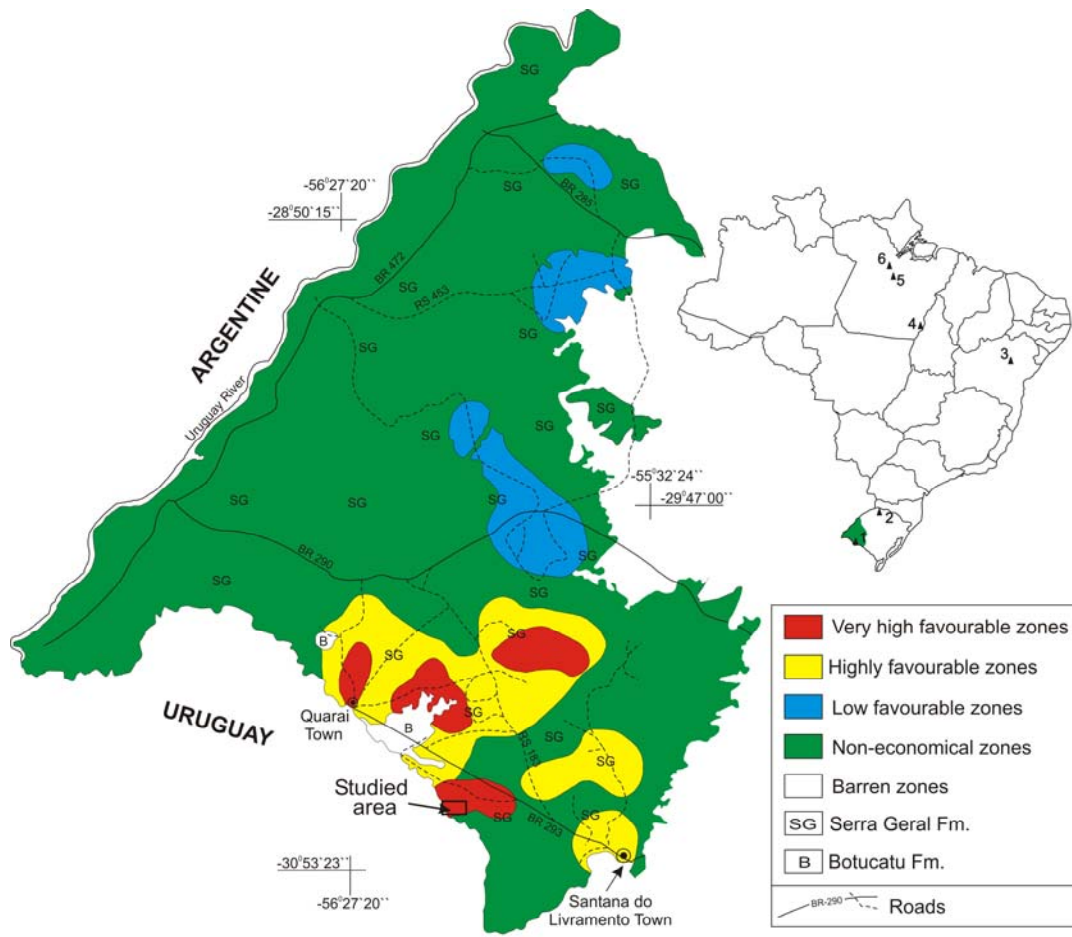


Figure 1.

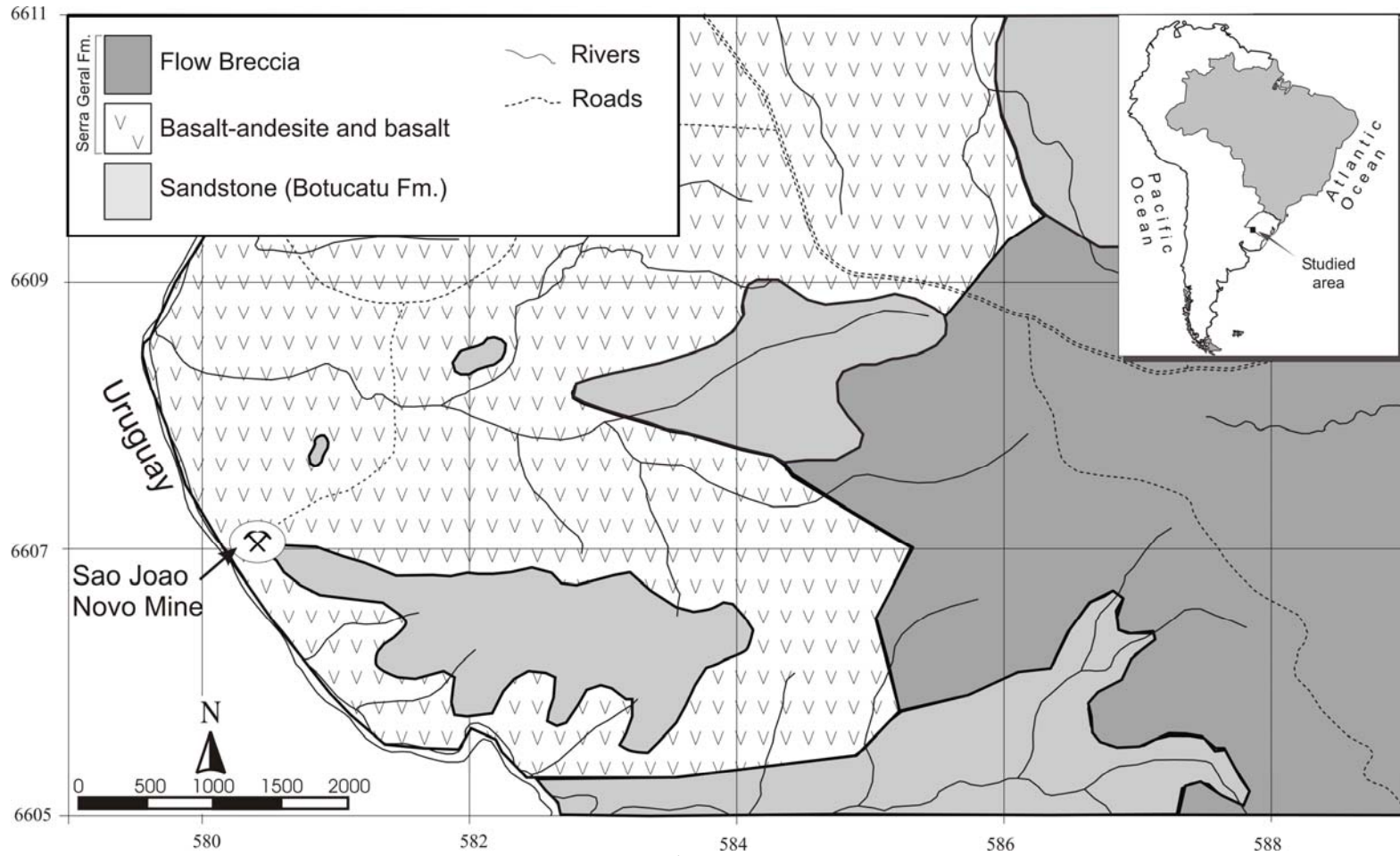


Figure 2.



Figure 3.





Figure 4.

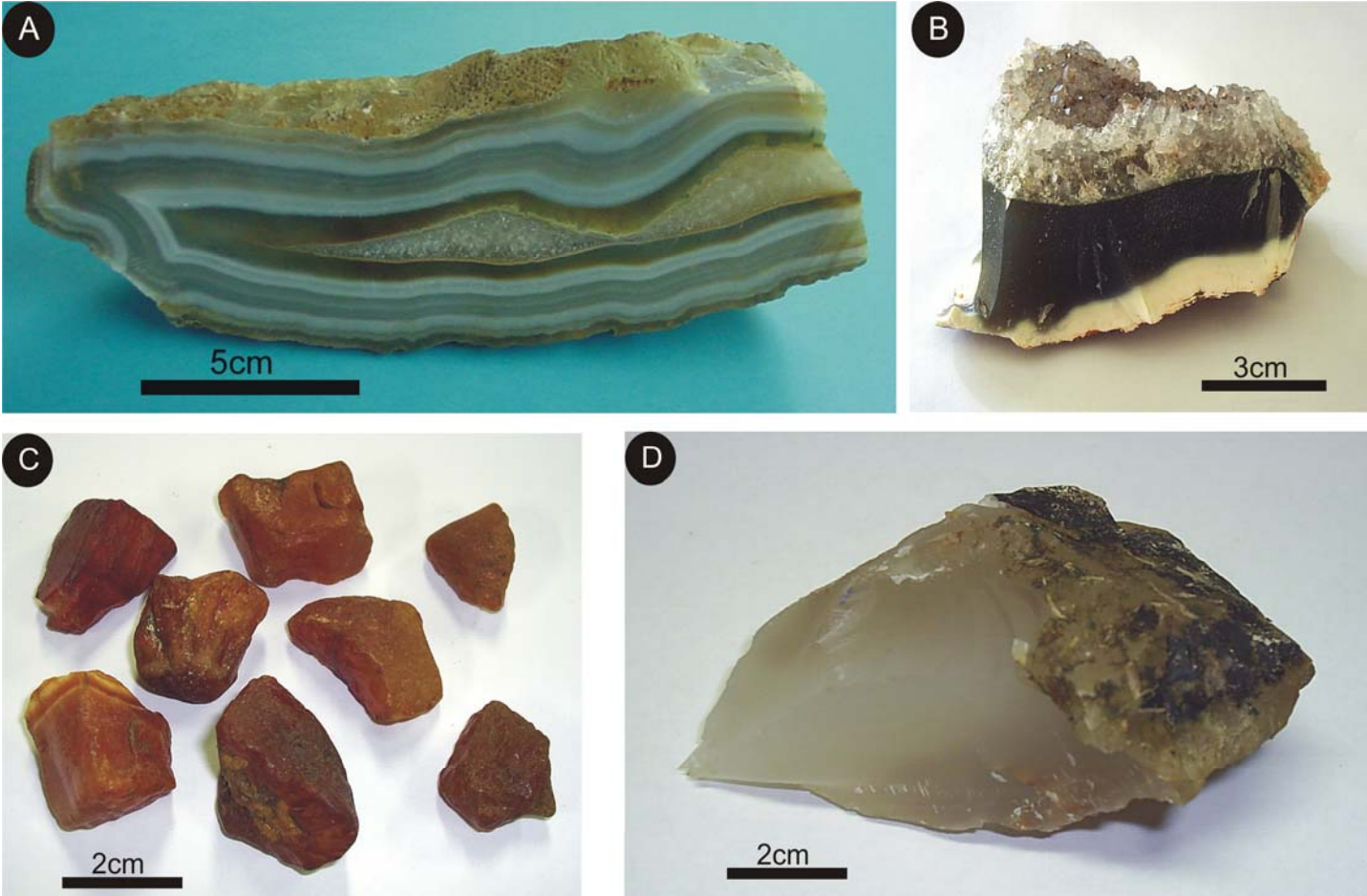


Figure 5.

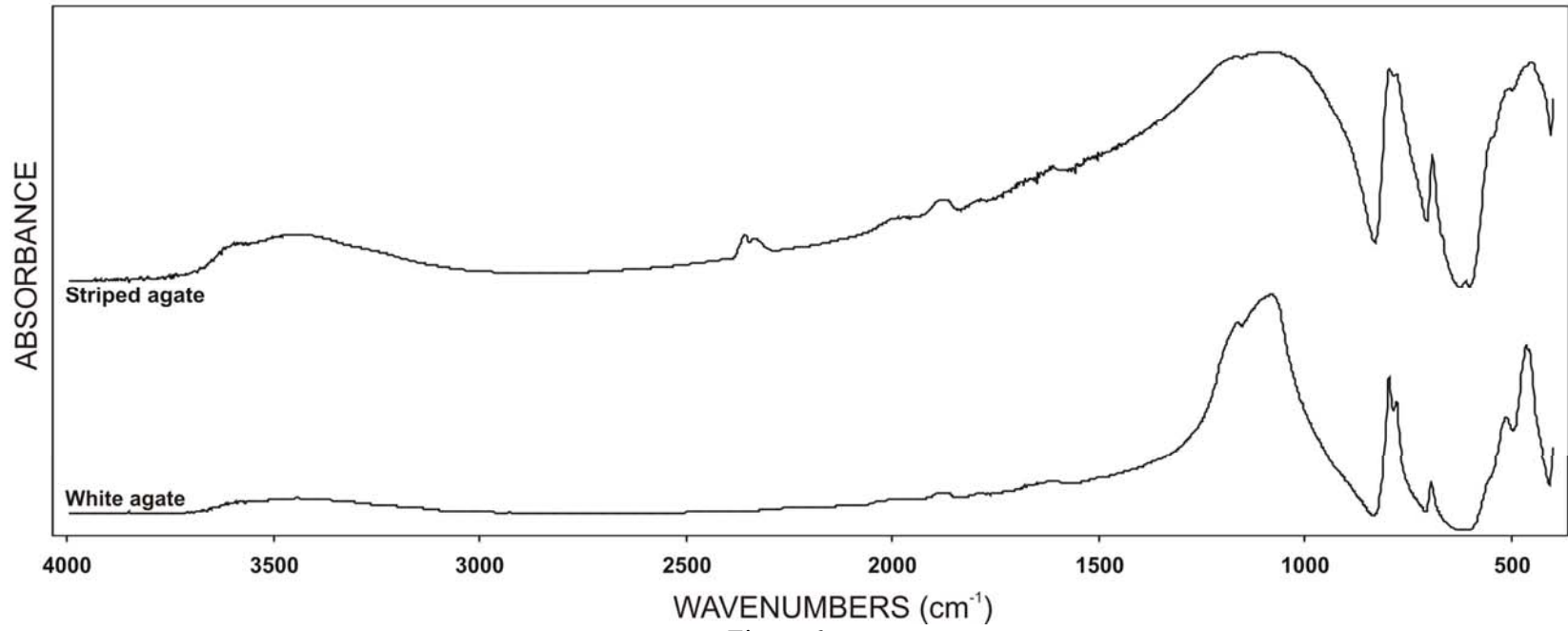


Figure 6.



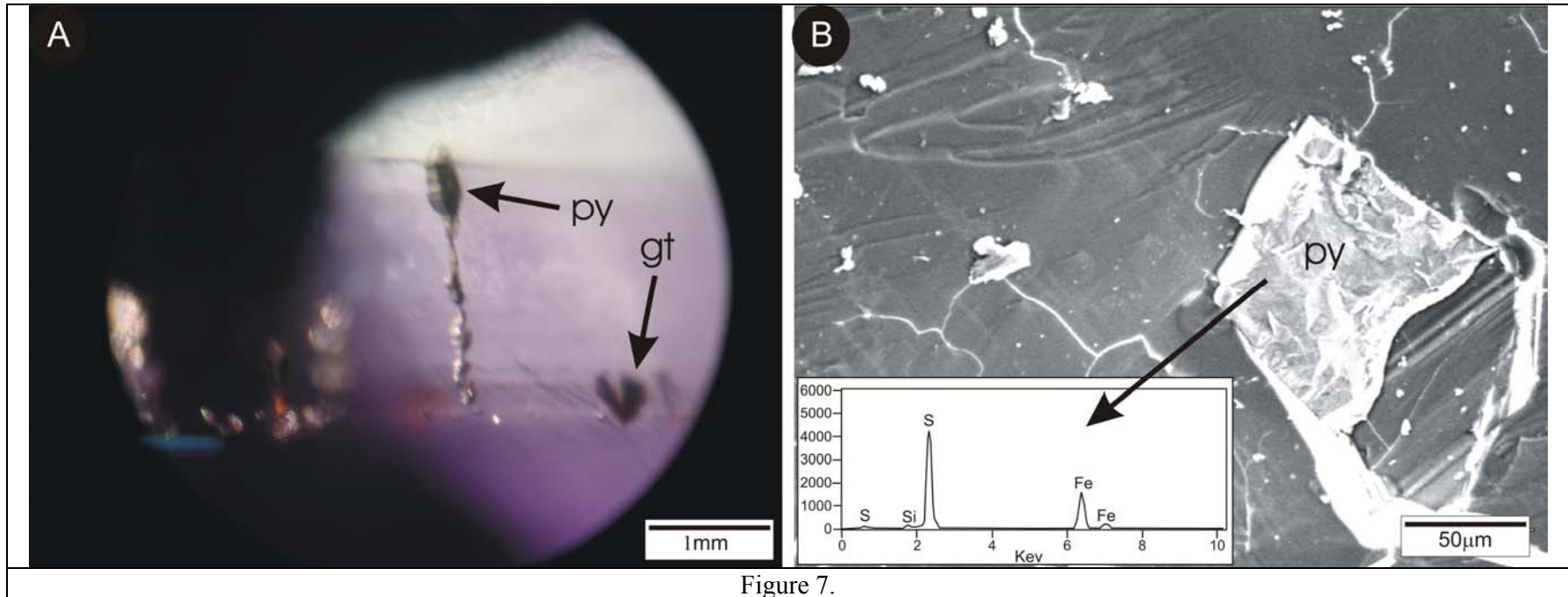


Figure 7.



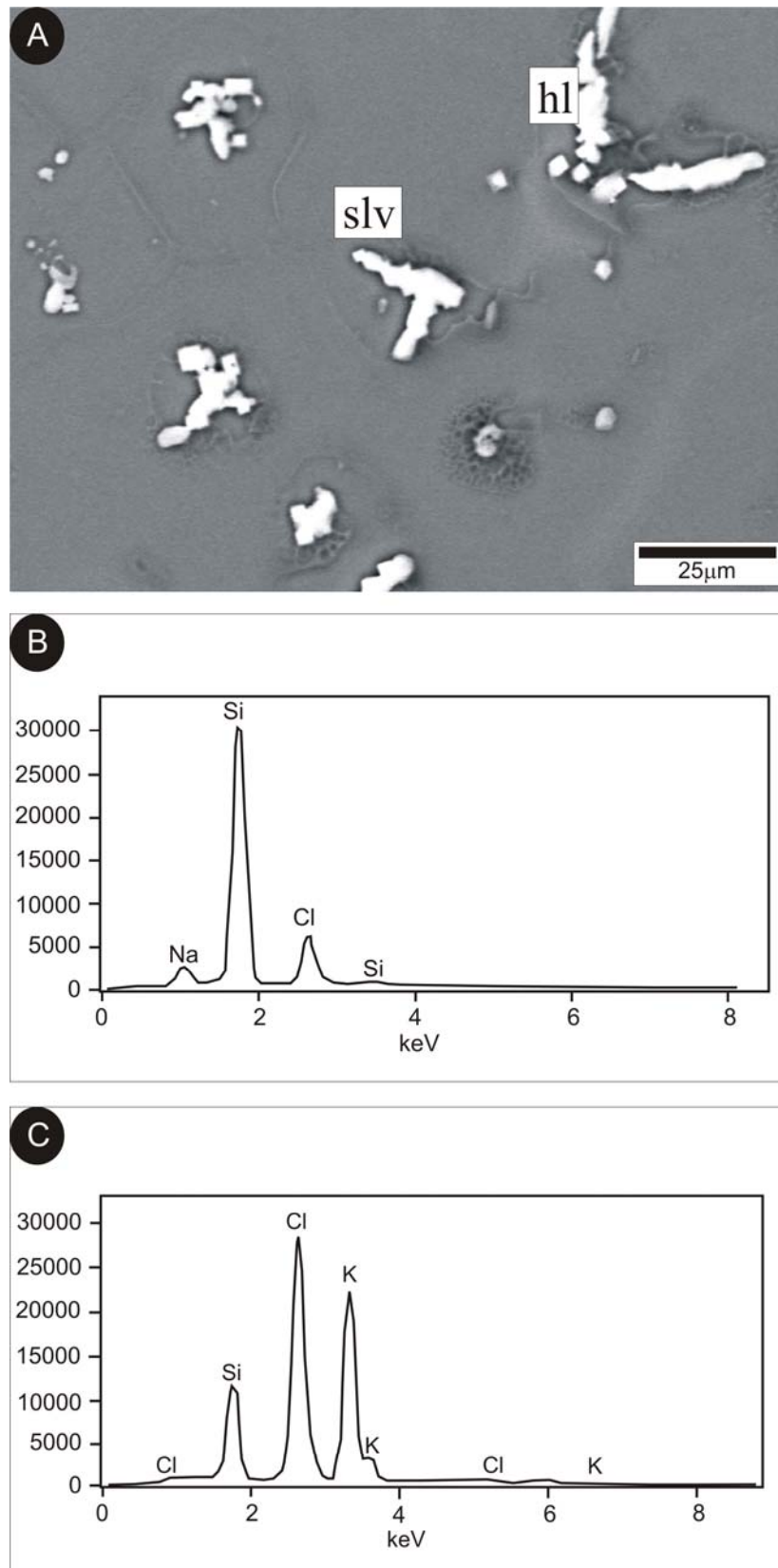


Figure 8.

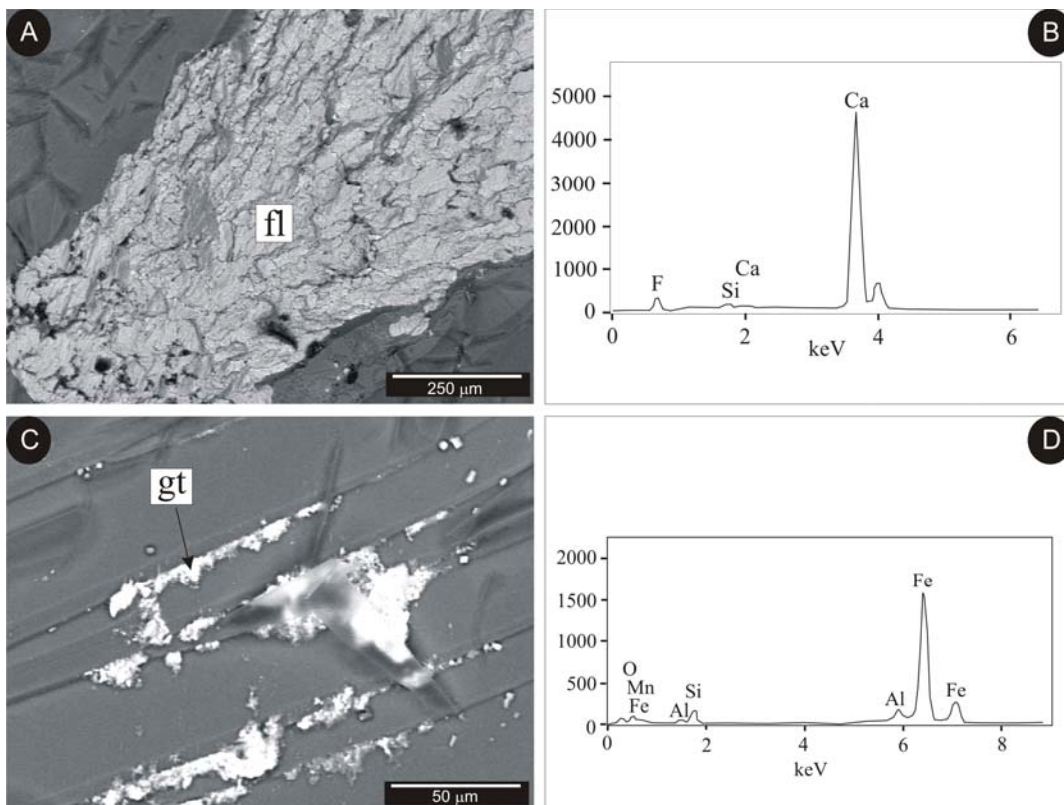


Figure 9.

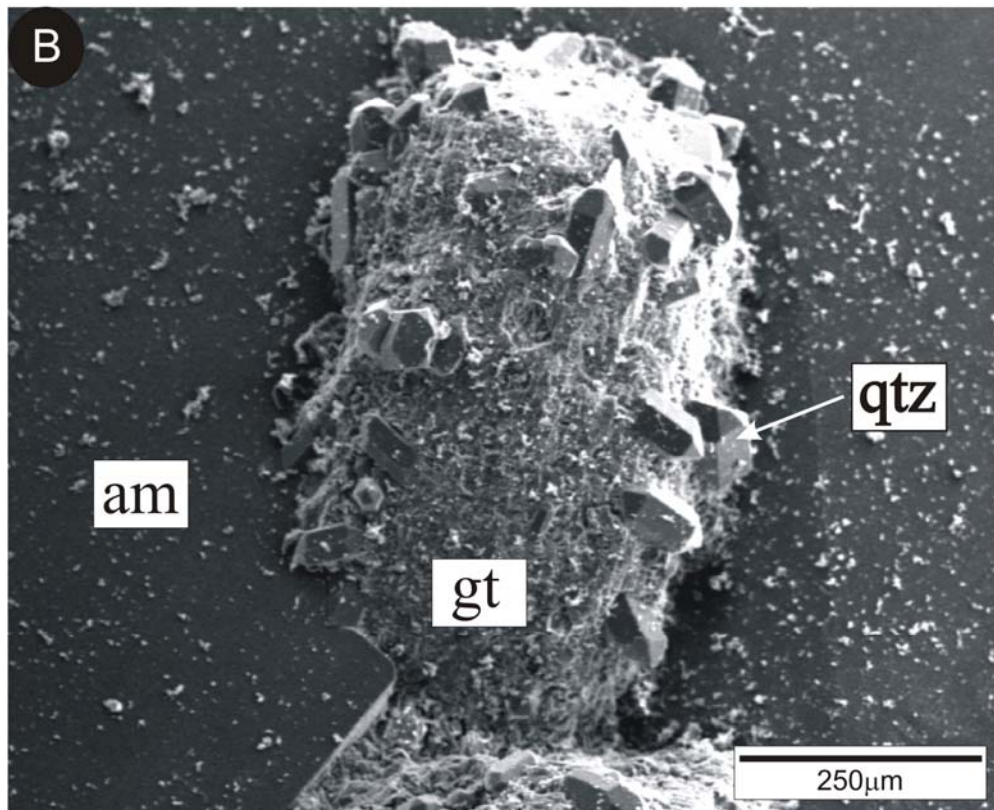
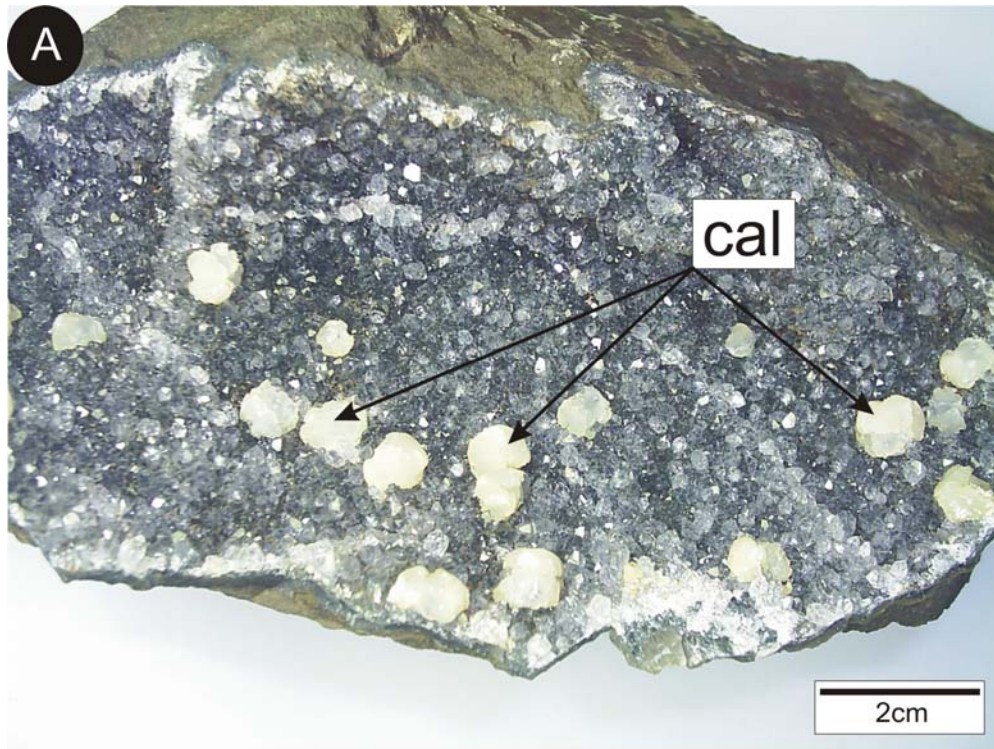


Figure 10.

## CAPÍTULO 4 – GEOLOGIA DAS OCORRÊNCIAS

### 4.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada uma cópia do resumo: “*Geologia das ocorrências de ametista da região de Santana do Livramento, sudoeste do estado do Rio Grande do Sul, Brasil.*”. Este resumo foi apresentado no **XLIII Congresso Brasileiro de Geologia** (Aracajú, 2006) sendo publicado nos anais do Congresso.

O trabalho será apresentado na íntegra sem nenhuma modificação no conteúdo e redação. Será anexado o pôster apresentado no Congresso (anexo 1).

**GEOLOGIA DAS OCORRÊNCIAS DE AMETISTA DA REGIÃO DE  
SANTANA DO LIVRAMENTO, SUDOESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE  
DO SUL, BRASIL.**

*A.H. Augustin, G.M. Pulz, R.B. Acauan, T.M.M. Brum, D. Knijnik, A.J. Strieder,  
L.A. Hartmann; E.S. Barboza.*

1 - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, IGEO,  
ahaugustin@yahoo.com.br.

2 - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia,  
PPGEM.

3 - Universidade do Estado do Rio de Janeiro. TEKTOS-Grupo de Pesquisa  
em geotectônica.

The Gemological Province of Santana do Livramento (Rio Grande do Sul State, Southern Brazil) hosts several occurrences of amethyst, agate, colorless quartz and cornaline. Rocks of the Serra Geral Formation (basalt, basalt-andesite, breccias) and Botucatu Formation (quartz-arenite) take place in the studied area. The geodes reach up 40 cm of diameter, variable shapes (irregular, elliptic, spheric and fragments) and they occur in the colluvium, as well as in the alluvium and basalts with variable degree of alteration. In the colluvium, the geodes are filled by agate ( $\pm$  quartz colorless and/or cornaline). In the altered basalt, geodes are filled mainly by agate and colorless quartz. The studied gems were classified according to color, crystallinity and texture: 1) macrocrystalline quartz (amethyst and colorless quartz); 2) microcrystalline quartz (agate and cornaline). Distinct colorimetric varieties of agate were observed in the same outcrop, however, grey and white colors are the most common. Some agate geodes exhibit a stripped pattern due the alternation of grey agate band and white agate band. Inclusions of goethite and spinel were identified in the amethyst by energy dispersive system (EDS) analyses combined with backscattering images (BSE). In addition, the EDS and BSE analyses contributed to recognize inclusions of goethite and iron sulfide in the colorless quartz, as well as spinel inclusions in the cornaline. The occurrence mode, geode shape and crystallographic properties of Santana do Livramento gems

were compared with characteristics of other Brazilian deposits of amethyst and agate. The results of this research suggest that the prospective guides to Santana do Livramento gems comprise the occurrence of geodes and fragments of cornaline, agate and amethyst in the alluvia and colluvia. In addition, the studied gems mineralization is controlled by the concentration of secondary deposits along of streams and colluvia, as well as vesicle zone in the rocks of Serra Geral Formation.



## XLIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA

- Arena, Michele; S14:AO-249; S14:P-332  
 Arend, Silvana Teresinha; S01:AO-11  
 Argôlo, João Lamarek; ST15:P-665; ST15:P-679  
 Arima, Naoki; ST02:P-457  
 Arioli, Edir Edemir; ST18:AO603  
 Aristizábal, Camilo Iván Ordóñez; S10:AO-169  
 Arraes, Tássia de Melo; S09:P-163; S09:P-167  
 Arnaud, Michel Henri; S04:AO-52; S04:AO-53; S04:AO-54; S04:AO-55  
 Artur, Antonio Carlos; S12:AO-202; S13:AO-244  
 Artusi, Lucia; S10:AO-155  
 Asmerom, Yemane; ST06:AO462  
 Assad, Eduardo Delgado; ST17:P-697  
 Assine, Mario; ST02:P-426  
 Assine, Mario Luis; ST02:AO385; ST02:P-433; ST03:AO404  
 Assis, Homencia Maria Barboza de; S10:P-198  
 Assis, Maristella Martins; S04:P-97  
 Assumpção, Marcelo Sousa de; S06:AO-88  
 Astini, Ricardo Aa; ST02:AO373  
 Atencio, Daniel; ST11:AO508  
 Atzigen, Noé Von; ST17:P-730  
 Augustini, Adolpho; ST11:P-615  
 Augusto, Cynthia; S09:P-169  
 Augusto, Vagney Aparecido; ST17:AO586  
 Ávila, Ciro Alexandre; S04:P-43; S04:P-50; S04:P-72; S15:AO-280; ST17:P-762; ST18:AO602  
 Azambuja Filho, Nilo Chagas de; S03:AO-33  
 Azevedo Junior, Alarico Jose Pessoa; S08:P-153  
 Azevedo, Adalberto Aurélio; S04:AO-59  
 Azevedo, Anna Artemisia Barracco de; S13:AO-240  
 Azevedo, Débora de Almeida; S01:P-01  
 Azevedo, Leiliane Rufino Pereira; S04:AO-54  
 Azevedo, Marcelo Mota de; S10:AO-156  
 Azevedo, Rodrigo Gonçalves; S11:AO-197  
 Azevedo, Sergio Alex Kugland de; ST13:AO531  
 Azmy, Katem; ST18:AO600  
 Azzone, Rogério Guitarari; ST10:AO492; ST10:AO494
- B**
- Babinski, Marly; S04:P-45; S13:P-293; ST08:P-573; ST08:P-594  
 Bacellar, Luis de Almeida Prado; S07:P-127; S01:AO356; S01:P-412  
 Bagini, Lorenzo Giuliano; S07:AO-110  
 Bahia, João; ST02:P-445  
 Bahia, Juliano Das Flores; S07:P-145  
 Bahia, Vânia Eunice; ST5:P-561  
 Bahls, Andréa Bressani; ST02:P-491  
 Bahniuk, Anelize Manuela; ST06:AO457; ST06:AO458; ST06:AO468  
 Balancin, Lucas; S06:AO-88  
 Baldim, Iuri; S15:AO-276; S15:P-341  
 Bamberg, Guilherme; S17:P-397  
 Bandeira, Iris Celeste Nascimento; S07:P-119  
 Baptista Neto, José Antônio; S10:AO-172; S10:P-212  
 Baptista, Marcos Cristóvão; S11:P-226  
 Barata, Cleber Furtado; ST02:P-500  
 Barbosa, Ana Carolina Lisboa; S09:P-169  
 Barbosa, Antônio Carneiro; ST15:P-668  
 Barbosa, Christianne Torres de Paiva; S13:P-304  
 Barbosa, Elisa Soares Rocha; ST10:AO495  
 Barbosa, Inara Oliveira; S01:P-422  
 Barbosa, Jaime dos Passos de Oliveira; S15:P-366  
 Barbosa, João Batista Santos; ST17:P-764  
 Barbosa, Jôhildo Salomão Figueiredo; S04:AO-79; S04:AO-81; S04:P-105; S04:P-106; S04:P-93; S11:P-239  
 Barbosa, José Antônio; S07:AO-115; S17:AO-312  
 Barbosa, José Roberto; S06:AO-88  
 Barbosa, Leonardo Onofre; S04:P-108; ST18:P-749  
 Barbosa, Liana Maria; S01:P-404; S01:AO357  
 Barbosa, Maria Fernanda Novo; S15:AO-278  
 Barbosa, Maria José de Oliveira; S10:P-210  
 Barbosa, Maria Silvia Carvalho; ST5:P-538  
 Barbosa, Msc; S02:AO-16  
 Barbosa, Paulo Afonso Ribeiro; ST08:P-606  
 Barbosa, Petterson de Azevedo; ST04:AO415  
 Barbosa, Ronaldo; S07:AO-107  
 Barboza, Eduardo Guimarães; ST02:P-489; ST17:P-718  
 Barboza, Elzio da Silva; S04:AO-85; ST11:P-615  
 Barcelos, Mabel Araújo; S10:AO-172  
 Barioni, Alberto; S07:P-143  
 Barson, Marcelo; S11:AO-192  
 Barra, Fernando; ST08:AO488  
 Barrancos, Joyce Teixeira Gardel; S09:P-159  
 Barreto, Alcina Magnólia Franca; ST02:AO377; ST02:P-467; ST03:P-508; ST12:P-626; ST13:AO527; ST13:AO529; ST13:AO538  
 Barreto, José Marden Costa; S17:AO-318  
 Barreto, Sandra de Brito; S07:P-135; S01:P-423  
 Barros, Carlos Ediarlo Mesquita; ST17:AO578  
 Barros, Carlos Eduardo de Mesquita; S04:P-107; S15:AO-274; S15:P-366; S16:P-374  
 Barros, Fernando Antonio Do Rego; S03:AO-32  
 Barros, Luiz Antonio Fonseca de; ST18:P-752  
 Barros, Márcia Aparecida Sant'ana; S14:P-320; S16:AO-298  
 Barros, Paulo Roberto; S15:AO-294  
 Barros, Wilmar Tenório de; S11:P-246  
 Bartoszeck, Marcelo Kulevicz; ST04:P-517; ST5:AO442; ST5:P-554  
 Basei, Miguel Ângelo Stipp; S04:AO-78; S04:P-39; S04:P-44; S04:P-49; S04:P-76  
 Basei, Miguel Stipp Angelo; S04:AO-58  
 Basilici, Giorgio; ST02:AO388; ST02:AO399; ST02:AO402; ST02:P-426; ST02:P-498  
 Bassrei, Amin; ST5:P-549  
 Bastos Neto, Artur Cezar; ST07:P-572  
 Bastos, Alex Cardoso; S10:P-190  
 Bastos, Denis Rodrigues; S12:AO-214  
 Bastos, Paulo Roberto; ST17:AO569  
 Batata, Maria Elisa Fróes; S15:AO-276; S15:P-341; S15:P-343  
 Batezelli, Alessandro; ST02:AO388; ST02:P-426  
 Batista Junior, Cicero Pereira; S01:AO355  
 Batista Junior, Raimundo Valmiqué; S04:AO-54  
 Batista, Aline de Oliveira; S10:AO-170  
 Batista, Diogo Lins; ST12:P-642  
 Battestin, Thaís Noffs; S04:P-42  
 Battilani, Ga; S02:AO-16  
 Battoni, Marco Antonio; S04:P-42; S07:P-143  
 Beato, Décio Antonio Chaves; S09:AO-139  
 Becker, Helena; ST15:P-665; ST15:P-679  
 Bedran, F; ST08:P-598  
 Bedregal, Ricardo Perez; S02:AO-15; S02:P-12  
 Beirigo, Elder Antônio; S11:P-224  
 Bêlem, Juliane; S04:AO-69  
 Bello, Rosa; ST07:AO470  
 Bello, Rosa Maria da Silveira; ST02:P-444; ST04:AO432; ST07:P-569; ST07:P-670  
 Belmonte, Sabrina; S15:P-352  
 Belote, Alexandra; S04:P-74; ST10:P-600  
 Beltrane, Leonardo Pereira; S11:AO-192  
 Bendoraitis, Daina Popic; S12:P-251; S12:P-270  
 Benedito, Daniela da Silva; ST15:AO558  
 Benetti, Francisco Augusto; S14:P-330  
 Bengtson, Peter; ST13:AO540  
 Benitez, Leila; ST11:P-608  
 Bennell, Michael Robin; ST18:AO612  
 Bensabatti, Lisandra Conus; ST08:AO478  
 Bento, Rosmeire Vieira; S04:P-47; S15:P-340; ST02:P-452; ST5:AO452; ST17:AO567; ST17:P-757; ST17:P-768; ST18:AO616; ST18:P-750  
 Benvenuti, Carlos Felipe; S02:P-17  
 Berber-Born, M. L. C.; ST08:P-599  
 Bergamaschi, Sérgio; S02:AO-24; ST02:AO373; ST02:P-466; ST12:P-625; ST13:AO522  
 Bermanec, Vladimir; ST11:P-609; ST11:P-618  
 Bernardes, Debora; S01:P-406  
 Berrêdo, José Francisco; S13:P-309  
 Berriel, Lidiane; S10:AO-171  
 Bertachini, Antônio Carlos; S09:AO-139  
 Bertol, Gisele Ana; S09:AO-131; S11:P-223  
 Bertotto, Gustavo Walter; S14:AO-264  
 Besser, Marcell Leonard; S07:P-122  
 Bettencourt, Jorge; ST18:AO599  
 Bettencourt, Jorge Silva; S04:AO-84; ST08:AO481; ST17:P-760  
 Bettencourt, Js; S15:AO-295  
 Bettú, Daniel Fabian; ST04:P-516  
 Bettú, Fabiana Marcon; S07:P-134; S07:P-138  
 Beurten, Hartmut; S107:AO469  
 Bez, Leonardo; S01:AO358  
 Bezerra Filho, Anselmo Pereira; S04:P-72; ST18:AO602  
 Bezerra, Francisco Hilário Rego; S06:AO-89; S06:AO-91; S06:AO-92; S06:P-114; S16:P-380; ST02:P-478; ST03:AO406; ST03:P-503; ST03:P-503; ST03:P-508  
 Bezerra, Pedro Edson Leal; ST17:P-711; ST17:P-712; ST17:P-713  
 Bezerra, Ronaldo; S10:P-198  
 Bezerra, Ronaldo Gomes; S10:P-194; S10:P-196; S10:P-211  
 Bianchini, Aline Ramos; S10:P-218  
 Bielschowsky, Cauê; S09:P-169  
 Birelli, Carlos Alberto; ST17:P-681  
 Bischoff, Alan Patrick; S09:P-183  
 Bitar, Omar Yabzek; S11:P-248  
 Bitenc, Maria de Fátima Aparecida Saraiv; S04:AO-77  
 Bitencourt, José Augusto; S10:AO-172  
 Bitencourt, Maria de Fátima; ST04:AO431; ST08:P-604  
 Bittar, Sheila Maria Bretas; S01:P-423





# Geologia das ocorrências de Ametista da Região de Santana do Livramento, sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil

A.H. Augustin<sup>1</sup>, G.M. Pulz<sup>1</sup>, R.B. Acauan<sup>1</sup>, T.M.M. Brun<sup>1</sup>, D. Knijnik<sup>1</sup>, A.J. Strieder<sup>1</sup>,  
L.A. Hartmann<sup>1</sup>, E.S. Barboza<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul, IGEO, Escola de Engenharia, Porto Alegre, RS  
ahaugustin@yahoo.com.br

<sup>2</sup> GEOMIN – Geologia e Mineração, Cuiabá, MT, geomini\_e@yahoo.com.br

## Abstract

The Gemological Province of Santana do Livramento (Rio Grande do Sul State, Southern Brazil) hosts several occurrence of amethyst, agate, colorless quartz and comaline. Rocks of the Serra Geral Formation (basalt, basalt-andesite, breccias) and Botucatu Formation (quartz-arenite) take place in the studied area. The geodes reach up 40 cm of diameter, variable shapes (irregular, elliptic, spheric and fragments) and they occur in the colluvium, as well as in the alluvium and basalts with variable degree of alteration. In the colluvium, the geodes are filled by agate ( $\pm$ quartz colorless and/or comaline). In the altered basalt, geodes are filled mainly by agate and colorless quartz. In addition, the studied gems mineralization is controlled by the concentration of secondary deposits along of streams and colluvia, as well as vesicle zone in the rocks of Serra Geral Formation. Thermal enhancement-treatment was done in some amethyst and colourless crystals. The results of these experiments reveal that the crystals acquire a yellow colour (similar to citrine variety) under high temperatures around 600 °C.

Key - words: Amethyst, Serra Geral Formation, Thermal enhance-ment-treatment, Rio Grande do Sul.

## 1 Introdução

O quartzo é um dos minerais mais abundante na natureza, encontrado em rochas ígneas, metamórficas e sedimentares. Dentre as diversas variedades desse mineral destaca-se o de cor violeta, variedade ametista (fig. 1)

O Rio Grande do Sul é reconhecido mundialmente como um dos principais produtores e exportadores de ametista do Brasil. As jazidas deste mineral ocorrem associadas às rochas vulcânicas da Formação Serra Geral em depósitos do tipo "geodo em basalto". Das várias regiões no estado produtoras deste mineral, destacam-se a região do Alto Uruguai pela quantidade de material extraído e a região de Santana do Livramento na Província Gemológica da Fronteira Oeste (CPRM, 1997) aqui estudada (fig. 3). Especialmente nesta última região associados à ametista ocorrem calcedônia, ágata, comalina e quartzo incolor.



Figura 1. Fotografia de um geodo de ametista.

## 2 Localização

A área de estudo está situada no interior do município de Santana do Livramento, sudoeste do estado do RS (fig. 2), distando a Mina Novo São João aproximadamente 550 km de Porto Alegre.

## 3 Geologia

A região sudoeste do RS está localizada sobre a Bacia do Paraná, onde afloram rochas sedimentares da Formação Botucatu e vulcânicas da Formação Serra Geral (fig. 2). A evolução geológica da Bacia do Paraná foi complexa, controlada por fatores climáticos e tectônicos e o vulcanismo está relacionado com a ruptura do supercontinente Gondwana.

### Formação Botucatu

A Formação Botucatu está representada por arenitos quartzosos de granulometria média a grossa, bimodal, com estratificação cruzada e variando de friável a extremamente litificados.

### Formação Serra Geral

Nessa região a Formação Serra Geral está representada por derrames de lavas basálticas e basalto-andesíticas de filiação tholeiítica, recobrimdo os arenitos da Formação Botucatu.

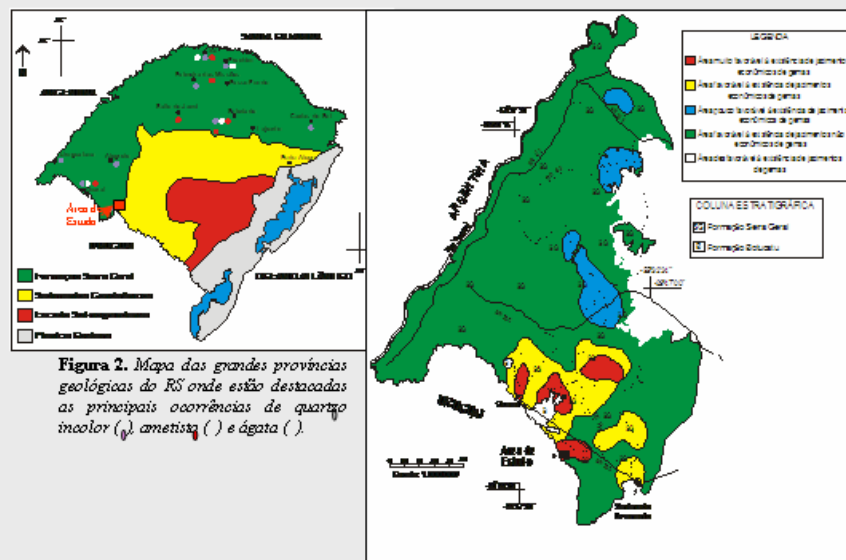


Figura 2. Mapa das grandes províncias geológicas do RS onde estão destacadas as principais ocorrências de quartzo incolor (q), ametista (a) e ágata (g).

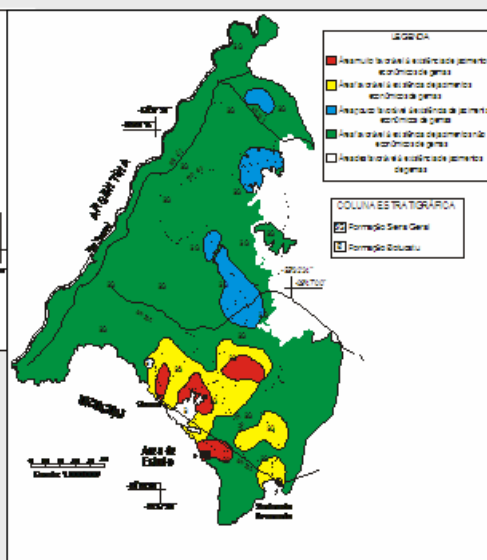


Figura 3. Mapa gemológico da fronteira oeste do RS. Modificado de CPRM (1997).

## 4 Mineração

Na Mina Novo São João, os geodos com ágata e ametista são extraídos do colúvio e da rocha alterada (fig. 4). A extração desse material é realizada com tratores de esteira e escavadeiras que revolvem o solo expondo os geodos que são retirados manualmente por trabalhadores.

Os geodos possuem formas ovalada, gota ou irregulares, com dimensões de 5 a 50 cm e com pesos médios de 2 a 5 kg, podendo chegar a mais de 100 kg (fig. 5). O preenchimento dos geodos se dá de forma total ou parcial por ágata, ágata e quartzo incolor ou por ágata, quartzo incolor e ametista



Figura 4. Fotografia da frente de lava. Escavadeira e trator de esteira revolvendo o solo (A) e a rocha alterada (B). Em C, pilha de geodos recém retirados do solo, manualmente pelos trabalhadores.

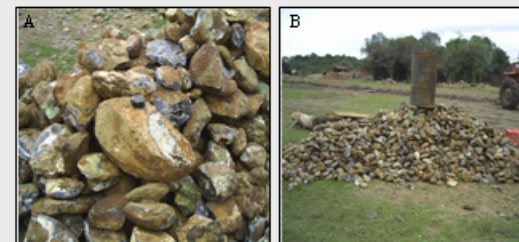


Figura 5. Fotografia de geodos de ágata. Em A, geodos de vários tamanhos e formas e em B geodos de ágata pré-selecionados por tamanho.

A ametista dessa região apresenta características particulares no que se refere à cor, predominando o violeta escuro com tonalidades azuladas ou rosadas (fig. 6).

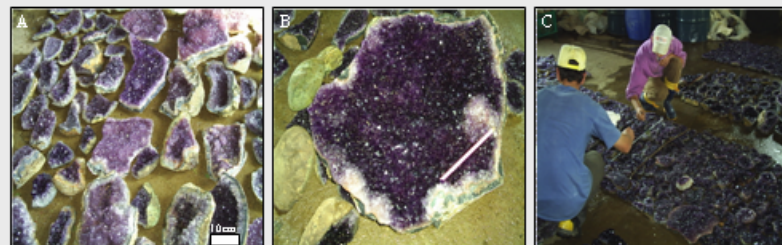


Figura 6. Fotografia de geodos de ametista. Em A e B, geodos de vários tamanhos e tonalidades de violeta e em C geodos de ametistas já selecionados por cor, sendo preparados para a comercialização.

## 5 Tratamento térmico

Cristais de ametista de cor clara ou com distribuição heterônea de cor são submetidos a tratamento térmico, conhecido como "queima". Neste tratamento, realizado em temperaturas em torno de 600°C, a ametista adquire cor amarela, transformando-se em "citrino" (fig. 7). Este procedimento é feito para obter um material com maior valor de mercado.



Figura 7. Cristais de ametista submetidos ao tratamento térmico.

## CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final deste estudo é possível integrar os dados obtidos nesta pesquisa e concluir que:

I - A geologia da Mina Novo São João é representada por rochas basálticas da Formação Serra Geral e por arenitos da Formação Botucatu. Os derrames de lavas recobriram de forma abrupta campos de dunas ativos, deixando preservadas estruturas tais como: estrias de fluxo, moldes de basalto e rochas tipo peperito;

II - Os geodos atualmente são extraídos em níveis rasos do basalto 1, a poucos metros da superfície. A ocorrência e distribuição dos geodos estão condicionadas pelas estruturas de dilatância da rocha hospedeira, tais como: fluxo magmático, dobras e fraturas;

III - Os geodos apresentam tamanhos e formas variadas e estão preenchidos por ágata e quartzo (incolor ou ametista), calcita e em pequenas quantidades por argilominerais do grupo da esmectita;

IV - As inclusões minerais encontradas nos cristais de ametista foram goethita, halita, silvita, fluorita e pirita;

V - A presença de estruturas de dilatação na rocha hospedeira possibilitou a percolação de fluidos mineralizantes, que depositaram minerais de sílica nos espaços abertos;

VI - A integração dos dados obtidos mostra que o contexto geológico da área estudada é propício para alojar vários depósitos de geodos, os quais merecem ser pesquisado em trabalhos futuros, a fim de obter uma avaliação do potencial econômico para gemas da fronteira sudoeste do RS.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACAUAN, R.B. **Caracterização geológica e gemológica das ametistas e ágatas de Santana do Livramento, Sudoeste do Rio Grande do Sul.** 2004. 80 f. Porto Alegre. Monografia (Graduação) – Instituto de Geociências, Curso de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- ARAÚJO, L.M.; FRANÇA, A.B.; POTTER, P.E. Hydrogeology of the Mercosul aquifer system in the Paraná and Chaco-Paraná Basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget aquifer system, USA. **Hydrogeology Journal**, Heidelberg v. 7, n. 3, p. 317–336, 1999.
- BELLIENI, G., COMIN-CHIARAMONTI, P., MARQUES, L.S., MELFI, A.J., PICCIRILLO, E.M., NARDY, A.J.R., ROISENBERG, A. High- and low Ti flood basalts from the Paraná plateau (Brazil): petrogenetic and geochemical aspects bearing on their mantle origin. **Neues Jahrbuch Für Mineralogie: Abhandlungen.** v. 150, p. 273–306, 1984.
- BRAZILIAN GEOLOGIC SURVEY, 1997. **Mapa gemológico da fronteira oeste do Rio Grande do Sul.** Informe de Recursos Minerais. Série Pedras Preciosas, n.1, SUREG/POA, 3 p.
- BRUM, T.M.M., JUCHEM, P.L., AGOSTINI, I.M., FIORENTINI, J.A. Classificação da Ágata. In: AGOSTINI, I.M., FIORENTINI, J.A., BRUM, T.M.M., JUCHEM,

- P.L. (Eds.) **Ágata do Rio Grande do Sul**. Brasília, Ministério de Minas e Energia; Departamento Nacional de Produção Mineral, Série Difusão Tecnológica, n. 5, cap. 3, p. 37-63. 1998.
- CASSINI, C.T., COSTA, M.L. A Ametista de Pau D'Arco: Mineralogia, quimismo e inclusões fluidas. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 4., 1994. Belém, **Resumos expandidos...** Belém: SBG, 1994 p. 151-154.
- CASSINI, C.T., COSTA, M.L., FUZIKAWA, K. A ametista de Pau d'Arco, Alto Bonito e Altamira no Estado do Pará. **Revista da Escola de Engenharia de Minas** v. 52, n. 4, p. 257-262, 1999.
- COLLYER, T.A., MÁRTIRES, R.A.C. O depósito de ametista do Alto Bonito, município de Marabá, Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34., Goiânia, **Anais...** Goiânia: SBG, 1986, v. 5, p. 2221-2225.
- COLLYER, T.A., MÁRTIRES, R.A.C., MACHADO, J.I.L., 1996. O depósito de ametista de Pau d'Arco, município de Conceição do Araguaia, Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35., Belém, **Anais...** Belém: SBG, 1988 v. 1, p. 374-382.
- CORRÊA, T.E. **Geologia e critérios de prospecção para depósitos de ametistas na região do Alto Uruguai, RS**. 1995. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Minas e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.
- DOVE, P.M. & RIMSTIDT, J.D. Silica-water interactions. In: Heaney P.J.;Prewitt C.T.; Gibbs G.V. (Eds.). **Silica physical behavior, geochemistry and materials applications**, p. 259 – 308 (Reviews in Mineralogy, v. 29). Michigan, BookCrafters. 1994.
- DUARTE, L.C.; HARTMANN, L.A.; VASCONCELLOS M.A. Epigenetic geode formation in the world-class amethyst deposits of the southern Paraná Basaltic Province. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE METALOGENIA, 1., 2005. Gramado. **Resumos...** Gramado: CPGq:UFRGS, 2005. 1 CD-ROM.

- DUARTE, L.C., JUCHEM, P.L., PULZ, G.M., BRUM, T.M.M.; CHODUR, N., LICCARDO, A., FISCHER, A.C.; ACAUAN, R.B. Aplicações de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e sistema de energia dispersiva (EDS) no estudo de gemas: exemplos brasileiros. **Revista Pesquisas em Geociências** v. 30, p. 3-15, 2003.
- EWART, A.; MILNER, S. C.; ARMSTRONG, R. A.; DUNCAN, A. R. Etendeka volcanism of the Goboboseb mountains and Messum Igneous Complex, Namibia. Part I: geochemical evidence of early cretaceous Tristan Plume Melts and the Role of crustal contamination in the Paraná–Etendeka CFB. **Journal of Petrology**, v. 39, n. 2, p. 191–225, 1998.
- FERNANDES, G.A.; PULZ, G.M.; ACAUAN, R.B. Critérios geofísicos na prospecção de depósito de ametista e ágata, na região de Santana do livramento, sudoeste do estado do rio grande do sul. In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 16., 2004. Porto Alegre. **Resumos...** Porto Alegre: UFRGS. 1 CD-ROM.
- FISCHER, A.C. **Petrografia e geoquímica das fases silicosas dos geodos mineralizados a ametista (Região do Alto Uruguai, RS, Brasil)**. 2004. 159 f. Tese (Doutorado em Geociências), Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Universite Toulouse III. Porto Alegre, 2004.
- FISCHER, A.C. **Composição química e possíveis causas da cor da ametista da região do Alto Uruguai, RS**. Ouro Preto, 1999. 168p. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1999.
- FRONDEL, C. **The system of mineralogy** (v. III – Silica minerals). New York, John Wiley and Sons. 1962. 334 p.
- GILG, H.A., MORTEANI, G., KOSTITSYN, Y., PREINFALK, C., GATTER, I., STRIEDER, A.J. Genesis of amethyst geodes in basaltic rocks of the Serra Geral Formation (Ametista do Sul, Rio Grande do Sul, Brazil): a fluid inclusion, REE, oxygen, carbon, and Sr isotope study on basalt, quartz, and calcite. **Mineralium Deposita** v. 38, p. 1009-1025, 1999.

- GOMES, M.E.B. **Mecanismos de resfriamento, estruturação e processos pós-magmáticos em basaltos da Bacia do Paraná - região de Frederico Westphalen (RS) - Brasil.** Porto Alegre, 1996. 264 p. Tese (Doutorado em Geociências), Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1996.
- GÜBELIN, E.J. Gemological characteristics of Pakistani emeralds. In: Kazmi, A.H., Snee, L.W. (Eds). **Emeralds of Pakistan: Geology, Gemology & Genesis**, p. 75-91. New York, Van Nostrand Reinhold Ltda. 1989.
- HEEMANN, R. **Modelagem estrutural e tridimensional para prospecção e avaliação dos depósitos de ágata do distrito mineiro de Salto do Jacuí (RS).** Porto Alegre, 2005. 150 p. Tese (Doutorado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Minas e dos Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.
- HOOG, J.C.M.; BERGEN, M.J.; JACOBS, M.H.G. Vapour-phase crystallisation of silica from SiF<sub>4</sub>-bearing volcanic gases. **Annals of Geophysics**, v. 48, n. (4/5), p. 775-785, 2005.
- JUCHEM, P.L. **Mineralogia, geologia e gênese dos depósitos de ametista da região do Alto Uruguai, Rio Grande do Sul.** São Paulo, 1999. 225 p. Tese (Doutorado em Geociências), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.
- KILE, D.E. Occurrence and genesis of thunder eggs containing plume and moss agate from the Del Norte Area, Saguache County, Colorado - Statistical Data Included. **Rocks & Minerals**, v. 77, p. 252-68. 2002.
- KIRSTEIN, L.A.; PEATE, D.W.; HAWKESWORTH, C.J.; TURNER, S.P.; HARRIS, C.; MANTOVANI, M.S.M. Early Cretaceous basaltic and rhyolitic magmatism in southern Uruguay associated with the opening of the South Atlantic. **Journal of Petrology**, v. 41 n. 9, p. 1413-1438. 2000.
- LOWELL, J. & KOIVULA, J. I. Amethyst from Four Peaks, Arizona. **Gems & Gemology**, v. 40, p. 230-238. 2004.



- MANTOVANI, M.S.M., MARQUES, L.S, DE SOUSA, M.A., CIVETTA, L., ATALLA, L., INNOCENTI, F. Trace element and strontium isotope constraints on the origin and evolution of Paraná continental flood basalts of Santa Catarina State, southern Brazil. **Journal of Petrology**, v. 26, p. 187–209. 1985.
- MENG, S.X., MAYNARD, J.B. Use of statistical analysis to formulate conceptual models of geochemical behavior: water chemical data from the Botucatu aquifer in São Paulo State, Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 250, p. 78-97. 2001.
- MILANI, E.J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental**. Porto Alegre, 1997. Tese (Doutorado em Geociências), Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1997.
- MILNER, S.C.; DUNCAN, A.R.; WHITTINGHAM, A.M.; EWART, A. Trans-Atlantic correlation of eruptive sequences and individual silicic volcanic units within the Paraná-Etendeka igneous province. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 69, p. 137-157. 1995.
- MINIOLI, B.; PONÇANO, W.L.; OLIVEIRA, S.M.B. Extensão geográfica do vulcanismo basáltico do Brasil Meridional. **Anais da Academia Brasileira Ciências**, v. 43, p. 433-437. 1971.
- PEATE, D. The Paraná-Etendeka Province. In: Mahoney, J.J., Coffin, M. (Eds.). **Large Igneous Provinces**, p. 217-245. American Geophysics Union, Geophysics Monographic, 100. 1997.
- PEATE, D.W., HAWKESWORTH, C.J., MANTOVANI, M.S.M. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. **Bulletin of Volcanology**, v. 55, p. 119-139. 1992.
- PETRI, S.; FÚLFARO, J.V. **Geologia do Brasil**. São Paulo. T. A. Queiroz, Universidade de São Paulo. 631 p. 1983.
- PETRY, K., JERRAM D.A., ALMEIDA, D.P.M., ZERFASS, H. Volcanic-sedimentary features in the Serra Geral Fm., Paraná Basin, southern Brazil: Examples of dynamic



- lava-sediment interactions in an arid setting. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 159, p. 313-325. 2007.
- PROUST D.; FONTAINE C. Amethyst-bearing lava flows in the Paraná Basin (Rio Grande do Sul, Brazil): cooling, vesiculation and formation of the geodic cavities. **Geology Magazine**, v. 144, n 1, p. 53–65. 2007.
- RAMSEY, J.G. **“Folding and fracturing of rocks”**. New York, McGrawHill, 568p. 1967.
- RAMSEY, J.G. & HUBER, M. I. **The techniques of modern structural geology**. London: Academic Press, 1987. V. 2, Folds and fractures.
- RENNE, P.R.; ERNESTO, M.; PACCA, I.G.; COE, R.S.; GLEN, J.M.; PREVOT, M.; PERRIN, M. The age of Paraná flood volcanism, rifting of Gondwanaland, and the Jurassic-Cretaceous boundary. **Science**, v. 258, p. 975-979. 1992.
- ROISENBERG, A. **Petrologia e geoquímica do vulcanismo ácido mesozóico da província meridional da Bacia do Paraná**. Porto Alegre, 1989. 285 p. Tese (Doutorado em Geociências), Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1989.
- SCHERER, C.M.S., LAVINA, E.L.C. Stratigraphic evolution of a fluvial-eolian succession: The example of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous Guarú and Botucatu formations, Paraná Basin, Southernmost Brazil. **Gondwana Research**, v. 9, p. 475-484. 2006.
- SCHERER, C.M.S.; CARAVACA, G.; SOMMER, C.A. Evolução estratigráfica dos depósitos eólicos do grupo São Bento (Cretáceo inferior da Bacia do Paraná) no estado do Rio Grande do Sul. In: ENCONTRO SOBRE A ESTRATIGRAFIA DO RIO GRANDE DO SUL: ESCUDOS E BACIAS, 1., 2003. Porto Alegre, **Anais...** Porto Alegre: UFRGS, 2003. p. 170–176.
- SCHERER, C.M.S. Eolian dunes of the Botucatu Formation (Cretaceous) in Southernmost Brazil: morphology and origin. **Sedimentary Geology**, v. 137, p. 63-84. 2000.

- SCHMITT, J.C.; CAMATTI, C.; BARCELLOS, R.C. Depósitos de ametista e ágata no estado do Rio Grande do Sul. In: Schobbenhaus, C.; Queiroz, E.T.; Coelho, C.E.S. (eds). **Principais depósitos minerais do Brasil-Gemas e rochas ornamentais**. Brasília, co-edição CPRM/DNPM, 4 (A) 1991. p. 271-285.
- SCHNEIDER, R.L.; MÜHLMANN, H.; TOMMAZI, E.; MEDEIROS, R.A.; DAEMON, R.F.; NOGUEIRA, A.A. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974. Porto Alegre, **Anais...** Porto Alegre: SBG, 1974. 41-65.
- SCOPEL, R.M.; GOMES, M.E.B.; FORMOSO, M.L.L.; PROUST, D. Derrames portadores de ametistas na região de Frederico Westphalen-Iraí-Planalto-Ametista do Sul, RS-Brasil. In: CONGRESSO URUGUAYO DE GEOLOGIA, 2., 1998. Montevideo, **Actas...** Montevideo: Sociedade Uruguaya de Geologia, 1998. p. 243-248.
- SIAL, A.N. The post-paleozoic vulcanism of northeast Brazil and its tectonic significance. *Anais da Academia Brasileira de Ciência*, v. 48, p. 299-311. 1976.
- STEWART, K.; SIMON, T.; SIMON, K.; HAWKESWORTH, C.; KIRSTEIN, L.; MANTOVANI, M. 3-D,  $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$  geochronology in the Paraná continental flood basalt province. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 143, p. 95-109. 1996.
- TURNER, S.; REGELOUS, M.; HAWKESWORTH, C.; MANTOVANI, M. Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision  $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$  geochronology. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 121, p. 333-348. 1994.
- WAICHEL, B.L., LIMA, E.F., SOMMER, C.A., LUBACHESKY, R. Peperite formed by lava flows over sediments: An example from the central Paraná Continental Flood Basalts, Brazil. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 159, p. 343-354. 2007.
- WAICHEL, B.L., LIMA, E.F., LUBACHESKY, R., SOMMER, C.A., Pahoehoe flows from the Paraná Continental Flood Basalts. **Bulletin of Volcanology**, v. 68, p. 599-610. 2006.

WEBSTER, R. 1983. **Gems**. 4 ed. Butterworth Ltd. England. 1006 p.

WILDNER, W. Estratigrafia do magmatismo Serra Geral na Bacia do Paraná – Conceitos básicos e divisão faciológica. In: REUNIÃO ABERTA DA COMISSÃO BRASILEIRA DE ESTRATIGRAFIA. 2004. Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: SBG, 2004. p. 62-77.

WILDNER, W.; LOPES, R.C.; ROMANINI, S., CAMAZZATO, E. Contribuição à estratigrafia do magmatismo Serra Geral na Bacia do Paraná. In: ENCONTRO SOBRE A ESTRATIGRAFIA DO RIO GRANDE DO SUL: ESCUDOS E BACIAS, 1., 2003. Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS, 2003. p. 204-210.

ZALÁN, P.V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J.C.J.; MARQUES, A.; ASTOLFI, M.A.M.; VIEIRA, I.S.; APPI, V.T.; ZANOTTO, O.A. 1990. Bacia do Paraná. In: Deraja Gabaglia, G.P. & Milani, E.J. (Coord.). **Origem e Evolução de Bacias Sedimentares**. Rio de Janeiro, PETROBRÁS, p. 135-164.