

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

UNICAMP

Pós-Graduação em Geociências - Área de Metalogênese

# JOSÉ CARLOS SÍCOLI SEOANE

## GEOLOGIA DO OURO EPITERMAL DE CASTRO, PR. Uso de Sistema de Informação Geo-referenciada para avaliação de base de dados geológico-geoquímicos

Tese apresentada ao Instituto de Geociências como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geociências - Área de Metalogênese

Orientador: Professor Doutor Ardemírio de Barros Silva Esto arresponder como como como
redo principalita de la del de
por jose anles 5. Secane
e AYSonn
DIRIENTADOR
CAMPINAS - SÃO PAULO

SETEMBRO - 1999

ference
NIDAG. BC
* CHAPLE A.
- 111. in 12
MM COMP
She Ula
4
MEO BC/ 3974R
100 229/99
° 0 र
1500 25 11 000
JA 17-4-99
' CPD

CM-00133175-0

## FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA I.G. – UNICAMP

,

Se61g	Seoane, José Carlos Sícoli Geologia do ouro epitermal de Castro, PR. Uso de SIG para avaliação de base de dados geológico - geoquímicos / José Carlos Sícoli Seoane Campinas, SP.: [s.n.], 1999.
	Orientador: Ardemírio de Barros Silva Tese (doutorado) Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.
	<ol> <li>Prospecção Mineral.</li> <li>Sistema de Informação Geográfica.</li> <li>Ouro - Castro, PR. I. Silva. Ardemírio de Barros. II. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.</li> <li>III. Título.</li> </ol>

~



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ÁREA DE METALOGÊNESE

AUTOR: JOSÉ CARLOS SÍCOLI SEOANE

TÍTULO DA TESE: GEOLOGIA DO OURO EPITERMAL EM CASTRO, PR. USO DE SIG NA CARACTERIZAÇÃO DE ÁREAS FAVORÁVEIS.

**ORIENTADOR:** Professor Doutor Ardemírio de Barros Silva - Instituto de Geociências

Aprovada em: \_\_\_\_/\_\_\_/

PRESIDENTE: Professor Doutor Ardemírio de Barros Silva

**EXAMINADORES:** 

 Prof. Dr. Ardemírio de Barros Silva
 - Presidente

 Prof. Dr. Alvaro P. Crósta
 - Martine

 Prof. Dr. Alfonso Schrank
 - Martine

 Prof. Dr. Ginaldo Ademar da Cruz Campanha
 - Martine

 Prof. Dr. Paulo César Soares
 - Martine

 Campinas, de
 de



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS Pós-graduação em Geociências - Área de Metalogênese

LINICAMP

## GEOLOGIA DO OURO EPITERMAL DE CASTRO, PR. Uso de SIG para avaliação de base de dados geológico-geoquímicos.

## RESUMO

#### **TESE DE DOUTORAMENTO**

#### José Carlos Sícoli Seoane

A região de Castro é constituída por uma bacia extensional, Eo-Cambriana a Eo-Ordoviciana tardi- a pós-Brasiliana. Diques e *plugs* andesíticos cortam sedimentos pelíticos e rudáceos bem laminados, com tufos e ignimbritos subordinados. Um complexo de domos riolíticos maciços a extremamente bandados por fluxo, originado em vários pulsos magmáticos, tufos e epiclásticas completam a seqüência, próximo à cidade de mesmo nome no centro-leste do estado do Paraná. As rochas da bacia hospedam mineralização aurífera epitermal de baixa sulfetação, a primeira de seu tipo e idade a ser descrita no Brasil.

A integração, validação e análise em diferentes escalas da grande diversidade de dados úteis à pesquisa de ouro em sistemas epitermais é abordada pela implementação de um Sistema de Informações Geo-referenciadas (SIG). Os dados utilizados no modelamento do depósito incluem geoquímica multielementar em vários meios e mapeamento geológico regional e de detalhe.

A contagem de pintas em concentrados de batéia e a geoquímica multielementar de 750 amostras de sedimento de corrente, nas frações acima e abaixo de 80#, são associadas às coordenadas das estações de amostragem obtidas por GPS, através do número da amostra. Uma base cartográfica, preparada a partir da digitalização e edição em SIG de cartas topográficas 1:50.000, permite a delimitação das bacias hidrográficas. Cada bacia é associada à amostra correspondente. Um novo mapa geológico, produzido pela edição e integração dos mapas disponíveis, mapeamento de campo e fotointerpretação 1:60.000 das estruturas proporciona uma visão integrada do ambiente vulcânico e mineralizações associadas.

O ouro é encontrado tanto nas rochas básicas a intermediárias como nas rochas félsicas. Contatos entre as rochas vulcânicas e sedimentos são locais de silicificação e mineralização embora os sedimentos sejam estéreis. A textura comum aos veios mineralizados é a substituição de carbonato. Cinábrio e arsenopirita ocorrem em pequena quantidade, enquanto calcedônia, ilita e barita são típicos como minerais de ganga. Também ocorrem hematita, limonita e goetita, em geral em fraturas e/ou cavidades, fluorita, sericita e epidoto. Estibnita, zeolita, e granada ocorrem localmente e em pequena quantidade.

Associações de elementos farejadores da geoquímica multielementar são obtidas pelas técnicas knowledge driven (Zn, Pb, Cu, Sb, As, Hg) e data driven (Zn, Ti, K). O modelamento em SIG prioriza bacias com simultaneidade e/ou vizinhança das duas associações, e leva à seleção de quatro grupos, num total de onze bacias, por sua vez também relacionadas à estruturas ou contatos litológicos. A ponderação dos valores de ouro pela sinuosidade das drenagens amostradas permite a filtragem dos efeitos de dispersão física e de acumulação do ouro, resultando em um mapa de anomalias modificado, que melhor representa a distribuição química original do ouro nas rochas, e portanto, de anomalias correlacionáveis à mineralizações.

::

- A Bacia de Castro é descrita em diversos trabalhos como de retroarco e não de antepaís.
- O termo intrusões subvulcânicas, que consta diversas vezes no texto (e.g. nos capítulos 2, 3, 4, 5, e 7, e Figuras 2.1, 2.2, etc.) é uma tradução direta do termo em inglês, utilizado por Henley & Ellis (1983), Sillitoe (1995) e Hedenquist et al. (1996) entre outros pesquisadores de renome. A menção à natureza intrusiva de rochas vulcânicas deve ser vista como caracterizando uma invasão em material inconsolidado, a pequena profundidade, sendo no entanto preservadas texturas e estruturas típicas de rochas vulcânicas sub-aéreas.
- Página 48: onde existe referência a Figura 3.4, acrescentar a referência ao Anexo 2.
- **Página 52**: onde o texto se refere a Tabela 3.2, substituir a referência pela Tabela 3.3, logo abaixo.
- Página 76: substituir a Figura 5.2, pela apresentada abaixo, em cores.



- Página 92: onde se lê "Outro bem exemplo..." substituir por "Outro bom exemplo...".
- **Página 94**: onde existe referência a Figura 5.2, acrescentar a referência às Figuras 5 e 6 do primeiro artigo.
- Abstract do segundo artigo: onde se lê "To each of those ranges tentative empirical values of 1, 1.5 and 2 were assigned" substituir por "To each of those ranges tentative empirical values of 2, 1.5 and 1 were assigned".

To see a World in a Grain of Sand And a Heaven in a Wild Flower Hold Infinity in the palm of your hand And Eternity in an hour

WILLIAM BLAKE

À pequena família (Catia, Yasmin e Yuri), grande alegria da minha vida.

À grande família (Pai, Mãe, Irmãos e Amigos), inspiração, exemplo e companheiros de jornada.

#### Agradecimentos

Ao Prof. Ardemírio Barros, em primeiro lugar, por abrir as portas de um novo mundo de informação. A seguir, por sua orientação, por acreditar no projeto e em sua viabilidade apesar das dificuldades, por sua compreensão de meus objetivos, e sobretudo pela sua amizade.

À DOCEGEO, pela cessão da área de tese e dos dados obtidos enquanto membro da equipe do Projeto Castro e à MINEROPAR pela permissão para mapear área onde é detentora de direitos minerais.

À FAPESP pela concessão da bolsa número 98/05477-8, permitindo a finalização da tese em caráter de dedicação exclusiva, além de sua divulgação em apresentações e publicação de artigos.

Ao Dr. Richard Sillitoe pelas discussões em campo da geologia e características das mineralizações, sugestões de bibliografias, e ainda por demostrar a imensa capacidade dos afloramentos em responder as indagações do geólogo.

Ao colega Gilberto Schubert pela generosa contribuição de compilar no item Geologia Regional.

À equipe que executou os trabalhos de prospecção na região, composta em diversas fases pelos geólogos Francisco Robério Abreu, Franciscus Baars, Gilberto Schubert e Renato Brás Sue; pelos técnicos José Geraldo Rosa, Olavo Alves Filho, Osvaldo Costa Filho, Denilson Moutinho, Wanilson Trevenzolli e Eduardo Marques, e pelos auxiliares técnicos José Osvaldo Rapallo, José Braga, José Gualandi, Célio Eustáquio e Maurete Ribeiro. Ao geólogo Emanuel D. Leal.

À equipe de petrografia do GIMIC/SUTEC - CVRD pela confecção, descrição inicial, e fotomicrografias das lâminas, e pelas discussões subsequentes, em especial Elisabeth da Fonseca, Beatriz Vieira e Maria Auxiliadora M. Vieira. Adicionalmente ao Prof. Alfonso Schrank e a Catarina Toledo pela disponibilidade em discutir a petrografia e pelas sugestões bibliográficas.

Aos vulcanólogos Dr. José Viramonte, Dr. Ray Cas, Dr. Guillermo Alvarado e Dr. Ivan Petrinovich por dividirem seu conhecimento em rochas vulcânicas, suas ocorrências e texturas. Ao geólogo Miles Thompson pela bibliografia.

À Cátia Fernandes Barbosa por muito, inclusive pela revisão do texto e sugestões.

Aos professores, técnicos, funcionários e colegas do IG – UNICAMP. Em especial ao pessoal do LAPIG pelo apoio quanto a formato de dados e uso de *software*, e aos Prof. Job Batista e Alfonso Schrank pelas sugestões e críticas tanto em bancas quanto fora delas. Às secretarias de Pósgraduação e do Depto. de Metalogênese por sua paciência, eficiência e boa vontade. À todos os colegas de curso pelas excelentes discussões.

Ao Lagemar / UFF pelo apoio em informática, em especial Prof. Alberto Figueiredo, Prof. Suzanna Sichel, Prof. Cleverson Silva e Prof. Gilberto Dias.

Aos amigos Liliana, Enrico, José Renato, Bibi, Analuiza, Tati, Carrera, Penteado, Márcio e Márcia pelo "apoio logístico".

Às ondas e bicicletas por manter baixo o stress, salvando minha saúde fisica e mental.

Aos gerentes com os quais estive envolvido durante a execução da tese, em especial à Diógenes Vial e Maurício Ferreira, sobretudo por sua "tolerância simpática" em dividir suas prioridades com este meu adicional afazer.

# SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	Å
1.1 OBJETIVOS E CONTEXTO GEOLÓGICO	2
1.2 LOCALIZAÇÃO E ACESSOS	4
1.3 HISTÓRICO DA PESQUISA DE MINERAIS METÁLICOS NA REGIÃO	5
1.4 ASPECTOS FISIOGRÁFICOS E SÓCIO-ECONÔMICOS	7
2 MODELO GEOLÓGICO E TÉCNICAS DE PROSPECÇÃO	8
2.1 GEOLOGIA REGIONAL	8
2.2 SELEÇÃO DO MODELO GEOLÓGICO	14
2.2.1 MODELOS DE DEPÓSITO EPITERMAL	14
2.2.2 EXEMPLOS SELECIONADOS DE DEPÓSITOS EPITERMAIS	21
Hishikari (Minério em Zonas de Bonanza)	23
Sleeper (Minério Disseminado com Zonas de Bonanza)	26
Round Mountain (Minério Disseminado)	27
2.3 TÉCNICAS DE PROSPECÇÃO PARA DEPÓSITOS EPITERMAIS	28
	20
2.4 USO DE SISTEMAS GEORREFERENCIADOS DE INFORMAÇÃO	
2.4 USO DE SISTEMAS GEORREFERENCIADOS DE INFORMAÇÃO 3 CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA	30
2.4 USO DE SISTEMAS GEORREFERENCIADOS DE INFORMAÇÃO 3 CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA	30 33
<ul> <li>2.4 USO DE SISTEMAS GEORREFERENCIADOS DE INFORMAÇÃO</li> <li>3 CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA</li> <li>3.1 AMOSTRAGEM DE SEDIMENTO DE CORRENTE</li> <li>3.1.1 COLETA DE AMOSTRAS</li> </ul>	30 33 33
2.4 USO DE SISTEMAS GEORREFERENCIADOS DE INFORMAÇÃO <b>3 CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA</b> 3.1 AMOSTRAGEM DE SEDIMENTO DE CORRENTE 3.1.1 COLETA DE AMOSTRAS 3.1.2 ANALISE ESTATÍSTICA	33 33 33 36
2.4 USO DE SISTEMAS GEORREFERENCIADOS DE INFORMAÇÃO <b>3 CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA</b> 3.1 AMOSTRAGEM DE SEDIMENTO DE CORRENTE 3.1.1 COLETA DE AMOSTRAS 3.1.2 ANALISE ESTATÍSTICA 3.2 AMOSTRAGEM DE SOLO E ROCHA.	33 33 33 36 47
<ul> <li>2.4 USO DE SISTEMAS GEORREFERENCIADOS DE INFORMAÇÃO</li> <li>3 CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA</li> <li>3.1 AMOSTRAGEM DE SEDIMENTO DE CORRENTE.</li> <li>3.1.1 COLETA DE AMOSTRAS</li> <li>3.1.2 ANALISE ESTATÍSTICA</li> <li>3.2 AMOSTRAGEM DE SOLO E ROCHA.</li> <li>3.2.1 PLANEJAMENTO E COLETA DE AMOSTRAS DE SOLO</li> </ul>	33 33 33 36 47 47
<ul> <li>2.4 USO DE SISTEMAS GEORREFERENCIADOS DE INFORMAÇÃO</li> <li>3 CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA</li> <li>3.1 AMOSTRAGEM DE SEDIMENTO DE CORRENTE</li> <li>3.1.1 COLETA DE AMOSTRAS</li> <li>3.1.2 ANALISE ESTATÍSTICA</li> <li>3.2 AMOSTRAGEM DE SOLO E ROCHA</li> <li>3.2.1 PLANEJAMENTO E COLETA DE AMOSTRAS DE SOLO</li> <li>3.2.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA</li> </ul>	33 33 33 36 47 47 50
<ul> <li>2.4 USO DE SISTEMAS GEORREFERENCIADOS DE INFORMAÇÃO</li> <li>3 CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA</li> <li>3.1 AMOSTRAGEM DE SEDIMENTO DE CORRENTE.</li> <li>3.1.1 COLETA DE AMOSTRAS</li> <li>3.1.2 ANALISE ESTATÍSTICA</li> <li>3.2 AMOSTRAGEM DE SOLO E ROCHA.</li> <li>3.2.1 PLANEJAMENTO E COLETA DE AMOSTRAS DE SOLO</li> <li>3.2.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA</li> <li>3.2.3 AMOSTRAGEM DE ROCHA.</li> </ul>	33 33 33 36 47 50 51
<ul> <li>2.4 USO DE SISTEMAS GEORREFERENCIADOS DE INFORMAÇÃO</li> <li>3 CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA.</li> <li>3.1 AMOSTRAGEM DE SEDIMENTO DE CORRENTE.</li> <li>3.1.1 COLETA DE AMOSTRAS</li> <li>3.1.2 ANALISE ESTATÍSTICA</li> <li>3.2 AMOSTRAGEM DE SOLO E ROCHA.</li> <li>3.2.1 PLANEJAMENTO E COLETA DE AMOSTRAS DE SOLO</li> <li>3.2.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA</li> <li>3.2.3 AMOSTRAGEM DE ROCHA.</li> </ul> 4 GEOLOGIA DE BACIAS HIDROGRÁFICAS ANÔMALAS PARA OURO	33 33 33 33 36 47 50 51 53
<ul> <li>2.4 USO DE SISTEMAS GEORREFERENCIADOS DE INFORMAÇÃO</li></ul>	33 33 33 33 36 47 50 51 53
<ul> <li>2.4 USO DE SISTEMAS GEORREFERENCIADOS DE INFORMAÇÃO</li> <li>3 CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA</li> <li>3.1 AMOSTRAGEM DE SEDIMENTO DE CORRENTE.</li> <li>3.1.1 COLETA DE AMOSTRAS</li> <li>3.1.2 ANALISE ESTATÍSTICA</li> <li>3.2 AMOSTRAGEM DE SOLO E ROCHA.</li> <li>3.2.1 PLANEJAMENTO E COLETA DE AMOSTRAS DE SOLO</li> <li>3.2.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA</li> <li>3.2.3 AMOSTRAGEM DE ROCHA.</li> <li>4 GEOLOGIA DE BACIAS HIDROGRÁFICAS ANÔMALAS PARA OURO</li> <li>4.1 CARACTERIZAÇÃO PETROLÓGICA.</li> <li>4.2 INTEGRAÇÃO DA GEOLOGIA DAS MALHAS E ARREDORES</li> </ul>	
<ul> <li>2.4 USO DE SISTEMAS GEORREFERENCIADOS DE INFORMAÇÃO</li> <li>3 CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA</li></ul>	

5	A REGIÃO DE CASTRO E O MODELO EPITERMAL	69
	5.1 CLASSIFICAÇÃO NO MODELO EPITERMAL	69
	5.2 AMBIENTE VULCÂNICO INTERPRETADO	71
	5.3 ALTERAÇÃO HIDROTERMAL E TIPOS DE MINERALIZAÇÃO	74
	5.4 IDENTIFICAÇÃO DO NÍVEL DE EROSÃO	81
~	HODEL AMENTO DOS DADOS EM SIO	OE
0	INDEFMIRENTA AAA AWAAA FIN SIQ	00

3	MODELAMENTO DOS DADOS EM SIG	00
	6.1 CONVERSÃO DE DADOS	85
	6.2 PRÉ-TRATAMENTO DOS DADOS EM SIG	90
	6.2.1 SÍNTESE DA CARACTERIZACAO GEOQUÍMICA	92
	6.2.2 GEOLOGIA E MINERALIZAÇÃO EM SUBSUPERFÍCIE	94

ARTIGOS	SUBMETIDOS PARA	A PUBLICAÇÃO	
---------	-----------------	--------------	--

## PRIMEIRO ARTIGO: GIS MODELING OF EPITHERMAL GOLD EXPLORATION DATA FROM CASTRO, PR, BRAZIL

## Abstract

- 1. Introduction
- 2. Geological Setting and Gold Exploration
- 3. The Data
- 4. Data Interpretation and Modeling
  - 4.1 Data Driven Model
  - 4.2 Knowledge Driven Model
- 5. Conclusions
- Acknowledgements
- References
  - Tables Figure Captions Figures

### SEGUNDO ARTIGO: GOLD-ANOMALOUS CATCHMENT BASINS: A GIS PRIORITIZATION MODEL CONSIDERING DRAINAGE SINUOSITY

Abstract

- 1. Introduction and Overall Setting
- 2. The Data
- 3. Gold Anomalous Catchment Basins
- 4. Modeling Drainage Sinuosity in Rhyolite-hosted Catchment Basins
- 5. Sinuosity-averaged Gold Anomalies Compared to Pathfinder Associations
- 6. Conclusions

### Acknowledgements

#### References

Table Figure Captions Figures

7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	. 97
	7.1 GEOLOGIA DA BACIA DE CASTRO	97
	7.2 GEOQUÍMICA	98
	7.3 MINERALIZAÇÃO	98
	7.4 IDADE E CORRELAÇÃO COM BACIAS DO SUL DO BRASIL	99
	7.5 USO DE SIG NA AVALIAÇÃO E INTEGRAÇÃO DE DADOS 1	101

## **8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

## 9. BIBLIOGRAFIA

## ANEXOS

- ANEXO 1 DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA DE AMOSTRAS SELECIONADAS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS ANÔMALAS PARA OURO EM SEDIMENTO DE CORRENTE
- ANEXO 2 MAPA GEOLÓGICO DA BACIA DE CASTRO, ESCALA 1:100.000, COM BACIAS HIDROGRÁFICAS SELECIONADAS E PONTOS AMOSTRADOS E DESCRITOS

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

. 4
16
18
35
37
38
39
43
44
45
46
66
75
76
78
82
87

## TABELAS

Tabela 3.1 - Resumo da estatística univariada para sedimento ativo de drenagem, 41 Tabela 3.2 - Síntese dos resultados de geoquímica de solos para ouro por alvo. ... 50 Tabela 3.3 - Total de amostras de rocha coletadas e resultados obtidos por alvo. ... 52

## ESTAMPAS

Estampa 4.1: Rochas Sedimentares, epiclásticas e retrabalhadas.

Estampa 4.2: Ignimbritos.

Estampa 4.3: Álcali-riolitos porfiríticos, maciços.

Estampa 4.4: Álcali-riolito bandado a fluxo.

Estampa 4.5: Mistura de lavas em diferentes estados de plasticidade.

Estampa 4.6: Devitrificação / hidratação em rochas félsicas.

Estampa 4.7: Álcali-traquitos.

Estampa 4.8: Textura fluidal em álcali-traquitos.

Estampa 4.9: Rochas máficas.

Estampa 4.10: Diques de andesito / basalto.

Estampa 4.11: Álcali-riolitos alterados hidrotermalmente.

Estampa 4.12: Brechas por Fraturamento hidráulico.

Estampa 4.13: Brechas por fraturamento hidráulico.

Estampa 4.14: Silicificação Pervasiva com mineralização.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS Pós-graduação em Geociências - Área de Metalogênese

## GEOLOGIA DO OURO EPITERMAL DE CASTRO, PR. Uso de SIG para avaliação de base de dados geológico-geoquímicos.

## RESUMO

### **TESE DE DOUTORAMENTO**

### José Carlos Sícoli Seoane

A região de Castro é constituída por uma bacia extensional, Eo-Cambriana a Eo-Ordoviciana tardi- a pós-Brasiliano. Diques e *plugs* andesíticos cortam sedimentos pelíticos e rudáceos bem laminados, com tufos e ignimbritos subordinados. Um complexo de domos riolíticos maciços a extremamente bandados por fluxo, originado em vários pulsos magmáticos, tufos e epiclásticas completam a seqüência, próximo à cidade de mesmo nome no centro-leste do estado do Paraná. As rochas da bacia hospedam mineralização aurífera epitermal de baixa sulfetação, a primeira de seu tipo e idade a ser descrita no Brasil.

O ouro é encontrado tanto nas rochas intermediárias a félsicas. Sedimentos são estéreis mas os contatos entre as rochas vulcânicas e estes são locais de silicificação e mineralização. A textura comum aos veios mineralizados é a substituição de carbonato, e cinábrio e arsenopirita ocorrem em pequena quantidade. Calcedônia, calcita, ilita e barita são típicos como minerais de ganga. Também ocorrem hematita, limonita e goetita, em geral em fraturas e/ou cavidades, fluorita, sericita e epidoto. Estibnita, zeolita, e granada ocorrem localmente e em pequena quantidade.

A integração, validação e análise em diferentes escalas da grande diversidade de dados úteis à pesquisa de *commodities* associadas aos sistemas epitermais é abordada pela implementação de um Sistema de Informações Geo-referenciadas (SIG). Os dados utilizados no modelamento do depósito inclui geoquímica multielementar em v;arios meios e mapeamento geológico regional e de detalhe.

A geoquímica multielementar de 750 amostras de sedimento de corrente nas frações acima e abaixo de 80#, além de contagem de pintas em concentrado de batéia, foram importados de arquivos de resultados enviados pelo laboratório e associados através do número da amostra às coordenadas das estações de amostragem, obtidas por GPS. Cartas topográficas 1:50.000 foram digitalizadas em CAD e editadas em SIG para obtenção de uma base, e as bacias hidrográficas foram delimitadas. Cada bacia foi associada à amostra correspondente. Mapas geológicos de diversas origens e fotointerpretação 1:60.000 das estruturas foram igualmente digitalizadas, georreferenciadas, editadas em SIG.

O modelamento em SIG de associações de elementos farejadores da geoquímica multielementar, selecionados tanto pela técnica *knowledge driven* quanto *data driven*, leva à seleção de quatro grupos de onze bacias, por sua vez também relacionadas à estruturas ou contatos litológicos, a serem investigados para mineralizações aflorantes ou não. O ponderamento dos valores de ouro pela sinuosidade das drenagens amostradas permite a filtragem dos efeitos de dispersão física e de acumulação do ouro, resultando em um mapa de anomalias modificado, que melhor representa a distribuição química original do ouro nas rochas, e portanto, de anomalias correlacionáveis à mineralizações.



## GEOLOGY OF EPITHERMAL GOLD IN CASTRO, PR, BRAZIL. GIS BASED EVALUATION OF GEOLOGICAL-GEOCHEMICAL DATABASE

## ABSTRACT

#### PhD. Thesis

#### José Carlos Sícoli Seoane

Castro is an extensional, Eocambrian to Eordovician late to post-Brasiliano foreland basin. Plug and dyke bodies of andesite cut pelitic and rudaceous sequences of well-bedded red to green siltstone and sandstone, with subordinate ignimbrite. A dome complex of massive to highly flow-banded rhyolite from several pulses, tuff and epiclastics, fill the basin nearby the town of the same name, in central-eastern state of Paraná. The basin is host to lowsulphidation epithermal gold mineralization, the first of its type and age to be reported in Brazil.

Gold is found in both intermediate and felsic volcanic rocks. Sediments are virtually barren, but rhyolite / sediment contacts are known sites of silicification and mineralization. Carbon replacement is a common vein texture and cinnabar and arsenopyrite occur in small quantities. Chalcedony, calcite, illite and barite are typical gangue minerals. Also present are hematite, limonite and goethite, usually in fractures and/or cavities, fluorite, sericite and epidote. Stibnite, zeolite, and garnet occur locally and in small quantities.

The integration, validation and analysis at different scales of the great diversity of data suitable for the exploration of commodities associated with epithermal systems, are met by the implementation of a Geographic Information Systems (GIS). Data used in deposit modeling includes multielementary geochemistry in various media and regional and detail geological mapping.

Multielementary geochemistry of 750 stream sediment samples in two sieve fractions (above and below 80#), plus color count for gold in pan concentrates collected nearby the stream sediment stations, were captured from lab result spreadsheets and associated by their corresponding sample number to sample site location obtained from GPS. Topo sheets in 1:50.000 scale were digitized in CAD to provide a base map and edited in the GIS to become seamless; catchment basins were delimited and each basin was assigned its corresponding sample. Geology maps and photointerpretation of structures were also digitized, georeferenced and edited for consistency in the GIS.

Modeling by GIS, using both *knowledge driven* and *data driven* pathfinder associations for multielementary geochemestry, lead to selection of four clusters of eleven catchment basins, which are related to structures or lithological boundaries, to be investigated for surfacing and non-surfacing orebodies. Weighting gold values based on sinuosity of the streams, to filter out the effects of physical dispersion and accumulation of gold, results in a modified anomaly map which more closely represents the original chemical distribution of gold in rocks, and thus anomalies related to mineralization.

### 1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho visa contribuir para o conhecimento de diversos aspectos da geologia da Bacia de Castro, situada nos municípios de Castro, Piraí do Sul e Carambeí, próximo a Ponta Grossa, no estado do Paraná. São descritos nos capítulos que seguem os litotipos, estruturas, estilo de vulcanismo, estratigrafia, mineralizações auríferas. Estes temas foram estudados através de mapeamento geológico, petrografia, caracterização geoquímica de sedimentos de corrente, concentrado de batéia, solos e rocha, todos integrados em Sistema Geo-referenciado de Informações (SIG).

Neste capítulo 1, são discutidos os objetivos e apresentada a área e seu histórico no que se refere à pesquisa de bens minerais metálicos. No capítulo 2 é apresentado um resumo sobre o conhecimento da geologia da área e, a partir deste, é selecionado um modelo geológico para as mineralizações. A seguir são discutidos alguns exemplos de depósitos de classe mundial desta categoria e apresentadas as técnicas de comprovada eficiência e eficácia na pesquisa desta categoria de depósito, inclusive a utilização de SIG. No capítulo 3 a paisagem geoquímica é caracterizada em seus diversos meios amostrais, e no capítulo 4 a geologia das bacias hidrográficas anômalas para ouro é detalhada. O capítulo 5 apresenta o modelo de mineralização epitermal aplicado à região de Castro, buscando evidenciar o ambiente vulcânico interpretado, a caracterização da alteração hidrotermal e mineralizações associadas e o nível de preservação da bacia quanto à erosão. O capítulo 6 apresenta o modelamento e a avaliação de base de dados geológico-geoquímicos em SIG, através de uma introdução onde são discutidos os parâmetros utilizados e a etapa de pré-

processamento e de dois artigos publicados. O primeiro artigo discute os tipos de modelamento guiado por dados (*data driven*) e por conhecimento prévio (*knowledge driven*), enquanto que o segundo artigo apresenta um estudo sobre o estabelecimento e a utilização de um índice de sinuosidade da rede de drenagem para ponderar as análises de ouro, resultando em uma reclassificação das anomalias de ouro em sedimento de corrente que reflete mais a geoquímica original e menos os fatores físicos de dispersão. As considerações finais são apresentadas no capítulo 7.

### 1.1 OBJETIVOS E CONTEXTO GEOLÓGICO

Embora depósitos auríferos epitermais ocorram ao longo do tempo geológico, do Arqueano (Forster & Jafarzadeh, 1994) ao Mioceno (Gray & Coolbaugh, 1994; Deen *et al.*, 1994), e nos cinco continentes, estes não vem sendo até o momento objeto de prospecção sistemática no Brasil. Tal fato se deve principalmente à dificuldade de se caracterizar este tipo de ambiente em rochas deformadas e metamorfisadas, que em geral constituem os *greenstone belts*, ambientes tradicionalmente trabalhados para ouro em nosso país. Mineralizações mais recentes hospedadas em rochas sedimentares também vem sendo trabalhadas, enquanto que rochas vulcânicas e vulcanoclásticas mineralizadas são ainda praticamente desconhecidas.

A partir do reconhecimento do potencial deste tipo de ambiente durante os trabalhos realizados na região de Castro, no estado do Paraná, buscou-se num segundo momento a

caracterização de recursos auríferos. Comprovada a fertilidade do ambiente para ouro, torna-se importante analisar novas possibilidades de mineralização, seja a céu aberto, seja a maiores profundidades. A utilização de SIG para estabelecer áreas de maior favorabilidade de ocorrência de ouro, e portanto orientar futuros trabalhos é o escopo desta tese.

A região de Castro e Piraí do Sul (Figura 1.1) corresponde a uma bacia extensional de antepaís, pós-Brasiliana, de idade Eordoviciana (490 + 13 Ma, Reis Neto et al., 1994) a Eocambriana (543 + 12Ma, Cordani et al., 1998). Constitui-se de rochas vulcânicas e vulcanoclásticas ácidas a intermediárias e sedimentos epiclásticos pelíticos e rudáceos formalizados como Grupo Castro (Trein & Fuck, 1967). Sua porção aflorante tem cerca de 900 km2. configurando um grande triângulo em mapa cujo lado leste, de 50 km de extensão, limita a bacia através de uma falha NNE, com granitos, migmatitos, micaxistos e quartzitos de idade Neoproterozóica. Os lados oeste do triângulo formam um vértice que aponta para noroeste, sentido do arco estrutural de Ponta Grossa, arqueamento de idade meso-Cenozóica ao qual se associam inúmeros diques básicos e que delineia a grande concavidade apresentada em mapa pela faixa de afloramentos de rochas da Bacia do Paraná. Os sedimentos basais desta bacia, os arenitos e níveis conglomeráticos da Formação Furnas, de idade Devoniana, recobrem em discordância angular toda a porção oeste das rochas do Grupo Castro, formando uma notável linha de escarpas de até 200 m de altura. Localmente, ocorrem, entre estas duas unidades, diamictitos Silurianos da Formação Iapó.

## 1.2 LOCALIZAÇÃO E ACESSOS

A cidade de Castro situa-se na região centro-leste do Estado do Paraná, a 100 km no rumo noroeste, da capital estadual, Curitiba. Está ligada a esta capital por rodovia pavimentada de pista dupla, em um trajeto de 140 km passando por Ponta Grossa (BR 376 e PR 151). A rodovia PR 151 segue para norte, em direção ao Estado de São Paulo. Uma densa e bem conservada rede de estradas secundárias irradia-se a partir deste acesso principal, entre estas a estrada intermunicipal Castro-Tibagi, pavimentada, que segue no rumo oeste. A Rede Ferroviária Paraná-Santa Catarina corta o município na direção SW-NE.



Figura 1.1 - Mapa Geológico e de Localização.

#### 1.3 HISTÓRICO DA PESQUISA DE MINERAIS METÁLICOS NA REGIÃO

Existem alguns registros de atividade garimpeira de pouca expressão executada pelos jesuítas na primeira metade do século XVIII ao longo do aluvião do córrego D'Ouro, afluente do rio Iapó imediatamente a norte da cidade de Castro.

Do início até meados deste século foram lavradas intermitentemente quatro pequenas pedreiras com minério de ferro associado a zonas de falha. São pequenos corpos hematíticos impuros de formato aproximadamente tabular que em alguns locais ainda são extraídos para capeamento de estradas vicinais.

Poucos trabalhos de prospecção mineral foram realizados na região. Na década de 70 a Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM) efetuou reconhecimento por amostragem de sedimentos de corrente e medidas cintilométricas, visando a identificação de mineralizações de metais base e urânio (Arioli & Moreton, 1982). O granito serra do Carambeí, a sudeste de Castro, foi estudado quanto à suas anomalias de urânio (Pinto-Coelho, 1986).

Em 1975/76 a GEOFOTO executou para o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) 53.924 km de perfis (N30°W) aerogeofísicos (magnetometria e radiometria) nos Estados de São Paulo, Paraná e Santa Catarina, no denominado Projeto Serra do Mar Sul. Como produto final foram apresentados mapas nas escalas 1:250.000 e 1:150.000. Estes dados contém erros de posicionamento com respeito às coordenadas geográficas, embora estejam corretos em relação aos detalhes planimétricos da região. Silva & Mantovani

\$

(1994) apresentam algoritmos para recuperação parcial dos dados originais. Em 1985, face a precariedade dos dados, a Rio Doce Geologia e Mineração S. A. (DOCEGEO) contratou os serviços de reprocessamento parcial do projeto à CONPETRO, com vistas à identificação de mineralizações de Cu, Mo e Au em granitos do Vale do Ribeira e Iguape (Arioli & Moreton, *op. cit.*). Das 17 folhas na escala 1:50.000 apresentadas, somente duas incluem a parte sul da Bacia Castro.

Entre 1978 e 1980 a UNIGEO, subsidiária do grupo Anglo-American, executou trabalhos de exploração geoquímica visando metais base na região de Colônia Iapó, parte noroeste da bacia, culminando com a perfuração de sondagens rotativas cujos resultados não são conhecidos (Arioli & Moreton, *op. cit.*).

Entre 1980 e 1982 a MINEROPAR executou trabalhos de prospecção geoquímica por sedimento de corrente e concentrado de batéia na região da folha Castro (parte sul da bacia), tendo delimitado várias anomalias de metais base e duas significativas anomalias de Au. Estas anomalias foram posteriormente checadas com amostragem de rocha e geraram resultados positivos, entretanto os trabalhos não prosseguiram (Arioli & Moreton, *op. cit.*).

Com a desistência de boa parte das áreas pela MINEROPAR, a DOCEGEO executou o reconhecimento geológico na região tendo obtido resultados significativos para ouro em amostras de rocha coletadas. Estes resultados, somados ao grande potencial do ambiente geológico da área, levaram ao requerimento de um conjunto de áreas que cobriam quase a totalidade da bacia (DOCEGEO, 1997).

6

## 1.4 ASPECTOS FISIOGRÁFICOS E SÓCIO-ECONÔMICOS

Geomorfologicamente a área constitui a extremidade oeste do primeiro planalto paranaense, com relevo suave ondulado e cotas variando de 920 a 1210 m, onde as áreas mais elevadas e acidentadas associam-se às rochas vulcânicas e piroclásticas e as áreas mais planas são dominadas pelas rochas epiclásticas.

A maior parte da área é utilizada para atividades agrícolas, de reflorestamento ou de pecuária, mas existem remanescentes de mata nativa, um dos quais corresponde ao Parque Estadual do Caxambu, com uma área de 10,54 km<sup>2</sup> na parte centro-leste da bacia.

A rede de drenagem, pertencente à bacia do rio Paranapanema/Paraná, tem padrão dendrítico, com sistemas subparalelos impostos por elementos estruturais. O rio Iapó segue no rumo noroeste, cortando o pacote de rochas sedimentares da Bacia do Paraná e formando um grande *canyon*. Juntamente com seus afluentes da margem direita, Piraí e Piraí-Mirim, constituem as principais expressões hidrográficas da região.

O município, de antiga tradição agropecuária e importante núcleo agroindustrial do estado, tem 65.000 habitantes e conta com uma excelente infraestrutura de apoio.

## 2. MODELO GEOLÓGICO E TÉCNICAS DE PROSPECÇÃO

#### 2.1 GEOLOGIA REGIONAL

Historicamente, o Grupo Castro, conforme definido por Trein & Fuck (1967), pode ser subdividido em três unidades distintas:

Seqüência sedimentar - constituída de arcósios, conglomerados, arenitos e siltitos.
Seqüência vulcânica ácida - compreendendo os riolitos e piroclásticas ácidas associadas.
Seqüência vulcânica intermediária - contando com andesitos e intercalações pouco espessas de sedimentos epiclásticos.

A estratigrafia proposta por Trein & Fuck (*op. cit.*) coloca a seqüência sedimentar intercalada entre dois eventos vulcânicos ácidos. A seqüência intermediária ocuparia o topo da unidade. O termo *seqüência*, no entanto é utilizado atualmente para se referir a sucessão relativamente concordante de estratos relacionados geneticamente, limitados em seu topo e base por discordâncias (Walker, 1992). O termo mais adequado quando não se observam as discordâncias, caso de Castro, é *associação de fácies*.

Moro (1993) define quatro associações litoestratigráficas para o Grupo Castro. A porção basal seria ocupada pela associação vulcânica intermediária a ácida, constituída de derrames andesíticos com intercalações de brechas vulcânicas, sedimentos rudáceos e vulcânicas/piroclásticas ácidas. Acima ocorreria a associação sedimentar inferior, com arenitos arcosianos e siltitos. Sobrepostas a estas podem ocorrer a associação vulcânica

8

ácida (riolitOs e piroclásticas ácidas) ou a associação sedimentar superior, composta principalmente por conglomerados. Esta autora apresenta uma coluna litoestratigráfica onde sugere uma relação de interdigitação entre as associações e acunhamento das unidades sedimentares no sentido inverso ao das unidades vulcânicas. Este fato foi confirmado, pelo menos localmente, durante os trabalhos da DOCEGEO (1997).

Bonacim *et al.* (1994) e Moro *et al.* (1994) reconhecem três associações litológicas: Associação Tronco (basal), constituída por intercalações de riolitos e andesitos, piroclásticas, conglomerados e arenitos conglomeráticos, Associação Piraí do Sul (intermediária), constituída por arenitos arcoseanos, siltitos e lamitos, e Associação Tirania (topo), constituída por riolitos, quartzo latitos, brechas piroclásticas, tufos, ignimbritos e conglomerados subordinados.

O posicionamento da associação intermediária na base da bacia, com clastos de composição andesítica identificados em sedimentos, condiz com as observações de Seoane *et al.* (1997), mas não com os trabalhos de Trein & Fuck (1967).

Expõe-se, a seguir, a descrição das unidades do Grupo Castro, segundo a definição original de Trein & Fuck (1967), as variações propostas por Moro (1993) e pela DOCEGEO (1997), que podem ser observadas no mapa geológico da Bacia Castro (Figura 1.1).

A **associação sedimentar** ocupa a maior parte do terço setentrional da bacia, na região ao redor da cidade de Piraí do Sul. Ocorre também em duas faixas paralelas de cerca de 3 km de largura de direção NE-SW, seguindo as vertentes esquerdas dos rios Piraí e Piraí-Mirim

e em porções a sudoeste e oeste da cidade de Castro. Os siltitos, siltitos argilosos e argilitos tem tonalidades variando de vermelho-escuro a creme-claro. Os arenitos arcosianos e arcósios possuem texturas de areia fina a média, com grãos subangulosos e selecionamento regular a bom. Aparecem normalmente intercalados nos siltitos, por vezes com um caráter rítmico ou em sucessão gradacional com conglomerados. Os termos mais finos destas litologias apresentam laminação plano-paralela, laminação cruzada cavalgante (*climbing ripple lamination*) e marcas de onda simétricas. Os conglomerados são extremamente mal selecionados com arcabouço composto em sua grande maioria por clastos angulosos a subarredondados de riolito pórfiro. Fragmentos de silexito, siltito, tufos e andesito são abundantes, mostrando nítida contribuição vulcânica. Em certos locais pode-se observar uma gradação normal grossa para arenitos arcosianos ou líticos. O tamanho dos clastos é extremamente variado, mas seixos de 2 a 30 cm de diâmetro são muito comuns. Os conglomerados geralmente encontram-se bem silicificados e se destacam no relevo, formando cristas isoladas no meio dos sedimentos pelíticos e psamíticos nos quais ocorrem intercalados.

Moro (1993) interpreta o que ela denominou de associação sedimentar inferior, uma associação composta por siltitos e arenitos arcosianos, como indicativa de um sistema flúvio-lacustre e a associação sedimentar superior, constituída por conglomerados, como registro de um sistema de legues aluviais.

A associação vulcânica ácida ocorre como uma faixa de 7 km de largura e direção NE-SW entre os rios Piraí e Piraí-Mirim, com formato aproximadamente circular, a oeste da cidade de Castro, em porções isoladas na parte norte da bacia e na sua extremidade meridional (q.v. Figura 1.1). Formam as áreas de relevo mais acidentado e elevado na bacia. Esta associação engloba uma série de litologias: riolitos, riodacitos, dacitos, tufos, lapili-tufos, tufos soldados e brechas.

Os riolitos são predominantes, ocorrendo na forma de múltiplos domos, geralmente encontrados em porções elevadas ou intercalados em tufos. Possuem tonalidades avermelhadas, rosadas ou esbranquiçadas e geralmente ocorrem muito fraturados. Em certos locais parecem apresentar um sistema de disjunção colunar. São rochas porfiríticas isotrópicas ou localmente com estrutura de fluxo. Normalmente ocorrem fenocristais de quartzo hialino bipiramidal, mas estes podem se apresentar arredondados ou com embainhamento por corrosão. Muito comuns também, são os fenocristais euédricos de feldspato alcalino rosado. Leinz (1936), através de minucioso estudo petrográfico destes riolitos, reconheceu a existência de três tipos distintos e concluiu que pelo menos duas erupções ocorreram na área. Esta hipótese foi confirmada pela existência de riolitos capeando conglomerados cujo arcabouço constitui-se destas vulcânicas ácidas.

As rochas piroclásticas são as que apresentam a maior heterogeneidade e sua distinção e mapeamento são tarefas extremamente difíceis, somente sendo possível em escala de mais detalhe que 1:10.000 (DOCEGEO 1997). Ocorrem associados aos riolitos dos quais nem sempre são facilmente distinguíveis, pois confundem-se com estas vulcânicas ácidas. Sua maior distribuição se dá na faixa de direção NE-SW acima comentada. São rochas de texturas variando de cinza fina a blocos e bombas.

in the second

Os lapili-tufos tem matriz de textura semelhante ao dos tufos grossos, com mais de 25% da rocha composta por clastos líticos ou de cristais de mais de 2 mm. Tanto os tufos quanto os lapili-tufos podem se apresentar soldados, ou seja, com estrutura laminada, *shards* e *pummice* deformados (achatados) e com clastos orientados. Nestes casos pode ocorrer também silicificação. As brechas e aglomerados vulcânicos têm ocorrência muito localizada e podem conter blocos de quaisquer uma das litologias acima.

A associação vulcânica intermediária ocorre principalmente na extremidade oeste da bacia, a partir da margem direita do rio Piraí-Mirim, na região de Colônia Iapó. Ocorre também de forma isolada como elipses de 2 a 4 km de eixo maior e 0,5 a 1,0 km de eixo menor em mapa, com direção NE, nas proximidades de Piraí do Sul, e também a norte e oeste de Castro, e como um bloco delimitado por lineamentos na área de Tirania. São rochas de cor cinza escura a clara, que amiúde apresentam abundantes amígdalas preenchidas total ou parcialmente por argila branca ou amarelada, especularita, calcita, quartzo, epidoto ou clorita. Localmente observa-se textura traquítica, com finas ripas de plagioclásio dispostas subparalelas a caoticamente. A composição da rocha varia dentro de uma área relativamente pequena entre andesitos *sensu stricto*, latitos e traquitos. Ocorre grande quantidade de hematita preenchendo fraturas nestas rochas.

Em geral estes andesitos são descritos como intercalados com camadas métricas de sedimentos epiclásticos. Podem ser arenitos líticos grossos e angulosos, siltitos acinzentados ou grauvacas. Tufos andesíticos também podem ser encontrados.

12

Trein & Fuck (1967) citam a formação de lamelas de biotita em grande parte dos sedimentos em contato com os andesitos, além da ocorrência de clorita e hornblenda.

Moro (1993), observando os padrões de terras raras, elementos maiores e traços, sugere que andesitos e riolitos são cogenéticos.

Diques de diabásio, microdiorito e diorito-pórfiro Cretáceos, cortam, indistintamente todas as següências do grupo Castro num padrão de direção que oscila entre N40°-60°W.

Sedimentos mais recentes pouco consolidados, constituídos de arenitos, arcósios, conglomerados e níveis argilosos ocorrem em encostas de vertentes suaves, acima do nível das várzeas atuais, ao longo dos rios Piraí, Iapó e seus afluentes da margem esquerda ao sul de Castro e na estrada Castro-Tibagi. Estes sedimentos são interpretados como Pleistocênicos ou como Pliocênicos (DOCEGEO 1997).

A tectônica predominantemente rígida que afeta as litologias do Grupo Castro, com adernamento e basculamento de blocos, já reconhecida por Coutinho (1955), manifesta-se na forma de juntas e falhas de rejeito horizontal e/ou vertical. Ocorrem, principalmente, duas direções de lineamentos. Aqueles de direção nordeste variam muito, entre N15° E (como a falha que limita a borda leste da bacia) e N50° E (falhas que limitam unidades litoestratigráficas, por exemplo). Estas estruturas foram prioritariamente investigadas pois devem relacionar-se à formação da bacia e aos eventos subsequentes de alteração hidrotermal. Outra direção de lineamentos é N35-55° W, normalmente intrudidos por

13

diques dioríticos de idade Cretácea, associados ao soerguimento do arco estrutural de Ponta Grossa. Ocorrem ainda, de forma subordinada, lineamentos de direção E-W, N15°W e N-S, além de estruturas curvilíneas e circulares, estas últimas associadas a domeamentos.

## 2.2 MODELO GEOLÓGICO

## 2.2.1 MODELOS DE DEPÓSITO EPITERMAL

Depósitos epitermais são aqueles formados a baixas profundidades (até 1 km da superficie), através de sistemas hidrotermais de baixas temperaturas (abaixo de 300° C), associados a ambientes vulcânicos ou subvulcânicos.

O termo **epitermal** foi cunhado por Lindgren (1933), que em seus estudos pioneiros procurou, a partir de observações de textura e mineralogia, caracterizar os diversos tipos de mineralizações quanto à temperaturas e profundidades (pressão) de formação, dividindo os tipos de depósitos genéticamente ligados às rochas ígneas em hipotermais, mesotermais e epitermais. Ele foi o primeiro a reconhecer a principal limitação de seu método, que é o fato de que a temperatura nem sempre é proporcional à profundidade, já que "*pela ação ígnea, as isotermas podem ser trazidas em direção à superficie*" (Lindgren, *op. cit.*). Assim sendo, as classificações mais modernas para os depósitos epitermais procuram levar em consideração associações tectono-petrográfico-metalogenéticas (Elston, 1994; Henley, 1986), subdividindo-os ainda quanto ao ambiente hidrotermal (Hayba *et al.*, 1986), tipos de

alteração, rochas encaixantes e hospedeiras, forma do depósito e modelo genético (White & Hedenquist, 1990, 1995).

Um sistema hidrotermal passa por mudanças químicas e físicas abruptas ao atingir a pequena profundidade que caracteriza os sistemas epitermais e seus depósitos minerais. Isto ocorre pela mudança do regime de pressão, de litostática para hidrodinâmica (resultando no fenômeno conhecido por *boiling* ou ebulição, Figura 2.1), pela interação de fluidos gerados em profundidade com águas provenientes da superfície, por mudanças de permeabilidade e pelas reações entre os fluidos e as rochas encaixantes (White & Hedenquist, 1990). Todas estas mudanças afetam a capacidade dos fluidos hidrotermais de transportar metais preciosos em solução. A *focalização* do fluxo de fluidos (pela predominância de estruturas rúpteis sobre as dúcteis em pequenas profundidades), juntamente com as mudanças supracitadas, que diminuem a solubilidade dos metais no fluido, eventualmente resulta na deposição destes metais.

Os depósitos formados podem ter formas e tamanhos muito variados mas geralmente estão relacionados a estruturas de caráter regional. Podem ocorrer como veios de grande porte, enxames de veios, *stockworks* ou disseminados. Sua característica mais marcante é a alteração hidrotermal produzida nas rochas encaixantes, que fornece importantes informações para localizar e caracterizar depósitos minerais (Hollister, 1985, Hedenquist *et al.*, 1996).

Nas últimas duas décadas vários depósitos epitermais de grande porte foram descobertos e estudados, como por exemplo McLaughlin, McDonald e Round Mountain (USA), Golden

Cross e Waihi (NZ), Emperor (Fiji), Porgera (PNG), e Pajingo (Austrália), gerando um incremento significativo de informações disponíveis e o desenvolvimento de uma série de , submodelos.



Figura 2.1 - Ambiente epitermal idealizado, com mudanças físico-químicas ao serem atingidas as pequenas profundidades que caracterizam o ambiente. Modificado de Henley & Ellis, 1983.

Os depósitos epitermais podem ser classificados de diversas formas, de acordo com o escopo da abordagem. Com relação à profundidade de formação utiliza-se o termo fontes termais ou *hot springs* para classificar depósitos formados em níveis próximos à superfície original até 200 m de profundidade. Uma classificação mais geral de depósitos epitermais refere-se ao tipo de rocha hospedeira: hospedados em rochas vulcânicas/vulcanoclásticas e hospedados em rochas sedimentares. O segundo tipo é designado também como depósito tipo Carlin e ocorre como substituição em camadas de calcários impuros.

A classificação mais utilizada atualmente foi proposta por Bonhan (1988) e Henley (1991). Estes autores dividem os depósitos epitermais em dois tipos: **alta sulfetação** (ou ácidosulfato) e **baixa sulfetação** (ou adularia-sericita) baseados principalmente no tipo de alteração e mineralogia do depósito. Os depósitos de alta sulfetação são formados em sistemas vulcânicos hidrotermais a partir de fluidos oxidantes ácidos, ricos em enxofre. Ocorrem principalmente em andesitos e riodacitos e contém minerais com alta relação de enxofre/metal (*e.g.* enargita, luzonita e covelita) e são envelopados por uma extensa e avançada argilização dominada por alunita. Os depósitos de baixa sulfetação são formados em sistemas geotermais a partir de fluidos reduzidos, com pH próximo à neutralidade, pobres em enxofre e geralmente enriquecidos em CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e NaCl. Ocorrem em vários tipos de rochas, de riolitos a andesitos. Contém minerais de baixo estado de sulfetação em associação com alteração sericítica e argílica fraca. Estes dois tipos de depósitos são, entretanto, registros extremos de um mesmo sistema magmático que pode apresentar uma contínua gradação com inúmeras situações intermediárias entre eles (Figura 2.2). Segundo Sillitoe (1993) os depósitos de baixa sulfetação podem ser, ainda, subdivididos em três tipos: pobre em sulfetos (< 5% em volume na rocha), associado a rochas subalcalinas (riolitos); pobre em sulfetos, associado a rochas alcalinas e rico em sulfetos (> 10% em volume na rocha), associado a rochas subalcalinas (andesitos).



Figura 2.2 - Seção esquemática mostrando intrusões subvulcânicas e estrato-vulcão associado e ambientes de depósitos epitermais de alta (sistema vulcânico hidrotermal) e baixa sulfetação (sistema geotermal). Hedenquist *et al.*, 1996.

No modelo de baixa sulfetação há predomínio de alteração por águas meteóricas, com  $CO_2$ , H<sub>2</sub>S e NaCl como principais componentes do fluido. A forma destes depósitos é em geral dada por veios de extensão (espaços abertos) e *stockwork*, com substituições e mineralizações disseminadas na rocha encaixante tendo importância secundária (White & Hedenquist, 1995).

Num estudo de mais de 130 depósitos da região do Pacífico, White *et al.* (1995), concluem que os minerais de minério mais comuns para ambientes de baixa sulfetação são pirita (abundante), esfalerita, galena, arsenopirita e calcopirita (em pouca quantidade), tetraedrita-tennantita e cinábrio (menos comuns e em pequenas quantidades), electrum e ouro nativo (comuns, mas em pequenas quantidades). No mesmo trabalho, citam como principais minerais de ganga o quartzo, calcedônia, calcita, adulária e ilita (comuns e abundantes ou em quantidades variadas), barita (comuns, mas em muito pequenas quantidades) e caolinita (comum, em geral como *overprinting*).

White & Hedenquist (1995) mencionam como texturas mais comuns de minério e de ganga a ocorrência de quartzo bandado, crustiforme, veios de calcedônia, cavidades com drusas e veios causando múltiplos eventos de brechamento por fraturamento hidráulico. Também comum é a ocorrência de calcita em retículos, podendo ser substituída por quartzo. Depósitos de *sinter* silícico podem estar presentes dependendo do nível de erosão. Estes autores concluem que as associações geoquímicas diferem para os tipos de mineralização de baixa e de alta sulfetação, sendo típicos do ambiente de baixa sulfetação Au, Ag, As, Sb, Hg e Pb (comuns também para alta sulfetação), e Zn, K, Se, a alta razão Ag/Au; e tipicamente baixos os valores de Cu e razão Te/Se.

Uma outra classificação utilizada no estudo e exploração de depósitos epitermais refere-se ao teor e distribuição de metal no depósito e inclui dois tipos: **depósitos disseminados**, geralmente de baixo teor e grande volume, hospedado em rochas sedimentares e vulcânicas/piroclásticas e **depósitos tipo bonanza**, geralmente pequenos, mas com teores extremamente elevados (Romberger, 1992). Existe, entretanto, pouca diferença nos processos geoquímicos responsáveis pela formação de um ou outro tipo. Na verdade, grande parte das jazidas epitermais de ouro contém os dois tipos de depósitos, com corpos de dimensões reduzidas e teores muito altos inseridos em meio a volumes muito grandes de minério de baixo teor. Este minério de baixo teor tem constituído, via de regra, a maior parte da produção de metal destas minas embora os corpos mais ricos sejam responsáveis pelo aumento do valor econômico destes projetos.

Duas principais condições são requeridas para formar um depósito de alto teor tipo bonanza: a primeira é um sistema de fraturas bem desenvolvidos e suficientemente extenso que permita a passagem de um grande volume de soluções mineralizantes. A segunda é a existência de gradientes físico-químicos (tais como diferenças abruptas de temperatura e reatividade de S), bem localizados e fixos no espaço, superimpostos às estruturas favoráveis, a fim de permitir a eficiente precipitação de metais durante um significativo espaço de tempo. Rochas vulcânicas félsicas pouco profundas tem um comportamento rúptil que tende a formar fraturas arborescentes abertas, ou seja, com boa permeabilidade que pode ser ainda intensificada por processos episódicos de brechação. Minérios crustiformes e bandados em muitos depósitos de bonanza atestam o longo período de tempo o qual as estruturas permaneceram abertas. Observando-se exemplos de depósitos tipo bonanza, conclui-se que um dos sítios favoráveis para a formação destes depósitos são fraturas subsidiárias verticalizadas, na capa de grandes estruturas regionais. Estas canalizam a maior parte das águas meteóricas oxigenadas, recarregando constantemente o sistema. O local de mistura destas águas com as soluções ascendentes que transportam minerais através dos condutos principais terá condições ideais para precipitação de metais preciosos em grande quantidade. Utilizando-se dados composicionais e de temperatura de soluções hidrotermais postuladas para vários depósitos de Bonanza, Haas (1971, *apud* Romberger, 1992) determinou a profundidade de 450 m abaixo da superficie original como a ideal para a ocorrência de *boiling*.

#### 2.2.2 EXEMPLOS SELECIONADOS DE DEPÓSITOS EPITERMAIS

Conceitualmente, Adams (1986) divide a informação necessária para desenvolver estratégias de exploração para depósitos epitermais em fatores estratégicos (objetivos da organização, preço dos bens minerais, recursos disponíveis, direitos de pesquisa, atividade dos concorrentes, trabalhos prévios, informação geológica disponível, métodos de exploração, oportunidade e risco) e fatores humanos (objetivos pessoais, especialização e

treinamento, capacidade de resolução de problemas, intuição e criatividade, incertezas, entre outros). Advoga a construção de um modelo do depósito que se está pesquisando, através da observação cuidadosa de depósitos análogos e, subseqüentemente, dos processos formadores destes. Como resultado se obtém o conteúdo mínimo necessário para que a área pesquisada se encaixe ao modelo, promovendo a análise crítica em todas as fases da pesquisa.

Assim, a comparação do ambiente geológico do Grupo Castro com outros ambientes epitermais reconhecidamente férteis é útil no sentido de indicar possíveis linhas de ação a serem adotadas na exploração. Foram buscados exemplos de mineralizações de grande porte em ambientes epitermais de baixa sulfetação já conhecidos e anotadas suas características litológicas, estruturais, geométricas, mineralógicas e químicas, bem como os métodos utilizados em sua pesquisa e avaliação.

Foram buscados exemplos de mineralizações de grande porte em ambientes epitermais de baixa sulfetação já conhecidos e anotadas suas características litológicas, estruturais, geométricas, mineralógicas e químicas, bem como os métodos utilizados em sua pesquisa e avaliação. Foram escolhidos entre os depósitos de baixa sulfetação, modelos de minério disseminado e modelos onde ocorrem zonas de bonanza. São exemplos clássicos os depósitos auríferos de McLaughlin, Sleeper, Archimedes, Bullfrog, Mesquite e Round Mountain (USA), Golden Cross e Waihi (Nova Zelândia), Emperor (Fiji), Porgera - zona IV, Ladolam e Misima (Papua Nova Guiné), e Pajingo na Austrália (Sillitoe, 1995; White & Hedenquist, 1995. Para Pajingo ver ainda Bobis *et al.*, 1995). Também nesta categoria estão os depósitos de Kelian e Gunung Pongkor na Indonésia (Sillitoe, op. cit.), Yandan

22

(Seed, 1995a) e Wirralie (Seed, 1995b) na Austrália, Kori Kollo na Bolívia e Cerro Vanguardia na Argentina (Sillitoe, op. cit.), e o recém descoberto depósito de McDonald, em Montana (Enders *et al.*, 1995), com cerca de 250 toneladas de ouro (Mining Journal, 1996).

McDonald, por exemplo, é descrito como um depósito com mineralizações em veios e disseminadas em tufos líticos, em ambiente de *hot springs* (mesmo caso de Yandan e Wirralie). São reconhecidos seis tipos de alteração (silicificação, qz-adulária, argilização, devitrificação, *leaching*, e rara albitização), sendo alteração por adulária e silicificação as mais importantes na zona mineralizada, tão mais intensas quanto maior a profundidade. Nos níveis próximos à superficie, predomina a intensa silicificação por calcedônia, com alteração argílica formando extenso halo em torno da zona mineralizada, gradando de caolínica no centro para montmorilonítica nas extremidades. A zona oxidada se estende a mais de 300 m de profundidade, e a geometria do depósito é controlada pela interseção de veios de mergulho alto com horizontes de tufos permeáveis, resultando numa zona tabular, estratiforme, com mergulho de 20-25° para Norte (Enders *et al., op. cit.*).

Outos exemplos importantes são resumidos a seguir.

#### Hishikari (Minério em Zonas de Bonanza)

Localizado no sul da ilha de Kyushu, Japão. Descoberto a partir de um programa de exploração regional da Metal Mining Agency of Japan (MMAJ), em 1981. Encontra-se descrito em detalhe por diversos autores, notadamente Hedenquist *et al.* (1996) e Sillitoe
(1995). Produziu 74 toneladas de ouro entre 1985 e 1996, possuindo um total mínimo de 250t de ouro, em um sistema de veios de 750m de largura por 2km de strike (Hedenquist *et al.*, op. cit.).

De modo geral, a geologia da área é composta pelo embasamento de metassedimentos Cretáceos e rochas vulcânicas de idade Quaternária. Os três depósitos principais são Sanjin, Honko (com teor médio de 63 gAu/t) e Yamada (com teor médio de 25 gAu/t, Sillitoe, op. cit.). Os veios são constituídos por quartzo, adulária, pouca esmectita e minerais de ouro e prata (razão Au/Ag: 0,7, com electrum, naumannita e pirargírio) e muito raramente minerais de sulfetos como calcopirita, tetraedrita, esfalerita, galena e pirita.

Os veios da área de Sanjin estão no contato entre o embasamento e rochas piroclásticas de composição andesítica, intercaladas por lavas andesíticas por sua vez sobrepostas por domos de riolito. Os veios da área principal, Honko, estão num mesmo contexto, com a diferença de estarem recobertos por sedimentos mais recentes ao invés de domos riolíticos. Já o depósito de Yamada encontra-se em rochas piroclásticas andesíticas, intercaladas por vulcânicas andesíticas e sobrepostas por argilitos e rochas piroclásticas de composição riolítica/dacítica, que preenchem cratera de erupção hidrotermal. Posteriormente o pacote foi recoberto por sedimentos (Hedenquist *et al.*, 1996).

O zoneamento das assembléias de alteração hidrotermal é simples, com clorita e ilita associadas diretamente à mineralização de alto teor nas áreas de Honko e Sanjin. Argilas bandadas e esmectita formam o envelope da zona mineralizada, constituindo um pacote subhorizontal de intensa argilização, localizada 50 a 100m acima dos veios. Externamente a estes pacotes, ocorre uma zona de esmectita que grada para as rochas não alteradas (Hedenquist *et al.*, op. cit.).

Os sistemas de veios não são portanto aflorantes, dissipando-se em direção à superficie em uma zona de alteração argílica de baixa temperatura (esmectita e quartzo-caolinita). A erosão desde a formação dos veios atinge 200m, e os veios hoje encontram-se a cerca de 250-300m de profundidade (Sillitoe, op. cit.).

As rochas argilizadas aflorantes acima dos veios na região de Honko contém até 15 ppm de arsênio, 150 ppb de mercúrio e 31 ppb de ouro, em contraste com o *background* regional de 2-5 ppm As, 10-40 ppb Hg e <1-1 ppb Au. A estruturação em subsuperficie foi reconhecida por gravimetria, com os blocos soerguidos de embasamento representados por anomalias positivas. Resistividade e IP discriminam a área hidrotermalmente alterada relacionada ao minério (Hedenquist *et al.*, op. cit.).

O primeiro furo profundo mineralizado foi direcional, ortogonal ao strike dos veios, com 45 graus de mergulho e 400m de extensão. Realizado sobre coincidência de anomalias de gravimetria e resistividade, apresentou como melhor resultado 15 cm de espessura em veio de quartzo a 290,3 g/t de ouro e 167 g/t de prata, totalizando 5,45 m a 220,4 g/t Au (Sillitoe, 1995).

#### Sleeper (Minério Disseminado com Zonas de Bonanza)

A jazida de Sleeper, no noroeste do Nevada, USA, perto de Winnemucca, contém mais de 80 toneladas de ouro a 7,5 gAu/t (zonas de bonanza), estando os recursos em aberto (Romberger, 1992). Está hospedada em latitos com estruturas de fluxo, tufos riolíticos e riolitos porfiríticos de idade Miocênica recobertos por cerca de 30 m de arenito e depósitos aluvionares, em zona de falha normal de mergulho alto (Sillitoe, 1995). O minério de alto teor está hospedado em veios de quartzo bandado e brechas de formato linear, enquanto que teores mais baixos de ouro ocorrem em brechas hidrotermais em torno dos veios e em *stockwork* em rochas vulcânicas adjacentes, formando mineralização *stratabound* (Wood & Hamilton, 1991).

A zona com minério de alto teor tem dimensões aproximadas de 500 x 50 m, e o minério é constituído principalmente por electrum. A alteração hidrotermal dominante é constituída por envelopes concêntricos de argilização e argilização avançada, com silicificação na porção central (Romberger, 1992).

Na amostragem inicial de *chip*, a área anômala foi caracterizada por valores de 0,25 ppm de ouro, 27 ppm de prata, 335 ppm de arsênio, 125 ppm de antimônio e 1100 ppm de bário (Wood & Hamilton, op. cit.). O melhor resultado da campanha de sondagem inicial, que mesclou circulação reversa e sondagem diamantada em furos verticais, foi de 1,4 ppm de ouro nos 40 metros finais do furo 7 (70m), com 5,8 ppm Au em um metro como teor máximo (Wood & Hamilton, op. cit.). Resistividade e IP foram utilizados simultaneamente

à sondagem, delineando as zonas silicificadas e as zonas argilosas (muito condutivas), auxiliando a programação de sondagem exploratória (Romberger, op. cit.).

### Round Mountain (Minério Disseminado)

Localizado no sudoeste do estado de Nevada, U.S.A., contém 277 milhões de toneladas de minério a 1,2 g Au/t, lavráveis a céu aberto (Hedenquist *et al.*, 1996).

Descrita detalhadamente por Cavender & Purdy (1985) e Sillitoe (1995), e conhecida desde 1906, Round Mountain produziu até 1959, 15 t de Au lavradas em veios e placeres. De 1959 a 1970 a área não foi trabalhada. Após adquirir os direitos de pesquisa, a Copper Range Co. começou a reavaliar o potencial da área. Em 1972 concluiu que os placeres não eram viáveis economicamente e decidiu concentrar esforços na pesquisa dos veios. Em 1976, com pouca sondagem adicional, já havia cubado um grande corpo de baixo teor, explotável por lixiviação em pilha, com 11 Mt a um teor médio de 1,9 g Au/t. A lavra começou em 1977 com esta pequena reserva inicial. Em 1979 foi iniciado o programa de sondagem para pesquisar mineralizações mais profundas e em 1981 já haviam sido realizados 76.000 m de perfurações, resultando em reservas de 180 Mt a 1,3 g Au/t. O sucesso da mina deveu-se principalmente ao domínio de uma nova tecnologia, no caso a utilização pioneira da lixiviação em pilha (Cavender & Purdy, op. cit.).

O minério está hospedado em tufos pouco soldados próximos a uma fratura anelar de caldeira aproximadamente contemporâneos (26,7 Ma). Parte do minério ocorre como veio

ou preenchimento de fissuras em juntas de resfriamento desenvolvidas nos tufos soldados sobrejacentes, gradando para zonas de baixo teor *stratabound* de até 150 m nos tufos soldados mais profundos (Hedenquist *et al.*, 1996).

A alteração hidrotermal é descrita por Hedenquist *et al.* (1996), sendo a propilitização pervasiva (quartzo-adulária-albita-clorita-pirita-calcita-epidoto) mais antiga e marcante em todo o distrito, sobreposta por alteração a quartzo-sericita-adulária (-calcita-pirita) diretamente correlacionáveis ao fraturamento e aos teores mais altos. Alterações silícicas e argílicas (illita-esmectita e esmectita) são mais recentes, na evolução do sistema e ocorrem em profundidades mais rasas, localmente acompanhadas de brechação e veios de quartzo (calcedônia)-pirita, com teores altos de Au (mas com pouca expressão em volume: menos de 10% do total do volume de minério). O sulfeto dominante é pirita, com electrum ocorrendo como grãos e inclusões na pirita. Teluretos de ouro e prata, esfalerita, galena, calcopirita, pirrotita, arsenopirita, tetraedrita, pirargírio, marcassita e realgar ocorrem como traços.

## 2.3 TÉCNICAS DE PROSPECÇÃO PARA DEPÓSITOS EPITERMAIS

Analisando os principais depósitos epitermais do nordeste de Queensland, Austrália, Beams & Jenkins (1995) compilaram as técnicas geoquímicas e meios amostrais mais efetivos: *chip* de rocha (em todos os casos), sedimentos de corrente na fração menor que 80# (para Kidston e Mt. Leyshon, do tipo Au-brecha e Yandan), sedimentos de corrente analisados por *bulk cyanide leach* (BCL, para Pajingo, Wirralie, Mt. Coolon, Kidston, Mt. Leyshon,

Mt.Wright e Lone Sister), concentrado de batéia (Pajingo, Mt. Coolon, Kidston e Mt. Leyshon) e solo (Yandan, Twin Hills, Lone Sister, Kidston e Mt. Leyshon). É importante ressaltar que naquele continente, a extensa cobertura Terciária torna pouco eficaz a utilização de amostras de solo para os depósitos.

A identificação de feições estruturais como falhas e fraturas e sua correlação com estruturas e tipos litológicos dos centros de vulcanismo (*cauldrons*), têm papel fundamental na compreensão da localização das mineralizações (Elston, 1994; Rytuba, 1994). A presença de domos riolíticos associados com lavas e sedimentos controlados por fraturas anelares, onde se desenvolvem as calhas preenchidas (*moats*), pode resultar em lagos responsáveis pela interação de águas meteóricas, salinas ou não, com fluidos ascendentes, resultando na precipitação de metais. Alternativamente, lagos e aquíferos em bacias *pull-apart* podem ter este mesmo papel de prover as águas meteóricas a sistemas hidrotermais convectivos. Águas descendentes em falhas profundas podem se aquecer pelo aumento do grau geotérmico, mesmo sem a presença de magma (Elston, *op. cit.*).

Irvine & Smith (1990) recomendam em escala regional a utilização de aeromagnetometria, radiometria e gravimetria como auxiliares à prospecção geoquímica e mapeamento geológico para localizar sistemas de alteração e estruturas que controlem depósitos. Para trabalhos de maior detalhe seriam apropriados IP, EM e resistividade, utilizados para assinalar mudanças nas propriedades das rochas tais como alteração argílica, silicificação e piritização, que podem estar relacionadas aos processos formadores de minério.

Quanto às técnicas de processamento digital de imagens de sensores remotos, destaca-se entre outras a análise de componentes principais, (Crósta & Moore, 1989; Loughlin, 1991; Crósta e Rabello, 1993). Diversos autores empenham-se em registrar as características importantes de cada tipo de depósitos passíveis de observação remota (e.g. Spatz, 1998, para pesquisa de pórfiros mineralizados a cobre; Spatz & Wilson, 1997, para pesquisa de depósitos de sulfetos maciços). Um grande e importante avanço vem sendo obtido pela utilização de imagens hiperespectrais que destacam alteração hidrotermal. Novos sensores, tanto aerotransportados quanto em satélites vem aumentando as possibilidades de utilização de bandas específicas para estudos de minerais típicos de alteração hidrotermal Assim, estuda-se tanto a possibilidade de mapeamento mineralógico utilizando sensores como geoscan e aviris (Hook *et al.*, 1991), quanto a integração com dados de geofísica e radar, utilizados principalmente em estudos de geologia estrutural (Harris *et al.*, 1990; Harris 1991).

## 2.4 USO DE SISTEMAS GEORREFERENCIADOS DE INFORMAÇÃO

A diversidade de tipos de sistemas epitermais e de bens minerais associados, e consequentemente de dados que podem ser utilizados na prospecção destes bens (geoquímica multielementar em diversas frações e em diversos meios, geofísica, mapeamentos geológicos regional e de detalhe, geologia estrutural, sensoriamento remoto, etc.), torna complexa a tarefa de combinar e analisar simultaneamente as diferentes informações, em diferentes escalas. Adams (1986), por exemplo, se utiliza de um processo por ele batizado de dados-processo-critérios, ilustrando-o com um exemplo de depósito epitermal do tipo *hot spring*.

A maior limitação para a criação de modelos tem sido a escolha de quais dados devem ser utilizados e, uma vez montado o modelo, como este deve ser continuamente atualizado e validado a partir de novas informações. De fato, é notório que mesmo nas grandes e bem sucedidas empresas de pesquisa e mineração, muitas vezes as amostras são coletadas e analisadas para um grande número de elementos, mas as decisões são tomadas a partir dos resultados de dois ou mesmo de um único elemento (ver, por exemplo, Bagby & Mora, 1996, sobre a situação no Equador e Kotlyar, 1996, sobre a situação na antiga União Soviética). Alguns sistemas de cartografia digital, além de *softwares* comerciais (e.g. DDM-SVF, de Condit, 1995, no primeiro caso, CANVAS ou ADOBE ILLUSTRATOR, no segundo) vem sendo desenvolvidos para aliviar este tipo de situação. Não são no entanto adequados para a realização de compilações, análises ou modelamento (Walker *et al.*, 1996).

As funções hoje disponíveis nos Sistemas de Informações Georreferenciados (SIG), facilitam a utilização de um grande número de dados de diversas fontes e em vários formatos (Silva, 1991, Bonham-Carter, 1994 ; Hillman, 1995; Mattikalli *et al.*, 1995; Walker *et al.*, 1996, por exemplo) e proporcionam análises de simultaneidade e a compreensão de fenômenos em diversas escalas, sendo portanto de grande serventia. Existem diversas definições para o que exatamente é SIG. Neste trabalho é utilizada a conceituação Silva (1996), de que necessariamente deve se utilizar o meio digital, com um banco de dados integrado e georreferenciado, onde é possivel realizar análises algébricas cumulativas (operações matemáticas) e não cumulativas (operações lógicas).

O conceito básico utilizado por SIG é a superposição de planos de informação topologicamente estruturada. Topologia é o processo matemático de definir explicitamente os relacionamentos espaciais existentes entre objetos. Os atributos topológicos de objetos são as características espaciais que são inalteráveis pelas transformações, como translação, mudanças de escala, rotação e deslocamento (Johnson & Glenn, 1965). Coordenadas, área, perímetro e orientação são afetados por estas mudanças, enquanto que contiguidade, continência e conectividade são características topológicas e permanecem inalteradas (Moura, 1997).

# 3 CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA

A utilização de sedimento ativo de corrente como meio amostral na pesquisa de bens metálicos, e de ouro em particular, é antiga e bastante disseminada, pois padrões de dispersão de elementos químicos neste meio recobrem distâncias significativas a partir da fonte geradora da anomalia, possibilitando a análise da paisagem geoquímica de áreas extensas (Andrew-Jones, 1968). O conceito de que elementos distintos tem padrões distintos de dispersão, mesmo que inicialmente associados, permite a utilização dos elementos de maior dispersão de uma associação geoquímica como indicadores de possível mineralização. Os elementos farejadores (*pathfinders*) geralmente são os mais voláteis de uma associação (*e.g.* antimônio, mercúrio ou arsênio em ambiente epitermal), ou os que formam facilmente fases iônicas em meio aquoso (Boyle, 1974).

### 3.1 AMOSTRAGEM DE SEDIMENTO DE CORRENTE

## 3.1.1 COLETA E ANÁLISE DAS AMOSTRAS

Foram coletadas na Bacia Castro e arredores, no período de janeiro a julho de 1995, 750 amostras de sedimento ativo de drenagem, o que perfaz uma média de uma amostra a cada 1,2 km<sup>2</sup> (Figura 3.1). Em 700 destes pontos de amostragem foram também coletados sedimentos grossos para contagem de pintas de ouro em concentrado de batéia. A localização das amostras foi auferida por aparelhos GPS (geopositioning system) Trimble Flightmate e/ou Garmin 45, conferida e anotada no campo em bases planimétricas

1:50.000. Foi utilizada a media de 30 leituras, com erro planimétrico máximo de 50m e altimétrico máximo de 100m.

As primeiras 80 amostras de sedimento de corrente foram utilizadas para estudo orientativo, tendo sido secas a 60° C, quarteadas, separadas em 5 frações granulométricas por peneiramento a 60, 80, 120 e 200 # e pulverizadas a <200#. Constatadas duas populações com comportamento distinto, acima e abaixo de 80#, estas foram subsequentemente agrupadas, e as próximas amostras foram separadas somente em duas frações por peneiramento a 80#. Para cada uma das frações foram dosados os seguintes elementos: Au (pelo método de refluxo de plasma, com limite de detecção de 3 ppb, prioritariamente na fração menor que 80#, que obteve os melhores contrastes), As, Sb e Hg (método de geração de hidretos, com limite de detecção entre 10 e 50 ppb) e Ag, Ba, Be, Cd, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, Ti, V, Zn e Zr (por plasma/ICP, com limite de detecção de 10 ppm). Amostras aleatórias foram reanalisadas para se testar a precisão analítica do laboratório, tendo-se obtido boa repetibilidade.

As amostras de concentrado de batéia foram coletadas com um volume médio original de 10 litros. No local de coleta foram bateadas e feita a contagem do número de pintas de ouro com lupa de 20 X. O concentrado foi recolhido para observação posterior em lupa binocular. Foram detectados, com este procedimento, além do ouro, cristais e fragmentos de cinábrio, zircão e ilmenita. As pintas de ouro são muito finas, em torno de 120#, na forma de palhetas irregulares.



Figura 3.1 - Mapa de Localização das Amostras de Sedimento de Corrente em bacias de drenagem, classificadas por área.

# 3.1.2 ANALISE ESTATÍSTICA

O estudo dos resultados da análise de Au ppb e contagem de pintas identificou limiares (threshold, utilizando-se média acrescida de dois e três desvios-padrão para anomalias de segunda e primeira ordem) de 64 e 95 ppb. na fração <80#, e 64 e 91 pintas de Au, respectivamente (ilustados pelas Figuras 3.2 e 3.3, com limiares reinterpretados conforme discutido a seguir). Ficou demostrado, também, que existe boa correlação entre os resultados de Au ppb na fração >80# (com limiares em 63 e 93 ppb) e a contagem de pintas em concentrado de batéia. Assim, para definição de áreas prioritárias para detalhamento, foi utilizado pela DOCEGEO (1997) o limiar de 64 pintas ou de 64 ppb na análise de ouro na fração <80#, aproveitando informações originadas de técnicas amostrais com baixo coeficiente de correlação. Definiram-se, com este critério, sete áreas prioritárias (Figura 3.4). Outras 20 áreas podem ser consideradas como de segunda prioridade. Seguindo prática ainda comum, conforme já discutido, outros elementos além do ouro não foram utilizados para a seleção de anomalias a serem detalhadas (DOCEGEO, op cit.), tanto pelo fato de que a evidência direta ("ouro é um excelente elemento farejador para ouro...") fornece boa quantidade de anomalias quanto pelo ritmo de trabalho adequado à empresa.

As áreas prioritárias variam de tamanho entre 2 x 1 km e 3 x 8 km, com picos anômalos de 250 a 333 pintas e 250 a 757 ppb de Au.



Figura 3.2 - Mapa de distribuição de ouro em sedimento de corrente, com bacias classificadas por "quebras naturais das populações".



Figura 3.3 - Mapa de distribuição de pintas de ouro em concentrado de batéia.



Figura 3.4 - Bacias selecionadas como anômalas (x + 2  $\sigma$ ) em sedimento de corrente (<80#) ou pintas de ouro em concentrado de batéia. Malhas de solo localizadas ao longo dos divisores de água destas bacias (modificado de Docegeo, 1997).

Os dados analíticos de sedimento de corrente foram tratados através dos testes estatísticos univariados do *software* ARCVIEW e multivariados dos *softwares* PC-XPLOR e P-PLOT. O resumo da estatística univariada é apresentado na Tabela 3.1.

O recobrimento da área pelas amostras com análise multielementar não era uniforme, e a partir da constatação de sua utilidade no modelamento, a análise de alíquotas de contrapartes das amostras originais, para elementos selecionados foi providenciada. O tratamento dos resultados da análise multielementar identificou correlações positivas fracas (maior que 0,5 e menor que 0,8) do Au com Be, Co, Fe, K, Mg, Mo, P, Zn, e Zr. Os elementos Ag e Ti mostraram correlações negativas maior que 0,5. Adicionalmente as amostras foram tratadas no ARCVIEW, sendo subdivididas por elementos em classes de "quebras naturais" de população. As figuras 3.5 a 3.8 mostram os padrões de distribuição e os valores considerados anômalos segundo este critério para elementos selecionados.

	N° de Análises	Média	Valor Máximo	Valor Mínimo	Variancia	Desvio Padrão	
Pintas	699	10	333	0	705	27	
< 80 #							
Ag (ppm)	382	<1.0	3.0 <1.0		0.2	0.2 0.5	
Al (%)	336	2.99	8.91	< 0.01	2.26	1.50	
As (ppm)	374	5	122	<5	217	15	
Au (ppb)	743	2	507	3	966	31	
B (ppm)	253	<30	83	<30	517	23	
Ba (ppm)	395	256	1188	31	38407	196	
Be (ppm) <sup>2</sup>	40	<10	4	<10	4	2	
Bi (ppm) <sup>2</sup>	71	<10	<10	<10	0	0	
Ca (%)	336	0.09	0.34	0.01	0	0.05	
Cd (ppm) <sup>1</sup>	392	<10	12	<10	18	4	
Co (ppb)	308	22	88	<1	187	14	
Cr (ppm)	330	32	126	<1	518	23	
Cu (ppm)	383	18	256	<1	608	25	
F (ppm)	253	349	1238	<100	40522	201	
Fe (%)	395	3.58	12.10	0.49	4.86	2.20	
Ga (ppm)	265	12	29	<1	23	5	
Hg (ppb)	384	128	1716	<100	23910	155	
In (ppm)	265	19	77	<1	162	13	
K (%)	336	0.19	0.68	0.03	0.01	0.12	
La (ppm)	265	38	218	4	488	22	
Li (ppm)	336	5.3	28.0	<1.0	21.6	4.6	
Mg (%)	336	0.10	0.46	0.01	0	0.07	
Mn (%)	395	0.07	0.71	0.00	0	0.07	
Mo (ppm)	395	1	8	<2	6	3	
Na (ppm)	335	0.01	0.05	<0.01	0	0.01	
Ni (ppm)	356	17	115	<1	237	15	
P (%)	336	0.02	0.25	< 0.01	0	0.04	
Pb (ppb)	393	67	329	14	1982	45	
Sb (ppm)	379	5	39	<10	82	9	
Sc (ppm) <sup>2</sup>	71	3.4	10.0	<1.0	9.0	3.0	
Sn (ppm)	336	10	47	<10	162	13	
Sr (ppm)	336	28	226	4	605	25	
Ti (%)	336	0.04	0.58	<0.01	0.01	0.07	
V (ppb)	395	74	789	4	4759	69	
W (ppm)	336	19	96	<10	463	22	
$Y (ppm)^2$	49	16	31	7	23	5	
Zn (ppm)	393	72	688	<1	3007	55	
Zr (ppm)	268	346	894	<1	34321	185	

Tabela 3.1 - Resumo da estatística univariada para os elementos analisados em amostras de sedimento ativo de drenagem. Abaixo: Fração < 80 # e número de pintas em concentrado de batéia. Na próxima página: Fração > 80 #.

<sup>1</sup>: Sem significado para estatística devido ao baixo contraste.
<sup>2</sup>: Sem significado para estatística devido ao baixo número de análises

> 80 #	N° de Análises	Média	Valor Máximo	Valor Mínimo	Variancia	Desvio Padrão
Ag (ppm)	266	<1.00	2,00	<1.00	0.21	0.45
Al (%)	213	2.42	7.81	0.02	2.39	1.55
As (ppm)	257	6,96	119.00	<5.00	223.36	14.95
Au (ppb)	344	3	517.00	<3.00	882	30
B (ppm)	137	<30.00	64.00	<30.00	731.96	27.05
Ba (ppm)	272	215.06	1207.00	4.00	35543.29	188.53
Be $(ppm)^2$	52	<1.00	6.00	<1.00	0.94	0.97
Bi (ppm) <sup>2</sup>	70	<10.00	<10.00	<10.00	0	0
Ca (%)	213	0.07	0.31	0.01	0	0.05
Cd (ppm)	268	0.84	14.00	<3.00	19.36	4.40
Co (ppb)	213	19.89	108.00	<1.00	380.13	19.50
Cr (ppm)	213	62.46	197.00	12.00	1269.61	35.63
Cu (ppm)	255	18.62	178.00	<1.00	622.94	24.96
F (ppm)	137	341.27	1058.00	<100.00	49397.13	222.25
Fe (%)	272	3.63	14.70	0.25	6.28	2.51
Ga (ppm)	143	11.59	29.00	1.00	32.40	5.69
Hg (ppb)	267	85.76	1032.00	<50.00	19908.66	141.10
In (ppm)	143	19.00	107.00	<1.00	275.73	16.61
K (%)	213	0.16	0.69	0.01	0.02	0.13
La (ppm)	143	35.01	218.00	3.00	698.66	26.43
Li (ppm)	213	3.64	23.00	<1.00	22.16	4.71
Mg (%)	213	0.08	0.55	0.00	0.00	0.07
Mn (%)	272	0.08	0.56	0.00	0.01	0.07
Mo (ppm)	270	0.79	9.00	<2.00	8.34	2.89
Na (ppm)	143	144.55	478.00	1.00	7720.59	87.87
Ni (ppm)	231	22.42	101.00	2.00	330.66	18.18
P (%)	213	0.02	0.21	< 0.01	0.00	0.04
Pb (ppb)	267	56.84	271.00	8.00	2133.97	46.19
Sb (ppm)	264	3.05	29.00	<10.00	77.74	8.82
$Sc (ppm)^2$	70	2.26	9.90	<1.00	7.66	2.77
Sn (ppm)	213	12.26	55.00	<10.00	289.16	17.00
Sr (ppm)	212	28.10	184.00	3,00	735.02	27.11
Ti (%)	212	0.05	0.71	< 0.01	0.01	0.08
V (ppb)	271	72.67	1066.00	2.00	10037.25	100.19
W (ppm)	213	16.94	83.00	<10.00	571.23	23.90
$Y (ppm)^2$	29	14.62	31.00	3.00	36.67	6.06
Zn (ppm)	272	56.33	425.00	<1.00	2681.77	51.79
Zr (ppm)	156	222.90	970.00	<1.00	27371.09	165.44

<sup>1</sup>: Sem significado para estatística devido ao baixo contraste.
<sup>2</sup>: Sem significado para estatística devido ao baixo número de análises



Figura 3.5 - Mapa de distribuição de arsênio em sedimento de corrente.



Figura 3.6 - Mapa de distribuição de mercúrio em sedimento de corrente.



Figura 3.7 - Mapa de distribuição de cobre em sedimento de corrente.



Figura 3.8 - Mapa de distribuição de chumbo e zinco em sedimento de corrente.

#### 3.2 AMOSTRAGEM DE SOLO E ROCHA

Cabe ressaltar que os dados relativos a amostras de solo e rocha não são objeto deste trabalho, mas servirão para alimentar os modelos de prospecção regional baseados em geoquímica de sedimentos de corrente.

## 3.2.1 PLANEJAMENTO E COLETA DE AMOSTRAS DE SOLO

A partir dos resultados da amostragem de sedimento de corrente e contagem de pintas de ouro em concentrado de batéia, as áreas mais evidentemente anômalas (ou seja, que conjugam anomalias de ouro em sedimento de corrente e pintas de ouro em uma mesma bacia de captura de drenagem) foram selecionadas para o estabelecimento de malhas de amostragem de solo, realizada em 1996 e 1997 (Figura 3.4).

As malhas foram locadas com GPS de precisão, segundo sistema de coordenadas UTM relativo ao *datum* SAD 69 na tentativa de corrigir os dados UTM das folhas plani-altimétricas da região, cujas referências geodésicas (*datum* Pilar astronômico de Ponta Grossa) extraviaram-se e não foram mais encontradas pelo Serviço Geográfico do Exército. A diferença aproximada entre eles é de -100 m para norte e +222 m para leste, consideradas as médias de cerca de 50 pontos notáveis distribuídos na bacia. Foram instalados quatro marcos permanentes na área. As coordenadas destes marcos foram transportadas para cada uma das malhas sendo materializadas no campo através de pontos marcados ao longo de suas linhas-base.

A área de coleta de solo nas malhas tem levantamento plani-altimétrico executado, permitindo a elaboração de mapas topográficos em escala 1: 5.000 e seções geológicogeoquímicas de furos de sondagem rotopercussiva (DOCEGEO, 1997)

O estudo orientativo para determinação da malha ótima para coleta de solo, na anomalia de sedimento de corrente da área que seria mais tarde denominada alvo Tanque, resultou em malha expedita, com coleta de 88 amostras de horizonte B de solo dosadas somente para ouro, resultou em uma anomalia de 450 x 130 m, amebóide, com teores variando entre 100 e 250 ppb.

Foram instaladas 10 malhas de solo com linhas-base orientadas ao longo dos divisores de água principais (Figura 3.4). Em certos casos, estes correspondem aproximadamente à direção das camadas (malhas Tanque, Campo do Meio e São Daniel). Em outras situações são elementos estruturais que se destacam ou provocam variações muito grandes nas atitudes das camadas ou são camadas sub-horizontais. As anomalias de sedimento de corrente de Tirania foram investigadas através de três malhas e as de Engenho Velho foram investigadas com duas malhas de solo, com linhas-base de direções diferentes.

Os solos da região são geralmente residuais e tem espessuras médias de até um metro, porém, com variações locais muito grandes. Nas áreas mais planas, geralmente aproveitadas para agricultura, chegam facilmente a três metros de espessura. Excepcionalmente, quando associado a uma zona de fraqueza (falhas por exemplo), podem alcançar 27 m de espessura (DOCEGEO, 1997). De uma forma geral, os solos são bem desenvolvidos, com horizontes bem marcados, mas nas áreas mais elevadas e de relevo mais acidentado são pouco espessos e com perfis incompletos.

As amostras de solo foram coletadas consistentemente no horizonte B ou, em casos onde este encontrava-se pouco desenvolvido ou conturbado por atividade agrícola, na transição do horizonte B para o C. As amostras foram coletadas com cavadeira tipo boca-de-lobo, tiveram as suas profundidades medidas e as suas localidades descritas em termos pedogênicos, fisiográficos e antropomórficos. As amostras foram homogenizadas em lona estendida no local da amostragem e quarteadas para a retirada de alíquotas de 1,5 a 2,0 kg. Amostras úmidas foram enviadas por inteiro ao laboratório, para secagem a baixa temperatura e posterior preparação.

As amostras foram separadas em duas frações por peneiramento a 80# em via úmida, utilizando-se floculante, por conterem alta proporção de argila plástica. As duas frações foram pulverizadas a <200# e analisadas para Au (ppb) e Ag, Sb, As, Ba, Be, Ca, Co, Li, K, Mg, Mn, P, Sr, Ti, Zn e Zr (ppm), pelos mesmos métodos e com os mesmos limites de detecção descritos para sedimento de corrente. Amostras replicatas, representando 5% do total das análises, foram utilizadas para se testar a precisão dos métodos analíticos e indicaram ótima repetibilidade dos resultados.

## 3.2.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Foram executados estudos estatísticos univariados com os resultados de Au ppb de todas as malhas, para cada uma das frações analisadas, através dos *softwares* PC-XPLOR e P-PLOT. Na fração <80# foram identificadas quatro populações lognormais limitadas pelos valores de 4, 89 e 153 ppb. O valor de 89 ppb, limite inferior da terceira população, foi considerado como limiar por definir um contorno de anomalias geológicamente relacionável a rochas cuja amostragem gerou resultados anômalos (DOCEGEO, 1997). Estes resultados, em grande parte dos casos, encontram-se na mesma ordem de grandeza dos teores obtidos em solo. Na fração >80# ocorrem cinco populações de teores limitadas pelos valores de 4, 47, 227 e 651 ppb. Foi considerado o limiar de 47 ppb utilizando-se o mesmo critério descrito para a fração mais fina.

As anomalias mais extensas ocorrem no alvo Tanque e os resultados mais altos encontramse nos alvos Campo do Meio e Mineropar, conforme sumarizado na Tabela 3.2.

ALVO	COMPRIM EIXOS DA A PRINCI	VALOR MÉDIO DA ANOMALIA (ppb)		VALOR PONTUAL MÁXIMO (ppb)		
	<80#	>80#	<b>&lt;80</b> #	>80#	<80#	>80#
TANQUE	600 x 50 e 800 x 200	200 x 100 e 800 x 200	172	97	380	287
MINEROPAR	550 x 150	600 x 200	486	260	1659	1609
CAMPO DO MEIO	200 x 150	500 x 400	421	307	1169	1978
LAGOA	550 x 150	500 x 150	46	78	531	207
SÃO DANIEL	450 x 250	400 x 200	22	190	331	326
TIRANIA	-	-	-	-	475	530
ENGENHO VELHO		6 <del></del>		-	não dosado	204

Tabela 3.2 - Síntese dos resultados de geoquímica de solos para ouro por alvo.

Com relação aos resultados da análise multielementar foram tratados estatisticamente somente os dados referentes ao alvo Tanque. Em outros alvos foi feita somente a plotagem dos resultados de alguns elementos em mapa e comparados visualmente com os teores de ouro em solo. O tratamento estatístico dos resultados de Tanque foi executado através do *software* STATISTICA (DOCEGEO, 1997). A correlação entre todos os elementos analisados mostrou excelente associação entre Sb e os elementos Co, As, Sr e Ca e entre estes três últimos. Nesta análise total, entretanto, o ouro não apresentou boa correlação com nenhum destes elementos. Executou-se, então, análise de fatores principais. A análise dos quatro primeiros fatores principais, que juntos constituem 74% da variabilidade entre os elementos, demonstrou boa correlação entre Au, Ba, K e Ti nos fatores principais 1 e 4 e, independentemente, entre Au e Zn, Ca, Sr, As, Ba e Sb nos fatores principais 3 e 4. Embora as correlações sejam boas, as participações destes elementos nos fatores principais expressas pelos seus autovalores (*eigen values*) são muito baixas.

#### 3.2.3 AMOSTRAGEM DE ROCHA

Toda a fase de reconhecimento e amostragem de solo (1996 e 1997) foi acompanhada também por uma intensa campanha de amostragem de *chips* e canais em rocha para análise química. Ao todo foram coletadas cerca de 1.000 amostras que foram dosadas para Au (por absorção atômica, com limite de detecção de 0,05 ppm) e para os mesmos elementos analisados em solo. Os resultados indicaram ocorrências de ouro bastante extensas nas

rochas aflorantes nas malhas (q.v. Figura 3.4). Todas as regiões trabalhadas em detalhe tiveram resultados acima de 1,5 ppm Au. Os melhores resultados estão na malha Mineropar e Colônia Iapó, com até 7,5 ppm Au ao longo de um horizonte silicificado, estendendo-se por 450 m com teor médio em torno de 2,0 ppm Au. Outro bom resultado foi obtido na malha São Daniel onde três amostras compostas de brecha vulcânica silicificada espaçadas ao longo de 65 m (transversais ao *strike* mas paralelos à direção maior da anomalia de solo) tem teor médio de 1,97 g Au/t. Na Tabela 3.2, a seguir, relacionam-se os totais de amostras de rocha por alvo e os resultados analíticos obtidos. Com os dados do mapeamento original relacionaram-se, de forma preliminar, os resultados anômalos em solo principalmente às porções mais silicificadas e brechadas das malhas e a alguns fotolineamentos.

Uma segunda campanha de amostragem de rocha foi realizada em 1998, recobrindo porções adjacentes às amostradas por solo e com bacias anomalas anteriromente não trabalhadas ou localizadas nas cercanias de estruturas circulares fotointerpretadas como limites de domos. Nesta campanha foram coletadas cerca de 1200 amostras em afloramentos, descritos para atualização e aperfeiçoamento do mapa geológico da bacia, e cujos resultados de análise são de conhecimento exclusivo da Docegeo.

ALVO	TOTAL DE AMOSTRAS	N° DE RESULTADOS >0,20 ppm Au	MELHORES RESULTADOS
MINEROPAR	187	30	7,5 ppm Au; 3 amostras acima de 3,0 ppm Au
TANQUE	229	19	0.45 ppm Au / canal com 11 m; 1,42 ppm Au
LAGOA	264	07	1,82 ppm Au
C. DO MEIO	124	03	0,75 ppm Au
TIRANIA	11	01	Valor não confirmado em reanálise.
S. DANIEL	170	17	2,26 ppm Au

Tabela 3.3 - Total de amostras de rocha coletadas e resultados obtidos por alvo

## 4 GEOLOGIA DE BACIAS HIDROGRÁFICAS ANÔMALAS PARA OURO

O mapeamento geológico de malhas de solo abertas em bacias com anomalias auríferas em concentrado de batéia e de sedimento de corrente (Figura 3.4), foi efetuado na escala 1:5.000, com detalhes em 1:2.000 e 1:1.000, (DOCEGEO, 1997). A maioria das malhas contém um número significativo de boas exposições e facilidade de acesso. Por outro lado, a grande quantidade de falhas, produzindo basculamento de blocos e variação de atitudes, a ocorrência de camadas horizontais, e de variações litológicos sutis, tornaram mais complexo o trabalho de mapeamento. A identificação de planos de acamamento em afloramentos também não é tarefa simples, pois grande parte das litologias apresenta estrutura maciça ou acamamento de grande porte ou ainda, estruturas de fluxo em várias direções, quase sempre verticalizadas. Originalmente procurou-se separar o máximo de litotipos distinguíveis em escala mesoscópica. Foram coletadas cerca de 300 amostras de rocha para análise petrográfica, cujo resultado permitiu o agrupamento de litologias semelhantes e a definição de um número menor de tipos litológicos (q.v. item 4.1).

No presente trabalho basicamente individualizaram-se domos de riolito e rochas ácidas, *plugs* e diques de andesitos e rochas vulcânicas intermediárias a básicas, ignimbritos, lahars, conglomerados, siltitos, argilitos e arenitos finos, além de dioritos de texturas diversas ocorrendo como diques. Como alterações hidrotermais principais associadas à mineralização foram observadas silicificação com opala e calcedônia, quartzo preenchendo cavidades e em microvenulações, potassificação (propilitização) e caulinização.

Subordinadamente, como "halo externo" ou "envelope" às mineralizações, identificou-se sulfetação (pirita), oxidação (hematita), argilização (ilita e sericita) e barita.

## 4.1 CARACTERIZAÇÃO PETROLÓGICA

O preparo das lâminas e a análise inicial da petrografia foi realizada pela equipe do Laboratório de Petrografia da Companhia Vale do Rio Doce (GIMIC/SUTEC-CVRD, *in* DOCEGEO, 1997). As amostras foram coletadas em afloramentos das regiões amostradas para solo ou em fragmentos de rocha dos furos de sondagem rotopercussiva nestes mesmos alvos (Figura 3.4) e descritas segundo a textura e composição mineralógica observada. Termos interpretativos e de significado dúbio ou genérico tais como ignimbrito, tufito e tufo-lava foram evitados. A classificação de rochas piroclásticas foi baseada em Fisher & Schmninke (1984). Para as rochas ígneas foram utilizados os diagramas de Streckeisen (1976), e Le Bas & Streckeisen (1991). Em grande parte dos casos, onde as texturas eram muito finas, utilizaram-se também os dados de difratometria de raios-X para identificação ou intensa alteração hidrotermal mascararem a rocha original a ponto de impedir a identificação do protólito.

Posteriormente cerca de 50 lâminas representativas da diversidade de litologias, estruturas e texturas encontradas em bacias anômalas para ouro em sedimento de corrente foram selecionadas para descrição petrográfica detalhada e interpretação segundo a composição

mineralógica original provável, caracterizando os litotipos presentes em Castro, inclusive quanto à sua gênese e posição no(s) aparelhos(s) vulcânico(s). Este trabalho foi realizado no laboratório de petrografia do Departamento de Metalogênese do Instituto de Geociências da Unicamp (DMG-IG-UNICAMP), e está apresentado no Anexo 1.

A partir das descrições micropetrográficas e das observações de campo as litologias foram agrupadas em 11 códigos litológicos passíveis de utilização em descrições mesoscópicas de testemunhos e afloramentos de rochas do Grupo Castro. Estes códigos e respectivos litotipos são a seguir descritos.

#### Rochas Sedimentares, Epiclásticas e Retrabalhadas (Estampa 4.1)

São rochas de sistemas flúvio-lacustres (siltitos, lamitos, arenitos) e rochas resultantes de fluxos de massa, com retrabalhamento ou redeposição de fragmentos vulcânicos, imaturos, mal selecionados.

Slt - Siltito Apresenta tonalidades bastante variáveis, cinza-esverdeadas, arroxeadas, castanhas, avermelhadas, amareladas ou esbranquiçadas. Localmente grada para argilito mas podem ocorrer também níveis areníticos ou pavimentos de grânulos. Apresenta estrutura maciça ou laminação plano-paralela, indicando origem lacustre. Muito subordinadamente observa-se laminação cruzada cavalgante. Amiúde ocorrem níveis sulfetados em subsuperfície, com cerca de 3% de pirita em cristais euédricos. Esta litologia

dificilmente é observada em afloramentos pois sofre intensa ação de intemperismo e constitui as áreas mais aplainadas e com solos mais espessos, aproveitadas para agricultura.

**Arn – Arenito** São normalmente arenitos arcoseanos de tonalidades esbranquiçadas e extremamente friáveis. Em afloramento e testemunhos de sondagem identificou-se um arenito lítico rosado com fragmentos grossos e angulosos de andesito, rocha silicificada e tufos riolíticos e matriz arcosiana, sugerindo tratar-se de retrabalhamento de ignimbritos.

Cgl – Conglomerado Esta litologia só foi observada em superfície e corresponde a grandes blocos arredondados ou cortes em partes altas da topografia de conglomerados muito mal selecionados, clasto-suportados e monomíticos a polimíticos. Predominam seixos subangulosos de até 10 cm de riolito porfirítico mas encontram-se também clastos de andesito, traquito, silexito, quartzo, tufos e mesmo de provável granófiro (que pode ser estágio mais avançado de devitrificação de álcali-riolito segundo Cas & Wright, p.419). Sua matriz é de arenito arcosiano, litologia para a qual grada localmente. Ocorrem também sob a forma de rochas sem organização aparente alguma, sugerindo tratar-se de fluxos de massa, lahars, que não são distintas nos mapeamentos anteriores.

#### **Rochas Piroclásticas (Estampa 4.2)**

Ocupam extensão areal pouco expressiva na bacia como um todo, sendo reconhecidos predominantemente ao longo da borda leste da bacia. Tem no entanto grande importância por indicar o pequeno nível de erosão à qual a bacia foi submetida. Podem ser originados

por queda (tufos), por fluxo (ignimbritos, *surges*), ou por combinações de ambos os mecanismos.

Ig – Ignimbrito São rochas de ocorrência restrita, porém de grande importância nas interpretações genéticas e de nível de erosão dos aparatos vulcânicos. Em geral apresentam cores arroxeadas. São por vezes pobres em finos (Estampa 4.2a). Fragmentos líticos constituem de 45 a quase 70 % da rocha e são dominantemente de andesitos (b, c), em geral vesiculados e/ou devitrificados, ou mais raramente de siltitos. Fenocristais dos fragmentos são de mesma composição dos cristaloclastos da matriz, típico de ignimbritos (Cas & Wright, 1979, p. 483), incluindo plagioclásio, orto e clino-piroxênio, além de palhetas de biotita, algum feldspato potássico e quartzo. Cristaloclastos de olivina são raros, localmente colados em lascas de vidro. Esta variedade composicional é indicativa de *mingling* de magmas, típica em vulcanismo explosivo, gerador de ignimbritos. A preservação de vitroclastos é pobre, devido à devitrificação, mas raramente *fiammes* podem ser observados (b). Podem ocorrer ainda brechados por fraturamento hidráulico posterior (d).

Ltfl - Lapilli-tufos lítico De ocorrência restrita, talvez devido à seu reconhecido baixo potencial de preservação. São rochas de cores variadas e textura grossa, com arcabouço equivalente à fração grânulo e seixo fino. Possui mais de 25% do volume da rocha composto por fragmentos líticos maiores que 2 mm.

De um modo geral a matriz é microcristalina, constituída predominantemente de quartzo, microclina, sericita e hematita subordinadas. Podem ocorrer também pirocristais de quartzo

e feldspato perfazendo cerca de 5% do volume da rocha. Esta rocha geralmente apresentase bastante silicificada ou oxidada, com hematita na matriz.

### **Rochas Vulcânicas Félsicas**

Ocorrem como domos, e subordinadamente diques que podem ser mapeados, usando-se como critério a textura e composição, que permanece a mesma para cada domo individual, que tende também a possuir coloração diagnóstica. A textura varia em função das dimensões, forma e abundância dos fenocristais de quartzo e feldspato potássico (sanidina, hoje ortoclásio é o mais comum), e raramente de plagioclásio alterado a sericita. Fenocristais de quartzo, por exemplo, variam de cristais cinzentos irregulares, vítreos, de tamanho pequeno, esparsamente distribuídos, até abundantes massas de cristais bipiramidados brancos, normalmente esqueléticos, de até 2 mm. Em certos locais observase a presença de juntas colunares de seção losangular ou quadrática.

São incluídas rochas classificadas como álcali-riolitos a álcali-traquitos, ou mais raramente riolitos, se considerados somente o conteúdo destes fenocristais, o que geralmente é necessário pois a matriz destas rochas vulcânicas era constituída por vidro, hoje hidratado, não sendo possível reconhecer sua composição original.

Arlt – Álcali-riolitos (Estampas 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6) São rochas com grande predomínio de feldspato potássico, em geral com características óticas de sanidina, e quartzo entre os fenocristais félsicos. Secundariamente ocorrem fenocristais de máficos, com anfibólio (hornblenda ?) e piroxênios (aparentemente predomina clino-), ambos idingcitizados.

Massas de hematita na matriz lembram palhetas de biotita. Os fenocristais de quartzo são bem formados, por vezes bipiramidados. Texturalmente variam desde maciças com fenocristais (Estampa 4.3) até caracterizadas pelo intenso bandamento originado por fluxo ígneo (Estampa 4.4). Neste caso são comuns perturbações por colapso ou retrabalhamento, e os fenocristais de quartzo comportam-se como corpos rígidos e podem ser rotacionados ou deformar a matriz. Ocorrem pulsos sucessivos de vulcanismo e rochas previamente consolidadas são englobadas por novas lavas e retrabalhadas (Estampa 4.5). O bandamento é definido ou pela cristalização diferenciada do material vítreo original (alternância de níveis criptocristalinos e microcristalinos, comumente com textura esferulítica) ou pela alternância de níveis quartzosos e feldspáticos. Os opacos concentram-se em níveis criptocristalinos.

A aparência clástica ou mesmo brechada das rochas félsicas origina confusão em sua classificação como tufo. Dois tipos de textura pseudo-fragmentar são identificados nas rochas vulcânicas ácidas: o intercrescimento de esferulitos resultante da hidratação / devitrificação (Estampa 4.6), criando até mesmo padrões de interferência entre os esferulitos resultantes; e alterações hidrotermais sucessivas, não pervasivas (Estampa 4.11, discutidas mais a frente). Ambos mascaram as características originais e geram confusão na classificação das rochas como tufos. A devitrificação pode ser primária, concomitante ao resfriamento, ou posterior, enquanto que a alteração hidrotermal produz rochas ricas em quartzo e sericita, conferindo um aspecto compacto e endurecido à rocha.

Atq – Álcali-traquito (Estampas 4.7 e 4.8) Sob esta denominação são descritos álcalitraquitos e quartzo-álcali-traquitos. São rochas com grande predomínio de feldspato
potássico subédrico a euédrico entre os fenocristais félsicos, em geral com características óticas de sanidina. Secundariamente ocorrem fenocristais de quartzo esqueléticos e máficos idingcitizados (anfibólio ou piroxênio). Possuem marcante estrutura fluidal, por vezes em dobras convolutas, sendo muito comum que cristais pirogênicos de quartzo comportam-se como corpos rígidos, sendo rotacionados ou deformando a matriz.

## Rochas Vulcânicas Intermediárias a Máficas

São rochas vesiculadas e/ou com amígdalas deformadas mostrando alinhamento por fluxo vertical, sendo portanto *plugs* e subordinadamente diques. Apresentam plagioclásio e rara hornblenda, orto e clinopiroxênio, hoje idingcitizados. Contém clastos de siltitos como xenólitos, por vezes formam *flow-top breccias*, mostrando sua colocação em pouca profundidade na bacia. Quando diques intrudidos em sedimento tem contatos mal definidos, mostrando que sedimentos ainda tinham comportamento plástico, fato também mostrado por diques clásticos nos *plug*s de andesito. Pode-se concluir que andesitos e sedimentos são quase contemporâneos. Não foram observados fluxos andesíticos.

Ad - Andesito (Estampas 4.9 e 4.10) Sob esta denominação incluíram-se andesitos *sensustricto* e quarzto-andesitos, bem como rochas que poderiam ser classificadas texturalmente como basalto. São rochas de tonalidades acinzentadas e textura afanítica a subofítica. Até cerca de 25 % dos fenocristais são de minerais máficos idingcitizados, transformados em clorita e quartzo ou argilizados. A quantidade de material originalmente vítreo e o resfriamento brusco sugeridos pelos fenocristais e microfenocristais esqueletais e em leque da matriz indicam condições de formação em corpos aquosos ou intrusão rasa em rochas inconsolidadas e saturadas de água. É comum a ocorrência de amígdalas esféricas ou elípticas de até 1,0 cm de eixo maior preenchidas por clorita, especularita, calcedônia, quartzo ou calcita espática, que constituem até 40 % em volume da rocha. As amígdalas elípticas podem apresentar-se orientadas, em geral verticalmente, por efeito de fluxo magmático.

Em uma pedreira ao norte do alvo Campo do Meio foram observados níveis de andesitos e aglomerados brechados (Estampa 4.9), com grande quantidade de hematita associada e cortados por diques félsicos (riolíticos) com fragmentos de andesito, hematita e quartzo coloforme. Esta estrutura foi interpretada como dique de brecha vulcânica, segundo terminologia de Mason (1996).

## Produtos de Alteração Hidrotermal

Hrlt – Riolitos alterados hidrotermalmente (estampa 4.11) Rochas submetidas à eventos de alteração hidrotermal não pervasiva, onde o protólito ainda é facilmente reconhecido, em geral devido à preservação de porções da rocha, gerando texturas pseudo-fragmentares. "Matriz" e "fragmentos" tem a mesma textura e cristais por vezes ultrapassam os limites rocha alterada – rocha sã. Em geral a ordem dos eventos sucessivos é cloritização, seguida de potassificação/propilitização e silicificação.

**BH - Brecha de Fraturamento hidráulico (Estampas 4.12 e 4.13)** Rocha em que a composição dos litoclastos é a mesma da rocha hospedeira que a engloba ou, quando entre rochas diferentes, a mesma da rocha subjacente. Em certos locais observam-se também fragmentos da rocha sobreposta. Ocorre localizadamente como *pipes* ou preenchendo falhas e fraturas. Este brechamento em zonas confinadas é típico de brechas formadas por fraturamento hidráulico (Cas & Wright, 1979, p. 481). Petrograficamente são rochas identificadas por de textura *jigsaw* (McPhie *et al.*, 1993), onde os clastos se completam como peças de um quebra-cabeças; pela dificuldade em se caracterizar o que é matriz e o que é cimento; e por porções brechadas em rochas não perturbadas.

RS – Silexito ou Rocha silicificada pervasivamente (Estampa 4.14) Este termo, essencialmente descritivo, foi utilizado para designar as porções extremamente silicificadas de certas seqüências litológicas, onde nem sempre é possível identificar-se a rocha original. Agregados suturados de quartzo muito fino formam uma matriz que engloba litoclastos angulosos. Alternativamente pode se tratar de alterações sucessivas, sendo as mais tardias (silicificação) menos pervasivas, preservando porções pseudo-fragmentares cloritizadas. Quando texturas originais são preservadas nestas porções, as características vão desde riolito bandado a fluxo à tramas ripiformes de textura pilotaxítica, típica de rocha intrusiva rasa (*sill* ou dique), de composição andesítica.

Em escala de afloramento, é comum a presença de texturas de substituição de carbonato (calcita espática) por silicificação, um evento que segundo Hedenquist *et al.* (1996, item 4 ilustrado em sua figura 4.2), pode ser atribuído ao fenômeno de *boiling* e que atesta a proximidade da superfície.

Seu aspecto é de quartzo sacaroidal ou de veio, de cor branca ou acinzentada, com dureza elevada. A observação de "fantasmas" de litoclastos bastante silicificados, também sugere que tal litologia pode tratar-se de uma brecha hidrotermal em estado de silicificação avançada.

Calcita e hematita são também comuns, em amígdalas e disseminados. Normalmente tal litologia é hospedeira de mineralizações auríferas. Raramente podem ser observadas cavidades de dissolução de *boxworks* de sulfetos.

#### Intrusivas Básicas do Arco de Ponta Grossa

**DB** - Dique de rocha básica Incluem-se sob esta denominação diabásios, dioritos, microdioritos e quartzomonzonitos porfiríticos, de provável idade Cretácea, que cortam discordante e indistintamente, na forma de diques, todo o pacote de rochas do Grupo Castro, sua cobertura e seu embasamento.

São geralmente porfiríticos, com matriz intergranular fina ( $\leq 1$  mm) constituída de plagioclásio, microclina, quartzo e agregados máficos, além de cummingtonita, diopsídio ilmenita e magnetita. Sobressaem esparsos fenocristais de plagioclásio e piroxênio uralitizado. A textura é definida principalmente por ripas de plagioclásio incipientemente sericitizadas, que são normalmente bordejadas por microclina.

Tal litologia associa-se à Formação Serra Geral da Bacia do Paraná e está relacionada ao episódio de rifteamento do Atlântico.

## 4.2 INTEGRAÇÃO DA GEOLOGIA DAS MALHAS E ARREDORES

A partir do mapeamento geológico das malhas e cercanias foi possível definir-se domínios geológicos com associações litológicas e padrões de alteração similares. Fotointerpretação na escala 1:25.000 ajudou na identificação de estruturas locais, tais como falhas e fraturas coevas à formação da bacia (direções NE-SW a N-S), limites entre domos (fotolineamentos circulares) e estruturas posteriores (Meso-Cenozóicas, NW, geralmente associadas a diques dioríticos). Fotos aéreas em escala 1:60.000 foram utilizadas na identificação de estruturas regionais e na integração das malhas.

Nas malhas a sul (São Daniel, Mineropar e Engenho Velho, *q.v.* Anexo 2 - Mapa Geológico da Bacia de Castro) ocorrem duas associações principais. A associação sedimentar é composta por siltitos e argilitos finamente laminados, de cores verdes a avermelhadas, e subordinadamente arenitos arcoseanos com clastos de riolitos, todos muito intemperizados. Intercalada a esta, a associação vulcânica/vulcanoclástica ácida é composta por álcali-riolitos bandados a fluxo, com estruturas de *slump*, tufos líticos, subdivididos em função do tipo de litoclastos, e brechas freatomagmáticas de composição original riolítica e cimentação de quartzo e óxidos de ferro (originalmente magnetita ?).

Nas malhas de Engenho Velho ocorre apenas a associação sedimentar, representada por siltitos e argilitos larninados, com níveis ferruginosos milimétricos. Esta litologia estendese desde o extremo leste da malha de São Daniel até o sudoeste da malha de Mineropar, sempre com pouca exposição em afloramento e muito intemperizada.

Os contatos entre as associações raramente são expostos em afloramento. Onde observados ocorrem por falhamento normal de baixo angulo e sugerem que ao menos parte da sedimentação foi iniciada antes das atividades magmáticas.

No alvo Mineropar são predominantemente identificados álcali-riolitos porfiríticos, maciços ou bandados a fluxo, anteriores à parte dos sedimentos ou subvulcânicos a estes. Uma outra litologia, de especial interesse por hospedar mineralizações auríferas refere-se a uma rocha extremamente silicificada, classificada ora como um silexito, ora como brecha hidrotermal, com litoclastos compostos de andesito, riolito, tufo fino e siltito, ao longo do contato vulcânica / sedimento.

Um segundo domínio engloba as malhas da porção central da bacia (Lagoa e Tanque, Anexo 2), constituído predominantemente por domos de rochas vulcânicas ácidas, com composição variando de riolítica a álcali-traquítica, porfiríticos, maciços a bandados a fluxo. Apresentam fenocristais máficos, fraturas perlíticas e por vezes texturas pseudofragmentares por alteração hidrotermal de silicificação, gerando mesmo um nível de rocha silicificada na malha de Tanque. Localmente ocorrem em ambas as malhas lapilli-tufos líticos.

O terceiro domínio litológico é encontrado nas bordas da bacia de Castro, tanto leste (Campo do Meio e Tirania, Anexo 2), quanto oeste (Colônia Iapó, Anexo 2). Aqui predominam conglomerados líticos clasto suportados monomíticos a polimíticos, mal selecionados, podendo ser interpretados como lahar, circundando ignimbritos com litoclastos e cristaloclastos dominantemente máficos, *plugs* e diques de rochas vulcânicas de composição andesítica/basáltica, cortados por pequenos corpos félsicos de composição álcali-traquítica a álcali-riolítica. As rochas vulcânicas de composição andesítica/basáltica possuem abundantes amígdalas alinhadas verticalmente, confirmando a natureza intrusiva destes corpos. A quantidade de xenólitos de siltitos, por vezes métricos e transicionais a diques clásticos, também sugere natureza intrusiva em sedimentos ainda não consolidados (Figura 4.1, Estampa 4.9).

20 m



# Legenda:

1. Siltitos subhorizontais

- Andesito amigdaloidal com xenólitos de siltito
  Riolito bandado a
  - fluxo com xenólitos de andesito

Figura 4.1: Relações entre litologias, estabelecida na pedreira municipal, malha Campo do Meio.

#### 4.3 ANÁLISE MULTIELEMENTAR EM FUROS DE SONDA

Cabe ressaltar que os dados relativos a sondagem rotopercussiva não são objeto deste trabalho, mas servirão para alimentar os modelos de prospecção regional baseados em geoquímica de sedimentos de corrente.

Foram executados cerca de 3.000 m de sondagem rotopercussiva a nível exploratório para se testar com rapidez o potencial das áreas com melhores perspectivas de conter depósitos para lavra a céu aberto. Desta forma, optou-se por realizar furos rasos, em torno de 30 m de profundidade e verticais. Furos mais profundos, de até 80 m de profundidade, foram excepcionalmente realizados em três dos alvos sondados, assim como alguns furos inclinados (DOCEGEO, 1997).

O planejamento da sondagem baseou-se nos resultados de Au ppb em solo (horizonte B) e rocha, contagem de pintas de Au em horizonte A nas áreas contíguas às malhas e informações geológico-estruturais de campo. Utilizou-se, preferencialmente, o espaçamento das malhas, de 200 m entre as seções de furos, com furos espaçados de 50 a 200 m nas seções. Os furos foram amostrados a intervalos constantes de 1,0 m.

Foram escolhidos furos mais representativos de cada alvo para análise multielementar, em um total de 402 amostras. Foram analisados os elementos Au e Hg (ppb), Ag, Al, Ba, Be, Ca, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Ga, In, La, Mg, Mo, Mn, Na, Ca, B, Ta, As, Sb, Th, U, Y, P, Nb, Ce, W, Zn, Zr, Sr, Sn, V, Ti, Ni e Pb (ppm), segundo os métodos e com os limites de

detecção descritos no Anexo 2. Não foi realizado tratamento estatístico dos resultados, tendo sido feita apenas uma correlação visual com os teores de ouro (DOCEGEO, 1997). Os resultados são discutidos no PRIMEIRO ARTIGO.

## 4.4 DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X

As amostras dos mesmos furos selecionados para análise multielementar, mais alguns intervalos de interesse em outros furos, totalizando 400 amostras, tiveram suas alíquotas analisadas por difratometria de Raios-X, no laboratório da GIMIC/SUTEC-CVRD (DOCEGEO, 1997). Os resultados desta análise semi-quantitativa (margem de erro de até 25%) disponíveis para dois furos mais profundos, de cerca de 70 m, foram plotados na forma de *logs*, junto com a litologia e teor de ouro (q.v. discussão no item 5.2 e Figura 5.1).

## 5 A REGIÃO DE CASTRO E O MODELO EPITERMAL

## 5.1 CLASSIFICAÇÃO NO MODELO EPITERMAL

Considerando as definições propostas por Sillitoe (1993), White & Hedenquist (1995) e outros, Seoane *et al.* (1997) classificam o tipo de mineralização existente na bacia de Castro como do tipo de baixa sulfetação (*low sulfidation* ou adulária-sericita), pobre em sulfetos ou *low sulfur* (isto é, com menos de 5% de sulfetos como mineral constituinte de rocha), subalcalino a alcalino e com predominância de termos riolíticos.

Entre os fatores que permitem a identificação do ambiente como de baixa sulfetação destaca-se a presença de cinábrio e arsenopirita (comum em pequenas quantidades no modelo de White *et al.* 1995) e ausência de sulfossais com alto estado de sulfetação (por exemplo enargita, luzonita, tennantita, tetraedrita). Como minérios de ganga típicos destes sistemas, ocorrem em Castro calcedônia, calcita, ilita e barita, além de caolinita como mineral superimposto tardiamente por percolação descendente de águas sulfetadas aquecidas. Nota-se também a presença de hematita, limonita e goetita, em geral preenchendo fraturas e/ou cavidades, fluorita, sericita e epidoto. Localmente e em pequena quantidade ocorrem estibinita, zeólita e granada (Seoane *et al., op. cit.*).

Os filmes de óxidos de manganês e a pirolusita, que ocorrem no oeste da bacia são derivados do intemperismo de manganocalcita, kutnohorita ou rodocrosita, também típicos de ambiente epitermal de baixa sulfetação.

O padrão de alteração hidrotermal e a assinatura geoquímica são fatores primordiais a se considerar na definição do nível de erosão. As observações de campo e a interpretação de seções de furos de sondagem permitiram a definição de três domínios de alteração hidrotermal nas áreas estudadas:

- Faixas de baixa silicificação acompanhadas de *envelopes* de ilita-sericita e pirita, como é o caso da Associação Tirania;
- Zonas de intensa silicificação superimposta por caolinita, em envelope de ilitasericita/pirita, no caso da Associação Tronco;
- Áreas de ocorrência de caolinita associada a hematita e, subordinadamente, ilita-sericita e calcita, conforme observado em Campo do Meio.

Na maioria dos casos os minerais constituintes da alteração hidrotermal perfazem cerca de 3% da rocha em volume (Seoane *et al.*, 1997). Como regra geral os teores de Ag são sempre muito baixos, assim como os de Cu. Os teores de Hg vão de médios a baixos, os de Sb são relativamente altos e os de As variam de alto a baixo. Os valores de Au são normalmente baixos com incrementos pontuais, freqüentemente ocorrendo em uma relação inversa a esses últimos elementos. Segundo Hedenquist *et al.* (1996), esta associação mineralógica e geoquímica é típica da base da zona da silicificação, com sericita e pirita.

## 5.2 AMBIENTE VULCÂNICO INTERPRETADO

O mapa geológico atualizado, apresentado no Anexo 2, resulta dos trabalhos de mapeamento, de integração e de interpretação dos dados disponíveis, e permite uma nova visão da Bacia de Castro, suas unidades e ambiente vulcânico atuante.

A chamada **Associação Piraí do Sul** de Moro *et al.* (1994) estabeleceu o início do preenchimento da Bacia de Castro, antecedendo por pouco o início da atividade vulcânica. Como descrito por estes autores, a associação constitui-se de arenitos arcoseanos, siltitos e lamitos de lagos e planícies aluviais, com a influência do vulcanismo mostrada por cinzas e bombas. Permanece em sedimentação ao longo de todo este primeiro evento vulcânico e chega mesmo a recobri-lo (Moro *et al., op. cit.*). As áreas com anomalias geoquímicas nesta unidade estão localizadas nas cercanias da fazenda Engenho Velho.

Quase concomitante, a chamada Associação Tronco de Moro *et al. (op. cit.)*, ácida a intermediária, ocorre ao longo das bordas sudeste e noroeste da Bacia de Castro e em bloco alto na altura do principal dique associado ao soerguimento do Arco de Ponta Grossa. O vulcanismo nesta associação foi iniciado por um evento com *plugs* e diques intermediários a máficos, colocados em pouca profundidade na bacia, deformando sedimentos ainda plásticos e saturados e englobando xenólitos e diques clásticos (*q.v.* Figura 4.5). Seguem-se domos álcali-riolíticos, com diques félsicos subordinados cortando os andesitos. A predominância de bandamento de fluxo ígneo vertical e de dobras de fluxo com eixo vertical permite a classificação dos riolitos como domos de lava. O *emplacement* de domos, conforme indicado pela presença de debris de composição riolítica nos arenitos arcoseanos

e conglomerados se estendeu durante toda a sedimentação, iniciada portanto antes do vulcanismo ou concomitante a este.

Os conglomerados subordinados a esta associação, descritos como de leques aluviais com clastos de vulcânicas é na realidade composta, ao menos nas bacias com anomalias geoquímicas de ouro (além do Domo do Iapó e de Tijuco Preto) por **lahars**. De fato recobrem as demais unidades, em especial as vulcânicas, porém em áreas menos expressivas do que a elas atribuídas nos mapas anteriormente produzidos, pois são apenas "cascas" de espessura métrica a decamétrica. Sua resistência à erosão mantém o relevo das áreas onde estão situados. No extremo norte, onde ocorrem isolados dos domos, sugere-se que estes estejam preservados em subsuperfície, com mesma composição que os clastos predominantes nos lahars.

Por fim, é notável que todos os trabalhos sobre o Grupo Castro descrevam lentes de tufos da Associação Tronco interdigitados aos sedimentos da Associação Piraí do Sul, sendo sua contemporaneidade inquestionável. Nas áreas anômalas estudadas entretanto, os contatos ocorrem por falhamento normal, localmente com baixo ângulo e mineralização associada, ou, alternativamente, rochas da Associação Tronco ocorrem como diques subvulcânicos em rochas da Associação Piraí do Sul.

A Associação Tronco inclui as áreas aqui detalhadas de Colônia Iapó, Campo do Meio e Tirania / Tijuco Preto. Deve incluir ainda as áreas de São Daniel e Mineropar, se considerada a presença de textura herdada de rocha vulcânica máfica em silexito e a presença de clastos desta composição nas piroclásticas. A chamada Associação Tirania de Moro *et al.* (1994), é descrita como constituída basicamente por rochas félsicas como riolitos, quartzo latitos (assim descritos por Moro, 1993, posteriormente identificados quimicamente como álcali-traquitos), piroclásticas destas composições e conglomerados. Ocorre nas áreas de Tanque e Lagoa, à centroeste da bacia, onde predominam álcali-riolitos e álcali-traquitos com exuberante bandamento por fluxo, e onde o retrabalhamento de lavas, a mistura de lavas de diferentes plasticidades e rochas perlitizadas são comuns. O nome dado à Associação é no entanto infeliz, pois na localidade deste mesmo nome ocorrem anomalias geoquímicas de drenagem em rochas da Associação Tronco. Sugere-se portanto a troca do nome, não faltando boas exposições desta unidade, inclusive com fácil acesso, como nas localidades de Agostinhos, Campina de Pedra ou Fazenda dos Órfãos (Associação dos Órfãos, por exemplo seria apropriado).

Quanto ao caráter litoquímico, ainda que as áreas estudadas não sejam ideais para estabelecimento de *trends*, já que, por princípio são anomalias geoquímicas onde há fortes indícios de alteração hidrotermal, deve ser notado que álcali-riolitos com clinopiroxênio e anfibólio em quantidade ocorrem apenas em suites peralcalinas, sendo denominados panteleritos ou comenditos. Estes tem baixa viscosidade devido ao efeito do sódio e do potássio em baixar o grau de polimerização de SiO<sub>2</sub> (Cas & Wright, 1988), o que explica a notória abundância de bandamento por fluxo ígneo e a extensão areal recoberta por rochas félsicas, especialmente àquelas da **Associação Tirania**, mais diferenciada.

# 5.3 ALTERAÇÃO HIDROTERMAL E TIPOS DE MINERALIZAÇÃO

Nos testemunhos de sondagem rotopercussiva (montados em réguas de *chips, q.v.* Figura 5.1), o critério de identificação visual de minerais de alteração hidrotermal possibilita um perfeito zoneamento, em escalas métricas, dos halos de hidrotermalismo, aqui descritos segundo a nomenclatura de Mason (1996). No alvo Mineropar foram individualizadas quatro zonas (Figuras 5.2 e 5.3): **zona da ilita/sericita** (c.a. 40 m total) que nas porções superiores dos furos encontra-se intemperizada. É encontrada acima e abaixo da **zona de silicificação pervasiva**, onde são identificadas localmente cavidades irregulares preenchidas ou não com hidróxido de ferro. Estas foram interpretadas como parte da **zona sulfetada oxidada**.

Na porção inferior da zona da ilita/sericita, não intemperizada, foram identificados os minerais jarosita (sulfato de ferro e potássio, secundário) e scorodita (um arseniato hidratado de ferro, comum em porções oxidadas de veios metálicos e certos *hot springs*). A **zona sulfetada** pode ser visível a partir dos 40 m de profundidade com quantidades variáveis de pirita ( até 5 %) e é onde se encontram também pequenas massas de fluorita. Nas porções mais externas do halo de alteração ocorre a **zona propilítica**, com abundante ocorrência de clorita, além de epidoto, carbonato, hidróxido de ferro e alguma pirita, dependendo da constituição inicial da rocha alterada.



Figura 5.1: Os testemunhos de sondagem rotopercussiva de circulação reversa, montados em réguas de madeira são armazenados em armário próprio (direita). Sua confecção envolve a colagem dos *chips* de rocha considerados como os mais representativos de cada metro de sondagem, marcados à esquerda da régua, e a anotação dos valores de análises de ouro, bem como observações sobre padrões observados de alteração hidrotermal, à direita da régua. Intervalos relevantes são detalhados em lupa binocular (na mesa, à direita), e seções interpretadas podem ser dispostas para melhor visualização. Ao fundo, na parede, é apresentada uma seção de sondagem com sete furos de até 50m no alvo Tanque, espaçados 25 m entre si e respeitada a topografia local.

Esta progressão de tipos de alteração hidrotermal é também bem marcada em lâminas petrográficas. Quando diversas alterações sucessivas ocorrem em uma rocha são observados, por exemplo, porções somente cloritizadas (o halo externo da alteração, extremamente pervasivo) em meio à porções potassificadas (*envelope* das mineralizações) e por último silicificadas (porções centrais do evento mineralizante). Localmente há boa

correlação entre aumento de silicificação, que atinge o máximo nos chamados silexitos, e teores de ouro.



Figura 5.2 - Zoneamento da alteração hidrotermal em sondagem rotopercussiva de circulação reversa. Os dois furos mais profundos realizados mostram teores de ouro associados com alteração caolínica tardia (*overprint*), e o par ilita/sericita dominante em relação à clorita como alteração hidrotermal mais pervasiva. Linhas pontilhadas indicam acima de 0,5 ppm de ouro, e linhas sólidas acima de 1,5 ppm Au, sendo 14 ppm Au/m o melhor resultado. Para os demais minerais linhas pontilhadas representam valores acima de 2,5% de peso da amostra e linhas cheias representam acima de 5%. Para minerais de ferro os valores são 5% e 10% respectivamente. (modificado de Seoane *et al.*, 1997)

Esta zona de silicificação intensa está relacionada na área da Mineropar (Associação Tronco) a uma rocha brechada no contato por falhamento normal entre sedimento e riolito (Figura 5.3). A caulinita acompanha a zona silicificada e o par ilita/sericita ocorre subjacente a esta, com sobreposição parcial de pirita. Este último mineral ocorre também em parte das zonas mais externas da faixa de alteração, onde predomina a clorita.

O alvo Campo do Meio tem padrão similar (q.v. Figura 5.2), com variações resultantes da composição inicial das rochas. Assim, ouro é acompanhado por caolinita, com o par ilita/sericita subjacente e clorita mais abaixo. Não se observam quantidades significativas de sulfetos ou silicificação. Em ambos exemplos a presença de ferro é marcante, estando presente na forma de limonita, goethita, e/ou hematita até profundidades de cerca de 40m, em até 5-10% do peso da amostra analisada. Segundo DOCEGEO (1997), no furo analisado, a mineralização ocorre em zona intemperizada, e os citados minerais podem estar relacionados com processos secundários. Tal fato não parece provável em função da profundidade em que a alteração por hematitização ocorre.

Nas rochas da Associação Tirania, o par ilita/sericita ocorre de forma pervasiva, geralmente sob a zona mineralizada porém de teores pouco econômicos. A caulinita aparece de forma muito subordinada, geralmente próximo à superficie e a clorita, quando presente, ocorre sempre nas porções mais afastadas das áreas anômalas. A microclina identificada na difratometria pode representar, pelo menos em parte, qualquer outro K-feldspato, inclusive a adulária, termo de campo que descreve uma variedade de ortoclásic em combinação com outros feldspatos alcalinos, separados por imiscibilidade (Banfield, 1999), e que é típico de sistemas epitermais de baixa sulfetação, também chamado por diversos autores de adulária-sericita. Pode ter uma ocorrência pervasiva ou associada com o ouro, direta ou inversamente (DOCEGEO, 1997).





#### Riolito bandado a fluxo

1. Bandamento de fluxo verticalizado. Mineralização disseminada, baixos teores auríferos.

#### Veio de quartzo / silexito mineralizado

2. Brechado por tectônica, no contato por falhamento entre riolito e siltito. Falha reativada pós-mineralização na base do veio, com fragmentos de siltito ilitizado.

# Siltito com brecha de falha no contato

**3.** Zona alterada a ilita, com ocorrência de pirita na base. Abaixo desta somente observa-se cloritização.

Figura 5.3: Associação entre mineralização de ouro e estrutura no alvo Mineropar. Perfil esquemático baseado em sondagem rotopercussiva. Contato por falha normal de baixo ângulo (lístrica ?), com veio mineralizado. Caixa indica o local aproximado da fotografia. A montmorilonita foi identificada nas áreas da Mineropar, próximo à superficie associada à caulinita, e Tanque, na base da zona oxidada, associada à sericita e ilita. A calcita ocorre nos alvos Mineropar, relacionada com os siltitos e no Campo do Meio, com pequena correlação negativa com microclina, ilita e ouro. A fluorita, conforme já havia sido identificado mesoscópicamente, ocorre no alvo Tanque em proporções de até 12% (resultado semi-quantitativo) entre a zona da ilita/sericita e da clorita, juntamente com pirita e quartzo. Anatásio e rutilo foram identificados dúbiamente no alvo Mineropar, em uma amostra superficial, juntamente com a gibsita.

Em resumo, dois tipos de mineralização foram observados: veios de quartzo, e disseminado. Os veios de quartzo são controlados por falhas de baixo ângulo / contato litológico (alvos no sul da bacia), ou subverticais em andesitos (oeste da bacia). Tem textura sacaroidal, sendo pouco bandados, parcialmente calcedônicos, comumente com vazios (*vugs*, <1cm) com quartzo prismático, e textura de substituição de carbonato quando associados a teores mais altos de ouro (>1 g/t), dando aspecto "estilhaçado" à rocha. Foram encontrados localmente indícios de estibnita em filme de cristais dispostos radialmente. Este tipo de mineralização parece até agora restrito à rochas da Associação Tronco, com a única exceção sendo uma amostra do alvo Tanque com textura similar, porém sem afloramentos ou teores significativos. São a fase mais avançada da mesma silicificação que gera os silexitos. O segundo tipo de mineralização ocorre disseminado em riolito, com grande volume e sem controle litológico aparente, por vezes associado à pirita em vênulas e disseminada na matriz. A alteração mais comum é ilitização, que ocorre de maneira irregular (*patchy*). Pode ser originada a partir de fluidos circulando pelo bandamento subvertical a partir da câmara magmática, pelo contato entre litologias diferentes, ou ainda

por falha de baixo ângulo, ainda não encontrada, à semelhança do sul da bacia, onde valores baixos disseminados ocorrem no riolito que capeia a estrutura mineralizada.

Um fato interessante quanto à presença de veios de hematita e quartzo é que esta, assim como a mineralização aurífera em veios da qual se distingue por ser estéril, também está mais disseminada nas rochas da Associação Tronco, em locais da porção leste como as pedreiras do Tronco, Campo do Meio e Tirania e na borda oeste da bacia. Sillitoe (1998) a considera pós-epitermal, geradas em maior profundidade, o que pressupõe existência de novas unidades de rocha sobrejacentes. Próximo ao alvo Lagoa há uma antiga lavra onde hematita ocorre como veio métrico maciço, com textura reniforme a botrioidal, podendo representar o topo destas estruturas. Sillitoe (op. cit.) especula que a origem deste fenômeno de hematitização deve encontrar-se num evento regional de perda de água na bacia, possivelmente detonado pelo fluxo de calor associado ao rifteamento, com óxido de ferro sendo extraído pela passagem de fluidos basinais dos aquíferos contidos em sedimentos. Estes poderiam ser as rochas de origem lacuste da Associação Piraí do Sul. As unidades da Bacia do Paraná parecem menos prováveis que as próprias rochas da Bacia de Castro (ou seja, a Associação Tirania), pois não é descrita ocorrência de óxidos de ferro nas Formações Iapó ou Furnas.

Para mineralizações auríferas do primeiro tipo, com brechamento, entrada de veios e silicificação pervassiva, o controle estrutural parece obedecer aos sistemas de falhamentos estudados por Bonacim *et al.* (1994). Assim ocorrem veios nos dois regimes definidos por estes autores: **extensões** *strike-slip* ("vertical oblíquo", c2) de direção NW-SE (*q.v.* falha normal de baixo ângulo, Figura 5.3). e *grabens* ("vertical / subvertical", ai) com direções de

N20E e N60E, e mergulho alto a vertical, no caso dos veios examinados na região de Colônia Iapó.

# 5.4 IDENTIFICAÇÃO DO NÍVEL DE EROSÃO

As associações litológicas, estruturas e texturas observadas nas rochas da bacia atestam a boa preservação de grande parte do(s) aparelho(s) vulcânico(s), à exceção de termos inconsolidados, de reconhecido baixo potencial de preservação devido às altas energias que caracterizam o ambiente vulcânico. Ainda assim, a pequena quantidade de rochas piroclásticas preservadas permite reconhecer diversas paleosuperfícies para a Bacia de Castro. O basculamento de blocos coloca lado a lado unidades estratigráficas distintas, *i.e.*, unidades de maior profundidade ao lado de suas correspondentes depositadas em ambiente subaéreo, que no entanto estão localmente preservadas. O reconhecimento destas unidades, especialmente nas rochas da **Associação Tronco**, que apresenta maiores indícios de mineralização economicamente viável, é de suma importância na reconstrução do paleoambiente.

Seoane *et al.* (1997) concluem que os parâmetros de alteração hidrotermal confirmam a pouca erosão a que foi submetida a bacia, sugerindo posicionamento das ocorrências com potencial econômico em uma zona silicificada parcialmente lixiviada, acima da zona de quartzo-adulária, a cerca de 100 a 200 m de profundidade em relação à paleosuperfície (Figura 5.4).



Adaptado de Berger & Elmon, 1983

Figura 5.4 - Seção esquemática mostrando a variação típica dos elementos e posição relativa das zonas de alteração hidrotermal com a profundidade. A cor clara no topo representa a argilização avançada com caolinita, alunita e *sinter*. A seguir, do nível de cinza mais escuro para o mais claro, ocorrem: a zona de silicificação pervasiva, com ilita, pirita e rutilo/anatásio; a zona de ocorrência de quartzo (veios), adularia, ilita/esmectita, caolinita e cristobalita; e finalmente a zona propilítica, com clorita, esmectita, albita e calcita (Hedenquist *et al.* 1996).

A textura dos veios mineralizados indica substituição de carbonatos por sílica, típica da zona onde ocorre o *boiling* (0 a 500m de profundidade no sistema). Maiores evidências da origem epitermal de baixa sulfetação são os baixos conteúdos de metais-base e sulfetos, que associados à textura do quartzo permitiram a Sillitoe (1998) delimitar a profundidade entre 150 e 400m em relação à paleosuperficie.

Outro fator importante a se considerar é o padrão litológico-estrutural das rochas hospedeiras e encaixantes. Normalmente a mineralização disseminada tem caráter *stratabound*, associada a camadas mais permeáveis sotopostas a estratos impermeáveis. Esta padrão não é freqüente em níveis muito profundos do sistema vulcânico, onde a mineralização encontra-se mais concentrada em veios. A ocorrência de silicificação pervasiva e de contornos irregulares também demonstra não ter sido alcançada a zona de veios de quartzo. Por outro lado, não foi encontrado nenhum nível de *sinter* preservado, junto às bacias geoquímicamente anômalas para ouro, apenas pequenos indícios em fragmentos de Lagoa e próximo a Campo do Meio, o que indica que a porção mais superior do sistema nestes locais já foi erosionada.

Identificaram-se vários níveis de brecha hidrotermal, associada ou não a mineralizações, porém não foi observado *stockwork* em larga escala, indicando um predomínio de pressão hidrostática, em porções mais elevadas na pilha vulcânica. No alvo Campo do Meio foram identificados, ainda, diques de brecha com fragmentos alóctones de pequenas dimensões de quartzo coloforme, subangulosos a subarredondados, em uma matriz riolítica, posteriormente confirmados em lâmina de rocha coletada na mesma região. Esta estrutura, segundo Mason (1996), é típica de porções mais distais do sistema magmático, alcançadas somente pelos fragmentos menores, já arredondados por efeito de giro no material quente. Próximo à fonte térmica, e em profundidade, predominam as brechações com clastos angulosos de grandes dimensões.

Finalmente, o posicionamento estratigráfico do Grupo Castro também não condiz com hipóteses de expressiva ação erosiva. Os sedimentos da Formação Iapó, de idade

Neordoviciana a Eosiluriana, sobrepõem-se às rochas do Grupo Castro na porção oeste, ou seja, pode não ter ocorrido um hiato de tempo significativo entre o fim da deposição desta última unidade e o início da deposição da segunda. A Formação Furnas recobre ambas as unidades através de um contato resultante da peneplanização pré-Devoniana, já em um estágio de total cratonização do embasamento da Bacia do Paraná. As cotas atuais na bacia Castro estão muito próximas da cota média do contato basal plano da Formação Furnas, o que indica que a erosão posterior ao recuo da escarpa do Furnas foi pouco expressiva. Entretanto, com o soerguimento do arco estrutural de Ponta Grossa, que produziu o recuo da escarpa, ocorreu também o basculamento de blocos ao longo de toda a bacia Castro. Com isto, níveis diferentes de profundidade podem hoje encontrar-se lado a lado, sendo de extrema importância reconhecer a situação em cada um dos alvos trabalhados.

Para concluir, cumpre destacar que **complexos de domos riolíticos** são excelentes locais para mineralização **epitermal do tipo de baixa sulfetação**, como foi confirmado ser o caso de Castro (Seoane *et al.*, 1997, Sillitoe, 1998), e a proximidade a domos é critério a ser priorizado na prospecção.

## 6 MODELAMENTO DOS DADOS EM SIG

Esta parte da tese foi preparada primeiramente no formato de dois *posters* apresentados no **XIX International Geochemical Symposium**, em Abril de 1999, na cidade de Vancouver, Canadá. Posteriormente foi submetida em dois artigos para a edição especial (*special issue*) do **Journal of Geochemical Exploration**, a ser publicado até Dezembro de 1999 com os melhores artigos selecionados entre as apresentações. Os artigos são apresentados em a seguir, e a discussão abaixo serve para ilustrar em mais detalhes os passos necessários para criação, administração e gerenciamento de uma base de dados SIG. Os parâmetros utilizados no modelamento guiado pelos dados (*data driven*) também são apresentados.

## 6.1 CONVERSÃO DE DADOS

A seleção de um *software* de SIG passa pela questão da representação dos dados em formato de células, às quais são atribuídos valores (*pixels*, ou formato *raster*), ou em formato de pontos, linhas e polígonos (*vector*, ou formato vetorial). A diferença básica entre ambas está no modelo de representação do espaço de cada uma: o formato *raster* divide o espaço em elementos discretos, matricialmente, enquanto o formato vetorial considera o espaço contínuo, seguindo os postulados da geometria euclidiana (Moura, 1997). Esta é, no entanto uma questão que tende a perder importância, já que a tendência é que os melhores *softwares* do mercado trabalhem com ambos os formatos. Assim, Walker *et al.* (1996) argumentam que litologias e pontos amostrais devem ser representados em formato vetorial, gerando bancos de dados mais fáceis de armazenar (ver também Bedell, 1994),

enquanto que dados de fotografias aéreas e se sensores remotos são melhor representados no formato *raster*.

O primeiro passo para possibilitar a utilização de técnicas de SIG é a compatibilização dos dados com o formato de entrada destes no *software* (ver por exemplo Dohar, 1997). O GRASS foi o inicialmente selecionado para a integração dos dados por estar disponível no LAPIG e ser de uso amplamente divulgado na comunidade do IG-UNICAMP, facilitando o aprendizado. Posteriormente optou-se pela utilização dos *softwares* ARC-INFO e ARCVIEW, da empresa californiana ESRI, adquiridos pela DOCEGEO. Este último em especial, instalado em *notebook* PANASONIC *pentium*, que sendo portátil, permitiu a utilização de SIG durante campanhas de campo, facilitando grandemente a atualização de mapas geológicos, dados geoquímicos, etc. à medida que estes se tornaram disponíveis, revelou-se sem dúvida como a solução mais adequada. Na parte de análise / simulações em SIG foi utilizado o mesmo *software* em um PC mais capacitado (*pentium* II, 450 MHz) e com mais memória para diminuir o tempo de processamento. O fluxograma para as etapas de conversão, edição e pré-processamento dos dados está ilustrado na Figura 6.1.

A preparação necessária para utilização no GRASS do mapa geológico integrado da bacia de Castro e seus arredores, em escala 1:50.000 (DOCEGEO,1997), envolveu a exportação das 3 folhas originais a partir dos arquivos AUTOCAD, em *dxf*, e a conversão deste para o formato GRASS, seguida pela concatenação das linhas e polilinhas, resultando em polígonos fechados, aos quais foi dado o atributo das litologias correspondentes. Foi realizada então a conversão do arquivo de vetor para *raster*.



Figura 6.1: Fluxograma para as etapas de SIG. Dados (A) são lidos no (às vezes são necessários arquivos intermediários), convertidos, editados e acrescentada a topologia (B, com produtos intermediários). A seguir no pré-tratamento (C) são geradas novas relações entre os dados originais.

A integração das cartas 1:50.000, todas com coordenadas UTM, mas com 2 *data* de projeções diferentes (Pilar Astronômico de Ponta Grossa e SAD 69) foi feita utilizando o procedimento descrito no item 3.2.1, e é melhor descrita no primeiro artigo.

Para a geração do banco de dados formato ARC-INFO mapa geológico com seus atributos foi migrado como imagem raster, através de leitura direta do arquivo pela opção grid do para o ARC-INFO, atestando a boa comunicação entre os softwares. No entanto, uma vez que o ARCVIEW trabalha preferencialmente com dados vetoriais (embora exista o módulo para tratamento de dados raster, o SPATIAL ANALYST), o mapa original da DOCEGEO (op cit.) foi novamente exportado pelo AUTOCAD para formato dxf e convertido para um formato intermediário, através de rotina do DATA AUTOMATION KIT, módulo de conversão do pacote ARCVIEW / PC-ARC-INFO. Este módulo encarrega-se de forçar o fechamento de quaisquer polígonos que estejam em aberto (dentro de limites pré estabelecidos por tentativa e erro), além de preservar a estrutura original de planos de informação, facilitando duplamente a criação posterior de topologia. O resultado é lido diretamente no ARCVIEW e convertido em formato shapefile, próprio do software, onde pode ser editado, para serem acrescentados atributos (e.g.: características das rochas, tipos de contato, idades, tipos de estrutura) e retiradas informações que não são características do mapa, mas tão somente convenções da cartografia, como espessura da linha e cor. Foram considerados sete tipos de litologias, inclusive embasamento e cobertura, e três tipos principais de estruturas (q.v. Figura 1.1).

A rede hidrográfica foi também convertida de AUTOCAD para formato dxf e lida pelo GRASS como arquivo de vetores. A seguir as linhas e polilinhas subsequentes constituintes de drenagens de mesma ordem foram concatenadas entre si e atribuídos valores a cada ordem de drenagem. Finalmente tributários de terceira ordem foram concatenados com as drenagens de segunda ordem e estas com as drenagens de primeira ordem onde deságuam. O arquivo de vetores resultante foi convertido para *raster*. Para conversão dos dados para o formato *shapefile* do ARCVIEW foi utilizada a rotina já estabelecida para o mapa geológico.

Para a confecção do modelo numérico do terreno foram selecionadas cartas recobrindo a bacia e rochas circunvizinhas na escala 1:100.000. Cartas em escala de maior detalhe (1:50.000) foram descartadas devido ao tratamento dado por estas à escarpa que constitui o contato oeste do Grupo Castro com a Formação Furnas, onde não foram traçadas as curvas de nível, que ficariam muito próximas umas das outras. Em seu lugar foi adotada uma simbologia que corta outras curvas e confunde o *scanner* utilizado. A *scannerização* das cartas selecionadas e sua posterior vetorização não foi bem sucedida. Alternativamente as bacias foram interpretadas à mão, diretamente sobre as folhas do IBGE ou SGE, em escala 1:50.000 (mesma base utilizada na coleta de sedimento de corrente) e digitalizadas. O arquivo AUTOCAD resultante foi convertido para formato *dxf* e a conversão para o formato *shapefile* seguiu a rotina descrita acima.

Os dados de geoquímica de drenagem e concentrado de batéia foram exportados do banco de dados do *software* PC-XPLOR, onde haviam sido armazenados originalmente. O formato texto *ASCII* delimitado por tabulações foi utilizado na exportação. Os registros foram importados para planilha EXCEL, onde foram acrescentados os caracteres separadores e de fim de linha e gerados arquivos intermediários. Finalmente, os arquivos gerados para cada elemento dosado nas diversas frações foram reconhecidos pelo GRASS. Para conversão para o formato *shapefile* foram utilizadas as mesmas planilhas de dados EXCEL geradas para conversão para o GRASS, convertidas para formato DBASE-IV e lidas diretamente pelo ARCVIEW, onde foram acrescidas de sua representação espacial através da rotina add event theme.

## 6.2 PRÉ-TRATAMENTO DOS DADOS EM SIG

Uma vez disponíveis os dados no ARCVIEW, foram estabelecidas as relações de 1 para 1 entre as bacias de captação de drenagem e as amostras. Cada bacia tem portanto seu ponto geo-referenciado de amostragem (na drenagem, à jusante), com uma amostra correspondente, dosada para diversos elementos nas frações >80# e <80# e contagem de pintas em concentrado de batéia, (similar por exemplo à *Australian Mining*, Março de 1996). Relações de **n para 1** foram estabelecidas entre a tabela de atributos dos polígonos de litologia e a tabela-chave de litologias e suas características. Em ambos os casos são utilizados campos comuns (indexadores) entre as tabelas, unidas logicamente pela rotina *join (q.v.* Figura 6.1). Com isto, apesar de sobrecarregada a memória de máquina necessária para se manipular as tabelas (e consequentemente o tempo gasto com as operações), evitase a duplicação desnecessária de campos e registros nas tabelas, que tem a conseqüência ainda mais indesejável de aumentar o espaço ocupado pelas informações. A ligação lógica facilita também a administração do banco de dados, pois qualquer alteração em uma tabela original é atualizada automaticamente em todas suas ligações, inclusive na parte gráfica

O pressuposto de que o valor de uma amostra coletada representa toda sua bacia de captação, bem como outras alternativas para atribuição e distribuição dos valores das amostras espacialmente, são discutidas por Moura (1997). Este apregoa o primeiro método

90

ONICAR<sup>®</sup>

de representação, de resto o mais tradicional e de mais fácil compreensão.

A análise estatística prévia dos resultados para ouro em duas frações de sedimento de corrente e contagem de pintas das amostras (DOCEGEO, 1997) foi auferida e aperfeiçoada, através das rotinas de estabelecimento das médias, desvios-padrão e das quebras naturais das populações. O número de classes foi estabelecido em quatro, para acompanhar o padrão adotado em DOCEGEO (*op cit.*), de média e 3 desvios. O método de classificação de quebras naturais entre classes de uma população utiliza uma fórmula estatística conhecida como otimização de Jenks (ESRI, 1996, detalhada nos ARTIGOS). A classificação mais tradicional baseada em média e desvio-padrão foi utilizada somente para comparação visual, não sendo entretanto significativamente diferente.

Os demais elementos analisados foram também submetidos à rotina para classificação de suas populações segundo suas quebras naturais. Foram considerados somente os elementos com contraste e limite de detecção suficiente para contribuir para a compreensão da paisagem geoquímica. As figuras 3.2, 3.3 e 3.5 a 3.8 ilustram a estatística obtida para elementos selecionados utilizando as quebras naturais das populações.

Uma vez colocados os dados numa mesma base, foram realizadas as simulações, que podem ser tanto *knowledge-driven*, isto é, o confronto da massa de dados com um modelo pré-determinado em função de parâmetros de mineralizações já conhecidas, quanto *data-driven*, ou seja, resultantes de simultaneidades observadas a partir dos próprios dados.

Um bom exemplo deste tipo de trabalho é dado por Wilford *et al.* (1995), com a integração de geoquímica multielementar de sedimento de corrente integrada e modelada com dados de aerogamaespectrometria, formas de regolitização, imagens Landsat, modelos digitais do terreno (DEM), geoquímica em amostras de rocha, padrões de drenagem e cadastro dos depósitos conhecidos. Outro bem exemplo é o uso do modelo *data-driven* para o estudo de mineralizações de metais-base nas Filipinas realizado por Carranza & Hale (1997).

## 6.2.1 SINTESE DA CARACTERIZACAO GEOQUÍMICA

Na amostragem de sedimento de corrente, o tratamento dos resultados da análise multielementar identificou correlações positivas fracas (maior que 0,5 e menor que 0,8) do Au com Be, Co, Fe, K, Mg, Mo, P, Zn, e Zr. Os elementos Ag e Ti mostraram correlação positiva maior que 0,8 com o ouro, enquanto que Ca e Sr mostraram correlações negativas maiores que 0,5.

Os resultados analíticos da amostragem de solo indicam excelente contraste em diversos alvos, com anomalias significativas com valores de Au da ordem de 85 a 1937 ppb ao longo de *trends* consistentes, levemente orientadas segundo direções de *strike* ou estruturas rúpteis regionais. Em outros alvos, como nas malhas de Engenho Velho, uma considerável parte da malha foi executada em áreas encharcadas e os resultados nas áreas onde foi possível a amostragem foram praticamente negativos. Constatou-se, outrossim, que nos locais de solos muito espessos e com atividade agrícola intensiva os resultados tornam-se extremamente depletados, mascarando os *trends* geoquímicos de Au. Há o caso das malhas

de Tirania, onde a maior parte das malhas programadas encontrava-se em área do Parque Estadual de Caxambu, onde não foi permitida a abertura de picadas. Onde a malha foi executada, foram obtidos resultados pontuais em solo.

As anomalias definidas por ambas as frações da amostragem de solo coincidem em grande parte, sendo que fração mais fina mostrou os teores médios mais altos, com um contraste mais definido e gerou as anomalias mais consistentes. Portanto, as anomalias desta fração foram utilizadas preferencialmente no planejamento da etapa de sondagem. Uma exceção foi o alvo São Daniel, onde a fração mais grossa delimitou uma anomalia de maior extensão em uma direção distinta daquela esperada.

Os elementos que se correlacionam bem, pela análise de fatores principais, na malha de solo do alvo Tanque, próximo a ocorrência de ouro em rocha são Au, Ba, K e Ti, e ainda Au, Zn Ca, Sr, As, Ba e Sb. A boa correlação entre Sb, Co, As e Ca também é significativa.

Um fato importante é que as anomalias de solo nos alvos pesquisados localizam-se em posições muito próximas dos pontos anômalos de coleta de sedimento de corrente e concentrado de batéia, mostrando que não há uma dispersão muito grande em torno das áreas-fonte. A amostragem de *chip* e canais de rocha na área das malhas de solo também confirmam este fato. A amostragem com alta densidade (cerca de 1 amostra a cada km<sup>2</sup>) por sedimento de corrente é portanto excelente para a detecção de ouro no sistema.

# 6.2.2 MINERALIZAÇÃO E GEOLOGIA EM SUBSUPERFÍCIE

A análise dos dados da sondagem rotopercussiva e de superficie levou à interpretação de um modelo de mineralização *stratabound*, porém, não necessariamente estratiforme. Os corpos são aparentemente lenticulares extensos e sempre associados a camadas de rochas mais porosas e/ou permeáveis dentro de uma determinada associação de litologias (*e.g.* riolitos no alvo Tanque e arenitos líticos/siltitos no alvo Campo do Meio, DOCEGEO, 1997). No caso do alvo Mineropar a rocha intensamente silicificada com fantasmas de litoclastos angulosos foi interpretada, pelo menos localmente, como uma silicificação / veio hidrotermal. Neste caso teríamos a mineralização diretamente associada a uma estrutura que serviu de conduto de fluidos. Esta hipótese é atestada pela coincidência do padrão de anomalias de sedimento de corrente e as estruturas identificadas em campo ou em foto aérea (Figura 5.2).

De qualquer maneira é provável que se tenham os dois fatores associados na formação dos corpos investigados até o momento. As grandes estruturas, que serviram de conduto dos fluidos hidrotermais, quando interceptam contatos e camadas de rochas mais permeáveis, em situações favoráveis, produzem alteração hidrotermal e precipitam metais segundo um padrão stratabound. Efetivamente, todas as camadas mineralizadas apresentam-se, via de regra, cortadas por estruturas rúpteis de caráter regional.

Os resultados analíticos para ouro obtidos em rochas da subsuperfície correlacionamse bem com os encontrados nas análises de *chips* e canais de rochas equivalentes

aflorantes. Constatou-se, inicialmente, que os valores de Ag, Mo e Cu são extremamente baixos em comparação com a maioria dos depósitos correlatos no mundo. Existem, entretanto, depósitos epitermais de grande porte com características semelhantes (e.g. Round Mountain, U.S.A.; item 5.2.3). Pequena correlação com ouro foi observada nos elementos **Hg, Sb, F, Pb e B** (± **Ti e Mn**). Ba apresenta uma correlação negativa.
ARTIGOS SUBMETIDOS PARA PUBLICAÇÃO

÷

-

## GIS MODELING OF EPITHERMAL GOLD EXPLORATION DATA FROM CASTRO, PR, BRAZIL

### J. Carlos Sícoli Seoane\*

Instituto de Geociências, Unicamp, caixa postal 6152, Campinas, SP, Brazil

### Abstract

Multielementary geochemistry of two sieve fractions (above and below 80#) of 750 stream sediment samples, plus color count for gold in pan concentrates collected nearby the stream sediment stations, were captured from laboratory result spreadsheets and associated by their corresponding sample number to sample site location obtained from GPS. Digitized 1:500 topographic sheets, edited in GIS to become seamless, provide a base map. Catchment basins were delimited and each basin was assigned its corresponding sample. Geology maps and photointerpretation of structures were also digitized and georeferenced in the GIS.

The database and information layers are used to select anomalies for follow-up by both data and knowledge based modeling for geochemistry, geology and structures. Modeling for simultaneous anomalies of pathfinder associations and prioritizing anomalies by their proximity to certain structures or lithological boundaries are complementary and better prospect delimitation results from combining geochemically modeled basins and the geological parameters. Four cluster of anomalous basins are selected by the combination of

<sup>\*</sup> e-mail: cainho@usa.net / sicoli@ige.unicamp.br

associations and geological parameters. Two of those clusters are also first order gold anomalies with confirmed mineralization.

Keywords: Mineral exploration, stream sediment sampling, catchment basin, GIS modeling, Castro basin (Brazil)

### 1. Introduction

The integration and analysis at different scales of the great diversity of data suitable for the exploration of commodities associated with epithermal systems, such as multielementary geochemistry in various media, regional and detail geological mapping, and structural compartmentation, is no easy task. Validations, choosing among different types of data and keeping models updated through the addition of new data are usually the crux of modeling such deposits. In fact, it is notorious that even big and successful players in the mining industry have relied on single elements or in a couple of the elements analyzed, to base exploration decisions, though usually multielementary analysis was carried out (*e.g.* Bagby & Mora, 1996, on the situation in Ecuador, or Kotlyar, 1996, reporting on the former Soviet Union). Digital cartography systems or commercial graphical software are a partial solution, but are not really adequate for compilations, analysis or modeling (Walker et al., 1996).

Modern geographic information systems (GIS) are a more practical solution for large data sets of different sources and formats, relating information from different sources, streamlining data capture, integration, projection and registration, and allowing the comprehension of phenomena at various scales through data structuring and modeling (*e.g.* Carranza & Hale, 1997, for raster-based data driven modeling). In the strictest sense, a GIS is a computer system capable of assembling, storing, manipulating, and displaying geographically referenced information, i.e. data identified according to their locations (USGS, 1997). The basic GIS concept is the superimposition of topologically structured information layers, where topology is the mathematical process of defining the spatial relationships between objects.

### 2. Geological Setting and Gold Exploration

Castro is an extensional, post-brasiliano foreland basin, Eordovician in age (490 + 13 Ma, Reis Neto et al., 1994). The Castro Group, first defined by Trein & Fuck (1967), comprises pelithic and rudaceous sequences of well-bedded red to green siltstone and sandstone of the Piraí do Sul Association (Moro et al., 1994), which are cut by contemporaneous plug and dyke bodies of andesite, with subordinate andesitic ignimbrite, tuff and epiclastics. A dome complex of masive to highly flow-banded rhyolite domes from several pulses, fill the basin nearby the town of the same name, in central-eastern state of Paraná, southern Brazil (Figure 1). The basin has a triangular-shaped outcropping area of about 900 km<sup>2</sup>, with a 50 km long eastern limit consisting of a NNE transtensive fault. separating basin rocks from the Neoproterozoic granitic basement. The western apex of the triangle points WNW, in the direction of the Ponta Grossa Structural Arch, a meso-Cenozoic structural high associated to a great number of basic dykes. The lower units of the Paraná Basin, sandstones and conglomerate levels of the Devonian Furnas Formation, unconformably overly the Castro Group to the west, in spectacular cliffs up to 200 m high. Locally, Silurian diamictites of the Iapó Formation are preserved in paleochannels between these two units.

From the results of previous work by the State of Paraná Mineral Resources Co. (MINEROPAR, Ariolli & Moreton, 1986), Rio Doce Geologia e Mineração S.A. (DOCEGEO) has successfully carried geochemical prospecting in the entire area. Their work reports for the first time the presence of significant showings of gold in early . Phanerozoic rocks in southern Brazil (Seoane *et al.*, 1997).

Gold mineralisation in Castro is of the low-sulfidation variety, low in sulfur, with less than 5% rock volume made up of sulfide minerals, subalkalic to alkalic-hosted (Seoane *et al.*, 1997). Cinnabar and arsenopyrite (common in small quantities in this type of deposits, White *et al.* 1995) and the absence of high sulfidation sulfosalts (such as enargite, luzonite, tennantite and tetrahedrite) are among the mineral indicators of a low sulfidation environment. Chalcedony, calcite, illite and barite are typical gangue minerals, and kaolinite is present as a late overprint, due to percolation of hot sulfide-rich water. Also present are hematite (locally in occurrences massive enough to have been quarried), limonite and goethite, usually in fractures and/or cavities, fluorite, sericite and epidote. Stibnite, zeolite, and garnet occur locally and in small quantities.

### 3. The Data

Multielementary analysis of two sieve fractions (above and below 177 µm) of 750 stream sediment samples was carried out at CVRD's SUTEC laboratory after an initial study of five different sieve fractions. Pan concentrates from 10 liters of material collected nearby the stream sediment stations were color counted for gold using 20x magnifiers. Analytical results were associated by their corresponding sample numbers to sample site locations obtained by GPS, with maximum errors of 50 m in plan view and 100m in elevation after an average of 30 readings. Metadata such as analytical method, detection limits, dates, laboratories used are kept on separate files. Topographic sheets mapped by the Army's Geographic Service (DSG) and by the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE), at 1:500 scale were digitized to provide a base map. GIS procedures were used to edit and remove inconsistencies between the topographic sheets, after registration to a common datum. Catchment basins were delimited by watersheds, following topographical highs. Stream sediment from anywhere within a basin contributes to the analytical results at a given sampling site. Basin extraction was carried out in GIS using heads-up digitizing, with scanned topographic sheet as background. The near-vertical cliffs that limit the basin to the west hampered the use of a digital terrain model. Each basin was assigned its corresponding sample and associated to the corresponding analytical results. Geologic information was compiled from field work, the work of agencies (Trein & Fuck, 1967; Arioli & Moreton, 1982), mining companies (DOCEGEO, 1997; Seoane *et al.* 1997), and thesis (Moro, 1993), as well as 1:60.000 photointerpretation of structures, which were digitized and georeferenced in GIS (Figure 1).

### 4. Data Interpretation and Modeling

The objective of using GIS is to support decision-making processes such as exploration site selection. To that end, modeling for anomalous catchment basin selection / prioritization, might be achieved by two different, if complementary approaches, both based on the well established practice of using pathfinder elements associated with the prospected element (Andrew-Jones, 1968), in this case gold. The first approach of pathfinder selection is to find patterns of association between gold and other analyzed elements, a process known as *Data Driven Modeling*. Once a type of mineralization is assumed, a second approach is to find characteristics of this type of deposit and search the area for them, a process known as *Knowledge Driven Modeling*. In modeling, even though gold content might be low in a given catchment basin, the presence of the other elements of each association (summarized in Table 1) is sufficient to select that basin for further work. On the other hand, if gold content is already enough to deem the basin as prospectable; the association serves to upgrade the basin's status to the top of the list.

### 4.1 Data Driven Model

Using factor analysis statistics to determine correlation among analyzed elements in stream sediment samples, weak positive correlations (>0.5, <0.8) occur between gold and **Co, Fe, K, Mg, Mo, P, Zn**, and **Zr**. Stronger correlation indexes, over +0.8, occur with **Ag** and **Ti**, while **Ca** and **Sr** have indexes over - 0,5.

When soil samples over known mineralization are considered, the same factor analysis statistics reveal **Ba**, **K** e **Ti**, as strongly related to gold, while **Zn**, **Ca**, **Sr**, **As**, and **Sb** correlate more weakly.

Some of the elements of the aforementioned associations were chosen for modeling purposes, based on availability of data to generate statistically and spatially meaningful information. Five classes are established for each element, based on natural breaks of the population, a method that identifies breakpoints between classes using a statistical formula that minimizes the sum of the variance within each of the classes (Jenk's optimization, ESRI, 1996). Elements with poor contrast, such as **Ag** and **Mo** were not included in modeling. In both media there is good correlation with **Ti**, **Zn**, and **K**, while **Ca** and **Sr** change behavior drastically and were also excluded from modeling. For each element of the chosen (Zn, Ti, K) association, the 3 upper anomaly classes are extracted from the original data sets and assigned a weight according to its class (Table 2). These weights are then totaled for each catchment basin as a new attribute which is used to classify the basins. Figure 2 shows basins selected for each sieve fraction.

### 4.2. Knowledge Driven Model

Evidence used in considering Castro mineralization as of the low-sulphidation epithermal type includes mineralogical and geochemical associations typical of the base of the silicified zone, as defined by Hedenquist et al. (1996, Figure 3, Table 3), low temperature patchy illite alteration, carbonate replacement textures in mineralized sugary quartz veins indicating boiling, manganese oxide films and pirolusite derived from the weathering of manganocalcite, kutnohorite or rhodochrosite and small amounts of jarosite and pyrite. All these factors are used to limit the depth of exposed mineralization to between 150 and 400m below the paleosurface (Sillitoe, 1998; Seoane et al., 1997).

Element geochemistry used as pathfinders in the model are Zn, Pb (Cu, Sb, As, Hg), with volatiles being used as pathfinders for shallow and concealed deposits. The methodology used is described in the Data Driven Section and in Table 2, and Figure 4 shows basins selected for each sieve fraction.

Based on known sites of mineralization found during first-pass gold anomaly follow-up, geological features to be modeled include rhyolite dome margins, rhyolite / sediment interfaces, N20°-35°E and N60°-70°E regional scale structures that could act as feeders and traps, mineralization locci for low sulphidation epithermal deposits. These features are represented as lines, polylines and polygon borders in vector format, and their areal influence is represented as buffer zones concentrically displayed (Figure 5) using distances of 50 and 100m, chosen to reflect mapped alteration halos.

### 5. Conclusions

Both data driven and knowledge driven models are helpful in prioritizing catchment basins for further detailing. Furthermore, when both methods are considered simultaneously, coincidence and/or proximity occurs in 11 basins, grouped in four clusters. This is shown by a spatial query of basins that simultaneously obey both data and knowledge driven parameters, or one of the parameters and are contiguous to a basin that follows the other. Still better prospect delimitation results from combining these geochemically modeled basins and the geological parameters considered (lithological contacts and selected structures, Figure 6), as all clusters are intercepted by the structures' area of influence. Two of the four clusters, Tanque and Campo do Meio, also are first order gold anomalies, which were chosen for follow up. Soil sampling and RC drilling confirm mineralization disseminated in rhyolite and in andesite dyke borders respectively. The other anomalous basins remain to be followed up.

Using readily available PC-based software, it is therefore possible to achieve prioritization of catchment basins, that while not statistically sophisticate, is still a step beyond the usual practice of letting all decisions be based on a single element. As an added benefit, everyday tasks are achieved more readily once data is in digital format in GIS.

### Acknowledgements

This paper is part of material prepared by the author for his Ph.D. thesis at Instituto de Geociências, State University of Campinas (IG-Unicamp), partially funded by Fapesp Grant # 98/05477-8. Exploration data was gathered while working at Docegeo-CVRD's Castro Project, and permission to publish is gratefully acknowledged.

### References

- Andrew-Jones, D. A. 1968. The application of geochemical techniques to mineral exploration. Mineral Industries Bulletin. v 2, no 6. Colorado School of Mines.
- Arioli, E. E., Moreton, L. C., 1982. Projeto Castro Relatório de Etapa. MINEROPAR -Minerais do Paraná S. A., Curitiba, 106pp.
- Bagby, W. C.; Mora, A. 1996. Gold Exploration in Ecuador. Explore, n. 90, p. 5-8.
- Berger, B.R.; Eimon, P. 1983. Cameron Volume on Unconventional Ore Deposits. Society of Mining Engineers AIME, p. 191-205.
- Carranza, E. J. M., Hale, M., 1997. A catchment basin approach to the analysis of reconnaissance geochemical-geological data from Albay Province, Philippines. J. Geochem. Explor. 60, 157-172.
- DOCEGEO 1997. Relatório de Etapa Projeto Paraná, Área Castro. Distrtito Sul, Depto. de Não Ferrosos. Belo Horizonte. Unpublished.
- ESRI, 1996. ArcView GIS. Redlands, California, USA, 350 pp.
- Heald, P.; Foley, N. K.; Hayba, D. O. 1987. Economic Geology, v. 82, p. 1-26
- Hedenquist, J. W.; Izawa, E.; Arribas, A.; White, N. C. 1996. Epithermal Gold Deposits: Styles, characteristics, and exploration. Tokyo: Society of Resource Geology. n. 1, 16p.
- Kotlyar, B. 1996. Geochemical Exploration in the former Soviet Union. Explore, n. 91, p. 1, 3-10.

- Moro, R. de P. X., 1993. A Bacia Ordoviciana do Grupo Castro, PR. Rio Claro, Instituto de Geociências/ UNESP, Rio Claro, Unpubl. MSc. thesis, 157pp.
- Moro, R. de P. X.; Bonacim, E. A.; Soares, P. C. 1994 Geologia da Bacia Ordoviciana de Castro - PR. Bol. Paran. Geociências, p. 43-48.
- Reis Neto, J. M., Moro, R. de P. X., Siga Jr. O., 1994. Grupo Castro: Idade e Implicações Tectonicas. Congr. Bras. Geologia., 38., Camboriú. Bol. de Res. Exp. 2, Brasil, pp. 394-395.
- Seoane, J. C. S., Schubert, G., Baars, F. J., Sue, R. B., Abreu, F. R., Vial, D. S., 1997. Epithermal deposit modeling applied to mineral exploration. X Int. Gold Symp., Rio de Janeiro, Brazil, Symposium Volume, Presentation 4, pp. 33-48.
- Sillitoe, R. H. 1998. Comments on Geology and Exploration Potential of Epithermal Gold Prospects in the Castro Area, Parana State, Brazil. A report prepared for DOCEGEO. Unpublished.
- Trein, E., Fuck, R. A., 1967. O Grupo Castro. Geologia do Pré-Devoniano e Intrusivas Subseqüentes da Porção Oriental do Estado do Paraná. Bol. Paranaense de Geociências (23-25), 257-305.
- U.S. Geological Survey, 1997 What is A GIS ? URL http://www.usgs.gov/research/gis/title.html
- Walker, J. D.; Black, R. A.; Linn, J. K.; Thomas, A. J.; Wiseman, R.; D'Attilio, M. G.
  1996. Development of Geographic Information Systems-Oriented Databases for
  Integrated Geological and Geophysical Applications. GSA Today, v. 6, n. 3, p. 1-7.

- White, N. C.; Hedenquist, J. W. 1995. Epithermal Gold Deposits: Styles, Characteristics and Exploration. SEG Newsletter, n.23, p. 1, 9-13.
- White, N. C.; Leake, M. J.; McCaughey, S. N.; Parris, B. W. 1995. Epithermal Gold Deposits of the Southwest Pacific. Journal of Geochemical Exploration, v. 54, n. 2, p. 87-136.

-

	Analyz	Mean	Maxim	Minim	Std.	Analyz	Mean	Maxim	Minim	Std.
	ed		um	um	Deviati	ed		um	um	Deviati
	sample				on	sample				on
	S					S				
	> 177 µm			< 177 μm						
Color count	699	10	333	0	27					
Ag (ppm) <sup>1</sup>	266	<1	2	<1	0.5	382	<1	3	<1	0.5
As (ppm)	257	7	119	<5	15	374	5	122	<5	15
Au (ppb)	344	3	517	<3	30	743	3	507	<3	31
Ba (ppm)	272	215	1207	4	188	395	256	1188	31	196
Ca (%)	213	0.07	0.31	0.01	0.05	336	0.09	0.34	0.01	0.05
Co (ppb)	213	20	108	<1	20	308	22	88	<1	14
Cu (ppm)	255	19	178	<1	25	383	18	256	<1	25
Fe (%)	272	3.63	14.70	0.25	2.51	395	3.58	12.10	0.49	2.20
Hg (ppb)	267	86	1032	<50	141	384	128	1716	<100	155
K (%)	213	0.16	0.69	0.01	0.13	336	0.19	0.68	0.03	0.12
Mg (%)	213	0.08	0.55	0	0.07	336	0.10	0.46	0.01	0.07
Mo (ppm) <sup>1</sup>	270	<2	9	<2	3	395	<2	8	<2	3
P (%)	213	0.02	0.21	< 0.01	0.04	336	0.02	0.25	< 0.01	0.04
Pb (ppb)	267	57	271	8	46	393	67	329	14	45
Sb (ppm)	264	10	29	<10	9	379	10	39	<10	9
Sr (ppm)	212	28	184	3	27	336	28	226	4	25
Ti (%)	212	0.05	0.71	< 0.01	0.08	336	0.04	0.58	< 0.01	0.07
Zn (ppm)	272	56	425	<]	52	393	72	688	<1	55
Zr (ppm)	156	223	970	<1	165	268	346	894	<1	185

Table 1: Summary of multielementary geochemistry data considered in modeling.

\$

<sup>1</sup>: low contrast.

Table 2: Attribute tables of catchment basins are reclassified for each element according to class of anomaly (4 for a first order anomaly, 3 for second order and 2 for third order). These weights are then totaled and used to classify each basin regarding the data- and knowledge-driven element associations.

Anomaly <sup>1</sup>	Third Order: 2	2 <sup>nd</sup> Order:3	First Order: 4	Third Order: 2	2 <sup>nd</sup> Order:3	First Order: 4
		> 177 μm			< 177 μm	
As (ppm)	10 - 23	24 - 51	52 - 119	19 - 35	36 - 64	65 - 122
Cu (ppm)	21 – 37	38 - 86	87 - 178	22 - 38	39 - 87	88 - 256
Hg (ppb)	129 - 262	263 – 586	587 - 1032	161 - 323	324 - 568	569 - 1716
K (%)	0.18 - 0.30	0.30 - 0.47	0.47 – 0.69	0.18 - 0.29	0.29 - 0.44	0.44 - 0.68
Pb (ppb)	63 - 102	103 - 154	155 - 271	69 – 103	104 - 167	168 - 329
Sb (ppm)	4 – 9	10 – 19	20 - 29	10 – 13	14 – 24	25 - 39
Ti (%)	0.10 - 0.23	0.23 – 0.40	0.40 - 0.71	0.07 - 0.15	0.15 - 0.30	0.30 - 0.58
Zn (ppm)	60 - 110	111 - 214	215 - 425	31 - 101	102 - 193	194 - 507

<sup>1</sup>: with corresponding assigned classification to the right.

Table 3: Characteristics of Low Sulphidation Epithermal Gold Deposits, from Heald et al.

(1987) and White & Hedenquist (1995). Underlined features are ubiquitous in Castro.

De	posit Form
-	Open space veins dominant, stockwork ore common
۹	Replacement and disseminated ore minor
Te	xtures
	Veins, cavity filling (bands, colloforms, druses), breccias
Or	e Minerals
ø	Pyrite, electrum, gold, sphalerite, galena (arsenopyrite)
Ga	ngue
-	Quartz, chalcedony, calcite, adularia, illite, carbonates
M	etals
<i></i>	An Ag 7n Ph (Cu Sh As Ha Se)

<u>Au, Ag, Zn, Pb (Cu, Sb, As, Hg, Se)</u>

Figure 1: Location and geologic map of the Castro Basin, Paraná State, southern Brazil. Geologic map compiled from different sources in GIS. Lithologies: (1) Granitic basement. (2) Fluvio-lacustrine sequences of well-bedded red to green siltstone, mudstone and sandstone are cut by (3) Plug and dyke bodies of andesite, with subordinate andesitic ignimbrite and tuff. (4) Dome complex of massive to highly flow-banded rhyolite and trachyte from several pulses, with subordinate pyriclastics, and (5) Conglomerate, laharic breccia and epiclastics complete the Castro Group which is overlain by (6) Sandstones. (7) Diorite dykes cut the whole sequence. Structures: (a) Circular features (dome limits). (b) Normal faults and fractures. (c) Transtentional fault (basin limit). (d) Lithological contact.

Figure 2: Catchment basins selected using data driven modeling in both sieve fractions.

Figure 3: Erosion level in the Castro Basin, ✓ indicates accordance to the model of Berger & Eimon (1983). Adapted from Hedenquist *et al.* (1996).

Figure 4: Catchment basins selected using knowledge driven modeling in both sieve fractions.

Figure 5: Structures and lithological contacts selected by attributes: nature and direction for structures, and volcanic/sediment contacts. Concentric buffers are applied to represent areal influence. Structural buffers shown in black, contact buffers in grey.

Figure 6: Coincidence / Proximity of catchment basins selected using data- and knowledgedriven modeling in both sieve fractions, and their relation to selected structures. Tanque and Campo do Meio clusters are also first order gold anomalies. Color profile: Disabled Composite 582,000 606.000 **⊕**24030\*S ∛49045\*W Brazil M 7.276.000 Brasília-Legend Structures 5 10 Km 0 2.1 а Contraction of b С đ Lithologies / Period 7.244.000 Castro 7 Jurassic 6 Devonian **5** j Curitiba Ordovician € 25000°S 50015°W Paraná State

fig\_1.JPG Sexta-feiva, 10 de Setembro de 1999 18:17:26 Vent area enriched in As-Sb-TI-(Hg±Au-Ag)

Silicification Erosion Level Quartz-illite ± adularia

> Quartzchlorite



Color profile: Disabled Composite



Fig\_4.JPG Sexta-feira, 10 de Setembro de 1999 18:54:03



Color profile: Disabled Composite



Sexta-feira, 10 de Setembro de 1999 18:58:31

# GOLD-ANOMALOUS CATCHMENT BASINS: A GIS PRIORITIZATION MODEL CONSIDERING DRAINAGE SINUOSITY

### J. Carlos Sícoli Seoane<sup>\*</sup>, Ardemírio de Barros Silva

Instituto de Geociências, Unicamp, caixa postal 6152, Campinas, SP, Brazil

### Abstract

Gold values in sediments of anomalous catchment basins are a function of several geological factors, including average composition of underlying rocks, geochemical controls, such as dispersion processes and scavenging of metal ions by oxides, and hopefully by the effects of mineralization processes. The influence of all these factors, in turn, is a reflection of sorting ("natural sampling") of minerals in drainages during sediment accumulation. Drainages with lower gradients, more sinuous paths, or both, are more likely to yield higher gold levels, as these factors restrict dispersion.

To test the sinuosity hypothesis, 52 gold bearing basins (above the detection limit of 3 ppb in the  $<177\mu$ m sieve fraction), out of 196 sampled basins situated entirely in rhyolites of the Eo-Ordovician Castro Basin (Paraná State, southern Brazil), were modeled in a GIS with respect to total lengths of drainage and distances from uppermost to lowermost points. The table of basin attributes was edited to include these data and sinuosity indexes were calculated by dividing total stream length by the distance between uppermost and lowermost points. The results were reclassified into three ranges for sinuosity (low, medium and high). To each of those ranges tentative empirical values of 1, 1.5 and 2 were assigned. Gold values for each basin were weighted by classes of sinuosity and re-classified, resulting in a modified gold anomaly map.

Some basins otherwise not considered first priority were thus emphasized, while other basins which were originally considered anomalous, were de-emphasized. It is proposed that the resulting map reflects more accurately the factors affecting the dispersion of gold, and, as all basins are situated on a single rock type, accentuates anomalies related to mineralization. Basins selected using sinuosity-weighted gold anomalies correlate well with those selected by pathfinder associations, and the two approaches are considered complementary. Both methods select the central portion of the Castro Basin as a primary candidate for follow up work.

**Keywords:** Mineral exploration, stream sediment sampling, catchment basin, sinuosity indexes, Castro basin (Brazil)

### 1. Introduction and Overall Setting

Castro is an extensional, post-brasiliano foreland basin, of Eo-Ordovician age  $(490 \pm 13 \text{ Ma}, \text{Reis Neto et al.}, 1994)$ . Plug and dyke bodies of andesite and intermediate to basic subvolcanics cut pelitic and rudaceous sequences of well-bedded red to green siltstone and sandstone. A dome complex of massive to highly flow-banded rhyolite from several subvolcanic pulses, with subordinate tuff and epiclastics, fills the basin near the town of the same name, in the central-eastern state of Paraná (Figure 1). The basin has a triangular-shaped outcrop area of about 900 km<sup>2</sup>, with a 50 km long eastern limit that consists of a NNE fault separating basin rocks from the Neoproterozoic granitic basement. The western apex of the triangle points WNW, in the direction of the Ponta Grossa Structural Arch, a Meso-Cenozoic structural high

<sup>\* :</sup> Corresponding author, e-mail: cainho@usa.net / sicoli@ige.unicamp.br

associated with a great number of basic dykes. The basin is host to low-sulphidation epithermal gold mineralization, the first of its type and age to be reported in Brazil (Seoane *et al.*, 1997).

Gold is found in both intermediate and felsic volcanic rocks, with economic concentrations usually related to the latter. Sediments are virtually barren, but rhyolite / sediment contacts are known sites of silicification and mineralization. Carbon replacement is a common vein texture, and cinnabar and arsenopyrite occur in small quantities. Chalcedony, calcite, illite and barite are typical gangue minerals, and kaolinite is present as a late overprint mineral due to percolation of hot sulphide-rich water. Also present are hematite (locally in occurrences massive enough to have been quarried), limonite and goethite (usually in fractures and/or cavities), fluorite, sericite and epidote. Stibnite, zeolite, and garnet occur locally in small quantities.

The use of a catchment basin as the area of influence of a stream sediment sample is widespread in the literature and innovative approaches with the use of Geographic Information Systems (GIS) are giving it new life, especially in areas where no *a-priori* control data or locations are available (*e.g.* Carranza & Hale, 1997).

### 2. The Data

Gold analysis of the < 177  $\mu$ m fraction of 775 stream sediment samples was carried out at CVRD's SUTEC lab after an initial study of five different sieve fractions. Five kilogram samples were homogeneized, quartered and 50 g aliquots, digested using *aqua regia*, were then analysed by plasma reflux-ICP with a detection limit of 3 ppb. Every eleventh sample collected was submitted in duplicate to check laboratory precision and ten percent of the samples, chosen randomly, were sent to a second commercial laboratory for confirmatory analyses. Analytical results were associated by their corresponding sample numbers to sample site locations obtained by GPS, with maximum errors of 50 m in plan view and 100m in elevation after an average of 30 readings. Topographic sheets mapped by the Army's Geographic Service (DSG) and by the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE) at 1:50.000 scale were digitized and converted to a single seamless datum using GIS procedures to provide a base map. Geologic information was compiled from several sources, including work from agencies (Trein & Fuck, 1967; Arioli & Moreton, 1980), mining companies (DOCEGEO, 1996; Seoane *et al.*, 1997), a thesis (Moro, 1993) and new data (Figure 1). Catchment basins were delimited, and each basin was associated with its corresponding sample data.

### 3. Gold Anomalous Catchment Basins

Gold values vary from the detection limit (3 ppb) to 507 ppb in the < 177  $\mu$ m sieve fraction. Five classes of gold values are established based on natural breaks in the population using Jenk's optimization (ESRI, 1996). This method identifies breakpoints between classes using a statistical formula that minimizes the sum of the variance within each of the classes. Gold occurs at greater than detection limit values in 171 of the 775 basins sampled (Table 1, Figure 2). Using GIS to identify the intersection of catchment basins and areas where rhyolite and rocks of rhyolitic composition are the dominant lithologies, 485 of the sampled basins are identified and detectable gold is present in 107 of those (Table 1, Figure 3). Out of 196 basins that lie exclusively in these lithologies, 52 have detectable gold (Table 1, Figure 4). Rhyolites therefore correlate well with anomalous values of gold in basins. This type of spatial query involving different layers of information is one of the most important uses of GIS (Chou, 1997), albeit a simple one.

### 4. Modeling Draimage Sinuosity in Rhyolite-hosted Catchment Basins

Once basins situated in a single rock type have been isolated, gold content will vary as a function of several geochemical factors, such as the inherent variability of rock type, the presence of mineralization and scavenging of metal ions by oxides. Physical factors, on the other hand, such as stream gradients and sinuosity of drainages, act to modify dispersion patterns. Drainages with lower gradients, more sinuous paths, or both, are more likely to yield higher gold levels, because they restrict down-drainage dispersion. It is therefore desirable to minimize such effects, by accounting for them through modeling, in order to minimize the influence of physical factors that might confuse basin rankings.

In this experiment, basins with detectable gold situated exclusively in rhyolites were modeled with a GIS with respect to total length of the main drainage and its tributaries. Firstly, the drainage segments within each selected basin were extracted from the drainage information layer and associated to these basins in a new layer (Figure 5). Next, drainage segment lengths in this new layer were summarized by basin, and the total length for each basin annotated.

Coordinates of the most upstream and downstream points of each main drainage segment and tributaries in each basin were determined and the distance between them calculated and summarized by basin. The attribute table for gold bearing, rhyolitehosted basins was joined to the length and distance summaries by their common identification field, i.e. sample numbers. The **sinuosity index** was calculated by dividing total length of drainages within a basin by the total distance of the beginning and ending points of the main drainage and its tributaries. Within a given basin, the longest possible combination of consecutive drainage segments is chosen as the main drainage and the other segments are considered its tributaries. This selection significantly affects the end result, as the distance between uppermost and lowermost points varies accordingly.

The results were reclassified into three ranges of sinuosity (Figure 6): low (1.002-1.038), medium (1.038-1.119) and high (1.119-1.253). Each range was assigned an empirical weighting factor by which gold values for each basin were multiplied to generate a modified gold anomaly map (Figure 7).

### 5. Sinuosity-averaged Gold Anomalies Compared to Pathfinder Associations

Anomalous basins for sinuosity-averaged gold values have good spatial correlation to basins selected using both knowledge-driven modeled pathfinder element association of volatiles (As, Sb, Hg) and data-driven modeled association of Zn, Ti and K (from Seoane, 1999). In that study, even though anomalies were not restricted to rhyolite-hosted basins, the majority of the basins selected were within that lithology. Correlation consists of basins being selected simultaneously by sinuosity-averaged gold and pathfinder element associations, or by neighboring basins selected by one of the two methods (Figure 8).

### 6. Conclusions

This work is an experiment to filter out the confounding effects of physical dispersion and accumulation of gold in stream sediments sampled as part of an exploration program. It is proposed that the resulting modified anomaly map more closely represents the original chemical distribution of gold within rhyolitic rocks, and thus anomalies related to mineralization. Trial and error adjustments of the weights assigned were made to assure that conspicuously anomalous samples did not get de-emphasized, as it is good practice to always follow those up. Likewise, weak anomalies should not be over-emphasized. The real usefulness of the method lies in ranking

anomalies of interrnediate value, where the field geologist is interested in deciding which are most anomalous and should be followed up.

All basins selected by the coincidence or proximity of the modified gold and pathfinder methods were followed up by soil sampling and mapping, and are sites of mineralisation under investigation by trenching/drilling by Docegeo (central portion of basin) and Mineropar (small anomaly to the southeast) This fact attests to the validity of the methods, and, both to the North and South, anomalies deemed as "high potential" in the sinuosity-weight experiment remain to be followed up.

### Acknowledgements

This paper is part of material prepared by the first author for his PhD. thesis at Instituto de Geociências, State University of Campinas (IG-Unicamp), partially funded by Fapesp Grant # 98/05477-8. Exploration data was gathered while working at Docegeo-CVRD's Castro Project, and permission to publish is gratefully acknowledged. Suggestions by Dr. Assit Choudhuri, Dr. William McMillan and the two referees, Dr. Robert Garrett and Dr. Ray Lett greatly improved the manuscript.

### References

- Arioli, E. E., Moreton, L. C., 1982. Projeto Castro Relatório de Etapa. MINEROPAR -
- Carranza, E. J. M., Hale, M., 1997. A catchment basin approach to the analysis of reconnaissance geochemical-geological data from Albay Province, Philippines. J. Geochem. Explor. 60, 157-172.
- Chou, Y.-H., 1997. Exploring Spatial Analysis in Geographic Information Systems. On Word Press, Santa Fe, New Mexico, USA, 474 pp.
- ESRI, 1996. ArcView GIS. Redlands, California, USA, 350 pp.
- Moro, R. de P. X., 1993. A Bacia Ordoviciana do Grupo Castro, PR. Rio Claro, Instituto de Geociências/ UNESP, Rio Claro, Unpubl. MSc. thesis, 157pp.
- Reis Neto, J. M., Moro, R. de P. X., Siga Jr. O., 1994. Grupo Castro: Idade e Implicações Tectonicas. Congr. Bras. Geologia., 38., Camboriú. Bol. de Res. Exp. 2, Brasil, pp. 394-395.
- Seoane, J. C. S., 1999. GIS modeling of epithermal gold exploration data from Castro, PR, Brazil (submitted).
- Seoane, J. C. S., Schubert, G., Baars, F. J., Sue, R. B., Abreu, F. R., Vial, D. S., 1997. Epithermal deposit modeling applied to mineral exploration. X Int. Gold Symp., Rio de Janeiro, Brazil, Symposium Volume, Presentation 4, pp. 33-48.
- Trein, E., Fuck, R. A., 1967. O Grupo Castro. Geologia do Pré-Devoniano e Intrusivas Subseqüentes da Porção Oriental do Estado do Paraná. Bol. Paranaense de Geociências (23-25), 257-305.

Table 1: Number Of catchment basins with samples situated in each class interval, for the 5 classes of gold distribution. For basins situated exclusively in rhyolitic rocks, 27% of basins are above detection limits, and gold-rich basins are also more abundant in proportion.

Gold Distribution	All basins sampled	Rhyolite- dominated basins <sup>b</sup>	Basins exclusively within rhyolites °
Class interval	Number of	Number of	Number of
	samples	samples	samples
< 3 ppb	604	378	144
3 - 30	140	87	42
31 - 101	20	13	6
102 - 193	10	б	4
194 – 507	1	1	0
Total samples	775	485	196
% of basins with	22	22	27
detectable gold			
% of basins > 101 ppb	1.4	1.4	2.0
<sup>a</sup> : see Figure 2			

<sup>b</sup>: see Figure 3 <sup>c</sup>: see Figure 4

Figure 1: Location and compiled geologic map of the Castro Basin, Paraná State, southern Brazil. Lithologies: (1) Granitic basement. (2) Fluvio-lacustrine sequences of well-bedded red to green siltstone, mudstone and sandstone cut by (3) Plug and dyke bodies of andesite, with subordinate andesitic ignimbrite and tuff. (4) Dome complex of massive to highly flow-banded rhyolite and trachyte from several pulses, with subordinate tuff and (5) Conglomerate, laharic breccia and epiclastics complete the Castro Group which is overlain by (6) Sandstones. (7) Diorite dykes cut the whole sequence. Structures: (a) Circular features (dome limits). (b) Normal faults and fractures. (c) Transtentional fault (basin limit). (d) Lithological contact.

Figure 2: Gold distribution in stream sediment samples of the Castro Basin (< 177  $\mu$ m sieve fraction, in ppb).

Figure 3: Gold distribution in basins where rhyolitic rocks of the Castro Group predominate.

Figure 4: Gold distribution in basins situated exclusively in rhyolitic rocks of the Castro Group.

Figure 5: Drainages bearing detectable gold within rhyolite-hosted basins. River segments upstream of detectable gold samples appear highlighted with their respective segment distance vectors, and are summarized by basin to calculate the sinuosity index.

Figure 6: Gold bearing, rhyolite-hosted basins classified by sinuosity.

Figure 7: Modified gold anomaly map, gold results weighted by the sinuosity index of the catchment basin. Circles surround examples of basins emphasized due to reclassification.

Figure 8: Correlation of Sinuosity-weighed Gold Anomalies and Pathfinder Associations. Pathfinder modeling from Seoane (1999).



IGES\_fig1.jpg Sexta-feira, 10 de Setembro de 1999 17:49:25



IGES\_fig2.jbg Sexta-feira, 10 de Setembro de 1999 17:53:47
Color profile: Disabled Composite



Color profile: Disabled Composite





IGES\_fiq5-jpg Sexta-feira, 10 de Setembro de 1999 18:05:33

Color profile: Disabled Composite



IGES\_fig6.jpg Sexta-feira, 10 de Setembro de 1999 18:07:38 Color profile: Disabled Composite





#### 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo das mineralizações auríferas na Bacia de Castro, executado através de mapeamento geológico, caracterização petrográfica, amostragem geoquímica em diversos meios, e integração de dados, modelados através de técnicas de SIG, permite as seguintes considerações.

#### 7.1 GEOLOGIA DA BACIA DE CASTRO

A subdivisão do Grupo Castro em Associações litoestratigráficas, apesar das dificuldades inerentes ao ambiente vulcânico, onde ocorrem variações laterais expressivas, interdigitamentos, além de rápida erosão e redeposição, permite que previsões e estimativas possam ser feitas com base nos modelos publicados por diversos autores. Assim pode-se afirmar que a história da deposição foi principiada pelos sedimentos da Associação Piraí do Sul, e logo foi instalado um vulcanismo, inicialmente máfico a intermediário e progressivamente mais félsico, da Associação Tronco. Sobreposto a estas associações ocorre novo vulcanismo félsico, com os álcali-riolitos e álcali-traquitos da Associação Tirania. Ao primeiro vulcanismo, parece associada maior quantidade de rochas piroclásticas, tanto de fluxo quanto de queda, e de rochas epiclásticas, talvez por se encontrar mais bem preservado, uma vez que os sedimentos da Bacia do Paraná encontram-se sobrepostos à Associação Tirania em discordância erosiva.

97

### 7.2 GEOQUÍMICA

Um primeiro fato a ressaltar é a pequena dispersão do ouro no ambiente. Desta forma, o local de coleta de amostras anômalas em sedimento de corrente é próximo das anomalias deste metal em solo (menos de 500m). As anomalias de solo independem da fração analisada, coincidindo em grande parte em ambas as frações. Tanto para sedimento de corrente como para solo, os maiores valores e maiores contrastes ocorrem na fração < 80 # (- 177  $\mu$ m).

Quanto a amostragem em rocha, também se observa pouca dispersão em relação as anomalias de solo, e os valores em superfície são da mesma ordem de grandeza que aqueles em subsuperfície, não denotando aparentemente enriquecimento ou empobrecimento supergênico significativo para profundidades de até 75 m.

## 7.3 MINERALIZAÇÃO

Considera-se que em Castro, até o presente momento, ocorrem dois tipos de mineralização. O primeiro tipo observado ocorre associado a teores mais altos e silicificação avançada / veios de quartzo, controlados por falhas normais de baixo ângulo ou fraturas, em rochas da Associação Tronco. Sua característica mais marcante é o aspecto estilhaçado dado pela textura de substituição de carbonato. O segundo tipo de mineralização ocorre disseminado em rochas de composição riolítica, com baixos teores e sem controle aparente, geralmente associado a ilitização. O primeiro e mais importante tipo de mineralização, com brechamento, veios e silicificação pervassiva, obedece ao controle estrutural dos sistemas de falhamentos com veios em , extensões *strike-slip* NW-SE e *grabens* N20E e N60E.

### 7.4 IDADE E CORRELAÇÃO COM BACIAS DO SUL DO BRASIL

A correlação do vulcanismo das bacias vulcanossedimentares Neo-Proterozóicas / Paleozóicas do sul do Brasil constitui um dos grandes desafios da geologia, sendo de grande interesse para a pesquisa de bens minerais.

No caso de Castro, a idade de *mise en place* das rochas vulcânicas e a implantação e desenvolvimento da bacia é atribuída por Reis Neto *et al.* (1994) em 490  $\pm$  13 Ma, através da datação de onze amostras por Rb-Sr, e construção de diagrama isocrônico para seis amostras de razão isotópica <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr similar. Ainda que datações individualizadas não estejam disponíveis para as Associações do Grupo Castro, as Associações Tronco e Tirania parecem corresponder respectivamente, em termos de eventos, tipos litológicos e composições aos Vulcanismos II (Mb. Hilário, Gr. Bom Jardim de Ribeiro *et al.*, 1966) e III (Fm. Acampamento Velho de Horbach *et al.*, 1986), conforme descritos por Wildner *et al.* (1997) e detalhados por Wildner *et al.*, (1999), Wildner & Nardi (1999), Zerfass *et al.* (1999) e mesmo Sommer *et al.* (1999 a e b), para o sul do platô do Taquarembó, RS. Nestes trabalhos, à semelhança de Castro, estão presentes rochas de afinidade comendítica, depositadas predominantemente em ambiente subaéreo, ou subaquoso de pequena profundidade, com intrusões rasas (Fambrini *et al.*, 1999), tectonicamente posicionadas em período de quiescência cratônica pós-orogênica, correspondendo às últimas manifestações

magmáticas relacionadas ao ciclo Brasiliano no Escudo Sul-Riograndense. No caso de Castro, tais fatos estão em concordância com as observações de Moro *et al.* (1994), que afirmam que a Bacia de Castro se formou no início do Ordoviciano, entre o ciclo Brasiliano e a cratonização da plataforma sul-americana.

A despeito de se tratar obviamente de uma seqüência tardia ao Brasiliano, esta bacia poderia alternativamente estar relacionada a um evento de início da formação da Bacia do Paraná, sendo neste caso considerada como pré-Caledoniana, também anterior à total cratonização da Plataforma Sul-americana (o que ocorreu em torno de 450 Ma). Como argumento favorável a esta hipótese podem ser citadas as relações estratigráficas entre o Grupo Castro (Eordoviciano) e formações Iapó (Eosiluriano) e Furnas (Eodevoniano). Neste caso a comparação com as rochas intermediárias a máficas do Vulcanismo IV de Wildner *et al.* (1997), ou seja com o membro Rodeio Velho (inicialmente descrito por Ribeiro *et al.*, 1966) conforme discutidas por Almeida *et al.* (1999), Fragoso Cesar *et al.* (1999) e Lopes *et al.* (1999), seria mais apropriada. Também lá ocorre controvérsia sobre a predominância de relação extrusiva ou intrusiva rasa entre as rochas vulcânicas e os sedimentos eólicos e pelíticos, devido à grande fluidalidade do magma e à complexidade dos contatos entre estas unidades.

Uma nova datação U-Pb (SHRIMP) em zircões de rochas vulcânicas das bacias de Campo Alegre, Itajaí e Castro (SC e PR, Cordani *et al.*, 1998), parece solucionar a questão, ao fornecer idade de  $543 \pm 14$  Ma para Castro,  $563 \pm 14$  para Itajaí e  $595 \pm 16$  para Campo Alegre. Tais idades concordam com a estabelecida para a intrusão do Complexo Anelar Leões, no Platô do Taquarembó, RS, de  $566 \pm 44$  Ma (Rb-Sr RT, Gastal & Lafon, 1999), ou 545-546 Ma para a Formação Acampamento Velho (Zerfass *et al.*, 1999), sendo no entanto incompatíveis com a idade do magmatismo Rodeio Velho (aproximadamente 470 Ma, U-Pb em zircões, datado por Lopes *et al.*, *op. cit.*, e por Hartmann *et al.*, 1998). Finalmente, os dados de <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr apresentados por Reis Neto *et al.* (1994) indicam razão inicial 0,7053 (MSDW 7,22), dentro do limite esperado por Chemale *et al.* (1999) para rochas básicas de magmatismo retroarco pós-colisionais e pós estabilização da Placa Sul-Americana no sul do Brasil.

## 7.5 USO DE SIG NA AVALIAÇÃO E INTEGRAÇÃO DE DADOS

A utilização de SIG comprovadamente resulta em um melhor conhecimento da região estudada, não só por permitir uma visão integrada dos diversos componentes a serem observados e das relações entre estes, como ainda pela integração de levantamentos de diferentes épocas e metodologias, e pela facilidade em se incorporar novos dados e informações. Adicionalmente, o confronto com novos modelos de mineralização é grandemente facilitado, já que o banco de dados encontra-se organizado e sem inconsistências.

Assim, através de sistemas disponíveis comercialmente, e a custos nitidamente cada vez menores, é possível a abordagem mais completa de uma área a ser investigada. Uma vez estabelecidas rotinas de tratamento de dados, o processo de pesquisa de bens minerais em uma região é mais eficiente, em menor prazo e com maior eficácia, do que pelos métodos tradicionalmente empregados de observação de cada elemento em separado, ou mesmo de basear as decisões de investimento no dado bruto de um único elemento analisado.

101

No caso específico de Castro, tanto o modelo *data-driven* quanto o *knowledge-driven* são úteis em priorizar bacias hidrográficas para detalhe em trabalhos posteriores. A seleção concomitante, considerados critérios de simultaneidade e vizinhança, de onze bacias pelos dois modelos, agrupados em quatro áreas, atesta a consistência da metodologia. Quando a estas são somadas observações geológicas (contatos entre as rochas vulcânicas e os sedimentos e estruturas tidas como locais preferenciais de mineralização), observa-se que estas áreas são de fato promissoras. Os alvos de pesquisa Tanque e Campo do Meio estão entre estas áreas, atestando a prospectabilidade das outros dois agrupamentos de bacias, que aguardam novos trabalhos.

Finalmente, é proposta uma nova abordagem para o estudo de dispersão de ouro em sedimento de corrente, buscando minimizar a influência da dispersão física através do índice de sinuosidade das drenagens amostradas, para cada tipo litológico. Desta forma acredita-se que as anomalias selecionadas tem maior possibilidade de representar mineralizações significativas.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, S. S. 1986. Using Geological Information to Develop Exploration Strategies for Epithermal Deposits. In: Berger, B. R.; Bethke, P. M. (Eds.) Geology and Geochemistry of Epithermal Systems. Chelsea, Society of Economic Geologists. p. 273-298. (Reviews in economic geology, 2)
- Almeida, D. P. M.; Lopes, R. C.; Lima, L.; Gomes, C. H. 1999. Resultados Preliminares do Estudo Petrográfico e Geoquímico das Rochas Pertencentes ao Membro Rodeio Velho (Ordoviciano) – Bacia do Camaquã – RS / Brasil. In: 1° Simpósio sobre Vulcanismo e Ambientes Associados. Boletim de Resumos. Gramado, RS, Brasil. p. 15.
- Andrew-Jones, D. A. 1968. The application of geochemical techniques to mineral exploration. Mineral Industries Bulletin. v 2, nº 6. Colorado School of Mines.
- Arioli, E. E.; Moreton, L. C. 1982. Projeto Castro Relatório de Etapa. Relat. Int. Curitiba: MINEROPAR - Minerais do Paraná S. A. 106p.
- Australian Mining. 1996. GIS mapping used to manipulate Pakistani data. p. 26, Mar.1996.
- Bagby, W. C.; Mora, A. 1996. Gold Exploration in Ecuador. Explore, n. 90, p. 5-8.
- Banfield, J. 1999. Gems and Precious Stones. An on-line course by the Geology and Geophysics Dept. of theUniversity of Wisconsin-Madison. Inclui um banco de dados e glossário. http://www.geology.wisc.edu/~jill/306.html
- Beams, S.D.; Jenkins, D. R. 1995. Regional exploration geochemistry and regolith of Northeast Queensland. In: Beams, S. D., (Comp.) Mineral Deposits of Northeast Queensland: Geology and Geochemistry. Townsville, James Cook Univ. p. 33-53. (EGRU contribution, 52)
- Bedell, R. L., Jr. 1994. GIS for the geosciences (short course notes for Geological Society of America Annual Meeting). Seattle, Washington.
- Berger, B.R.; Eimon, P. 1983. Cameron Volume on Unconventional Ore Deposits. Society of Mining Engineers - AIME, p. 191-205.
- Bobis, R. E.; Jaireth, S.; Morrison, G. W. 1995. The Anatomy of a Carboniferous Epithermal Ore Shoot at Pajingo, Queensland: Setting, Zoning, Alteration, and Fluid Conditions. Economic Geology, v. 90, p.1776-1798.
- Bonacim, E. A.; Moro, R. de P. X.; Soares, P. C. 1994 Tectonica da Bacia Ordoviciana de Castro - Paraná. Bol. Paran. Geociências.

- Bonhan, H. F. 1988. Models for volcanic-hosted epithermal precious metal deposits: A review. In: Schafer, R. W., Cooper, J. J., Vikre, P. G. (Eds.), Bulk Mineable Precious Metal Deposits of the Western United States. Geological Society of Nevada. p. 259-272.
- Bonham-Carter, G. F. 1994. Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS. Kidlington, Pergamon. xvii+398p. (Computer methods in the Geosciences, 13)
- Boyle, R. W. 1974. Elemental associations in mineral deposits and indicator elements of interest in geochemical prospecting. Geological Survey of Canada. Dept. of Energy, Mines and Resources. Ontario. Paper 74-75.
- Carranza, E. J. M.; Hale, M. 1997. A catchment basin approach to the analysis of recconaissance geochemical-geological data from Albay Province, Philippines. Journal of Geochemical Exploration, v. 60, n. 2, p. 157-172.
- Cas, R. A.F.; Wright, J. V. 1988. Volcanic Sucessions. Modern and Ancient, North Sydney, Allen & Unwin. p. xvii+528.
- Cavender, W. S.; Purdy, C. P., Jr. 1985. The Making of the Round Mountain Mine. In: Hollister, V. F. (Ed.), Discoveries of Epithermal Precious Metal Deposits. Case Histories of Mineral Discoveries, Vol. 1. New York: Society of Mining Engineers. p. 101-104.
- Chemale Jr., F.; Wildner, W.; Lima, E. F.; van Schmus, W. R. 1999. Isotopic Studies of Brasiliano Retro-arc Magmatism in Southern Brazil. In: 1° Simpósio sobre Vulcanismo e Ambientes Associados. Boletim de Resumos. Gramado, RS, Brasil. p. 57.
- Condit, C. D. 1995. DDM-SVF: A prototype dynamic digital map of the Springville volcanic field, Arizona. GSA Today, v. 5, n. 4, p. 69, 87-88.
- Cordani, U. G.; Basei. M. A. S.; Siga Jr., Oswaldo; Nutman, A. 1998. Idades U-Pb (SHRIMP) de rochas vulcânicas das bacias de Campo Alegre, Itajaí e Castro (SC e PR). Apresentado na sessão regular da Academia Brasileira de Ciências de dezembro de 1998, IG-USP, São Paulo, SP.
- Coutinho, J. M. V. 1955. Geologia e petrologia da região de Piraí do Sul, Paraná. Bol. Soc. Bras. de Geol., v 4, n 1, p.47-65.
- Crósta, A. P.; Moore, J. McM. 1989. Enhancement of Landsat Thematic Mapper Imagery for Residual Soil Mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: A Prospecting Case History in Greenstone Belt Terrain. Proceedings of the 7<sup>th</sup> (ERIM) Thematic Conference: Remote Sensing for Exploration Geology. Calgary. p. 1173-1187.

- Crósta, A. P.; Rabelo, R. 1993. Assessing Landsat TM for Hydrothermal Alteration Mapping in Central-western Brazil. Proceedings of the 9<sup>th</sup> (ERIM) Thematic Conference on Geologic Remote Sensing. Pasadena. p. 73-82.
- Deen, J. A.; Rye, R. O.; Munoz, J. L.; Drexler, J. W. 1994. The Magmatic Hidrothermal System at Julcani, Peru: Evidence from Fluid Inclusions and Hydrogen and Oxygen Isotopes. Economic Geology, v. 89, n.8, p.1924-1938. A special issue on volcanic centers as targets for mineral exploration.
- DOCEGEO 1997. Relatório de Etapa Projeto Paraná, Área Castro. Distrtito Sul, Depto. de Não Ferrosos. Belo Horizonte. Relatório Interno.
- Dohar, V. 1997 Tailoring ARC-INFO for geological map production. http://www.esri.com/base/commom/userconf/proc97/PROC97/TO250/PAP2 43/ P243.HTM de 28/10/97. p. 1-12.
- Elston, W. E. 1994. Siliceous Volcanic Centers as Guides to Mineral Exploration: Review and Summary. Economic Geology, v. 89, n.8, p.1687-1696. A special issue on volcanic centers as targets for mineral exploration.
- Enders, M. S.; Bartlett, M.W.; Griffin, G. C.; Volberding, J. E.; Young, D. P. 1995. Discovery of the Mc Donald gold deposit. Mining Engineering, v. 47, n. 10, p. 916-921
- Environmental Systems Research Institute, Inc. ESRI 1996. ARC-VIEW GIS: The Geographic Information System for everyone. Redlands, California. 349p.
- Environmental Systems Research Institute, Inc. ESRI 1996. DATA AUTOMATION KIT: PC Arcedit User's Guide. Redlands, California. 349p.
- Fambrini, G. L.; Martin, M. A. B.; McReath, I.; Fragoso Cesar, A. R. S. 1999. Subaqueous Pyroclastic Deposits of the Hilário Formation – RS. In: 1° Simpósio sobre Vulcanismo e Ambientes Associados. Boletim de Resumos. Gramado, RS, Brasil. p. 34.
- Fisher, R. V.; Schmninke, H. U. 1984. Pyroclastic Rocks. Berlin Heidelberg: Springer - Verlag. 472p.
- Forster, H.; Jafarzadeh, A. 1994. The Bafq Mining District in Central Iran a Highly Mineralized Infracambrian Volcanic Field. Economic Geology, v. 89, n.8, p.1697-1721. A special issue on volcanic centers as targets for mineral exploration.
- Fragoso Cesar, A. R. S.; Silva Filho, W. S.; Fambrini, G. L.; Machado, R.; Riccomini, C.; Paes de Almeida, R.; Pelosi, A. P. M. R.; Janikian, L. 1999. Significado Tectônico do Magmatismo Rodeio Velho no Rift Guaritas (Eopaleozóico do Rio Grande do Sul, Brasil). In: 1º Simpósio sobre

Vulcanismo e Ambientes Associados. Boletim de Resumos. Gramado, RS, Brasil. p. 16.

- Gastal & Lafon, 1999. Evolução Petrológica do Complexo Anelar Leões, Platô do Taquarembó – RS: petrografia, Química mineral e isótopos de Rb-Sr. In: 1º Simpósio sobre Vulcanismo e Ambientes Associados. Boletim de Resumos. Gramado, RS, Brasil. p. 27.
- Gray, J. E.; Coolbaugh, M. F. 1994. Geology and Geochemistry of Summitville, Colorado: an Epithermal Acid Sulfate Deposit in a Volcanic Dome. Economic Geology, v. 89, n.8, p.1906-1923. A special issue on volcanic centers as targets for mineral exploration.
- Harris, J. R. 1991. Mapping of regional structure of eastern Nova Scotia using remotely sensed imagery: implications for regional tectonics and gold exploration. Canadian Journal of Remote Sensing. v. 17, n. 2p. 122-135.
- Harris, J. R.; Murray, R.; Hirose, T. 1990. IHS transform for the integration of radar imagery with other remotely sensed data. Photogrametric Engineering and Remote Sensing. v. 56, n. 12, p. 1631-1641.
- Hartmann, L.; Silva, L.C.; Remus, M.V.; Leite, J. & Philipp, R.P. 1998. Evolução geotectônica do sul do Brasil e Uruguai entre 3.3 Ga e 470Ma. In: II Congresso Uruguaio de Geologia. Actas. Punta del Este, p. 277-284.
- Hayba, D. O.; Bethke, P. M.; Heald, P.; Foley, N. K. 1986. Geologic, Mineralogic, and Geochemical Characteristics of Volcanic-Hosted Epithermal Precious-Metals Deposits. In: Berger, B. R.; Bethke, P. M. (Eds.) Geology and Geochemistry of Epithermal Systems. Chelsea, Society of Economic Geologists. p. 129-168. (Reviews in economic geology, 2)
- Hedenquist, J. W.; Izawa, E.; Arribas, A.; White, N. C. 1996. Epithermal Gold Deposits: Styles, characteristics, and exploration. Resource Geology Special Publication. Tokyo: Society of Resource Geology. n. 1, 16p.
- Henley, R. W. 1986. The Geothermal Framework for Epithermal Deposits. In: Berger, B. R.; Bethke, P. M., eds. Geology and Geochemistry of Epithermal Systems. Chelsea, Society of Economic Geologists. p. 1-24. (Reviews in economic geology, 2)
- Henley, R. W. 1991. Epithermal gold deposits in volcanic terranes. In: Foster, R. P. (Ed.) Metallogeny and Exploration. London: Blackie. p. 133-164.
- Henley, R. W.; Ellis, A. J. 1983. Geothermal systems, ancient and modern. Earth Science Reviews 19, p. 1-50
- Hillman, B. A. 1995 Developing a GIS for acomplex site: US Borax Inc. Earth Observation Magazine. p. 20-23. October, 1995.

- Hollister, V.F. 1985. Models of Precious Metal Epithermal Deposits. In: Hollister, V.F. (Ed.) Discoveries of Epithermal Precious Metal Deposits. Case Histories of Mineral Discoveries, Vol. 1. New York: Society of Mining Engineers. p. ix-xiv.
- Hook, S. J.; Elvidge, C. D.; Rast, M.; Watanabe, H. 1991. Na evaluation of shortwave-infrared (SWIR) data from the AVIRIS and GEOSCAN instruments for mineralogical mapping at Cuprite, Nevada. Geophysics. V. 56, n. 9, p. 1432-1440.
- Horbach, R.; Kuch, L.; Marimon, R. G.; Moreira, H. L.; Fuck, R. A.; Moreira, M. L. O.; Marimon, M. P. C.; Pires, J. L.; Vivian, L.; Marinho, D. de A.; Teixeira, W. 1986. *Geologia*. In: Folha SH.22 Porto Alegre e parte das folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim. Rio de janeiro. IBGE / Projeto Radambrasil, p. 29-312 (Levantamento de Recursos Minerais, 33).
- Irvine, R. J.; Smith, M. J. 1990. Geophysical exploration for Epithermal gold deposits. Journal of Geochemical Exploration, v. 36, p. 375-412.
- Johnson, D. A.; Glenn, W. H. 1965 Topology The rubber-sheet geometry. Exploring Mathematics on Your Own. Book Twelve. John Murray, London. 40p.
- Kotlyar, B. 1996. Geochemical Exploration in the former Soviet Union. Explore, n. 91, p. 1, 3-10.
- Leinz, V. 1936. Os porphyros de Castro. Anais da Academia Brasileira de Ciências. Rio de Janeiro. v. 8, n. 4, p. 305-311.
- Le Bas, M. J.; Streickeisen, A. L. 1991. The IUGS systematics of igneous rocks. Journal of the Geological Society, Londres, v. 148, p. 825-833.

Lindgren, W. 1933. Mineral Deposits. 4. ed. New York, McGraw-Hill. 930 p.

- Lopes, R. da C.; Wildner, W.; Sander, A.; Camozzato, E. 1999. Alogrupo Guaritas: Aspectos Gerais e Considerações sobre o Posicionamento do Vulcanismo Rodeio Velho (Encerramento do Ciclo Brasiliano ou Instalação da Bacia do Paraná?). In: 1º Simpósio sobre Vulcanismo e Ambientes Associados. Boletim de Resumos. Gramado, RS, Brasil. p. 17.
- Loughlin, W. P. 1991. Principal Component Analysis for Alteration Mapping. Photogrametric Engineering and Remote Sensing. v. 57, n. 9, p. 1163-1169.
- McPhie, J.; Doyle, M.; Allen, R. 1993. Volcanic Textures A guide to the interpretation of textures in volcanic rocks. Centre for Ore Deposit and Exploration Studies University of Tasmania. 198 p.

- Mason, R. 1996. Gold Metallogeny. Seminar Notes. Kingston: Queen's University. 148 p.
- Mattikalli, N. M.; Devereux, B. J.; Richards, K. S. 1995. Integration of Remotely Sensed Satellite Images with a Geographical Information System. Computers & Geosciences, v. 21, n. 8, p. 947-956.

Mining Journal. 1996. Canyon Between Mines., p. 168, Mar. 1996.

- Moro, R. de P. X. 1993. A Bacia Ordoviciana do Grupo Castro, PR.. Rio Claro, UNESP. 157 p. Dissertação de Mestrado.
- Moro, R. de P. X.; Bonacim, E. A.; Soares, P. C. 1994 Geologia da Bacia Ordoviciana de Castro - PR. Boletim Paranaense de Geociências, p. 43-48.
- Moura, P. A. 1997. Potencialidade mineral da porção média do Vale do Ribeira (SP) para mineralizações auríferas, obtida de um sistema de informação geográfica - SIG. Campinas, UNICAMP. 110p. Dissertação de Mestrado.
- Pinto-Coelho, C. V. 1986. O granito serra do Carambeí (Paraná) e as anomalias uraníferas associadas. Brasíla, UnB. 309p. Dissertação de Mestrado.
- Ribeiro, M.; Bocchi, P. R.; Figueiredo Filho, P. M.; Tessari, R. I. 1966. Geologia da Quadrícula de Caçapava do Sul. Rio Grande do Sul. Boletim da Divisão de Fomento à Produção Mineral Brasileira, Rio de Janeiro, DFPM, Boletim nº. 127, 232 p.
- Reis Neto, J. M.; Moro, R. de P. X.; Siga Jr., O. 1994. Grupo Castro: Idade e Implicações Tectonicas. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 38.,Camboriú, 1994. Boletim de Resumos Expandidos, v. 2, p. 394-395.
- Romberger, S. B. 1992. A Model for Bonanza Gold Deposits. Geoscience Canada, v.19, n. 2, p. 63-72.
- Rytuba, J. J. 1994. Evolution of Volcanic and Tectonic Features in Caldera Settings and Their Importance in the Localization of Ore Deposits. Economic Geology, v. 89, n.8, p.1687-1696. A special issue on volcanic centers as targets for mineral exploration.
- Seed, M. 1995. Discovery history, geology and geochemistry of the Yandan gold deposit. In: Beams, S. D. (Comp.) Mineral Deposits of Northeast Queensland: Geology and Geochemistry. Townsville, James Cook Univ. p. 79-90. (EGRU contribution, 52)
- Seed, M. 1995. Discovery history, geology and geochemistry of the Wirralie gold deposit. In: Beams, S. D. (Comp.) Mineral Deposits of Northeast Queensland: Geology and Geochemistry. Townsville, James Cook Univ. p. 91-100. (EGRU contribution, 52)

- Seoane, J. C. S.; Schubert, G.; Baars, F. J.; Sue, R. B.; Abreu, F. R.; Vial, D. S. 1997. Epithermal Deposit Modelling Applied to Mineral Exploration. In: 11th International Gold Symposium. Boletim de Resumos Expandidos.
- Sillitoe, R. H. 1993. Epithermal Models: Genetic Types, Geometrical Controls and Shallow Features. In: Kirkham, R. V.; Sinclair, W. D.; Thorpe, R. I.; Duke, J. M., (Eds.), Mineral Deposit Modeling. Geological Association of Canada, Special Paper 40, p. 403-417.
- Sillitoe, R. H. 1995. Exploration and Discovery of Base- and Precious-metal Deposits in the Circum-Pacific Region During the Last 25 Years. Metal Mining Agency of Japan, Tokyo, 127 p.
- Sillitoe, R. H. 1998. Comments on Geology and Exploration Potential of Epithermal Gold Prospects in the Castro Area, Parana State, Brazil. A report prepared for Rio Doce Geologia e Mineração S. A. Relatório interno.
- Silva, A. B. 1991. Remote Sensing, Geophysical and Geochemical data as Aid to Mineral exploration. United Kingdom, The Open University. 140p. PhD Thesis.
- Silva, A. B. 1996. Sistema de Informações Georreferênciadas: Uma Introdução. Apostila de Curso, IG-UNICAMP, São Paulo, 127p. Inédito.
- Silva, D. C.; Mantovani, M. S. M. 1994 Projeto aerogeofísico Serra do Mar Sul: uma abordagem semi-quantitativa. Revista Brasileira de Geociências, v. 24, n. 2, p.120-127.
- Spatz, D. M. 1998. Remote Sensing Applied to Porphyry Copper Exploration. A Practical Guide for the Exploration Geologist. BHP Minerals. 38 p. Inédito.
- Spatz, D. M.; Wilson, R. T. 1997. Remote Sensing Characteristics of the Volcanicassociated Massive Sulfide Systems. Proceedings of the 12<sup>th</sup> (ERIM) International Conference and Workshop on Applied Geologic Remote Sensing. Denver. V. 1, p. 1-12.
- Sommer, C. A.; Lima, E. F.; Nardi, L. V. S.; Liz, J. D. 1999. Aspectos Petrográficos do Vulcanismo Ácido na porção Sul do Platô do Taquarembó, Dom Pedrito -RS. In: 1º Simpósio sobre Vulcanismo e Ambientes Associados. Boletim de Resumos. Gramado, RS, Brasil. p. 32.
- Sommer, C. A.; Lima, E. F.; Nardi, L. V. S.; Sousa, E. R. 1999. Gênese e Evolução Geoquímica do Magmatismo da Sequência Vulcânica Ácida – Dom Pedrito -RS. In: 1º Simpósio sobre Vulcanismo e Ambientes Associados. Boletim de Resumos. Gramado, RS, Brasil. p. 29.
- Streckeisen, A. 1976. To each plutonic rock its proper name. Earth Science Review, v. 12, p. 1-33.

- Trein, E.; Fuck, R. A. 1967. O Grupo Castro. In: Geologia do Pré-Devoniano e Intrusivas Suseqüentes da Porção Oriental do Estado do Paraná. Bol. Paran. de Geoc., n. 23-25, p. 257-305.
- Walker, J. D.; Black, R. A.; Linn, J. K.; Thomas, A. J.; Wiseman, R.; D'Attilio, M. G. 1996. Development of Geographic Information Systems-Oriented Databases for Integrated Geological and Geophysical Applications. GSA Today, v. 6, n. 3, p. 1-7.
- Walker, R. G. 1992. Facies, Facies Models and Modern Stratigraphic concepts. In: Walker, R. G.; James, N. P. (Eds.) Facies Models - Response to Sea Level Change. Geological Association of Canada, p. 01-14.
- Wilford, J. R.; Cruikshank, B. I.; Pain, C. F.; Bain, J. H. 1995. Integration and modelling of stream sediment geochemistry using GIS: Ebagoola, a case study. In: International Geochemical Exploration Symposium, 17., Townsville, 1995. Extended Abstracts. James Cook Univ. p. 173-174. (EGRU contribution, 54)
- Wildner, W.; Lima, E. F.; Camozzato, E.; Lopes, R. C. 1997. Vulcanismo Neoproterozóico-Cambriano no Rio Grande do Sul: Estratigrafia e Aspectos Texturais. A Terra em Revista, nº 3, Julho. p. 19-27.
- Wildner, W.; Lima, E. F.; Sousa, E. R. 1999. Interpretação de Texturas Vulcânicas Cambrianas Preservadas no Platô do Taquarembó – RS. In: 1º Simpósio sobre Vulcanismo e Ambientes Associados. Boletim de Resumos. Gramado, RS, Brasil. p. 42.
- Wildner, W.; Nardi, L. V. S. 1999. Características Geoquímicas e Petrogenéticas do Vulcanismo Neoproterozóico do Sul do Brasil - Platô do Taquarembó – RS. In: 1º Simpósio sobre Vulcanismo e Ambientes Associados. Boletim de Resumos. Gramado, RS, Brasil. p. 30.
- White, N. C.; Hedenquist, J. W. 1990. Epithermal environments and styles of mineralization: variations and their causes, and guidelines for exploration. Journal of Geochemical Exploration, v. 36, p. 445-474.
- White, N. C.; Hedenquist, J. W. 1995. Epithermal Gold Deposits: Styles, Characteristics and Exploration. SEG Newsletter, n.23, p. 1, 9-13.
- White, N. C.; Leake, M. J.; McCaughey, S. N.; Parris, B. W. 1995. Epithermal Gold Deposits of the Southwest Pacific. Journal of Geochemical Exploration, v. 54, n. 2, p. 87-136.
- Wood, J. D.; Hamilton, S. K. 1991. The Sleeper Gold-Silver Deposit: Discovery through Feasibility. Economic Geology, Monograph 8, p. 289-299

Zerfass, H.; Almeida, D. P. M.; Gomes, C. H. 1999. Faciologia das Rochas Vulcânicas da Formação Acampamento Velho (Bacia do Camaquã) na região da Serra de Santa Bárbara, Cerro do Perau e Cerro do Bugio (Município de Caçapava do Sul – RS). In: 1º Simpósio sobre Vulcanismo e Ambientes Associados. Boletim de Resumos. Gramado, RS, Brasil. p. 35.

- Aronoff, S. 1989. Geographic Information Systems: a Management.perspective. Ottawa, Ontario, WDL Publications.
- Bard, J.P. 1986. Microtextures of Igneous and Metamorphic Rocks. D. Reidel Publishing Co., Holland 264p.
- Best, M. H. 1982. Igneous and Metamorphic Petrology, W. H. Freeman and Co, 630p.
- Blatt, H.; Middleton, G.; Murray R. 1972. Origin of Sedimentary Rocks. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 634p.
- Burrough, P. A. 1986. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Claredon, Oxford.
- Chapin, C. E., Elston, W. E. (Eds.) 1979. Ash-Flow Tuffs. Geological society of America Special Paper 180. 211 p.
- Comissão da Carta Geológica do Paraná. 1966. Folha Geológica de Castro. Escala 1:50.000. Curitiba, Cia. de Desenvolvimento Econômico do Paraná.
- Comissão da Carta Geológica do Paraná. 1966. Folha Geológica de Colônia Iapó. Escala 1:50.000 Curitiba, Cia. de Desenvolvimento Econômico do Paraná.
- Comissão da Carta Geológica do Paraná. 1966. Folha Geológica de Piraí do Sul. Escala 1:50.000 Curitiba, Cia. de Desenvolvimento Econômico do Paraná.
- Comissão da Carta Geológica do Paraná. 1966. Folha Geológica de serra do Carambei. Escala 1:50.000 Curitiba, Cia. de Desenvolvimento Econômico do Paraná.
- Coobs, D. S.; Kawachi, Y.; Houghton, B. F.; Hyden, G.; Pringle, I.J; Williams J.G. 1977. Andradite and Andradite-Grossular Solid Solutions in Very Low-Grade Regionally MetamorphosedRocks in Southern New Zealand. Contributions to Mineralogy and Petrology, n 63, p. 229 - 246.
- Corbett, G. J.; Leach, T. M. 1997. Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration, and Mineralization. SEG / SME Short Course Manual. 235 p.
- Cox, D. P.; Singer, D. A. 1987. Mineral Deposit Models. U. S. Geological Survey Bulletin, 1693. Denver, Colorado. 379p.
- Davis, J. 1986. Statistics and Data Analysis in Geology. 2<sup>nd</sup> edition. New York. John Wiley & Sons, Inc. 645p.

- Environmental Systems Research Institute, Inc. ESRI 1996. ARC-VIEW SPATIAL ANALYST: Advanced Spatial Analysis Using Raster and Vector Data. Redlands, California. 148p.
- Environmental Systems Research Institute, Inc. ESRI 1996. AVENUE Customization and Application Development for ARC-VIEW. Redlands, California. 260 p.
- ESRI Educational Services 1994. Introduction to ARC-INFO: Two-day course notebook with exercises and training data. Redlands, California.
- ESRI Educational Services 1996. Introduction to ARC-VIEW GIS: Two-day course notebook with exercises and training data. Redlands, California.
- Foster, R., (Ed.) 1991. Gold Metallogeny and Exploration. Glascow, Blackie & Son Ltd. 432p.
- Goodchild, M. F.; Kemp, K. K., (Eds.) 1990. Introduction to GIS. National Center for Geographic Information and Analysis, Univ. of California, Santa Barbara.
- Howarth, R. 1984. Statistics and Data Analysis in Geochemical Prospecting. Handbook of Exploration Geochemistry, v. 2. Elsevier Scientific Publishing Co. Amsterdam, 437 p.
- Huxhold, W. E.; Levinsohn, A. G. 1995. Managing Geographic Information System Projects. Oxfrod University Press, Oxford, 247 p.
- Interactive Graphics 1997. Gondwana GIS ARC-INFO and ARC-VIEW. CD-ROM e texto explicativo. 150 p.
- Johnson, A. I., *et al.*, (Eds.) 1992. Geographic Information Systems (GIS) and mapping -Practices and standarts. American Society for Testing and Materials, ASTM STP 1126.
- Lajoie, J.; Stix, J. 1992. Volcaniclastic Rocks. In: Walker, R. G.; James, N. P. (Eds.) Facies Models - Response to Sea Level Change. Geological Association of Canada, p. 01-14.
- Legg, C. A. 1994. Remote Sensing and Geographic Information Systems. Geological Mapping, Mineral Exploration and Mining. Wiley-Praxis Series in Remote Sensing. John Wiley & Sons, Chichester. 166 p.
- Le Maitre, R. W. (Ed.) 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms. Reccomendations of the IUGS Subcommisions on the Sistematics of Igneous Rocks. Blackwell Scientific Pub. Ltd. 191 p.
- Leeder, M. R. 1982. Sedimentology Process and product.George Allen & Unwin, London. 344 p.

- Lobato, L. M. 1997. Processos de Mineralização e Alteração Hidrotermal. Apostila de Estudo. Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. 59 p. + viii.
- Machado, F. N. R.; Abreu, M. 1995. Projeto de Banco de Dados Uma visão prática. Editora Érica. São Paulo, 298 p.
- Maguire, D. J.; Goodchild, M. F.; Rhind, D. W., (Eds.) 1992. Geographic Information Systems: Principles and Applications. v. 1 e 2. Longman Scientific & Technical, England.
- Moorhouse, J. 1959. The study of Rocks in Thin Section. Harper & Row, Pub. New York, 514p.
- Pettijohn, F. J. 1975. Sedimentary Rocks. Harper & Row, Pub. New York, 628p.
- Pettijonh, F. J; Potter, P. E.; Siever, R. 1972. Sand and Sandstone. Springer-Verlag, New York, 618p.
- Ross, C. S., Smith, R. L. 1961. Ash-Flow Tuffs: Their Origin, Geologic Relations and Identification. US Geological Survey Professional Paper 366. 81 p.
- Star, J.; Estes, E. 1990. Geographic Information Systems: An Introduction. Prentice-Hall, Eaglewood Cliffs, New Jersey.
- Tuffe, E. R. 1983. The visual display of quantitative information. Cheshire, Connecticut, Graphic Press, 197 p.
- Viramonte, J. G. (Ed.) 1998. Curso de Volcanologia de Campo en Los Andes Centrales. Reconocimiento de Estruturas Volcanicas y sus Productos. Instituto GeoNorte, Univ. Nac. de Salta, Salta Argentina. 185 p.
- Viramonte, J. G. (Ed.) 1998. Curso Internacional de Volcanologia de Campo. Guia de Campo. Volcanismo en Areas Distensivas (Rift Cretacico del Noroeste Argentino) y Compressivas (Andes Centrales). Instituto GeoNorte, Univ. Nac. de Salta, Salta Argentina. Cerca de 200 p.
- Volcano World, 1997. Volcanic and Geologic Terms. http://volcano.und.nodak.edu /vwdocs/glossary.html de 12/11/97. p 1-13.
- Williams, H.; Turner, F. J.; Gilbert, C. M. 1982. Petrography An introduction to the study of rocks in thin sections. Segunda edição. W. H. Freeman & Co. San Francisco. 626 p.
- Whitten, D. G. A.; Brooks, J. R. V. 1976. The Penguin Dictionary of Geology. Penguin Books. Hazell Watson & Viney Ltd. Aylesbury, Bucks, Great Britain.

ANEXO 1 Descrição petrográfica de amostras selecionadas de bacias anômalas para ouro em sedimento de corrente.

\*

As amostras selecionadas representam a diversidade de litologias, estruturas e texturas encontradas em bacias anômalas para ouro em sedimento de corrente, estando localizadas na Figura 3.4 e Anexo 2. As rochas vulcânicas e plutônicas foram classificadas pela composição modal dos minerais presentes, baseada na classificação apresentada por Streckeisen (1976, 1979, fig. A e B). Cabe ressaltar que as rochas vulcânicas são por vezes classificadas levando-se em conta somente a mineralogia dos fenocristais, pois a matriz era constituída por vidro, hoje hidratado, não sendo possível reconhecer sua composição original. Neste caso utiliza-se o prefixo "feno" junto ao nome da rocha, segundo recomendação de Cas & Wright, 1988, p. 18. As lâminas são apresentadas segundo tipo de litologia e de alteração, agrupadas em estampas, e discutidas de S para N em cada categoria. As fotografias de lâminas foram realizadas pelas geólogas Elisabeth da Fonseca e Maria Auxiliadora M. Vieira (GIMIC/SUTEC-CVRD). A bibliografia utilizada originalmente e nas modificações posteriores constam do item Bibliografia (9).



Figura C - Classificação das rochas vulcânicas (A. Streckeisen) segundo % de minerais félsicos em volume (Q+A+P = 100 ou A+P+F = 100). 2 - Álcali- (feldspato) riolito (liparito, pantelerito, comendito); 3a - riolito (liparito); 3b - riodacito; 4 - dacito; 5 - dacito (quartzo-andesito); 6\* - quartzo álcali (feldspato) traquito; 6 álcali (feldspato) traquito; 6'- foid álcali (feldspato) traquito; 7\* - quartzo traquito; 7 - traquito; 7'- foid traquito; 8\* - quartzo latito; 8 - latito; 8' - foid latito; 9\* - quartzo andesito; 9 - latito andesito (andesito), 9' - latito basalto (mugearito); 10\* - quartzo andesito (quartzo toleito), 10 - basalto toleítico (alumina basalto, toleito) e 10' - álcali basalto (hawaiito); 11- fonolito; 12 - fonolito tefrítico; 13 - tefrito fonolítico (basanito); 14 - tefrito, basanito; 15a - foidito fonolítico; 15b - foidito tefrítico; 15c - foidito; 16 - ultramafitos.



Figura B - Classificação das rochas plutônicas (A. Streckeisen) segundo % de minerais em volume Q+A+P = 100 ou A+P+F = 100. la - quartzolito (silexito); lb - granitoides ricos em quartzo; 2 granito álcali-feldspato; 3 - granito; 4 - granodiorito; 5 - tonalito; 6\* - quartzo álcali-feldspato sienito; 7\* -quartzo sienito; 8\* - quartzo monzonito; 9\* - quartzo monzodiorito/quartzo monzogabro/quartzo anortozito; 6 - álcali-feldspato sienito; 7 - sienito; 8 monzonito; 9 - monzodiorito/ monzogabro; 10 diorito/gabro/ anortozito; 6' - basicamente foid álcali-feldspato sienito; 7'- basicamente foid sienito; 8'basicamente foid monzonito; 9'- basicamente foid monzodiorito/monzogabro; 10'- basicamente foid diorito/gabro; 11- foid sienito; 12 - foid monzosienito (plagiosienito); 13 - foid monzodiorito/foid monzogabro (essexito = nefelina monzodiorito/ monzogabro); 14 - foid diorito/foid gabro (teralito = nefelina gabro, teschenita = analcima gabro); 15 - foidolitos; 16 - rochas plutônicas (ultramafitolitos). 4b - Provável classificação das rochas plutônicas pelo teor de quartzo e foids presentes. Margem esquerda - teores de quartzo e foids (moda). Esquerda para direita - relação feldspato rf = P/ (A+P).

Observação - Q - quartzo; A - feldspato potássico; P - plagioclásio; F - foids; M - máficos; ol - olivinas; cpx - piroxênios; mel - melilitos.

# **Rochas Sedimentares e Epiclásticas** (Estampa 4.1)

AMOSTRA PPG-CAS-EV-02-RO-04 (Argilito / Siltito muito fino)

Rocha com granulação em geral fina, contendo porções irregulares de material síltico mais grosso. A mineralogia é basicamente a mesma em toda a rocha, destacando-se nas frações sílticas grossas a presença de clastos de quartzo e feldspato (microclina e plagioclásio) com dimensões na faixa de 0,04-0,15mm, em sua maioria, subangulosos. A ocorrência de raros clastos euédricos de feldspato sugere contribuição vulcânica. Opacos e leucoxênio ocorrem como acessórios.

AMOSTRA FP-416 43 a 44m (Siltitos a clorita)

As amostras variam de cor castanho avermelhada a cinza e verde acinzentado.

A amostra do furo FP-416 é de rocha síltica de cor castanho avermelhada constituída dominantemente por sericita (moscovita 2M-difratometria de raios-X), quartzo e plagioclásio. O feldspato e quartzo mostram geralmente granulometria de silte muito grosso. O primeiro metro apresenta-se com grãos irregulares e o último apresenta-se com fragmentos pouco maiores semelhante a material vulcanoclástico. Pela composição teríamos rochas dacíticas como fonte. Finos veios de quartzo ocorrem, sendo interceptados por finos veios de calcita.

A goethita presente ocorre em grãos irregulares distribuídos pela amostra.

A presença de clorita na amostra FP 416 43 a 44m, pode indicar diagênese ou alteração hidrotermal. Na tabela abaixo estão relacionados os minerais detectados:

Mineralogia/Amostra	FP-416
	40 a 41 m
Moscovita / sericita	83*
Quartzo	8
Plagioclásio	5
Ciorita	3
Calcita	1
Limonita / goethita	t*
Pirita	ł
Somatório	100

AMOSTRA CAS-EV-02-RO-11 (Arenito lítico feldspático, tufáceo).

A rocha é constituída por clastos mal selecionados, tamanho areia fina a grossa, em sua maioria, subangulosos e angulosos. Os fragmentos líticos perfazem aproximadamente 60% da rocha, predominando largamente sobre os clastos de quartzo e feldspato (plagioclásio e microclina), ambos em torno de 15-20%. Predominam fragmentos de rocha vulcanoclástica (tufos) e vulcânicas ácidas a intermediárias (riolito e traquito). Fragmentos de siltito, gnaisse e de rocha quartzosa (silexito) também foram identificados. Os clastos são soldados por pequena proporção de matriz sericítica, que perfaz aproximadamente 10% em volume da rocha. Partículas finas de opacos (hematita) e leucoxênio acham-se disseminadas na matriz ou aparecem como clastos. Zircão fragmentado ocorre como acessório.

AMOSTRA PPG-CAS-TI-10-RO-24 (matriz de Lahar ou conglomerado)

Em amostra de mão, é uma rocha de cor rosada, clasto suportada, constituída por fragmentos líticos que perfazem 90% de sua composição, imersos em matriz representada por um arenito lítico fino. Os fragmentos variam de subarredondados a subangulosos e possuem tamanho entre 2mm a 4 cm.

Os clastos consistem de fragmentos líticos, que incluem: traquitos, andesitos, tufos de cristal, tufos soldados, álcali-riolitos esferulíticos, eventualmente silicificados, ignimbritos fraturados, granito, provável granito granofírico, além de fragmentos de arenito lítico e arenito arcoseano.

A matriz (10%) é constituída por quartzo, microclina, plagioclásio sericitizado, rutilo, limonita/goethita, hematita e localmente carbonato, além de fragmentos líticos (andesito, riolito e tufo). Os cristais de matriz apresentam tamanhos entre 0,2 a 2mm e variam de subarredondados a subangulosos. Goethita/limonita e quartzo ocorrem como cimento.

Os minerais opacos estão representados principalmente por hematita criptocristalina e goethita/limonita presentes na matriz. A hematita ocorre também na forma de cristais subédricos a euédricos e às vezes parcial ou totalmente goethitizados. Raros cristais de ilmenita e magnetita também são observados.

Não há organização em lentes ou camadas, a rocha é homogênea, sugerindo tratar-se de mass flow (Cas & Wright, 1988, pp. 480).

Mineralogia/Amostra	TI-10-RO-24	
Matriz		
Feldspato Potássico	4	
Quartzo	3	
Clasto	S	
Fragmentos Líticos	90	
Ciment	°O	
Hematita	3	
Somatório	100	

# **Rochas Piroclásticas** (Estampa 4.2)

AMOSTRA PPG-CAS-CM-RO-03 (Ignimbrito pobre em finos)

Macroscopicamente a rocha mostra cor cinza esbranquiçada a levemente castanho, com fragmentos arredonciados de até 5cm que perfazem cerca de 80% da rocha. A matriz apresenta coloração ligeiramente mais escura.

Ao microscópio os litoclastos arredondados são de rocha esferulitizada, andesito a anfibólio e quartzo. A matriz tem mesma composição dos fragmentos, e estão presentes abundantes cristaloclastos de quartzo, feldspato e horneblenda idingcitizada, por vezes colados em lascas de vidro, além de algum material argiloso. Os cristais minerais variam de 2mm a 20mm. Cerca de 80% deste material ocorre com dimensões inferiores a 2mm. Quanto a matriz, lembra um pouco material "cinerítico", com algum percentual de opacos. A presença de argilas na rocha é pouco representativa.

Pela abundância de litoclastos, a amostra poderia ser confundida com arenito conglomerático lítico, sendo distinta deste pela quantidade de cristais, aspecto maciço, constituindo possivelmente porção basal do ignimbrito (Cas & Wright, 1988, pp. 479 e 484).

Mineralogia/Amostra	CM-RO-03	
Matriz muito fina - 20%		
Microclina	8	
Quartzo	6	
Goethita / Limonita	3*	
Hematita	3	
Argila	<1	
Litoclastos - 65%		
Rochas vulcânicas	45	
Quartzo (fragmentos)	18	
Cistaloclastos - 15%		
Quartzo	4	
Microclina	9	
Horneblenda (?)	3	
Argila	1	
Somatório	100	

AMOSTRA PPG-CAS-TI-10-RO-16 A (Ignimbrito com *fiammes* preservados)

Rocha de cor arroxeada, constituída por uma matriz extremamente fina e fragmentos líticos esparsos, comumente subangulosos, com dimensões variando de 2mm a 3 cm.

Ao microscópio a matriz perfaz cerca de 10% da rocha e é composta essencialmente por quartzo microscristalino e hematita criptocristalina, com sericita subordinada. Fragmentos líticos consistem de andesitos amigdaloidais (ortopiroxênio em arcos, olivina idingcitizada, muito plagioclásio, quartzo em amigdalas), com tamanho variando de 3mm a 2,5cm e fragmentos constituídos essencialmente de hematita criptocristalina com algum quartzo, sericita e clorita, correspondendo provavelmente a rocha tufácea ou siltito. Esses últimos possuem tamanho entre 1 a 6mm, às vezes são laminados e localmente apresentam uma tendência a orientação definindo bandamento na rocha.

Além dos fragmentos líticos a matriz contém cristaloclastos de quartzo, feldspato potássico, plagioclásio, anfibólio e palhetas de biotita (que mostra tendência alcalina das rochas da região), clorita e moscovita. Os grãos de quartzo são comumente subangulosos e possuem tamanho variando entre 0,06mm a 0,17mm (areia muito fina a fina). O plagioclásio está desestabilizado, apresentando como produtos de alteração sericita e epidoto.

A presença de *fiammes*, além da variedade de cristaloclastos e da organização pouco aparente mostram tratar-se de ignimbrito. Somente no maior aumento, no entanto, se observam vitroclastos preservados.

Localmente observam-se na matriz estruturas irregulares, fragmentadas e preenchidas por um material micáceo muito fino (clorita ou sericita).

Microvenulações tardias de quartzo cortam localmente a rocha.

Mineralogia/Amostra	TI-10-RO-16 A	
Matriz - 10%		
Quartzo	5	
Hematita	4	
Sericita	1	
Litoclastos - 45%		
Rochas vulcânicas	45	
Cristaloclastos - 45%		
Quartzo	20	
Feldspato Potássico	20*	
Plagioclásio		
Moscovita / Biotita / Clorita	5*	
Anfibólio	t	
Epidoto	t	
Somatório	100	

AMOSTRA PPG-CAS-TI-10-RO-25 (Ignimbrito com clastos andesíticos).

Rocha de cor arroxeada, constituída por uma matriz afanítica, onde se distinguem fragmentos líticos que atingem até 4cm e fragmentos de cristal com tamanho variando de 1mm a 0,5cm.

Microscopicamente a rocha é caracterizada por uma matriz cripto a microcristalina constituída principalmente por quartzo e em menor quantidade hematita fina, epidoto, sericita e feldspato.

Os fragmentos líticos são geralmente subangulosos (ver Foto (c)) e perfazem aproximadamente 65% da rocha. São constituídos por rocha vulcânica porfirítica que possui uma matriz com estrutura fluidal, formada por micrólitos de feldspato potássico e ripas de plagioclásio, além de hematita fina e pouco quartzo. Essa matriz envolve fenocristais de plagioclásio, orto e clinopiroxênio (?) e amígdalas preenchidas por epidoto, por vezes radial, e quartzo. Fraturas perlíticas são comuns na matriz desses fragmentos. Alguns fenocristais de plagioclásio estão bordejados por hematita e totalmente substituídos por quartzo e epidoto ou somente quartzo. Observa-se localmente um intercrescimento entre plagioclásio e hematita.

Destaca-se a presença de cristaloclastos constituídos por plagioclásio hipidiomórfico, orto e clinopiroxênio (?) incipientemente sericitizados e às vezes alterados para epidoto. Alguns cristais são bordejados por hematita e estão totalmente substituídos por quartzo, da mesma forma que os fenocristais presentes nos fragmentos líticos.

Localmente a rocha é cortada por fraturas preenchidas por hematita e goethita/limonita. Ocorrem também venulações tardias preenchidas por quartzo, localmente, apresentando textura em pente.

Além da hematita ocorrem rara ilmenita, pirita e rutilo na matriz e nos fragmentos líticos.

Mineralogia/Amostra	TI-10-RO-25	
Matriz – 20%		
Quartzo		
Feldspato Potássico	] 15*	
Epidoto	]	
Sericita		
Hematita	5	
Goethita / Limonita	t*	
Rutilo	ſ	
Pirita	ſ	
Ilmenita	r	
Cristaloclastos – 5%		
Plagoclásio,OPx e CPx	5	
Fragmentos Líticos – 75%		
Fragmentos	75	
Somatório	100	

Fraturas com impregnação de hidróxido de ferro e vênulas de quartzo são freqüentes. O quartzo desenvolve-se perpendicular às paredes das vênulas, com textura *dente de cão*. Nas amostras LT 100 NW/302SW e LT200 NW/250 SW ocorrem agregados granulares de barita associada ao quartzo nas vênulas. Esse mineral pode também aparecer em substituição a fenocristais de sanidina.

A amostra LT 100NW/302SW tem coloração mais rosada, sendo tingida por hidróxido de ferro, estando mais intemperizada. Ressalta-se o aspecto bastante fragmentado. As fraturas são preenchidas por hematita e hidróxido de ferro. É comum a ocorrência de pseudomorfos quadrados, cujas bordas contém rutilo e os núcleos caulinita/clorita. Agregados de clorita ocorrem em substituição ao feldspato, preenchendo também espaços intergranulares.

Localmente destaca-se a presença de sericita na matriz, em torno de 3%, desenvolvida às expensas de feldspato, mica conferindo às rochas tonalidade esverdeada. Pseudomorfos de fenocristais de feldspato substituídos por sericita são comuns. Cristais granulares de rutilo secundário tendem a se concentrar junto à sericita.

Feno-álcali-riolitos bandados a fluxo (Estampas 4.4, 4.5, 4.6) (São Daniel, sul da bacia, 4.4)

AMOSTRA PPG-CAS-SD-01-RO-11 (FENO-ÁLCALI-RIOLITO bandado a fluxo)

Macroscopicamente, a rocha exibe estrutura laminada, definida pela alternância de níveis milimétricos afaníticos de cor rósea e níveis mais claros, quartzosos. Esses níveis mostram-se deformados, dobrados, por vezes em colapso.

Ao microscópio, observam-se níveis quartzo-feldspáticos com textura esferulítica, alternantes com níveis de mesma composição, porém mais finos e texturalmente distintos. Os níveis apresentam-se dobrados e por vezes interrompidos, provavelmente em decorrência de movimento relativo entre camadas de material já solidificado com outras ainda em estado fluido. Estruturas de escorregamento são observadas. Nos níveis mais finos, não se observam esferulitos bem desenvolvidos de microclina, mas agregados criptocristalinos e microcristalinos, por vezes fibrosos e orientados na direção de fluxo. A preservação de vestígios do fluxo primário, que passa através dos esferulitos, mostra que esses se formaram após cessar o fluxo ativo do magma, tratando-se portanto de devitrificação.

Os espaços entre os esferulitos são ocupados por agregados de quartzo com sericita subordinada ou agregados criptocristalinos de caulinita. Algumas amígdalas são arredondadas. Também se distinguem porções esferulíticas tingidas por hidróxido de ferro e porções límpidas. Essas últimas ocorrem nas bordas de amígdalas de quartzo, onde também se desenvolvem cristalitos de microclina. Ressalta-se a presença de raros fragmentos de cristal de quartzo arredondado e microclina, esse último parcialmente substituído por quartzo e sericita.

Acessórios como leucoxênio, zircão e turmalina são identificados. Observam-se fraturas preenchidas por quartzo, opacos (hematita parcialmente hidratada) e caulinita.

AMOSTRA PPG-CAS-SD-01-RO-11A (FENO-ÁLCALI-RIOLITO com bandamento de fluxo)

Rocha com estrutura fluidal, contendo níveis quartzo-feldspáticos criptocristalinos turvos, alternantes com níveis microcristalinos. Análise difratométrica identificou quartzo, microclina, caulinita, hematita e goethita/limonita, indicando composição álcali-riolítica. O feldspato encontra-se parcialmente caulinizado. Os níveis são de modo geral descontínuos e deformados, provavelmente em decorrência de bandamento de fluxo. Prováveis estruturas de escorregamento são evidentes. Em meio à massa microcristalina, destacam-se diminutos esferulitos de microclina.

Ocorrem abundantes amígdalas de contornos irregulares ou ovóides, que são preenchidas comumente por agregados recristalizados de quartzo com sericita intergranular, além de caulinita e hidróxido de ferro. Finíssimas partículas de hematita encontram-se disseminadas em toda a rocha. Assim como os opacos, abundantes cristais finíssimos de provável leucoxênio recobrem a matriz. Presença de raros cristais de microclina parcialmente substituídos por quartzo e sericita. Fraturas são preenchidas por hidróxido de ferro e caulinita.

AMOSTRA PPG-CAS-SD-01-RO-45B (FENO-ÁLCALI-RIOLITO bandado a fluxo)

Rocha constituída predominantemente por matriz criptocristalina a microcristalina quartzofeldspática, de coloração amarelada, com estrutura fluidal, na qual se observam níveis apresentam-se descontinuos ou interrompidos, provavelmente em decorrência de movimento relativo entre camadas de material já solidificado, que se rompe, passando a se comportar como clastos, com outras ainda em estado fluido. Algumas porções da rocha são enriquecidas em hematita parcialmente hidratada.

Os fenocristais comportam-se como corpos rígidos, podendo sofrer rotação, e perfazem aproximadamente 10% em volume da rocha. Sobressaem fenocristais arredondados ou angulosos de quartzo, com tamanhos que variam de 0,15 a 0,6 mm, alguns esqueletais. Além do quartzo, ocorrem fenoscristais euédricos ou fragmentos angulosos de microclina. Os fenocristais por vezes englobam fragmentos de vidro vulcânico ou agregados criptocristalinos de caulinita bordejados por hidróxido de ferro. Estão parcialmente substituídos por quartzo.

Raramente se observam agregados de sericita fina junto ao quartzo, preenchendo vesículas. Vênulas de quartzo de várias gerações se entrecortam, provocando deslocamentos. Zircão aparece como mineral acessório.

AMOSTRA PPG-CAS-SD-01-RO-96A (FENO-ÁLCALI-RIOLITO bandado a fluxo)

Rocha de cor rósea, algo intemperizada, com estrutura fluidal e laminação irregular, caracterizada por matriz esferulítica feldspática, impregnada por hidróxido de ferro, com estrutura fluidal. Cristais pirogênicos de quartzo comportam-se como corpos rigidos e deformam a matriz.

Observam-se cavidades preenchidas por agregados de quartzo com gumos de sericita intergranulares. Nos contornos desses agregados, desenvolvem-se ripas delgadas de microclina. Os fenocristais de quartzo podem ser arredondados, ou em forma de cunha, sendo freqüentes as bainhas de corrosão. Fenocristais de microclina são parcialmente substituídos por quartzo, opacos e alguma sericita. Os opacos (hematita) ocorrem como finos cristais anedrais ou ripiformes disseminados, ou como fenocristais tabulares, idingcitizados, parcialmente hidratados e caulinizados. Aparecem ainda substuindo a microclina. Os opacos que ocorrem associados ao quartzo amigdaloidal são ripiformes, enquanto na matriz exibe seções quadradas.

(Lagoa e Tanque, centro da bacia, 4.5, 4.6)

AMOSTRA PPG-CAS-LA-RO-71B (FENO-ÁLCALI-RIOLITO bandado a fluxo, silicificado e sericitizado)

Rocha cinza, porfirítica, com fenocristais subédricos a euédricos de feldspato potássico, originalmente sanidina (seção basal losangular), com dimensões variando de 0,1 a 3mm, e anédricos a subédricos de quartzo, por vezes esqueletais, de dimensões em média de 0,3mm. Raramente se observam pseudomorfos de fenocristais de feldspato totalmente substituídos por sericita ou com intercrescimentos gráficos. Fenocristais de clinopiroxênio e de horneblenda também são comuns. Seção basal de clinopiroxênio alterado a clorita. Vesículas muito deformadas, em torno dos fenocristais, mostram grande fluidez da rocha, fato pouco comum para rochas vulcânicas félsicas.

A matriz é essencialmente quartzo-sericítica, com marcante estrutura fluidal. Apesar da devitrificação e alteração hidrotemal, são preservadas fraturas perlíticas. Ao longo dos planos de fraturas, desenvolve-se quartzo axiolítico, que contornam agregados quartzo-sericíticos microcristalinos, com abundantes agulhas de hematita.

Cristais granulares muito finos de rutilo/leucoxênio ocorrem disseminados, mas tendem a formar trilhas nos planos das fraturas circulares. Essas estruturas são geralmente achatadas e alongadas na direção do fluxo.

Os opacos ocorrem disseminados, principalmente em cristais aciculares de granulação muito fina, associados à sericita. Zircão ocorre como acessório.

Fraturas posteriores cortam a estruturação da rocha, sendo preenchidas por quartzo cripto a microcristalino, além de provável calcedônia.

Álcali-riolitos com clinopiroxênio (aegerina/augita) e anfibólio sódicos ocorrem apenas em suites hiperalcalinas, sendo denominados comenditos e panteleritos, e tem baixa viscosidade devido ao efeito do sódio e do potássio em baixar o grau de polimerização de SiO<sub>2</sub>.

Mineralogia/Amostra	LA-RO-71B	
Matriz – 85 %		
Quartzo	45	
Sericita	30	
Hematita	6	
Goethita / Limonita	<b>4</b> *	
Rutilo	t	
Leucoxênio/ilmenita	t	
Zircão	t	
Pirita	t	
Fenocristais – 15 %		
Feldspato Potássico	6	
Quartzo	5	
Horneblenda, CPX	4	
Somatório	100	

\*: percentagem estimada em conjunto.

AMOSTRA PPG-CAS-TQ-RO-41 (FENO-ÁLCALI-RIOLITO)

Rocha de cor rósea, algo intemperizada, com textura pseudo-fragmentada, anteriormente tida como lápili-tufo lítico e descrita como de matriz afanítica e fragmentos líticos comumente angulosos, mal selecionados, com dimensões variáveis de 2 mm até 1-2 cm.

A devitrificação resulta no desenvolvimento de textura felsítica caracterizada por abundantes esferulitos, e o intercrescimento destes, quando presentes em grande densidade, resulta na textura pseudo-fragmentada. Ao microscópio, tem-se a "matriz" constituída de quartzo e microclina com textura esferulítica fina, com "fragmentos" cognatos angulosos e arredondados, de rocha também esferulítica, similar aos demais riolitos descritos nesta área.

Análise difratométrica identificou 1% de plagioclásio, mas não foi possível distinguí-lo ao microscópio.

Possue abundantes cavidades irregulares, raramente ovóides, que são preenchidas por agregados de quartzo fino, suturado. Pequena proporção de sericita ocorre junto ao quartzo preenchendo amígdalas ou em substituição aos fenocristais de feldspato.

A rocha possui fragmentos angulosos de cristais quartzo, que perfazem 2% e pseudomorfos de feldspato (1%) substituídos por sericita, caulinita e algum quartzo.
AMOSTRA PPG-CAS-TQ-RO-128 A e B (FENO-ALCALI-RIOLITO bandado a fluxo)

Rocha de cor rósea, com estrutura fluidal e finamente laminada, com intercalações disformes de rocha porfirítica, cinza claro, com matriz afanítica, na qual destacam-se esferulitos centimétricos.

A estrutura laminada, vista ao microscópio, é definida pela alternância de níveis mais ou menos quartzosos e feldspáticos. Os níveis mais feldspáticos caracterizam-se por arranjo fibroso do feldspato, cujas fibras se desenvolvem normais a estrutura de fluxo (textura axiolítica), enquanto nos níveis mais quartzoso, a textura pode ser felsítica ou esferulítica fina. Esses níveis são normalmente dobrados, por vezes em colapso, sugerindo tratar-se de fluxo de lava. As intercalações distorcidas, por vezes em colapso, sugerem uma mistura de lavas em estado plástico. A porção cinza tem características de um álcali-riolito, mas pode ser uma porção diferenciada do mesmo material. Esferulito centimétrico pode ter sido originalmente porção de vidro já resfriado, parece estar sendo digerida pelo outro magma, também sugerindo mistura ou o esferulito fragmentado, se desenvolveu anteriormente ou durante o processo de mistura.

Os fenocristais de feldspato são euédricos com formas esqueletais, com geminações Carlsbad ou possuem inclusões de vidro, e perfazem cerca de 5%. Estão parcialmente alterados a sericita e quartzo e bordejados por hidróxido de ferro. Também o feldspato da matriz mostra incipiente sericitização. Há ainda fenocristais de quartzo.

Amígdalas preenchidas com sericita são abundantes. Observam-se vênulas de quartzo cortando a estruturação geral da rocha, indicando que são tardias. Fraturas com impregnação de hidróxido de ferro também são observadas.

#### AMOSTRA FP 707-24 a 25M (ÁLCALI-RIOLITO)

A amostra macroscopicamente consiste de fragmentos de sondagem rotopercussiva, selecionados em intervalo métrico segundo representatividade média e diversidade. Apresentase com cor levemente castanha, com alternância de níveis de granulometria fina (felsíticos) e níveis de esferulitos, mais grossos. Localmente há formação de nódulos gerados por silicificação, guardando ainda alguns relictos de mica e microclina em seu interior. Fragmentos de siltito e clorita ocorrem associados.

A completa devitrificação da rocha, com desenvolvimento de esferulitos milimétricos a centimétricos, mascara suas feições originais, dificultando a distinção entre tufo e lava álcaliriolítica. O aspecto homogêneo e a ausência de estruturas típicas de rochas piroclásticas sugere tratar-se de lava.

Mineralogia/amostra	FP-707
	24 a 25 m
Nódulos	95
Quartzo	88
Sericita / Moscovita	3*
Microclina	2
Clorita	1
Limonita / goethita	1*
Siltito	5
Quartzo	2
Clorita	2
Sericita / Moscovita	1*
Microclina	Г
Somatório	100

AMOSTRA FP-711 6 A 8m (ÁLCALI-RIOLITO)

A amostra macroscopicamente apresenta-se com cor levemente castanha e granulometria grossa, com textura esferulítica (esferulitos de aproximadamente 0,5mm), localmente há formação de nódulos de até 30mm.

A completa devitrificação da rocha, com desenvolvimento de esferulitos milimétricos a centimétricos, mascara suas feições originais. O aspecto homogêneo sugere tratar-se de lava.

兹

3

Mineralogia/amostra	FP-711
-	6 a 8 m
Nódulos	100
Quartzo	91
Microclina	5
Sericita / Moscovita	2*
Limonita / goethita	1*
Pirita	1
Somatório	100

\*: percentagem estimada em conjunto.

AMOSTRA PPG-CAS-TQ-RO-137 (RIOLITO bandado a fluxo)

Rocha porfirítica de cor rósea, algo intemperizada, com estrutura fluidal e laminação evidentes. Finas fraturas subparalelas são transversais à laminação, mas não cortam fenocristais.

A laminação é evidenciada por níveis criptocristalinos e microcristalinos alternantes. Esses últimos têm textura felsítica ou axiolítica, localmente desenvolvendo-se esferulitos. Cristais fibrosos de feldspato e quartzo intercrescidos desenvolvem-se perpendicularmente à direção de fluxo. Opacos alterados a goethita/limonita ocorrem com aspecto pulverulento ou como micrólitos, concentrados nos níveis criptocristalinos, marcando a direção de fluxo.

A composição mineralógica da rocha, definida em análise difratométrica, consiste de quartzo (predominante), microclina e plagioclásio (provável andesina) em proporções equivalentes, além de provável hematita.

Os fragmentos de cristais são principalmente de feldspato (microclina e plagioclásio), perfazendo cerca de 20%, sendo também observados alguns cristais euédricos. Eles se comportam como corpos rígidos durante a compactação em estado fluidal, deformando a matriz e sendo rotacionados (Foto 4.9H). Alguns tendem a se orientar na direção de fluxo. É comum identificar fenocristais de opacos, provavelmente pirita, que perfazem cerca de 2%.

Fraturas submilimétricas com impregnação de opacos/hidróxido de ferro ocorrem transversais ou paralelas à laminação. Fraturas milimétricas preenchidas com quartzo também ocorrem transversalmente à laminação e, em suas bordas, tem-se impregnação pelo material opaco.

(Tirania, norte da bacia)

AMOSTRA PPG-CAS-TI-09-RO-28 (FENO-ÁLCALI-RIOLITO)

Rocha de cor rósea, algo intemperizada, com matriz afanítica, na qual sobressaem nódulos de cor mais clara.

Possui composição álcali-riolítica, sendo constituída de matriz a quartzo e microclina, configurando textura felsítica. Micrólitos de feldspato tendem a se alinhar, evidenciando tênue bandamento de fluxo. Agregados criptocristalinos a microcristalinos de hematita ocorrem intergranularmente. Observam-se algumas concentrações de hematita associada a sericita. Finas palhetas de sericita ocorrem de forma subordinada na matriz e são provavelmente advindas da alteração do feldspato.

Sobressaem esparsos cristais subédricos e euédricos de feldspato potássico parcial a totalmente alterados a sericita, quartzo, caulinita e hidróxido de ferro. Cristais subédricos e anédricos de quartzo, por vezes embainhados, também se destacam. Rara hematita está presente como cristais anédricos. Em alguns cristais de feldspato, observam-se orlas que se distinguem do restante da matriz pela ausência de hematita e que em amostra de mão assume aparência de nódulos preservados.

Esparsas amígdalas irregulares são preenchidas por quartzo, sericita e hematita.

Ressalta-se ainda a ocorrência de raras fraturas submilimétricas preenchidas com hematita.

Mineralogia/Amostra	TI-09-RO-28		
Matriz	Matriz		
Quartzo	58		
Felspato Potássico	25		
Hematita	10		
Sericita	3		
Rutilo	t		
Zircão	t		
Fenocristais			
Quartzo	2		
Felspato Potássico	2		
Hematita	t		
Cavidad	es		
Quartzo	t		
Sericita	t		
Hematita	t		
Somatório	100		

## Feno-álcali-traquitos (Estampas 4,7 e 4.8)

## (Lagoa, Tanque e Tirania, centro e norte da bacia)

AMOSTRA CAS-LA-RO 147 (FENO-QUARTZO-ÁLCALI-TRAQUITO a FENO-ÁLCALI-RIOLITO)

Rocha de cor arroxeada, porfirítica, ressaltando-se a presença de níveis milimétricos diferenciados pela maior quantidade de cavidades irregulares.

Ao microscópio, observa-se matriz esferulítica bem desenvolvida, formada de agregados fibrorradiais de quartzo e microclina intercrescidos. Cristais granulares ou lamelares de hematita muito fina ocorrem entre os esferulitos ou intercrescidos com as fibras.

A rocha contém principalmente fenocristais subédricos ou euédricos de feldspato, tingidos por hidróxido de ferro, e com granulação cerca de 1-2mm. Pelo menos parte era originalmente sanidina como observado em cristal de seção basal losangular e cristal com intercrescimentos gráficos, hoje uma pertita de albita e microclina, por resfriamento térmico. Fenocristais de quartzo subédricos a euédricos, por vezes com lacunas de cristalização (esqueletais) ocorrem subordinadamente, assim como fenocristais de pesudomorfos de provável ferromagnesiano (com contornos de goethita e núcleos de argila).

A rocha possui abundantes cavidades irregulares preenchidas com quartzo, além de pequena proporção de hematita e raro plagioclásio ripiforme. As cavidades são as vezes coalescentes.

Zircão e rutilo ocorrem como acessórios.

Mineralogia/Amostra	LA-RO-147	
Matriz		
Quartzo	60	
Microclina	20	
Hematita	3	
Goethita / Limonita	į*	
Rutilo	t	
Zircão	t	
Fenocristais		
Feldspato	9	
Quartzo	1	
Ferromagnesianos	ŧ	
Cavidades		
Quartzo	7	
Plagioclásio	t	
Hematita	t	
Somatório	100	
	······································	

#### AMOSTRA PPG-CAS-TQ-RO-119 (FENO-QUARTZO-ÁLCALI-TRAQUITO a FENO-ÁLCALI-RIOLITO)

Rocha porfirítica, com matriz afanítica, de coloração rósea. Os fenocristais predominantes são de feldspato róseo, em sua maioria, euédricos, com dimensões em torno de 2-3mm. Observam-se também fenocristais de opacos, provavelmente pirita. Ressalta-se a ocorrência de "natas" de material microcristalino que se solidificaram primeiramente, que poderiam ser confundidas com *fiammes*, porém não tem terminações esfiapadas.

Ao microscópio, a matriz exibe textura esferulítica, formada por cristais fibrorradiais de microclina e quartzo intercrescidos. Agregados disformes ou aciculares de hematita, perfazendo aproximadamente 5% em volume da rocha, ocorrem intergranularmente aos esferulitos. Finas palhetas de mica esverdeada, provável clorita, em associação com sericita, ocorrem em substituição ao feldspato, atingindo cerca de 1%.

Destacam-se nessa matriz fenocristais de feldspato, quartzo e opacos, com predomínio do primeiro. Os fenocristais de quartzo perfazem aproximadamente 2% e podem ser arredondados ou euédricos, por vezes esqueléticos. As suas dimensões são em torno de 0,2mm. Os fenocristais de feldspato atingem cerca de 7%, sendo comumente euédricos, em cristais tabulares, com geminações Carlsbad (provável sanidina). Mais raramente são observados também microfenocristais de magnetita.

Amígdalas irregulares constituem menos de 1% em volume da rocha, e são preenchidas por agregados granulares de quartzo, além de sericita, caulinita e plagioclásio.

AMOSTRA CAS-TQ-RO 121 (FENO-QUARTZO-ÁLCALI-TRAQUITO bandado a fluxo, metassomatizado)

Rocha cinza esbranquiçada, porfiritica, com fenocristais de feldspato róseo em matriz afanítica com estrutura fluidal.

Possui matriz microcristalina essencialmente de quartzo e sericita, com estrutura fluidal evidenciada principalmente por trilhas de opacos. Vênulas submilimétricas (< 0,1mm) de quartzo com textura axiolítica, juntamente com os opacos, desenham estruturas denominadas fraturas perlíticas. Essas feições ressaltam estruturas preexistentes.

Sobressaem raros fenocristais anédricos ou euédricos de quartzo, comumente fragmentados, por vezes exibindo bainhas de corrosão. Fenocristais anédricos ou euédricos de feldspato perfazem cerca de 5% e são parcial a totalmente lixiviados na preparação da lâmina. Observam-se pseudomorfos de fenocristais de feldspato totalmente substituido por quartzo ou caulinita criptocristalina.

Cavidades irregulares preenchidas por quartzo ocorrem de forma esparsa.

As características mineralógico-texturais da rocha original foram mascaradas pela alteração, o que dificulta sua caracterização. Considerando a presença de fraturas perlíticas, sugere-se tratar de lava.

AMOSTRA PPG-CAS-TI-09-RO-05A (FENO-ÁLCALI-TRAQUITO)

Rocha de cor rosada, algo intemperizada, com estrutura fluidal e laminação evidente. A tonalidade avermelhada da rocha deve-se à impregnação por goethita/limonita, cujo tingimento dificulta um pouco a identificação dos minerais ao microscópio. Apresenta fenocristais somente de feldspato potássico, quebrados nas bordas ou arredondados, resultante da digestão com vidro, evidenciando que trata-se de lava, sendo portanto herdados de camara magmática. Localmente observa-se um piroxênio/anfibóio idicitinzado (oxidado) e zeolitas em fraturas precoces, "tardi a pós-vulcânica", pois ainda há fonte de calor.

É caracterizada por níveis quartzo feldspáticos com textura esferulítica que se alternam com níveis felsíticos de granulação mais fina. Finíssimos cristais granulares de hematita ocorrem disseminados na matriz. Cavidades irregulares preenchidas por quartzo, sericita/clorita e alguma hematita são mais abundantes nos níveis esferulíticos. Nos níveis mais finos as cavidades são alongadas e por vezes coalescentes, formando lentes descontínuas, que evidenciam a estrutura de fluxo. Cristais pirogênicos de feldspato subédrico ou anédrico ocorrem preferencialmente nos níveis esferulíticos.

De modo geral esses níveis são microdobrados atectonicamente, num processo de *slumping*, tendo-se dobramentos apertados e deitados, com plano axial paralelo a direção do fluxo da lava. A estruturação da rocha é ainda afetada por fraturas comumente preenchidas com barita, quartzo e hematita/goethita, além de pequena proporção de clorita.

Mineralogia/Amostra	TI-09-RO-5A	
Matriz		
Quartzo	85*	
Feldspato Potássico		
Hematita / Goethita / Limonita	10*1	
Rutilo	t	
Leucoxênio	t	
Zircão	t	
Cristais		
Feldspato Potássico	1	
Pirobólio Idingcitizado	1	
Cavidades / Fraturas		
Quartzo	3	
Sericita	t	
Hematita	t	
Clorita	t	
Caulinita	t	
Zeolitas	t	
Somatório	100	

AMOSTRA PPG-CAS-TI-09-RO-19 (FENO-QUARTZO-ÁLCALI-TRAQUITO porfirítico)

Rocha de cor rósea-arroxeada, algo intemperizada, composição álcali-riolítica, caracterizada por matriz com intercrescimentos de quartzo e microclina, configurando textura esferulítica, resultante de devitrificação. Os núcleos dos esferulitos consistem geralmente de sericita/clorita, que parece advir da alteração de gérmen feldspático. Agregados intergranulares felsíticos são comuns. A hematita também ocorre disseminada na matriz, exibindo finíssimos cristais granulares ou ripiformes. Os acessórios presentes incluem zircão, rutilo e leucoxênio.

A rocha possui abundantes cavidades irregulares, totalmente preenchidas por quartzo e hematita granular parcialmente substituída por goethita.

Sobressaem pseudomorfos euédricos de feldspato potássico, parcial a totalmente substituído por caulinita, sericita e, e menor proporção, goethita/limonita. Muitos deles foram lixiviados. Cristais anédricos de quartzo ocorrem esparsos, em menor quantidade.

Mineralogia/Amostra	TI-09-RO-19	
Matriz		
Quartzo	37	
Feldspato Potássico	25	
Clorita / Sericita	10*	
Hematita / Goethita / Limonita	3*	
Rutilo	t	
Leucoxênio	ţ	
Zircão	t	
Cristais		
Feldspato Potássico	5	
Quartzo	t	
Cavidades		
Quartzo	15	
Hematita	5	
Somatório	100	

### **R.** Vulcânicas Intermediárias a Máficas (Estampas 4.9 e 4.10)

Cas & Wright (1988, página 18) usam o termo andesito para o campo chamado por Streickeisen (1979) e outros de latito-andesito. Quando plagioclasio é o único fenocristal félsico presente junto com clinopiroxênio, a rocha pode ser chamada de andesito ou basalto dependendo da quantidade total de máficos. Nestas lâminas nem sempre é fácil estabelecer a moda dos máficos, pois estes estão amiúde alterados; localmente a classificação textural é indicativa de basalto, já que andesitos teoricamente tem cristais mais equidimensionais e zonados. Relações de campo entretanto sugerem tratar-se de andesitos e seria necessária análise química das rochas.

(Campo do Meio e Tirania, borda leste e norte da bacia)

AMOSTRA PPG-CAS-CM-RO-50 (Basalto / andesito com poucos fenocristais)

Caracteriza-se por presença de matriz muito fina constituída por micrólitos de plagioclásio, hematita e mica com dimensões variando de 0,035mm a 0,38mm. Os feldspatos apesar de raros são os que alcançam as maiores dimensões. Localmente apresentam textura de fluxo.

Observam-se fenocristais máficos idingcitizados, com talco preservado dentro sugerindo tratar-se de ortopiroxênio ou olivina. A observação de seções basais de alguns destes fenocristais sugere tratar-se de ortopiroxênio. Ocorrem ainda fenocristais máficos hoje transformados em clorita e quartzo, com resquícios de tremolita, e por vezes mesmo argilizados. A grande quantidade de material originalmente vítreo e o resfriamento brusco sugerido pelos microfenocristais da matriz ("rabos de andorinha") indicam condições de

formação em corpos aquosos ou intrusão rasa em sedimentos inconsolidados saturados em água.

As cavidades ocorrem com formas irregulares em sua maior parte e são preenchidas total ou parcialmente por clorita e quartzo (apresenta textura *dente de cão*), podendo ocorrer também carbonato. Quanto a este, apresenta-se pouco frequente talvez devido ao grau de alteração das amostras. Ocorrem dispersos preenchendo fraturas.

AMOSTRA PPG-CAS-TI-08-RO-08 (Basalto)

Rocha de cor cinza esverdeado, porfirítica, com matriz fina, na qual sobressaem esparsos fenocristais anédricos de quartzo e mais abundantes pseudomorfos de ferromagnesiano à goethita e biotita, que parece ser clinopiroxênio quando observado com nicóis cruzados, além de raros fenocristais de feldspato potássico. A matriz é constituída de ripas finas de plagioclásio, com agregados de biotita/hidróxido de ferro pseudomorfoseando cristais ripiformes e opacos intergranulares.

A textura geral é subofitica, com fenocristais de clinopiroxênio desviando cristais de plagioclásio, e microlitos mostrando textura fluidal, sugerindo tratar-se de *plug / sill* próximo à superficie. Resfriamento da rocha deve ter sido mais lento, uma vez que não há fenocristais esqueléticos. São abundantes as amígdalas arredondadas ou irregulares, preenchidas com agregados fibrosos de provável biotita associada à goethita, além de pequena proporção de clorita e quartzo, e vesículas com preenchimento sucessivo de quartzo, resultando em textura semelhante à substituição de calcita nos silexitos.

Os opacos consistem essencialmente de magnetita granular fina parcialmente substituída por finas lamelas de hematita, caracterizando martita. Cristais granulares de rutilo e leucoxênio são abundantes e ocorrem associados aos opacos.

Destaca-se a presença de abundantes fraturas preenchidas com magnetita, parcialmente substituída por hematita e goethita/limonita. Vênulas de quartzo também são observadas. Localmente se observa uma região brechada, onde se mistura fragmentos de rocha com esse material criptocristalino, cimentados por quartzo e opacos.

Cristais finos de zircão subédrico ocorrem como acessório.

Mineralogia/Amostra	TI-08-RO-08	
Matriz		
Plagioclásio	50	
Biotita + Hidróxido de Fe	25*	
Goethita / Limonita		
Rutilo / Leucoxênio	5*	
Magnetita	3	
Quartzo	t	
Hematita	t	
Zircão	t	
Fenocristais		
Biotita / Goethita (CPx)	10*	
Quartzo	5	
Cavidades		
Quartzo	t	
Clorita	t	
Somatório	~100	

\*: percentagem estimada em conjunto, para pseudomorfos.

AMOSTRA PPG-CAS-TI-10-RO-12 (Andesito ou Basalto)

Rocha de cor arroxeada, caracterizada pela presença de ripas de plagioclásio em matriz ferruginosa.

÷.

æ

Ao microscópio a rocha é constituída por matriz composta essencialmente de hematita criptocristalina que envolve ripas de plagioclásio fracamente alteradas a sericita e raro epidoto, além de pseudomorfos de um mineral ferromagnesiano, em geral subédricos, e constituídos principalmente por clorita e sericita, com menor quantidade de hematita, goethita/limonita e raro epidoto secundário. Estes pseudomorfos de fenocristais de olivina, hoje serpentinizados, e de ortopiroxênio, hoje talco, são esqueletais. A matriz apresenta microfenocristais de mesma constituição (máficos idingcitizados) e de plagioclásio, em leques, sugerindo textura típica de formação em corpo aquoso ou intrusão rasa em sedimentos saturados em água.

Além de hematita criptocristalina ocorrem também raros cristais de martita, ilmenita e pirita.

Sobressaem na rocha amígdalas preenchidas por zeólitas e clorita fibrorradiada e criptocristalina, plagioclásio, epidoto, quartzo, rutilo e anfibólio. Em algumas amígdalas o plagioclásio possui a tendência de crescimento perpendicular às paredes das cavidades, formando drusas.

Mineralogia/Amostra	TI-10-RO-12	
Matriz		
Hematita	28	
Goethita / Limonita	t	
Ilmenita	r	
Pinta	r	
Martita	Г	
Fenocristais		
Plagioclásio	20	
Pseudomorfo (Clor/Ser)	2*	
Cavidades		
Plagioclásio	30	
Clorita	10	
Quartzo	8	
Anfibólio	1	
Epidoto	1	
Rutilo	r	
Somatório	100	

\*: percentagem estimada em conjunto, para olivina (?).

AMOSTRA PPG-CAS-TI-09-LT 2000/300SE (Andesito ou Basalto)

Rochas de coloração cinza a arroxeada, com matriz afanítica ferruginosa, na qual sobressaem fenocristais ripiformes de plagioclásio e amígdalas esféricas ou irregulares.

Ao microscópio, observa-se matriz constituída essencialmente de hematita cripto a microcristalina, em associação a goethita/limonita, e ripas finas de plagioclásio, por vezes com aspecto fibroso. Textura da matriz é igual a de TI-10-RO-12, só que com menos máficos (menos magnesiana).

Sobressaem nessa matriz fenocristais ripiformes de plagioclásio fracamente alterados e epidoto e sericita. Pequena proporção de hematita também ocorre como fenocristais tabulares. É comum a ocorrência de feldspato potássico intercrescido com o plagioclásio. Microfenocristais de anfibólio (?) ocorrem inclusos em fenocristais de plagioclásio. Microfenocristais são também parte integrante da matriz e mostram resfriamento rápido, sendo esqueletais. Plagioclásio é mais bem formado e ocorre em fibrorradiados finíssimos, por vezes formando "rabos de andorinha", típicos de entrada de água durante a cristalização, sugerindo formação em corpo aquoso.

De modo geral, as rochas possuem amígdalas esféricas ou irregulares, que perfazem de 5 a 10% em volume da rocha e são comumente preenchidas por epidoto, sericita/clorita, quartzo, além de proporções menores de hematita, titanita e algum feldspato. O epidoto tende a ocorrer nas bordas das amígdalas, sendo observadas algumas com núcleos vazios.

Mineralogia/Amostra	TI-09 LT 2000/300SE	
Matriz		
Plagioclásio	30	
Hematita	40*	
Goethita / Limonita	*	
Rutilo	ţ	
Titanita	t	
Zircão	1	
Fenocristais		
Plagioclásio	15	
Feldspato Potássico	1	
Pseudomorfo (Clor/Ser)	8	
Hematita	t	
Cavidades		
Quartzo	2	
Epidoto	2	
Hematita	1	
Sericita / Clorita	t	
Somatório	99	

2.5

#### Produtos de Alteração Hidrotermal

## Álcali-riolitos alterados hidrotermalmente (Estampa 4.11) (São Daniel, Mineropar e Lagoa, sul e centro da bacia)

AMOSTRA LT 100NW/270-300SW (FENO-ÁLCALI-RIOLITO com textura pseudo-fragmentar por silicificação/sericitização não pervasiva)

A amostra tem coloração rósea, com "matriz afanítica" e "fragmentos angulosos", com dimensões variáveis desde submilimétricas até 6 mm. A amostra encontra-se muito intemperizada.

Microscopicamente, a rocha exibe aspecto pseudo-fragmentado, identificado já que a composição dos "fragmentos líticos" e "matriz" é similar, sendo constituída de vidro devitrificado a microclina e quartzo, perfazendo aproximadamente 90 % em volume e fenocristais fragmentados de quartzo e feldspato (10%). Ocorre também pequena quantidade de sericita na "matriz". Alguns pirocristais cortam o "limite fragmento-matriz".

Os cristais possuem dimensões variando de 0,1 a 0,9mm, podendo ser angulosos ou subarredondados. A maioria dos fragmentos de cristais é de quartzo anguloso, sendo encontrados alguns bipiramidais. Cristais euédricos de feldspato e quartzo ocorrem eventualmente, por vezes embainhados. Nas porções mais silicificadas os fenocristais de feldspato são substituidos por quartzo. As porções mais preservadas contêm abundantes cristais granulares disseminados de provável rutilo muito fino (0,008mm).

AMOSTRA PPG-CAS-LA-RO-192 (FENO-ÁLCALI-RIOLITO com textura pseudo-fragmentar por silicificação/sericitização não pervasiva)

Rocha cinza esverdeado, algo intemperizada, com textura pseudo-fragmentar e porfiritica, constituída de "matriz" microcristalina fluidal formada de quartzo, pouca microclina e agregados de finas palhetas de sericita e biotita, que por vezes forma filmes orientados. Agregados de microclina bordejados por quartzo, de granulação mais grossa que a da matriz, parecem representar cavidades irregulares preenchidas por esse material ou ainda fraturas perlíticas A textura pseudo-fragmentar gera confusão com feições de textura vitriclástica e com litoclastos.

Estes pseudofragmentos permitem a reconstituição dos eventos de alteração hidrotermal não totalmente pervasiva, que não "digeriu" a rocha totalmente. São porções de riolito perlítico, eventualmente com abundantes cavidades, com dimensões variando de poucos milímetros até centímetros, em formas angulosas ou arredondadas, alongadas na direção de fluxo, que lembram fragmentos líticos. A sequência consiste em:

- 1. Cloritização / Sericitização: vidro vulcânico de composição riolítica já perlitizado é alterado para clorita, sericita e quartzo (entrada de alumínio),
- 2. Potassificação / Propilitização: alteração com microclina e mineral romboédrico (por vezes apenas vazios romboédricos: barita ?) menos pervassiva; cavidades são preenchidas por este material,
- 3. Silicificação: vênulas de quartzo atravessam a matriz, fragmentos e cristais pirogênicos, circundam romboedros; entrada de sílica causa textura pseudopiroclástica.

Os cristais pirogênicos são predominantemente de feldspato potássico parcial a completamente sericitizado e/ou caulinizado, em geral subédricos. Cristais de quartzo, por vezes esqueletais, ocorrem em menor proporção. Ambos estão comumente fraturados.

Os minerais acessórios incluem zircão e rutilo/leucoxênio. Opacos são raros. O rutilo é relativamente abundante, ocorrendo em finos cristais granulares disseminados.

Mineralogia/Amostra	LA-RO-192	
Matriz silicificada		
Quartzo	50	
Sericita	6	
Biotita	3	
Rutilo / Leucoxênio	1*	
Microclina	t	
Goethita / Limonita	į*	
Fenocristais		
Feldspato Potássico	4	
Quartzo	1	
Cavidades		
Quartzo	4	
Microclina+ "romboedros"	1	
Matriz cloritizada		
Fragmentos	30	
Somatório	100	

AMOSTRA PPG-CAS-SD-01-RO-96B (Brecha hidráulica de composição riolítica).

Variação da AMOSTRA PPG-CAS-SD-01-RO-96A, porém alterada hidrotermalmente por silicificação, de maneira não totalmente pervassiva. A "digestão" não é completa, sobrando resquícios da rocha original, que era uma lava devitrificada. A rocha é a seguir brechada, possivelmente por fraturamento hidráulico, com cimento quartzo-ferruginoso.

Resultado final é uma rocha constituída de matriz afanítica quartzo-ferruginosa e abundantes fragmentos líticos angulosos, mal selecionados, com dimensões milimétricas a centimétricas, atingindo desde 2 mm até mais de 4 cm. Ao microscópio, a silicificação mascara as feições originais da rocha que constitui estes fragmentos líticos, mas pode-se dizer que era uma rocha vesicular, de mesma composição que AMOSTRA PPG-CAS-SD-01-RO-96A. Fragmentos líticos de eventos hidrotermais anteriores também são preservados.

Observa-se um cimento essencialmente de agregados microcristalinos de quartzo suturado e abundante hematita parcialmente substituída por goethita/limonita. São freqüentes as cavidades irregulares preenchidas por quartzo nas bordas e óxido/hidróxido de ferro no núcleo. Algumas delas têm núcleos vazios. Os opacos ocorrem na matriz, principalmente como massas irregulares, às vezes preenchendo fraturas. Brechas de fraturamento hidráulico (Estampas 4.12 e 4.13)

Utilizada a nomenclatura de Cas & Wright (1989, p.481).

(São Daniel, sul da bacia, 4.12)

AMOSTRA PPG-CAS-SD-01-RO-14A (Brecha de fraturamento hidráulico silicificada)

Macroscopicamente a rocha é acinzentada, fragmentada, com material ferruginoso entre os fragmentos.

Esses fragmentos, vistos ao microscópio, consistem de rochas quartzo-feldspáticas intensamente sericitizadas, cimentadas por hematita. A hematita contém inclusões de magnetita, sugerindo ter se formado a partir da oxidação deste mineral. Goethita/limonita ocorrem associadas. Sobressaem raros fragmentos angulosos de quartzo,que atingem no máximo 0,15 mm de tamanho, bem como seções quadradas de opacos (hematita pseudomorfa de magnetita) e pseudomorfos de feldspato sericitizado. A mineralogia obtida por análise difratométrica consiste de quartzo, hematita, moscovita, microclina e provável anatásio.

Cavidades irregulares são preenchidas por drusas de quartzo e hematita. Vale ainda mencionar a ocorrência muito frequente de rutilo. O processo de alteração nessa amostra foi intenso, incluindo processos de sericitização, oxidação com formação de hematita e silicificação. Foi também observada rara turmalina neoformada.

AMOSTRA PPG-CAS-SD-01-RO-41 A (Brecha de fraturamento hidráulico)

Rocha afanítica de coloração rósea, com aspecto fragmentado. Fragmentos líticos angulosos com dimensões milimétricas a centimétricas, atingindo até 6cm, são soldados por material rico em ferro, cuja coloração é mais avermelhada. Vênulas de quartzo são abundantes, mostrando preenchimento da borda para o centro.

Ao microscópio, observam-se fragmentos angulosos e "cacos" que se encaixam, com tamanhos variando de 1cm a mais de 5cm, cimentados por drusas de quarto, além de hidróxido de ferro e vidro misturados à caulinita. Predominam fragmentos de riolito devitrificado, com matriz microcristalina quartzosa, onde o quartzo tem aspecto cominuido. Finíssimas palhetas de sericita ocorrem intergranulares. Alguns fragmentos são bastante tingidos por hidróxido de ferro.

AMOSTRA PPG-CAS-SD-01-RO-41 B (Brecha de fraturamento hidráulico silicificada)

Brecha hidrotermal, com fragmentos de composição riolítica (?) com dimensões milimétricas a centimétricas e cor amarelada, em cimento avermelhado. A textura *jigsaw*, onde os clastos se encaixam como peças de quebra-cabeça, é típica deste tipo de brecha, resultando de quebra da rocha original por pressão dos fluidos passantes.

Ao microscópio, a rocha é constituída predominantemente por fragmentos angulosos de tamanhos variados (0,4 mm à > 2cm), que consistem de riolitos afaníticos devitrificados. Análise difratométrica identificou a presença de quartzo, caulinita e microclina. Os fragmentos são cimentados por matriz microcristalina essencialmente quartzosa, com aspecto cominuido, tendo alguma sericita e microclina subordinadas.

Observam-se vênulas cortando matriz e fragmentos, indicando que são posteriores ao brechamento, onde o quartzo desenvolve-se perpendicular às paredes, mostrando preenchimento da borda para o centro. A rocha possui também cavidades irregulares preenchidas por drusas de quartzo nos bordos e núcleos de caulinita. Vestígios de quartzo drúsico são superimpostos pela recristalização.

## (Tirania, norte da bacia, 4.13)

AMOSTRA PPG-CAS-TI-08-RO-06A (Brecha hidrotermal)

Rocha algo intemperizada, de cor avermelhada, caracterizada por abundantes fragmentos angulosos milimétricos a centimétricos, atingindo mais de 4 cm, contornados por matriz ferruginosa.

Ao microscópio, observa-se rocha fragmentada, constituida predominantemente de fragmentos monolíticos de provável tufo álcali-riolítico. São "estilhaços" angulosos, com tamanho médio de cerca de 1 cm, envolvidos por fragmentos menores, submilimétricos, de mesma composição e soldados por massa criptocristalina de hematita, parcialmente substituida por goethita, onde se individualizam cristais finos de hematita e rara pirita. Por analogia com material de sondagem deve ter sido magnetita.

Os fragmentos líticos possuem matriz esferulítica, na qual sobressaem fenocristais de quartzo e feldspato potássico. Cavidades irregulares preenchidas com quartzo são abundantes. Localmente se observam venulações de quartzo.

Mineralogia/Amostra	TI-08-RO-06A	
Matriz		
Hematita	5	
Goethita / Limonita	t*	
Rutilo / Leucoxenio	t*	
Pirita	Г	
Ilmenita	ſ	
Fragmentos I	Líticos	
Fragmentos Líticos	95	
Somatório	100	
	·····	

AMOSTRA PPG-CAS-TI-09-RO-05B (Brecha de fraturamento hidráulico, com episódios superimpostos)

Coletada ao lado da AMOSTRA PPG-CAS-TI-09-RO-05A, rocha de coloração rósea arroxeada que é uma lava com fenocristais de k-felds. Só por fenocristais seria álcali-traquito.

Ocorrem fragmentos de lava, as vezes recobertos com película de hematita, e de hematita. Clastos de vidro ácido cimentados por quartzo e hematita e finos de material vítreo, em matriz não vítrea, mostram que não é rocha puramente vulcânica. Parece ocorrer um primeiro evento de brechamento, eminentemente mecânico, com fragmentos já expostos e oxidados, com película (*coating*) de hematita, quebrados antes de constituirem a brecha. Estes fragmentos são envolvidos por cimentação quartzo-ferruginosa, que apresenta bordos de reação, sendo consumida por sílica e barita (?), proveniente de um evento posterior, aparentemente gerado por fluidos.

A rocha original é de composição álcali-traquítica a álcali-riolítica, com estrutura laminada e fluidal bem evidentes. A laminação é definida pela alternância de níveis microscristalinos felsíticos e níveis esferulíticos mais grossos. Cavidades irregulares preenchidas com quartzo, sericita e clorita ocorrem em toda a rocha, mas são mais abundantes nos níveis esferulíticos. As cavidades são alongadas evidenciando a direção de fluxo e são comumente coalescentes, formando lentes descontínuas.

Sobressaem cristais pirogênicos de feldspato potássico arredondados e euédricos, com incipiente alteração a caulinita, cujas dimensões atingem cerca de 1-2 mm. Os cristais deformam a matriz que os envolvem, e por vezes observam-se sombras de pressão e deformação de bandas da matriz, provavelmente decorrentes do processo de fluxo ou menos provavelmente compactação em estado plástico.

A rocha encontra-se de modo geral fraturada, mas esse processo é mais intenso em determinadas porções, desenvolvendo-se textura brechóide, inicialmente penetrando ao longo do bandamento e tornando-se aleatória quando mais desenvolvida. Os litoclastos angulosos já se encontravam hematitizados por ocasião do brechamento, e são corroidos por venulas de barita. Solução de sulfato de bário cimenta a brecha. Rara pirita é observada.

Zircão e rutilo ocorrem como acessórios.

Mineralogia/Amostra	TI-09-RO-5B	
Matriz		
Quartzo	55 <sup>,</sup>	
Feldspato Potássico	25	
Hematita / Goethita / Limonita	14*	
Rutilo	t	
Leucoxênio	t	
Sericita	t	
Zircão	t	
Pirita	r	
Cristais		
Feldspato Potássico	1	
Quartzo	t	
Cavidades		
Quartzo	4	
Sericita	1	
Clorita	t	
Somatório	100	

Silicificação Pervasiva (Silexito) (Estampa 4.14)

As amostras são constituidas quase exclusivamente de quartzo, tratando-se de um evento hidrotermal de intensa silicificação. A classificação de silexito para essas rochas segue o conceito de Thurst (1968): "silexito é o nome proposto para um corpo de sílica pura ou quase pura, de origem ígnea ou aquoígnea, que ocorre como dique, segregação ou inclusão cognata."

(Tanque e Mineropar, sul e centro da bacia)

AMOSTRA PPG-CAS-TQ-RO-125 (Silexito, originalmente lava bandada a fluxo).

Rocha intensamente silicificada, constituída de matriz microcristalina de guartzo, com microclina e hidróxido de ferro subordinados. A matriz possui estrutura de fluxo evidenciada por filmes de hidróxido de ferro. Destacam-se vestígios de fragmentos líticos com textura porfirítica e estrutura fluidal, similares à matriz, compostos essencialmente de guartzo. Eles são realçados pela menor concentração de hidróxido de ferro, estando mais límpidos. Os fragmentos líticos perfazem cerca de 30% em volume da rocha, e são angulosos, mal selecionados, com dimensões que variam de 2mm até mais de 1cm. A caracterização desses fragmentos é dificultada pela intensa silicificação, que apagou as suas feições originais.

Na matriz, ressalta-se ainda a ocorrência de cristais de quartzo e feldspato parcial a totalmente alterados a guartzo, caulinita e sericita, que juntos compõem cerca de 2%.

# AMOSTRAS LT 200NW/300SW, LT 300NW/230SW, LT 300NW/265SW e LT 400NW/250SW (Silexito)

Macroscópicamente, são rochas afaníticas de coloração branca. Cavidades irregulares vazias ou preenchidas com quartzo são frequentes, com dimensões variando de 1 a 2 mm. As amostras LT 300NW/230SW e LT 400NW/250SW possuem fraturas impregnadas com hidróxido de ferro, além de porções avermelhadas, de prováveis fragmentos tufáceos ferruginosos. Na amostra LT 200NW/300SW identificam-se alguns fragmentos angulosos, provavelmente líticos, ou então são pseudo-fragmentos, devido à alterações hidrotermais sucessivas, com silicificação incompleta sendo a mais tardia. Invariavelmente apresentam textura de substituição de carbonato espático por quartzo, típico de zona de *boiling*.

#### Amostra LT 300NW/230SW

Rocha intensamente silicificada, constituida por uma massa de agregados suturados de quartzo muito fino (0,03 mm), na qual sobressaem alguns fragmentos riolíticos, quartzo-ferruginosos, com pequena proporção de sericita associada. A rocha contém porções de quartzo mais grosso, que estão preenchendo cavidades irregulares. Algumas delas possuem núcleos vazios. Cristais finíssimos de calcita e palhetas de sericita recobrem a massa quartzosa, provavelmente advindas da alteração de feldspato original.

#### Amostra lt 200NW/300SW

Rocha intensamente silicificada, constituida por uma massa de agregados suturados de quartzo. Ainda se observam vestígios de fragmentos de rocha essencialmente quartzosos, com alguma sericita subordinada. Alternativamente podem se tratar de pseudofragmentos por silicificação incompleta. Esses fragmentos se distinguem da matriz pelo aspecto turvo, proveniente da ocorrência de abundantes cristais granulares muito finos de provável rutilo. Distinguem-se também pelo aspecto feltroso da rocha, cuja trama parece herdada da rocha original. Nessa trama os cristais ripiformes de quartzo parecem substituir o feldspato, sugerindo textura pilotaxítica ou decussada, típica de rocha intrusiva rasa, provavelmente *sill* ou dique de composição dacítica ou andesítica, com poucos máficos. Os fragmentos contém ainda abundantes inclusões fluidas. Alguns deles são muito vesiculares.

#### Amostra lt 300nw/265sw

Rocha intensamente silicificada, constituida por uma massa de quartzo muito fino (0,05 mm, em média), justapostos com contatos irregulares ou suturados. O quartzo contém abundantes inclusões fluidas. Essa massa homogênea é recoberta por cristais finíssimos (0,004 mm) de

calcita, amplamente disseminados. Em meio a essa massa recristalizada de quartzo, sobressaem raros fragmentos de rocha, provavelmente de riolito, e fragmentos de quartzo.

A rocha é cortada por vênulas milimétricas de quartzo e raras fraturas submilimétricas impregnadas com hidróxido de ferro.

Observam-se vesículas preenchidas com quartzo, sendo que algumas delas tem núcleos vazios.

Amostra lt 400nw/250sw

Rocha intensamente silicificada, constituida por uma massa de agregados suturados de quartzo muito fino (0,03 mm). Destaca-se a presença de vesículas irregulares com bordos de quartzo denteado e núcleos com opacos (provável hematita) e hidróxido de ferro. Fraturas preenchidas por opacos atravessam a matriz. Raros fragmentos de quartzo destacam-se em meio à massa recristalizada. Alguns agregados de quartzo que preenchem vesículas irregulares exibem cristais fibroradiais com extinção em leque.

## Intrusivas Básicas do Arco de Ponta Grossa

AMOSTRA PPG-CAS-RO-CM-154 (Diabásio)

A amostra apresenta-se com granulometria fina sendo constituída por oligoclásio, magnetita, cummingtonita e diopsídio como minerais principais. A textura é diabasoide.

Mineralogia	RO CM 154
Oligoclásio	62
Magnetita	14
Cummingtonita	10
Diopsídio	6
Microclina	4
Pirita	2
Biotita	1
Ilmenita	1
Somatório	100

Rocha de cor cinza amarronzado, porfirítica, com matriz intergranular fina ( $\leq 1$  mm) constituida de plagioclásio, microclina, quartzo, agregados máficos, além de ilmenita e magnetita. Sobressaem esparsos fenocristais de plagioclásio e piroxênio uralitizado. A textura é definida principalmente por ripas de plagioclásio incipientemente sericitizadas, que são comumente bordejadas por microclina. Por vezes tem-se intercrescimentos mirmequíticos e gráficos nos contatos entre eles. O quartzo é disforme e ocorre intersticialmente (Foto 4.14B).

Os agregados máficos distribuem-se intergranularmente aos félsicos e consistem de anfibólio (horneblenda e tremolita-actinolita), clorita, biotita, epidoto, titanita, carbonato, magnetita e ilmenita. Pelo menos em parte, esses minerais são produtos de alteração do piroxênio. Cristais prismáticos de horneblenda ocorrem ainda dispersos, sugerindo tratar-se de material primário, estando por vezes alterados parcialmente a clorita e tremolita-actinolita.

Os opacos, além de associados aos máficos, mostram cristais granulares isolados. São constituidos essencialmente de ilmenita, magnetita e pequena quantidade de sulfetos, incluindo pirita, calcopirita, calcocita/digenita, bornita e covelita. Os sulfetos podem ocorrer inclusos na ilmenita. Ainda se observam cristais prismáticos de apatita e cristais granulares finos de titanita.

Mineralogia/Amostra	LA-RO-161
Matriz	
Plagioclásio	46
Microclina	20
Agregados Máficos	13*
Quartzo	10
Ilmenita	5
Magnetita	2
Sericita	t
Apatita	t
Titanita	1
Hematita / Goethita / Limonita	ţ*
Sulfetos	ţ*
Cristais	
Piroxênio Alterado	3
Plagioclásio	1
Somatório	

\*: percentagem estimada em conjunto.

ESTAMPAS

,



Estampa 4.1: Rochas Sedimentares, epiclásticas e retrabalhadas. Acima: Argilito/siltito muito fino, com porção siltica mais grossa. (ppg-cas-ev-02-ro-04). Abaixo: Arenito lítico feldspático com fragmentos de tufos e clastos (ppg-cas-ev-02-ro-



Acima afloramento, e abaixo a matriz, em lâmina, de Lahar tufáceo clasto suportado, sem organização aparente

(ppg-cas-ti-10-ro-24).







**Estampa 4.2: Ignimbritos**. Acima **(a)** Ignimbrito pobre em finos (ppg-cas-cm-ro-03). Abaixo: **(b)** Ignimbrito com litoclastos de andesito (A) e siltito. Notar *fiammes* (*F*). (ppg-cas-ti-10-RO-16A).





Acima: (c) Ignimbrito com clastos andesíticos (ppg-cas-ti-10ro-25). Abaixo: (d) Fragmentos de ignimbrito brechados por fraturamento hidráulico com matriz de quartzo e hematita/goethita. Notar textura *jig saw* (ppg-cas-ti-09-ro-09).





**Estampa 4.3: Álcali-riolitos porfiríticos**, maciços. Acima: Venulação de quartzo e barita associada. Abaixo: Fenocristais de microclina e quartzo, matriz devitrificada (ppg-cas-tr-lt200nw/250 sw)



Acima: Álcali-riolito fraturado, venulações interrompidas de quartzo e barita. Abaixo: Vênulas de barita atravessam fenocristais de quartzo e matriz. (ppg-cas-tr-lt100nw/302 sw)







Estampa 4.4: Álcali-riolito bandado a fluxo. Acima: Dobras e deformação por movimento relativo entre camadas de diferentes competências. (ppg-cas-sd-01-ro-11). Abaixo: Idem, em lâmina, notar devitrificação e vesículas.





Acima: Níveis descontínuos ou interrompidos por resfriamento diferenciado e fenocristais rotacionados, com sombras de pressão (ppg-cas-sd-01-ro-45b). Abaixo: Cristais pirogênicos de quartzo deformam a matriz bandada a fluxo (ppg-cas-sd-01-ro-96a).





Estampa 4.5: Mistura de lavas em diferentes estados de plasticidade. Acima e à direita: Intercalações distorcidas, por vezes em colapso, sugerem que porções previamente consolidadas são englobadas por novas lavas e retrabalhadas. Notar fragmentos arredondados quebrados de álcali-riolito devitrificado, em matriz de mesma composição. (ppg-cas-tq-ro-128)



Acima: **Riolito bandado a fluxo**. Fragmentos que se consolidaram primeiro adotam comportamento rúptil, sendo carreados como clastos pelas camadas ainda não consolidadas. Opacos em níveis criptocristalinos. (ppg-cas-tq-ro-137)





Estampa 4.6: Devitrificação / hidratação em r. félsicas. Acima: Álcali-riolito perlitizado, matriz fluidal. Notar cristais de CPx e anfibólio. (ppg-cas-la-ro-71B). Abaixo: Esferulitos intercrescidos, dando aspecto pseudo-fragmentar: à rocha. (ppg-cas-tq-ro-41).





**Níveis felsíticos** (fp-707-24a25m, acima) e **esferulíticos** (fp-711-6a8m, abaixo) em *chip* de sondagem rotopercussiva de riolito. Cavidades irregulares provenientes de devitrificação; pirita ocorre como mineral opaco.





**Estampa 4.7: Álcali-traquitos:** Rochas de coloração cinzaarroxeada, predominantemente com fenocristais de k-feldspato. Abaixo: fraturas perlíticas evidenciadas por trilhas de opacos e vênulas (ppg-cas-tq-ro-121)





Matriz esferulítica e com cavidades irregulares (litófises). Poucos fenocristais de quartzo e mais de feldspato, originalmente sanidina (seção basal, S). (Acima: ppg-cas-laro-147, abaixo: ppg-cas-ti-9-ro-19)





**Estampa 4.8: Textura fluidal em álcali-traquitos.** Fenocristais de sanidina, quartzo esquelético e "natas" (seta) de material microcristalino, que podem ser confundidas com *fiammes*, porém não tem terminações esfiapadas. (ppg-cas-tq-ro-119)





Acima: níveis quartzo-feldspáticos com textura esferulítica alternados a níveis felsíticos de granulação mais fina, com microdobramentos apertados de plano axial paralelo à direção do fluxo da lava. Abaixo: detalhe de fenocristal de feldspato potássico, quebrado na borda e arredondado, resultante da digestão com vidro. (ppg-cas-ti-9-ro-5a).





**Estampa 4.9: Rochas máficas.** Abaixo: *Plug* basáltico com clasto incorporado de siltito (S) e cortado por dique riolítico (D, N10W/subvert.) com clastos de andesito. Pedreira municipal de Campo do Meio. À esquerda: Basalto subofítico com esparsos fenocristais bem formados de quartzo (Q) e de máficos (M, Cpx ?) idingcitizados, brechado (B) por entrada de cimento quartzo e magnetita (ppg-cas-ti-8-ro-8).





Estampa 4.10: Diques de andesito / basalto. Esquerda: Afloramento de dique em siltito inconsolidado. Fenocristal de plagioclásio e vesículas orientadas na vertical por fluxo, zonadas, apresentando quartzo diagenético nas bordas e hematita especular (H) ou carbonato (C, no campo ferve com HCl) ao centro. Direita acima: Zona vesiculada em lâmina: microfenocristais de plagioclásio com "rabos de andorinha", Opx e olivina (?), em matriz muito fina de plagioclásio, hematita e mica. (ppg-cas-cm-ro-50). Abaixo: Matriz idem anterior, com mais fenocristais esqueletais de plagioclásio e máficos (olivina e Opx ?) idingcitizados. (ppg-cas-ti-10-ro-12).



Estampa 4.11: Álcali-riolitos alterados hidrotermalmente. Silicificação não pervasiva, gerando pseudo-fragmentos. Acima: rocha é ainda brechada com cimento quartzo-ferruginoso. (ppgcas-sd-ro-96b). Abaixo: limites da silicificação são cortados por fenocristais (estrela), enquanto que feldspato potássico (K) é substituído por quartzo (PK) na porção silicificada, que é também mais sericítica. (ppg-cas-to-lt100nw/270sw)





Acima: pseudo-fragmentos por cloritização e potassificação não pervasiva em álcali-riolito perlítico, lembrando vitroclastos. Abaixo: detalhe de fraturamento perlítico preservado no pseudoclasto perlítizado. (ambas: ppg-cas-la-ro-192)





Estampa 4.12: Brechas por Fraturamento hidráulico: Fragmentos silicificados de riolito devitrificado, com textura *jig saw*, em matriz de vidro, drusas de quartzo, caolim e hidróxido de ferro, que tinge a rocha (acima à esquerda); e em matriz de quartzo cominuido, microclina e pouca sericita (abaixo à esquerda, detalhadas à direita). Vênulas posteriores cortam matriz e fragmentos, com quartzo perpendicular às paredes, crescidos da borda para o centro. (ppg-cas-sd-ro-41A e B, variações ao longo do mesmo perfil).







Estampa 4.13: Brechas por fraturamento hidráulico: Acima e no alto à direita: Eventos superpostos formam brecha polimítica. Clastos de álcali-traquito bandado a fluxo, às vezes recobertos com película de hematita, e de hematita. Matriz quartzo-ferruginosa, barita e clorita. O primeiro evento gera fragmentos oxidados (película de hematita), envolvidos por cimentação quartzo-ferruginosa, e se desenvolve por fraturamento, inicialmente ao longo do bandamento e penetrativamente quando mais desenvolvida. Nova fragmentação com entrada de solução de sílica e barita, causa localmente bordos de reação, com matriz quartzo-ferruginosa sendo consumida e venulação nos fragmentos. Rara pirita é observada (ppg-cas-ti-9-ro-5b).



Abaixo: Brecha com fragmentos 'estilhaçados', em textura jig saw. Notar 'trincas' preenchidas pela matriz quartzo-hematítica, nos clastos de álcali-riolito esferulítico. (ppg-cas-ti-8-ro-06a)





Estampa 4.14: Silicificação Pervasiva com mineralização: Acima: Quartzo com textura de substituição de carbonato espático, típico de zona de *boiling* (B), Abaixo: matriz microcristalina de quartzo (M) e fragmentos onde o quartzo apresenta textura decussada herdada de rocha andesítica (F). (ppg-cas-tr-lt-200nw/300sw)





Acima: Matriz microcristalina de quartzo com textura de carbonato espático (B) além de fragmentos preservados (F). (ppg-cas-tr-lt300nw/230sw). Abaixo: fenocristal de feldspato substituído por agregados de quartzo em fragmento mais preservado da rocha vulcânica original. (ppg-cas-tq-ro- 125)

