



FERNANDO HENRIQUE BAIA

**“BRECHAS HIDROTERMAIS DA MINA DO CERCADO E DAS OCORRÊNCIAS
OLHO D’ÁGUA, MATA II E PAMPLONA: IMPLICAÇÕES METALOGENÉTICAS E
PROSPECTIVAS PARA ZINCO NA REGIÃO DE VAZANTE, MG”**

**CAMPINAS
2013**

NÚMERO: 473/2013



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

FERNANDO HENRIQUE BAIA

“BRECHAS HIDROTERMAIS DA MINA DO CERCADO E DAS OCORRÊNCIAS
OLHO D’ÁGUA, MATA II E PAMPLONA: IMPLICAÇÕES METALOGENÉTICAS E
PROSPECTIVAS PARA ZINCO NA REGIÃO DE VAZANTE, MG”

ORIENTADORA: PROFA. DRA. LENA VIRGÍNIA SOARES MONTEIRO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA AO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DA UNICAMP PARA
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM
GEOCIÊNCIAS. NA ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS
NATURAIS.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA
DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO FERNANDO HENRIQUE
BAIA E ORIENTADO PELA PROFA. DRA. LENA VIRGINIA SOARES
MONTEIRO

CAMPINAS
2013

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca do Instituto de Geociências
Cássia Raquel da Silva - CRB 8/5752

B149b Baia, Fernando Henrique, 1984-
Brechas hidrotermais da mina do Cercado e das ocorrências Olho D'água, Mata II e Pamplona : implicações metalogenéticas e prospectivas para zinco na região de Vazante, MG / Fernando Henrique Baia. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Lena Virgínia Soares Monteiro.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.

1. Brechas (Geologia). 2. Vazante. 3. Zinco. 4. Alteração Hidrotermal. I. Monteiro, Lena Virgínia Soares, 1970-. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Geociências. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Hydrothermal breccias of the Cercado mine and the Olho D'Água, Mata II and Pamplona zinc occurrences : metallogenic and mineral exploration constraints in the Vazante belt, MG

Palavras-chave em inglês:

Breccias (Geology)

Vazante

Zinc

Hydrothermal Alteration

Área de concentração: Geologia e Recursos Naturais

Titulação: Mestre em Geociências

Banca examinadora:

Lena Virgínia Soares Monteiro [Orientador]

Roberto Perez Xavier

Lydia Maria Lobato

Data de defesa: 06-12-2013

Programa de Pós-Graduação: Geociências

Dedico a Deus e Minha Família

AGRADECIMENTOS

Desde o início, muitas pessoas contribuíram de alguma forma para realização deste trabalho. Chegar até aqui não foi fácil, pois exigiu muita dedicação e trabalho árduo.

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus e a toda minha família (Conceição, Romildo, Denise e Paula) pelo incentivo e apoio nas horas mais difíceis. Em especial, a Aline Carneiro Dias, pelo sábio convívio nas horas de aperto, pelos dias os quais não pude estar presente e principalmente por ser uma das principais incentivadoras da minha evolução profissional e pessoal, muito obrigado.

Aos amigos do trabalho, Samuel Bouças do Lago, Basílio Botura Neto, Joyce Barrancos, Luiz F. Montano, Pedro Foster, Edgar Sanches, Bruno Baptistella, Célio Rodrigues Gomes, Hélio Dias Paes, Valdeson Alves da Silva, Leidiane dos Reis Braga e os demais aqui não citados pelas intensas discussões geológicas as quais contribuíram e muito para chegarmos a este ponto.

Ao amigo Gustavo Diniz Oliveira, um dos maiores incentivadores na busca do conhecimento e um geólogo muito acima da média.

Aos professores e consultores, Marcel A. Dardenne (*in memoriam*), Gema Olivo (Queens University), Adalene M. Silva (UnB), Roberto Xavier (UNICAMP), David Leach, André Dandfer (UFOP) e em especial minha orientadora prof. **Dr. Lena Virginia Soares Monteiro** (UNICAMP-USP), pelas horas disponibilizadas para correções, discussões, incentivo, ajuda técnica e financeiras para realização das amostras de isótopos e lâminas petrográficas e paciência para confecção desta dissertação de mestrado.

Todas as universidades envolvidas, principalmente aos professores e colegas da UNICAMP (Instituto de Geociências), pelo apoio nos trabalhos aqui realizados, muito obrigado.

À empresa Votorantim Metais (Jones Belther, Lucio Molinari e Paulo F. R. Pires) por disponibilizar acesso aos dados, bem como o apoio financeiro para realização de análises químicas.

Obrigado a todos,
Fernando Henrique Baia

SÚMULA CURRICULAR

Nome: Fernando Henrique Baia

1. Formação

ANO	TÍTULO	INSTITUIÇÃO
2007	Geólogo	UNESP – Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho

2. Histórico Profissional

Projeto de Exploração Vazante – Votorantim Metais – *Commodities: Zn-Pb/ Bacias Carbonáticas*
Função: Coordenador do Projeto Exploração Mineral Vazante-MG: Coordenação de projeto em diferentes etapas do pipeline de exploração mineral, gestão de projetos, coordenação de equipe multidisciplinar com trabalhos relacionados a exploração mineral (sedimento de corrente, mapeamento geológico, geoquímica de solo, programa de sondagem, geofísica, banco de dados, QAQC, relatórios finais e parciais de pesquisa (DNPM) e modelo geológico) e orçamentário (desenvolvimento de orçamento anual para projetos de exploração mineral).
Período de duração: 15/12/2012 até o momento.

Projeto de Exploração Colômbia, *Acerias Paz Del Rio* - Votorantim Siderurgia – *Commodities: Carvão/ Bacias Carbonáticas*
Função: Geólogo Pleno – Projeto Avançado com implementação da metodologia, padrões e estrutura Votorantim Metais Brasil, integração de base de dados (plataforma *ArcGis e Acess*), mapeamento geológico, auxílio no modelo geológico (*datamine*), programa de sondagem exploratória, descrição de sondagem.
Período de duração: 01/04/2012 até 15/12/2012.

Projeto de Exploração Vazante – Votorantim Metais – *Commodities: Zn-Pb/ Bacias Carbonáticas*
Função: Geólogo Pleno - Mapeamento geológico de detalhe e regional, interpretação de mapas geofísicos (magnetometria aérea/terrestre, gamaespectrometria e gravimetria terrestre), elaboração de modelos geológicos, elaboração de campanhas de geoquímica de solo, sedimento de corrente e sondagem exploratória, geoquímica de rochas (análise estatística de correlações), acompanhamento de sondagem, integração de banco de dados.
Período de duração: 01/01/2009 até 01/04/2012.

Projeto de Exploração Goiás Níquel – Votorantim Metais – *Commodities: Ni-Cu/Complexos Máfico-Ultramáficos e Greenstone Belts*
Função: Geólogo “Programa de *Trainee* Votorantim 2008” - Mapeamento geológico de detalhe e Regional, interpretação de mapas geofísicos (magnetometria aérea/terrestre e gamaespectrometria), geoquímica de rochas (análise estatística de correlações), acompanhamento e elaboração de campanha de sondagem exploratória.
Período de duração: 14/12/2007 até 31/12/2008.

Projeto de Exploração Mato Grosso – Grupo Yamana - *Commodities: Ouro/Rocha Meta-sedimentar/Magmáticas*

Função: Estagiário – Trabalho de Conclusão de Curso - Mapeamento geológico-estrutural de detalhe e regional, acompanhamento de amostragem geoquímica de solo, petroquímica, estatística aplicada.

Período de duração: 04/07/2006 até 30/11/2007.

Mineração Maracá , GO – Grupo Yamana – *Commodities*: Cu-Au/Rocha vulcano-sedimentar

Função: Estagiário em geologia - Mapeamento geológico-estrutural de detalhe de mina, descrição de testemunho de sondagem, locação e acompanhamento de sondagem.

Período de duração: 01/06/2006 até 04/07/2006.

3. Lista dos Resultados de Pesquisa mais Relevantes

Neto, B. N., Filho A. D., Baia, F. H., Oliveira, G.D, Lago, S.B., Montano, L.F. 2012. **Orientação de Testemunhos – Estudo de Caso e Aplicação em Exploração Mineral**”Participação no V Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral, realizado no período de 20 a 23 de maio de 2012, em Ouro Preto, MG.

Santana, A., Dardenne, M.A., Baia, F.H., Oliveira, G.D., 2011 *.High resolution sequence stratigraphy in sedimentary-hosted ore. Example in Fagundes area, Paracatu, MG, Brazil*, Participação no XI SGA, Society Geology Applied, realizado no período de 26 a 29 de setembro de 2011, Antofagasta – Chile.

Oliveira, G.D., Baia, F.H, Lago, S.B., Barrancos, J.T.G. Rosas, C.F., 2010. “ **Caracterização Geológica e Geoquímica do Extremo Norte do Depósito de Zinco de Vazante-MG**” - Participação no IV Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral, realizado no período de 23 a 26 de maio de 2010, em Ouro Preto, MG

4. Outras Informações

Banca Examinadora:

Trabalho Geológico de Graduação em Geologia: “**Mapeamento Geológico no entorno do Alvo Cantionil**”, Daniel Augusto de Miranda e Filipe Silva Nunes, IG-UFMG, 13/12/2010.

Trabalho de Conclusão de Curso - Geologia: “**O sistema deposicional pelítico mesoproterozóico da Formação Serra da Lapa – Grupo Vazante: sistema marinho profundo ou de água rasa?**”, Marcia Thaís de Souza, IG -UNICAMP, 10/12/2010.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

BRECHAS HIDROTERMAIS DA MINA DO CERCADO E DAS OCORRÊNCIAS OLHO D'ÁGUA, MATA II E PAMPLONA: IMPLICAÇÕES METALOGENÉTICAS E PROSPECTIVAS PARA ZINCO NA REGIÃO DE VAZANTE, MG

RESUMO

Dissertação de Mestrado

Fernando Henrique Baia

No maior distrito zincífero brasileiro, situado no noroeste do estado de Minas Gerais, os depósitos de zinco estão hospedados em rochas dolomíticas do Grupo Vazante. Ocorrências zincíferas são conhecidas em um raio de 15 km no entorno da Mina da Vazante, considerada o maior depósito de willemita do mundo.

As ocorrências Mata II e Olho D'Água são estruturalmente controladas e localizadas no contato entre as rochas dolomíticas da Formação Morro do Calcáreo e metapelíticas da Formação Serra da Lapa. Nessas ocorrências, foram reconhecidas diferentes tipologias de brechas dolomíticas hidrotermais. Os tipos I e II resultam de baixa a média interação fluido-rocha, além de cimentação e vênulas hidrotermais, sem hidrofraturamento. Os tipos III e IV representam estágios de hidrofraturamento com quebra dos clastos do dolomito, enquanto o Tipo V revela, além de brechação hidráulica, completa dissolução dos clastos dolomíticos.

Na ocorrência Pamplona e na Mina do Cercado, as brechas dolomíticas são mineralizadas, controladas por falhas normais e transcorrentes e evidenciam deformação rúptil-dúctil (estiramento mineral, planos S-C, indicadores cinemáticos tipo Sigma, estrias e degraus de falha).

A associação hidrotermal nas quatro ocorrências inclui hematita, quartzo, dolomita, óxido/hidróxido de ferro, apatita e, subordinadamente, pirita, Zn-clorita, sericita, feldspato e barita. Os principais minerais de minério identificados são a willemita, franklinita e, secundariamente, esfalerita e galena. Outros minerais reconhecidos incluem monazita, xenotima, covellita, zircão e, pontualmente, piromorfita, coronadita, pirolusita, zincita e cerussita.

A evolução das brechas foi acompanhada nas quatro áreas por enriquecimentos relativos de Fe_2O_3 , V, Sb, As e Pb e localizados de SiO_2 , SrO, Na_2O , Cr_2O_3 , P_2O_5 , ETR, Bi, Ba, Cd, Zn, Hg, Ag, Se, U e Cu. Elementos farejadores para zinco foram definidos com base na assinatura química de cada área, como: Zn-Pb-As-Sb-ETR-Co-Se-V-Cd-Ag (Olho D'Água); Zn-Pb-Se- Na_2O -As-Ag-Cu (Cercado) e Zn-Pb-Se- Na_2O -As-Ag-Cu-Hg (Pamplona), não sendo observada forte correlação entre zinco e os demais elementos na área de Mata II.

As rochas dolomíticas preservadas possuem valores de $\delta^{13}\text{C}$ entre -0,51‰ e +2,72‰ PDB e de $\delta^{18}\text{O}$ entre +22,09‰ e +28,13‰ V-SMOW condizentes com rochas carbonáticas marinhas. Contudo, rochas

alteradas hidrotermalmente apresentam decréscimo dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ (até -4,07‰, no Cercado) e de $\delta^{18}\text{O}$ (até 15,46‰, no Olho D'Água) que apontam para interação fluido-rocha.

Temperaturas foram estimadas para pares minerais (dolomita-hematita) das brechas em 155° a 290°C (Olho D'Água) e 62° e 260°C (Pamplona). A composição isotópica estimada para os fluidos hidrotermais indica mistura de um fluido formacional ou metamórfico, ascendente, metalífero, quente, moderadamente salino e com baixo conteúdo de enxofre e um fluido descendente ou residente, meteórico, diluído, pobre em metais.

O sistema hidrotermal envolveu fontes comuns de fluidos que migraram em larga escala controlados pela atividade tectônica, principalmente relacionada à fase final compressiva da Faixa Brasília (Mata II e Olho D'Água) e com o desenvolvimento de zonas de falhas rúpteis-dúcteis (Pamplona e Cercado). No entanto, a formação de willemita foi limitada ou dificultada na presença de fluidos hidrotermais ácidos, possivelmente derivados da oxidação do material carbonoso proveniente das unidades redutoras superiores da Formação Serra da Lapa.

Palavras chave: Brechas, Vazante, Zinco, Alteração Hidrotermal



UNIVERSITY OF CAMPINAS
INSTITUTE OF GEOSCIENCE

HYDROTHERMAL BRECCIAS OF THE CERCADO MINE AND THE OLHO D'AGUA, MATA II AND PAMPLONA ZINC OCCURRENCES: METALLOGENETIC AND MINERAL EXPLORATION CONSTRAINTS IN THE VAZANTE BELT, MG.

ABSTRACT

Masters Degree

Fernando Henrique Baia

In the major Brazilian zinc district, located in the northwest of the Minas Gerais State, the deposits are hosted in dolomitic rocks of the Vazante Group. Zinc occurrences are known within a radius of 15 km surrounding the Vazante Mine, considered the largest deposit of willemite in the world.

Mata II and Olho D'Água occurrences are structurally controlled and located in the contact between the dolomitic rocks of the Morro do Calcáreo Formation and the metapelites of the Serra da Lapa Formation. In these occurrences different types of hydrothermal breccias were recognized. The type I and II resulted from a low to medium fluid-rock interaction, in addition to cementation and hydrothermal veinlets, without hydrofracturing. The type III and IV represent stages of hydrofracturing of the host dolomite, while type V shows, in addition to hydraulic brecciation, the complete dissolution of the dolomite clasts.

In the Pamplona occurrence and the Cercado Mine, the dolomite breccias are mineralized, structurally controlled by normal and transcurrent faults and evidences brittle-ductile deformation (stretched minerals, S-C foliation, Sigma-type kinematic indicators, striations on fault planes and step-like offsets on fault surface).

The hydrothermal mineral association in the four occurrences comprises hematite, quartz, dolomite, iron oxide/hydroxide, apatite and minor pyrite, Zn-rich chlorite, sericite, K feldspar, and barite. The main ore minerals recognized are willemite, franklinite and subordinate, sphalerite and galena. Other minor minerals include monazite, xenotime, covellite, zircon, and locally, pyromorphite, coronadite, pyrolusite, zincite, and cerussite.

The evolution of the breccias was accompanied by relative enrichment of Fe₂O₃, V, Sb, As and Pb and specific enrichments of SiO₂, SrO, Na₂O, Cr₂O₃, P₂O₅, ETR, Bi, Ba, Cd, Zn, Hg, Ag, Se, U, and Cu. Pathfinder elements for zinc were defined based on the chemical signature of each area, as: Zn-Pb-As-Sb-ETR-Co-Se-V-Cd-Ag (Olho D'Água); Zn-Pb-Se-Na₂O-As-Ag-Cu (Cercado) and Zn-Pb-Se-Na₂O-As-Ag-Cu-Hg (Pamplona). Correlation among zinc and other elements was not observed at Mata II.

Preserved dolomitic rocks have $\delta^{13}\text{C}$ (-0.51‰ and +2.72‰ PDB) and $\delta^{18}\text{O}$ (+22.09‰ and +28.13‰ V-SMOW) values comparable to those of marine carbonate rocks. However, hydrothermally altered dolostones reveal gradual decrease of $\delta^{13}\text{C}$ (up to -4.07‰, in Cercado) and $\delta^{18}\text{O}$ (up to 15.46‰, in Olho D'Água) values, which indicate the fluid-rock interaction.

Temperatures have been estimated based on mineral pairs (dolomite-hematite) from breccias of the Olho D'água (155° to 290 °C) and Pamplona (62° to 260 °C). The isotopic composition estimated for the

hydrothermal fluids indicate fluid mixing involving an ascendant formational or metamorphic, metalliferous, hot, moderately saline fluid with low reduced sulphur content and a descendant or resident metal-poor meteoric fluid, more diluted.

The hydrothermal system evolution reflects common fluid sources that migrated in large scale controlled by tectonic activity, mainly related to the final compressive phase of the Brasília Belt (Mata II - Olho D'Água) and with the development of brittle-ductile normal and transcurrent faults (Pamplona - Cercado). The willemite formation was limited or prevented by the presence of the acid hydrothermal fluids, possibly derived from oxidation of carbonaceous material from the upper Serra da Lapa Formation.

Keywords: Breccias, Vazante , Zinc, Hydrothermal Alteration

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E LOCALIZAÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS E MÉTODOS.....	3
2.1 Métodos e Etapas de Trabalho	3
2.2 Levantamento Bibliográfico.....	3
2.3 Mapeamento Geológico	3
2.4 Aerogeofísica – Magnetometria e Gamaespectrometria	4
2.5 Petrografia e MEV	5
2.6 Análise Química.....	6
2.7 Isótopos Estáveis.....	7
2.8 Integração dos Dados Geológicos	8
3. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	11
3.1 Província Tocantins – Aspectos Gerais.....	11
3.2 Faixa Brasília – Aspectos Gerais	12
3.3 Faixa Brasília - Contexto Geotectônico	14
4. GRUPO VAZANTE	17
4.1 Aspectos Gerais e Litoestratigrafia	17
4.2 Ambiente Geotectônico e Geocronologia	25
4.3 Geologia Estrutural	27
5. DEPÓSITOS DE ZINCO NÃO SULFETADO.....	31
5.1 Depósitos Supergênicos de Zinco	31
5.2 Depósitos Hipogênicos de Zinco.....	32
5.2.1 Depósito de Aroona Beltana	34
5.2.1.1 Aspectos Gerais.....	34
5.2.1.2 Geologia do Depósito.....	34
5.2.1.3 Mineralização - Alteração Hidrotermal e Gênese	36
5.2.2 Depósitos willemíticos da Namíbia e Zambia.....	38
5.2.2.1 Aspectos Gerais.....	38
5.2.2.2 Geologia dos Depósitos Willemíticos	38
5.2.2.3 Mineralização – Alteração Hidrotermal e Gênese	39
5.2.3 Depósito de Vazante.....	40
5.2.3.1 Aspectos Gerais.....	40
5.2.3.2 Geologia do Depósito.....	41

5.2.3.3 Mineralização – Alteração Hidrotermal e Gênese	42
6. CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL.....	47
6.1 Estratigrafia	47
6.2.1 Geofísica - Aerogamaespectometria	47
6.2.2 Unidades Litológicas.....	48
6.2.2.1 Formação Serra do Garrote	50
6.2.2.2 Formação Serra do Poço Verde.....	51
6.2.2.3 Formação Morro do Calcáreo/ Membro Pamplona Superior.....	51
6.2.2.4 Formação Serra da Lapa.....	53
7. CONTEXTO GEOLÓGICO DAS BRECHAS DOLOMÍTICAS E OCORRÊNCIAS ZINCÍFERAS.....	55
7.1 Alvo Mata II.....	55
7.1.1 Rochas hospedeiras	55
7.1.2 Brecha Dolomítica – Mata II.....	60
7.2 Alvo Olho D’Água	71
7.2.1 Contexto Geológico.....	72
7.2.2 Brecha Dolomítica – Olho D’Água.....	78
7.3 Alvo Cercado.....	88
7.3.1 Contexto Geológico.....	88
7.3.2 Brecha Dolomítica - Cercado	94
7.4 Alvo Pamplona.....	102
7.4.1 Geologia	103
7.4.2 Brecha Dolomítica - Pamplona	109
8. LITOGEOQUÍMICA	115
9. ISÓTOPOS ESTÁVEIS.....	131
9.1 Análise Isotópicas de Carbono e Oxigênio	131
9.2 Rochas hospedeiras	131
9.3 Rochas alteradas hidrotermalmente	131
9.4 Assinaturas isotópicas de carbonatos hidrotermais.....	134
9.4.1 Cálculo de Temperatura	137
9.4.2 Composição Isotópica do Oxigênio dos Fluidos Hidrotermais.....	138
10. DISCUSSÃO.....	143
10.1 Relações Estruturais, Químicas e Formação das Brechas Dolomíticas	143
10.2 Considerações Sobre Condições de Formação da Willemita.....	154

10.3 Assinaturas Isotópicas de Oxigênio e Carbono: Considerações Sobre Processos Hidrotermais e Origem dos Fluidos	157
11. CONCLUSÕES.....	163
12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	169

SUMÁRIO DE FIGURAS

Figura 1. 1. Localização das minas de Vazante e Extremo Norte e das áreas de estudo - Pamplona, Cercado, Olho D'Água e Mata I em imagem Quickbird.	2
Figura 2. 1. Etapas de mapeamento de campo.	4
Figura 2. 2. Principais softwares utilizados para integração de dados.	9
Figura 3. 1. Representação esquemática da Província Tocantins e dos elementos tectônicos do Brasil Central. As linhas fortes representam os limites dos crátons (Valeriano <i>et al.</i> , 2008).....	11
Figura 3. 2. Divisão tectônica da Plataforma Sul-Americana (Almeida, 1978).....	12
Figura 3. 3. Unidades tectônicas da Faixa Brasília (FB) e da margem oeste do Cratón do São Francisco (CSF), segundo Dardenne (2000).	13
Figura 3. 4. Seção geológica esquemática mostrando as relações entre os grupos Araxá, Ibiá, Canastra, Vazante e Bambuí (Dardenne, 2000).	14
Figura 3. 5. Evolução geotectônica da Faixa Brasília (modificado de Dardenne 2000).	15
Figura 4. 1. Mapa Geológico Regional da região de Vazante e Paracatu (CPRM, 2004).	20
Figura 4. 2. Perfil esquemático do Grupo Vazante, modificado de Dardenne <i>et al.</i> (1998).	21
Figura 4. 3. Coluna estratigráfica do Grupo Vazante, Dardenne (2000, 2001).	24
Figura 4. 4. Modelo evolutivo simplificado para o segmento centro-sul da Faixa Brasília (Rodrigues, 2008).....	27
Figura 4. 5. Seção estrutural esquemática: A – Zona de Falha de Vazante; B – Zona de Falha da Serra do Garrote; 1 – metapelitos da Formação Serra do Garrote; 2 – Filitos quartzosos, Formação Serra do Garrote; 3 – Metadolomitos do Membro Morro do Pinheiro Inferior (Rostirolla, 2002).	29
Figura 5. 1. Localização dos principais depósitos de zinco não sulfetado (Boni, 2003).	31
Figura 5. 2. Mapa Geológico dos depósitos de Beltana-Aroona (1:250.000) de Carman (2003)..	35
Figura 5. 3. Trend estrutural de Aroona, mostrando a localização da Mina de Aroona (Carman, 2003).....	36
Figura 5. 4. Mapa do Sul da África Central mostrando os cinturões orogênicos Pan-Africanos (Schneider <i>et al.</i> , 2007).	39
Figura 5. 5. Seção geológica da Mina de Vazante baseada no Perfil 11750E, Sucuri (Monteiro, 2007).....	41
Figura 5. 6. Mapa geológico do Nível 500 da Mina Subterrânea de Vazante, mostrando: (A) A morfologia e a distribuição dos corpos de minério (Cia. Mineira de Metais, 1987); (B) Modelo teórico de relação entre estruturas de Riedel (C, P, R, R' and T); (C) Controles estruturais dos corpos de minério willemítico e sulfetado, relacionados à Zona de Falha de Vazante (Monteiro <i>et al.</i> , 1999b). (1) Minério sulfetado; (2) Minério willemítico; (3) Brechas hidráulicas com siderita, ankerita, dolomita, hematita, jaspe e clorita e dolomitos brechados e alterados hidrotermalmente (Membro Pamplona Inferior); (4) Dolomitos hidrotermalizados (Membro Morro do Pinheiro Superior) com veios de siderita, dolomita e hematita).....	42
Figura 6. 1. Mapa gamaespectrométrico (K, Th, U – RGB) dos domínios litológicos da Faixa Vazante e unidades geofísicas.	47
Figura 6. 2. Coluna estratigráfica esquemática da área de estudo, segundo Dardenne (2000), mostrando o posicionamento estratigráfico dos alvos de estudo.	48
Figura 6. 3. Mapa Geológico semi-regional da área de estudo e posicionamento das ocorrências zincíferas Pamplona, Mata II, Olho D'Água e Mina do Cercado, 1:25000. Modificado Relatório Interno Votorantim Metais 2011.	49

Figura 6. 4. (a) Filito carbonoso de cor preto da Formação Serra do Garrote (b) Brecha metapelítica no contato entre as unidades Formação Serra do Garrote e Formação Serra do Poço Verde; (c, d) Filito carbonoso alterado, de cor bege da Formação Serra do Garrote.....	50
Figura 6. 5. (a) Dolomito cinza escuro com “bird’s eyes” da Formação Serra do Poço Verde; (b) Metapelitos de cor ocre; (c) Dolomito laminado de cor rosa; (d) Dolomito rosa com “mudcracks”.....	52
Figura 6. 6. (a) Estromatólito colunar; (b) Dolomito laminado da Formação Morro do Calcáreo.....	52
Figura 6. 7. (a) Metapelitos avermelhados da Formação Serra da Lapa; (b) Metamargas com alternâncias entre níveis pelíticos e carbonáticos.....	53
Figura 7. 1. Visão geral da ocorrência zincífera do Mata II.....	55
Figura 7. 2. <i>Mapa Geológico da ocorrência zincífera do Mata II</i> , este estudo.....	56
Figura 7. 3. Perfil Geológico da ocorrência zincífera do Mata II, este estudo.....	57
Figura 7. 4. (a) Afloramento de dolomito cinza a róseo laminado da Formação Morro do Calcáreo na Área de Mata II; (b) Dolomito laminado em testemunhos de sondagem (VZM2F001).....	58
Figura 7. 5. Em (a) estruturas sedimentares, representada por laminação, preservadas em dolomito da Formação Morro do Calcáreo; (b) Dolomita micrítica a microesparítica e bolsões preenchidos com dolomita esparítica; (c) Zona de substituição dos dolomicritos por dolomita esparítica e vênulas com hidróxido de ferro;	59
Figura 7. 6. Em (a) Afloramento de metamarga da Formação Serra da Lapa na Área de Mata II; (b) Metamarga em testemunhos de sondagem (VZM2F002).....	59
Figura 7. 7. Em (a) Filito carbonoso dobrado da Formação Serra da Lapa; luz transmitida e polarizadores cruzados; (b) Pirita euhédrica e finamente disseminada; luz refletida em filito carbonoso; (c) Filito Carbonoso com vênulas com calcedônia e quartzo; luz transmitida e polarizadores cruzados (d) Esteiras algais com níveis constituídos por quartzo e dolomita; luz transmitida e polarizadores cruzados.....	60
Figura 7. 8. Características macroscópicas dos cinco tipos de rochas dolomíticas alteradas hidrotermalmente e brechas dolomíticas da ocorrência do Mata II.....	61
Figura 7. 9. Brecha hidrotermal dolomítica e suas variações laterais associadas à diferentes estágios e/ou intensidade de alteração hidrotermal na área de Mata II.....	62
Figura 7. 10. Em (a) Bolsões de dolomita esparítica em dolomicroesparito; (b) Dolomita esparítica subhedral; (c) Dolomita esparítica e vênulas de hidróxido de ferro. Fotomicrografias em luz transmitida com polarizadores cruzados (a e b) e descruzados (c).....	63
Figura 7. 11. Em (a), laminação reliquiar (luz transmitida; polarizadores descruzados); (b) Nódulos com calcedônia e quartzo (luz transmitida; polarizadores cruzados); (c) Dolomita com textura radial (luz transmitida; polarizadores cruzados); (d) Dolomita esparítica e hidróxido de Fe (luz transmitida; polarizadores cruzados).....	64
Figura 7. 12. Em (a) “Network” de fraturas preenchidas por hematita e hidróxidos de ferro em rocha dolomítica (luz transmitida, polarizadores descruzados); (b) Clastos de dolomito separados (in situ) por uma matriz constituída por quartzo, dolomita esparítica e hematita (luz transmitida, polarizadores descruzados); (c) Pirita envolta por quartzo hidrotermal e hematita (luz transmitida, polarizadores descruzados); (d) Interstícios de grãos de dolomita preenchidos por hidróxido e óxido de Fe (luz refletida, polarizador cruzado); (e) Hematita limonitizada (luz transmitida, polarizadores descruzados).....	66
Figura 7. 13. Em (a) Clastos subarrendados de rocha dolomítica envoltos por matriz constituída por quartzo microcristalino e dolomita esparítica (luz transmitida; polarizadores cruzados); (b) Finos agregados de quartzo e calcedônia ao redor de clasto de dolomito (luz transmitida;	

polarizadores cruzados; (c) Matriz da brecha composta por barita, hematita, quartzo e hidróxido/óxido de Fe (luz transmitida; polarizadores descruzados); (d) Quartzo com textura de preenchimento de espaços abertos indicada pelo crescimento de cristais perpendicularmente à parede da cavidade (luz transmitida; polarizadores cruzados).....	67
Figura 7. 14. Em (a) Agregados de cristais de quartzo com diferentes tamanhos (luz transmitida; polarizadores cruzados); (b) Óxido/hidróxido de ferro preenchendo interstícios entre os cristais de quartzo (luz refletida; polarizadores cruzados); (c) Matriz da brecha composta por quartzo, hematita e óxido/hidróxido de Fe (luz refletida; polarizadores cruzados); (d) Quartzo fraturado com hidróxido/óxido de ferro nos interstícios (luz refletida; polarizadores cruzados); (e) Presença de hematita e quartzo + óxido/hidróxido de Fe (f) Clorita associada ao quartzo e hematita (Luz transmitida, polarizador descruzado).	69
Figura 7. 15. Imagens de elétrons retro-espalhados obtida com uso de MEV em brechas dolomíticas hidrotermais do tipo V na ocorrência zincífera do Mata II. Em destaque (a) presença de xenotima e zircão; (b) monazita; (c) presença de barita e óxido de Cu envolto por cristais de quartzo; (d) Covellita; (e) pirolusita em meio a hematita e fino cristal de galena incluso no quartzo; (f) Quartzo e hematita que possivelmente representa pseudomorfo de dolomita.	70
Figura 7. 16. Sequência paragenética das brechas dolomíticas hidrotermais da ocorrência zincífera do alvo Mata II.	71
Figura 7. 17. Visão geral da ocorrência zincífera do Olho D'Água, mostrando relevo característico da Formação Serra da Lapa ao fundo.	72
Figura 7. 18. Mapa Geológico da ocorrência zincífera Olho D'Água, este estudo.	73
Figura 7. 19. Perfil geológico da ocorrência zincífera Olho D'Água, este estudo.....	74
Figura 7. 20. (a) Dolomito cinza laminado da Formação Morro do Calcáreo na área da ocorrência Olho D'Água; (b) Dolomito levemente brechado, cinza a róseo, da Formação Morro do Calcáreo; (c) Dolomito cinza laminado em testemunho da sondagem VZODF001.	75
.....	75
Figura 7. 21. (a) Dolomito brechado com dolomita esparítica em sela entre fragmentos de dolomicrito-dolomicroesparito (luz transmitida; polarizadores descruzados); (b) Dolomito brechado com clastos angulosos de dolomicrito envoltos por dolomita esparítica e finos agregados de quartzo e calcedônia (luz transmitida; polarizadores cruzados); (c) Dolomito com textura brechada (luz transmitida; polarizadores descruzados) com matriz constituída por calcedônia e dolomita esparítica; (d) Dolomita esparítica e piritita associada com texturas de preenchimento de espaços vazios (luz transmitida; polarizadores descruzados); (e) Bandamento caracterizado por níveis com grãos de quartzo arredondados e outros com predominância de dolomita microesparítica (luz transmitida; polarizadores descruzados); (f) Idem (e) com polarizadores descruzados.	76
Figura 7. 22: Em (a) Afloramento de metamarga da Formação Serra da Lapa; (b) filito estratificado alterado.	77
Figura 7. 23. Em (a) Material carbonoso e foliação milonítica com quartzo estirado; (b) Vênulade quartzo discordante da foliação milonítica com cristais de quartzo também estirados; (c) Microfalhas que deslocam as vênulas de quartzo; (d) Crenulação em filito carbonoso (luz transmitida; polarizadores cruzados).....	78
Figura 7. 24. (a) Visão geral do afloramento (gossan); (b) Dolomito cinza, mais preservado e evidências de alteração hidrotermal resultantes em dolomito vermelho com alteração férrica (acima) e rocha com textura grossa constituída por hematita, dolomita, siderita, calamina e willemita(direita).	79

Figura 7. 25. Características macroscópicas dos cinco tipos de rochas modificadas por processos hidrotermais e brechas dolomíticas da ocorrência do Olho D'Água.	80
Figura 7. 26. Em (A, B) - Processos de Fe-Carbonatação modificando a coloração da rocha original dolomítica de cor cinza para uma coloração cinza a rosada. Dolomito com baixa interação fluido rocha.:	81
Figura 7. 27. (a) Rocha dolomítica com hidróxido/óxido de ferro entre os grãos carbonáticos, que confere cor avermelhada à rocha (b) vênula com dolomita esparítica que evidencia novos pulsos de fluidos hidrotermais posteriores ao “staining” por hidróxidos de ferro(luz transmitida; polarizadores descruzados).	82
Figura 7. 28. Em (a, b, c) Clastos de dolomito separados por network de fraturas preenchidas por dolomita esparítica e óxido/hidróxido de Fe. Luz transmitida, polarizadores cruzados em (a) e descruzados em (b) e (c); (d) Estilólitos com concentração de óxido/hidróxido de Fe (luz transmitida; polarizadores descruzados); (e) Dolomita esparítica e hematita limonitizada (luz transmitida; polarizadores cruzados).....	83
Figura 7. 29. Em (a) Dolomito fraturado; (b) Dolomito preservado em contato com zona brechada; (c,d)Brecha hidrotermal com clastos de dolomito e matriz composta por dolomita esparítica, hematita e óxido/hidróxido de Fe(luz transmitida; polarizadores descruzados).....	84
Figura 7. 30. Em (a) Dolomita associada a óxido/hidróxido de Fe (luz transmitida; polarizadores descruzados); (b) Hematita limonitizada e dolomita esparítica límpida (luz transmitida; polarizadores descruzados); (c) Duas gerações de vênulasde dolomita esparítica que truncam a rocha dolomítica com concentrações de goethita (luz transmitida; polarizadores cruzados); (d) Dolomita esparítica associada com apatita e hematita (luz transmitida; polarizadores descruzados); (e) Cristais subhedrais, arredondados, de franklinita associada com hematita e dolomita esparítica (luz refletida); (f) Hematita estirada associada aos cristais de franklinita (luz refletida); (g) Cristais de dolomita esparítica e willemita (luz transmitida, polarizadores cruzadas); (h) Vênula de dolomita cortando hematita (luz transmitida, polarizadores descruzados).	85
Figura 7. 31. Imagens de elétrons retro-espalhados obtida com uso de MEV em brechas dolomíticas hidrotermais do tipo V na ocorrência zincífera Olho D'Água. Em destaque (a) Cerussita e fino cristais de apatita; (b) hematita com fraturas preenchidas por clorita; (c) dolomita com finos cristais de quartzo e apatita disseminados; (d) análise EDS de dolomita e cloritas zincíferas.	87
Figura 7. 32. Sequência paragenética para a ocorrência zincífera do Olho D'Água.	87
Figura 7. 33. Visão parcial da Cava da Mina do Cercado.	88
Figura 7. 34. Mapa geológico da Mina do Cercado, este estudo.	89
Figura 7. 35. Esquema da Mina do Cercado, este estudo.....	90
Figura 7. 36. (a) Dolomito cinza, fino, da Formação Morro do Calcáreo; (b) Dolomito cinza claro, fino, maciço da Formação Morro do Calcáreo intercalado a metapelitos;.....	91
Figura 7. 37. (a) Bolsões de dolomita esparítica e quartzo truncando a laminação do dolomito micrítico a microesparítico (luz transmitida; polarizadores cruzados); (b) Fraturas e estilólitos com concentrações de óxido/hidróxido de Fe limitando bolsões preenchidos por dolomita esparítica, indicando dissolução sob pressão (luz refletida); (c) Estrutura milonítica e falha tardia em rocha dolomítica com cimentação esparítica ao longo da foliação (luz transmitida; polarizadores descruzados); (d) Estrutura milonítica truncada por dolomita esparítica, que também preenche bolsões paralelos à foliação da rocha dolomítica (luz transmitida; polarizadores descruzados)	92
Figura 7. 38. (a) Rocha constituída por quartzo e sericita com estrutura milonítica(luz transmitida; polarizadores cruzados); (b) Bandas constituídas por quartzo e sericita fina (luz transmitida;	

polarizadores cruzados); (c) Cristais de quartzo orientados e estirados(luz transmitida; polarizadores cruzados); (d) Goethita em espaços intragranulares em metamarga (luz refletida, polarizadores cruzados).....	93
Figura 7. 39. Em (a) dolomito de coloração rosada, com network de fraturas anastomosadas, (b) dolomito rosa, brechado com clastos angulosos; (c) degrau de falha no dolomito róseo; (d) estrias de falha em plano com hematita; (e,f) zona mineralizada com dolomita, hematita e willemita orientadas ao longo de foliação milonítica.....	95
Figura 7. 40. Em (a) foliação milonítica em rocha dolomítica micrítica(luz transmitida; polarizadores descruzados); (b) foliação milonítica em rocha carbonática micrítica com cimentação esparítica concordante aos planos de foliação truncada por finas vênulas de dolomita discordantes (luz transmitida; polarizadores descruzados); (c) textura milonítica e estilólitos preenchidos por óxido/hidróxido de Fe, sugerindo dissolução sob pressão (luz transmitida; polarizadores descruzados); (d) fraturas preenchidas por óxido/hidróxido de Fe (luz refletida, polarizadores cruzados); (e) cristais de sericita dispersos no dolomito brechado (luz transmitida; polarizadores cruzados).....	96
Figura 7. 41. Em (a) cristais de willemita deformada cortados pela hematita orientada ao longo de planos de foliação milonítica (luz transmitida; polarizadores cruzados); (b) Willemita e dolomita esparítica deformadas em rocha com textura milonítica (luz transmitida; polarizadores cruzados); (c) Willemita granular fina associada com dolomita e truncada por zonas com concentração de deformação com óxidos de ferro (luz transmitida; polarizadores cruzados); (d) Hematita limonitizada orientada ao longo da foliação milonítica(luz transmitida; polarizadores cruzados); (e) Willemita fibrorradiada (luz transmitida; polarizadores cruzados); (f) Willemita granular (luz transmitida; polarizadores cruzados); (g) Willemita fibrorradiada com óxido-hidróxido de ferro nas bordas dos cristais e planos de clivagem e fraturas (luz refletida, polarizadores cruzados); (h) Quartzo hidrotermal associado com a willemita, hematita e dolomita esparítica (luz transmitida; polarizadores cruzados).....	98
Figura 7. 42. (a,b) vênulas de hematita com franklinita associada (luz refletida, polarizadores cruzados e descruzados); (c) Cristais subhedrais de franklinita (luz refletida, polarizadores descruzados); (d) Franklinita com willemita e esfalerita (luz transmitida, polarizadores descruzados); (e) Esfalerita em fraturas cortando cristais fibrorradiados de willemita e quartzo (luz transmitida, polarizadores cruzados); (f) Esfalerita, franklinita e zincita (luz transmitida, polarizadores cruzados).....	99
Figura 7. 43. Imagens de elétrons retro-espalhados obtida com uso de MEV em brechas dolomíticas mineralizadas na mina do Cercado. Destaque em (a,b) cristais arredondados de franklinita disseminados em matriz formada por willemita; (c) fino cristais de galena e esfalerita em matriz de willemita; (d) fino cristal de galena; (e) principais minerais de zinco (franklinita e willemita); (f) Coronadita preenchendo espaços vazios; (g) foliação milonítica.....	101
Figura 7. 44. <i>Sequência paragenética para Mina do Cercado.</i>	102
Figura 7. 45. (a) e (b) Visão do afloramento Pamplona, inserido no limite urbano do município de Vazante.....	103
Figura 7. 46. Mapa geológico da ocorrência zincífera Pamplona, este estudo.	104
Figura 7. 47. Perfil geológico do Alvo Pamplona, este estudo.	105
Figura 7. 48. (a) Dolomito laminado, rosa, da Formação Serra do Poço Verde; (b) Dolomito cinza, maciço da Formação Morro do Calcáreo; (c) Dolomito rosa com intercalação de metapelito em testemunho de sondagem – Formação Serra do Poço Verde; (d) Dolomito cinza, laminado em testemunho de sondagem – Formação Morro do Calcáreo.	106

Figura 7. 49. (a) Dolomito com estrutura sedimentar laminada preservada (luz transmitida; polarizadores descruzados); (b) Vênulas preenchidas por dolomita esparítica, em dolomito tectonizado (luz transmitida; polarizadores cruzados)	107
Figura 7. 50. (a) Matriz microesparítica em rocha dolomítica rósea (luz transmitida; polarizadores descruzados); (b) Bandamento composicional representado por alternância entre níveis com material carbonoso e dolomita (luz transmitida; polarizadores descruzados); (c) Dolomita esparítica paralela ao acamamento sedimentar e preenchendo veios tardios (luz transmitida; polarizadores cruzados); (d) Veios preenchidos por dolomita esparítica e quartzo truncando a estrutura reliquiar da rocha (luz transmitida; polarizadores cruzados).	108
Figura 7. 51. (a, b) Bandamento composicional definido por concentrações de material carbonoso e sericita (luz transmitida; polarizadores cruzados); (c) Cristais de quartzo envolvidos por óxido/hidróxido de Fe (luz refletida, polarizadores cruzados); (d) Detalhe do bandamento composicional entre níveis de quartzo + sericita e níveis de quartzo e óxido/hidróxido de Fe (luz transmitida; polarizadores cruzados).....	108
Figura 7. 52. (a) Sequência de amostras representativas da evolução da brecha dolomítica da ocorrência zincífera Pamplona; (b) Dolomito brechado rosa (c) Rocha dolomítica com hematita e dolomita, cisalhado da zona de brecha; (d) Zona mineralizada com willemita e hematita, com estruturas de cisalhamento.	109
Figura 7. 53. (a) Matriz de rocha dolomítica com óxido/hidróxido de Fe (luz refletida) cortada por finas vênulas dolomíticas límpidas; (b) Veios de dolomita esparítica (stockwork) (luz transmitida, polarizadores cruzados); (c) Veios de dolomita esparítica e estilólitos (luz transmitida, polarizadores cruzados); (d) Quartzo associado à dolomita nas brechas (luz transmitida, polarizadores cruzados); (e) Hematita limonitizada associada com dolomita esparítica (luz refletida, polarizadores cruzados).	111
Figura 7. 54. (a) Willemita granular (luz transmitida, polarizadores cruzados); (b) Willemita granular associada a clorita e dolomita esparítica (luz transmitida, polarizadores cruzados) (c) Willemita granular e veio preenchido por willemita truncando fase inicial; (d) Willemita granular e em veios, com hematita e falhas tardias; (e) Três gerações de veios de dolomita; (f) Willemita granular cortada por veios de hematita e este arranjo cortado por veios de dolomita (g) Willemita granular e veios de dolomita tardio; (h) Hematita, willemita, dolomita e veios de dolomita; (i) Willemita granular e quartzo hidrotermal; (j) Hematita limonitizada, óxido/hidróxido de ferro e cristais de dolomita esparítica.	112
Figura 7. 55. Imagens de elétrons retro-espalhados obtida com uso de MEV em brechas dolomíticas hidrotermais do tipo V do Alvo Pamplona, mostrando em (a) a associação de willemita, hematita, dolomita, clorita, hematita e piromorfita e (B) associação entre piromorfita e hematita em zona mineralizada com willemita.	113
Figura 7. 56. Sequência paragenética para a ocorrência zincífera do Pamplona.	114
Figura 8. 1. Classificação das rochas dolomíticas para os alvos estudados. PP = Pamplona; OD = Olho D'Água; CC = Cercado; MII = Mata II.	115
Figura 8. 2. Diagrama Isocon mostrando as perdas e ganhos relativos durante a evolução do processo hidrotermal para as rochas encaixantes e diferentes tipos de brecha na ocorrência Mata II.	118
Figura 8. 3. Diagrama Isocon mostrando as perdas e ganhos relativos durante a evolução do processo hidrotermal para as rochas encaixantes e diferentes tipos de brecha na ocorrência Olho D'Água.	119

Figura 8. 4. Diagrama Isocon mostrando as perdas e ganhos relativos durante a evolução do processo hidrotermal para as rochas encaixantes e diferentes tipos de brecha na ocorrência Cercado.....	120
Figura 8. 5. Diagrama Isocon mostrando as perdas e ganhos relativos durante a evolução do processo hidrotermal para as rochas encaixantes e diferentes tipos de brecha na ocorrência Pamplona.....	120
Figura 8. 6. Principais enriquecimentos e perdas químicas nos diferentes tipos de brechas para as ocorrências estudadas.....	121
Figura 8. 7. Diagramas mostrando a variação dos conteúdos de CaO e MgO nas diferentes ocorrências zincíferas por litotipos.....	122
Figura 8. 8. Diagramas mostrando a distribuição do Fe ₂ O ₃ e SiO ₂ nas diferentes ocorrências zincíferas por litotipos.....	123
Figura 8. 9. Distribuição dos conteúdos de Zn e Pb (em ppm) nas ocorrências estudadas.....	124
Figura 8. 10. Diagramas mostrando a distribuição do ETR nas diferentes ocorrências zincíferas por litotipos normalizados pelo NASC (North American Shale Composition - Haskin & Haskin, 1966).....	126
Figura 8. 11. Valores críticos dos índices de correlação entre duas variáveis (KOZAK, A. 1966).....	127
Figura 8. 12. Diagrama de correlações de elementos para os casos estudados.....	128
Figura 8. 13. Evolução química das brechas hidrotermais para as ocorrências zincíferas Mata II (a), Olho D'Água (b), Cercado (c) e Pamplona (d).....	129
Figura 9. 1. Composição isotópica de carbono ($\delta^{13}\text{C}\%_{\text{PDB}}$) e oxigênio ($\delta^{18}\text{O}\%_{\text{SMOW}}$) em rocha total para os diferentes litotipos encontrados nas ocorrências zincíferas de (a) Mata II; (b) Olho D'Água; (c) Mina do Cercado; (d) Pamplona.....	132
Figura 9. 2. Composição isotópica de carbono ($\delta^{13}\text{C}\%_{\text{PDB}}$) e oxigênio ($\delta^{18}\text{O}\%_{\text{SMOW}}$) em rocha total para rochas mineralizadas nas áreas de Olho D'Água, Pamplona e Cercado.....	133
Figura 9. 3. (a) Composições isotópicas de carbono e oxigênio de dolomita das ocorrências do Olho D'Água, Cercado e Pamplona. Fonte dos dados: Este estudo. (b) Comparação entre as composições isotópicas de carbono e oxigênio em minerais carbonáticos dos depósitos de Morro Agudo, Vazante e outros depósitos de Zn-Pb hospedados no Grupo Vazante Fonte dos dados: Monteiro <i>et al.</i> (1999; 2007); Rubo & Monteiro (2010).....	134
Figura 9. 4. Comparação entre as composições de carbono e oxigênio em minerais carbonáticos do depósito de Vazante. (Monteiro, 2000; Monteiro <i>et al.</i> , (2007) e dolomita hidrotermal das áreas do Olho D'Água, Cercado e Pamplona (este estudo).....	136
Figura 9. 5. Composições isotópicas de oxigênio médias calculadas, a 200°C, a partir da equação de fracionamento isotópico dolomita-H ₂ O de Golyeshev <i>et al.</i> (1981) para o fluido hidrotermal em equilíbrio com dolomita das áreas de Olho D'Água, Pamplona e Cercado e comparação com valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ dos demais depósitos da Faixa Vazante (Monteiro, 2002), considerando-se a mesma temperatura.....	142
Figura 10. 1. Mapa aeromagnetométrico (derivada vertical) mostrando os principais alinhamentos magnéticos (-----) e ocorrências zincíferas da área de estudo; (direita) Roseta de frequência dos alinhamentos magnéticos preferenciais.....	144
Figura 10. 2. Perfil geológico esquemático (sem escala) para os principais alvos estudados.....	144
Figura 10. 3. Modelo esquemático (sem escala) para circulação de fluidos regionais e posição dos principais alvos estudado.....	145
Figura 10. 4. Modelos estruturais para a formação das brechas hidrotermais dos alvos Mata II e Olho D'Água.....	146

Figura 10. 5. (a) Fluidos basinais e meteóricos migrando por zonas de alívio de pressão em condições de (b) Desenvolvimento da brecha hidrotermal por hidrofraturamento.....	146
Figura 10. 6. (a) Fluidos basinais e meteóricos migrando por zonas de alívio de pressão em condições de $P_{\text{fluido}} < P_{\text{rocha}}$; (b) Desenvolvimento da Brecha Hidrotermal por hidrofraturamento em condições de $P_{\text{fluido}} > P_{\text{rocha}}$	148
Figura 10. 7. (a) Fluidos basinais e meteóricos migrando para zona de falha; (b) Desenvolvimento de brecha dolomítica e mineralização restrita a zona de falha; (c) modelo estrutural para o alvo Pamplona; (d) Modelo estrutural para a Mina do Cercado; (e) Textura milonítica em dolomitos no Alvo Pamplona; (f) Estrias de falha e textura milonítica na Mina do Cercado; (g, h) evidências de deformação em escala microscópica.	153
Figura 10. 8. Condições de precipitação de willemita e hematita a 300 °C, de acordo com Brugger <i>et al.</i> (2003).	154
Figura 10. 9. Condições de precipitação de willemita e hematita a 100 °C, de acordo com Brugger <i>et al.</i> (2003).	155
Figura 10. 10. Curvas de solubilidade de fases de zinco, mostrando as condições favoráveis à precipitação de willemita e zincita, smithsonita e esfalerita em condições de pH=5 e pH=7 (Brugger <i>et al.</i> 2003).	156
Figura 10. 11. Composição isotópica calculada, a 200 °C, para os fluidos em equilíbrio com diferentes fases minerais associadas às brechas hidrotermais (quartzo, hematita e dolomita) e comparações com campos para água do mar, meteóricas, metamórficas, magmáticas e sedimentos (Sheppard, 1986).	161
Figura 11. 1. Modelo esquemático para formação de precipitação de Willemita no segmento sul da faixa Vazante, evidenciando a mistura de fluidos ascendente e descendente associados a condições de oxidante e pH levemente básico dos dolomitos rosa da Formação Serra do Poço Verde e assinaturas químicas da mineralização de zinco para as ocorrências mineralizadas em zinco Cercado, olho D'Água e Pamplona).	166

SUMÁRIO DE TABELAS

Tabela 2. 1. Métodos analíticos utilizados nas análises litoquímicas realizadas no laboratório ALSChemex.....	7
Tabela 3. 1. Tabela esquemática dos principais eventos da evolução geotectônica da Faixa Brasília. Compilação dos dados apresentados em Valeriano <i>et al.</i> , 2004b; baseados em diferentes autores: Almeida 1967; Almeida e Hasui, 1984; Almeida <i>et al.</i> , 2000; Alkmim <i>et al.</i> , 1996; Alkmim <i>et al.</i> , 2001; Araújo & Marshak, 1997; Brito Neves <i>et al.</i> , 1995; Brito Neves <i>et al.</i> , 1996; Brito Neves <i>et al.</i> , 1999; Brod <i>et al.</i> , 1991; Chaves <i>et al.</i> , 1997, Dalziel, 1997; Dardenne, 2000; Ferreira Filho <i>et al.</i> , 1994; Fonseca <i>et al.</i> , 1996; Fuck, 1994; Janasi, 2002; Marini <i>et al.</i> , 1981; Moraes <i>et al.</i> , 1994; Moraes & Fuck, 1997; Pimentel <i>et al.</i> , 1991, 1999; Pimentel & Fuck, 1992; Pimentel <i>et al.</i> , 1999; Piuzana <i>et al.</i> , 2003b; Seer, 1999; Silva, 2003; Simões, 1995; Strieder & Nilson, 1992; Trompette, 1994; Unrug, 1996; Valeriano, 1992; Valeriano <i>et al.</i> , 2000.	16
Tabela 4. 1. Estudos históricos realizados da Região de Vazante.....	18
Tabela 4. 2. Principais estudos estruturais e modelos de evolução tectônica propostos para a Faixa Vazante.....	30
Tabela 5. 1. Características dos principais depósitos supérgenos de zinco.....	33
Tabela 9. 1. Composição isotópica de minerais hidrotermais (dolomita, hematita e quartzo) das áreas Mata II, Olho D'Água, Pamplona e Cercado.	135
Tabela 9. 2. Temperaturas estimadas a partir de isótopos estáveis de oxigênio para pares quartzo-hematita e dolomita-hematita para os alvos Mata II, Olho D'Água e Pamplona.....	140
Tabela 9. 3. Composição isotópica de oxigênio calculadas para fluidos em equilíbrio com quartzo, dolomita e hematita dos alvos Mata II, Olho D'Água e Pamplona, considerando-se as condições mínimas de temperatura estimadas pelos cálculos termométricos e as equações de fracionamento isotópico entre quartzo-H ₂ O (Matsuhisa <i>et al.</i> , 1979), dolomita-H ₂ O (Golyshev <i>et al.</i> , 1981) e hematita-H ₂ O (Yapp, 1990).	141
Tabela 9. 4. Equação de fracionamento isotópico dolomita-H ₂ O de Golyshev <i>et al.</i> (1981) e valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ estimados a partir da composição isotópica do oxigênio da dolomita hidrotermal das ocorrências Olho D'Água, Cercado, e Pamplona calculadas para temperaturas de 150°C, 200° C e 250° C.	141
Tabela 11. 1. Principais características das brechas hidrotermais das ocorrências zincíferas do Mata II, Olho D'Água, Cercado e Pamplona.	167

LISTAS DE ANEXOS

ANEXO I: Datos Químicos.....	183
ANEXO II: Isótopos Rocha Total.....	195

1. INTRODUÇÃO E LOCALIZAÇÃO

O zinco, metal do grupo dos não ferrosos, apresenta propriedades físicas e químicas indispensáveis para o desenvolvimento tecnológico mundial. Este pode ser encontrado em uma série de minerais, tais como a esfalerita (ZnS), willemita (Zn_2SiO_4), smithsonita ($ZnCO_3$), calamina ou hemimorfita ($2ZnO.SiO_2.H_2O$), wurtzita [(Zn,Fe)S], franklinita [(Zn,Mn)Fe₂O₄], hidrozincita [$2ZnO_3.3Zn(OH)_2$] e zincita (ZnO), entre outros.

A ocorrência desses minerais está associada predominantemente a três principais classes de depósitos de Zn-Pb-(Cu)-(Ag), de acordo com Leach & Sangster (1993): depósitos de sulfetos maciços hospedados em rochas vulcânicas (*volcanic-hosted massive sulfide*– VHMS), depósitos hospedados em rochas carbonáticas do tipo Mississippi Valley (*Mississippi Valley Type*– MVT) e depósitos hospedados em unidades siliciclásticas (*Sedimentary-exhalative type*– SEDEX), que são encontrados em diversos ambientes geotectônicos. Os depósitos do tipo MVT, VHMS e SEDEX são responsáveis por grande parte da produção e reservas mundiais de zinco e chumbo, sendo que depósitos de classe mundial são conhecidos na China, EUA, Canadá, Austrália e Peru. Adicionalmente, depósitos de zinco não-sulfetado (*carbonate-hosted willemite deposits* ou *non-sulfide zinc deposits*; Hitzman *et al.*, 2003), tanto de natureza supergênica como hipógena representam nos últimos anos importantes alvos da pesquisa mineral.

No Brasil, o maior distrito zincífero encontra-se no noroeste do estado de Minas Gerais (DNPM, 2009), incluindo os municípios de Vazante (Mina de Vazante, Cercado e Extremo Norte) e Paracatu (Mina de Morro Agudo e depósitos de Ambrósia e Fagundes). Nesse distrito, os depósitos de zinco são hospedados em rochas carbonáticas do Grupo Vazante (Dardenne, 2000). A Mina de Vazante (concessão de lavra da Votorantim Metais), localizada a 5 km a nordeste da cidade de Vazante, MG, é notável por ser o maior depósito de willemita (Zn_2SiO_4) do mundo, com recursos totais estipulados de 40-60 Mt @ 20% de Zn. Esse depósito também é considerado raro, pois são poucos os depósitos de willemita conhecidos mundialmente, tais como Beltana e Aroona na Austrália, Berg Aukus e Abenab na Namíbia e Star Zinc e Kabwe na Zâmbia (Carman, 2003; Brugger *et al.*, 2003; Groves *et al.*, 2003; Hitzman *et al.*, 2003).

No entorno da Mina de Vazante, em um raio de 15 km, são reconhecidas várias ocorrências de brechas hidrotermais dolomíticas que podem ser semelhantes às que hospedam o minério willemítico na Mina de Vazante, tais como Cercado, Olho D'Água, Mata II e Pamplona (Figura 1.1).

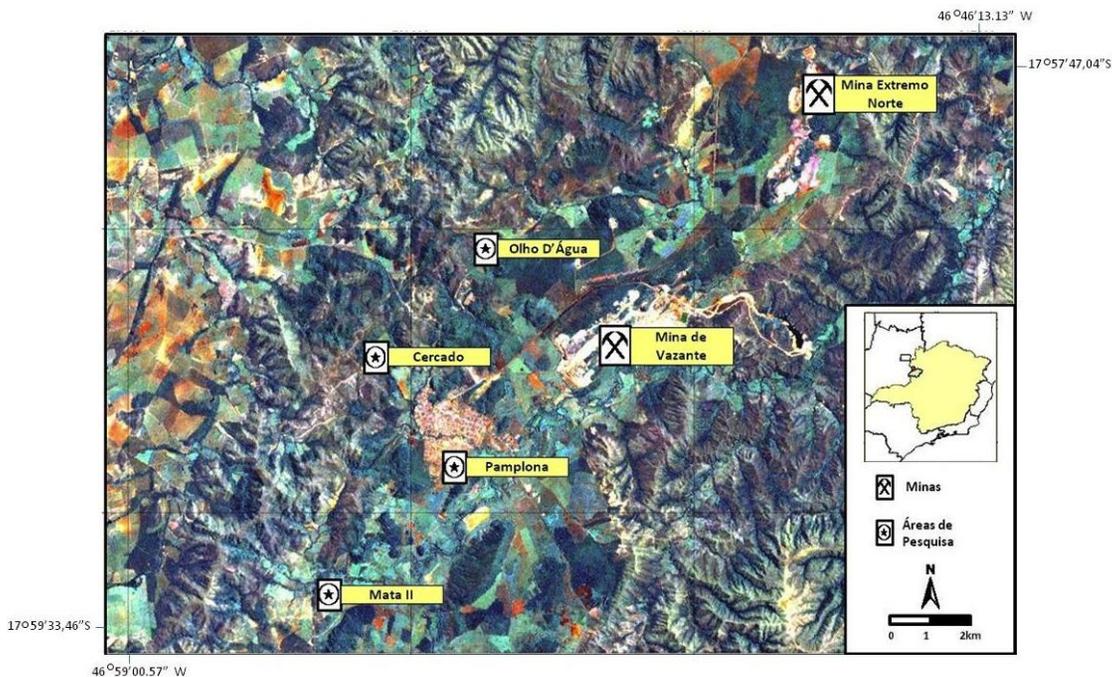


Figura 1. 1. Localização das minas de Vazante e Extremo Norte e das áreas de estudo - Pamplona, Cercado, Olho D'Água e Mata I em imagem Quickbird.

Na Mina Cercado, as brechas ocorrem na área da cava já explorada pela Votorantim Metais, com ocorrência de minério willemítico. No Alvo Olho D'Água, as brechas associam-se com abundante quantidade de calamina e willemita em superfície, porém com poucas evidências de willemita e sulfetos em testemunhos de sondagem, enquanto no Alvo Mata II, apesar de anomalias de até 8.000 ppm de Zn em rocha na superfície, os furos de sondagem interceptaram 30 m de brecha dolomítica hidrotermal sem evidência direta de willemita. O Alvo Pamplona, hoje inserido no perímetro urbano da cidade de Vazante, apresenta forte silicificação em superfície e minério willemítico em testemunhos de sondagem.

Nas quatro áreas (Cercado, Olho D'Água, Mata II e Pamplona) ocorrem brechas associadas a níveis estratigráficos distintos e estruturas não correlatas ou alinhadas com a falha principal que controla os corpos de minério willemítico de Vazante. Como a ocorrência de willemita nessas brechas foi verificada apenas em alguns casos, o estabelecimento das relações entre os processos hidrotermais que atuaram na região em larga escala e os condicionantes favoráveis para a formação das raras ocorrências de willemita é de grande importância para a exploração mineral na região de Vazante. Dessa forma, estudos para uma melhor compreensão da gênese das brechas e sua contextualização na Faixa Vazante necessários para a avaliação do seu potencial metalogenético, são aqui apresentados.

2. OBJETIVOS E MÉTODOS

O foco principal deste estudo é a caracterização das brechas hidrotermais dolomíticas da Mina do Cercado e das ocorrências zincíferas do Olho D'Água, Mata II e Pamplona, buscando-se o estabelecimento das correlações estratigráficas, estruturais e metalogenéticas de tais ocorrências e comparações com o contexto da Mina de Vazante, visando à identificação de áreas com potencial prospectivo para a exploração de zinco na região de Vazante.

2.1 Métodos e Etapas de Trabalho

O projeto de mestrado incluiu levantamento bibliográfico, interpretação de dados aerogeofísicos (gamaespectometria e magnetometria), trabalho de campo, descrição petrográfica, análise de isótopos estáveis, análises litoquímicas e integração de dados, cujo detalhamento é apresentado a seguir:

2.2 Levantamento Bibliográfico

Durante a etapa de revisão bibliográfica foi realizada a compilação das principais referências bibliográficas referentes a depósitos zincíferos hidrotermais, incluindo livros, artigos, dissertações de mestrado e teses de doutorado, relatórios internos da empresa Votorantim Metais, bem como artigos específicos de contextos geológicos semelhantes em outros locais do mundo, especialmente aqueles dedicados a depósitos com características similares às da Mina de Vazante.

2.3 Mapeamento Geológico

Com o intuito de posicionar regionalmente as ocorrências zincíferas Olho D'Água, Mata II, Pamplona e Mina do Cercado, as etapas de trabalho de campo consistiram primeiramente no mapeamento geológico semi-regional (Figura 2.1) e integração de dados geológicos preexistentes da área de estudo, principalmente do banco de dados de superfície Votorantim Metais – Geoexplor, totalizando aproximadamente 150km² em escala 1:25.000. Posteriormente, com o auxílio de testemunhos de sondagem diamantada da Votorantim Metais, as áreas de interesse deste estudo foram detalhadas com confecção de mapas e perfis geológicos em escala 1:5.000, buscando-se o melhor entendimento geológico das ocorrências zincíferas.



Figura 2. 1. Etapas de mapeamento de campo.

2.4 Aerogeofísica – Magnetometria e Gamaespectrometria

Com o intuito de auxiliar e obter correlações para o mapeamento geológico foram utilizados dados de gama espectrometria regional, que visam ao mapeamento da quantidade de U, Th e K nas rochas pela quantificação da radiação gama emitida no processo de desintegração atômica, auxiliando assim na identificação de propriedades contrastantes entre as principais unidades geológicas com composições distintas.

Para delimitação de estruturas regionais não aflorantes, bem como para a caracterização mais ampla do contexto geológico estrutural das brechas dolomíticas, foram utilizados dados de magnetometria aérea (derivada vertical e amplitude do sinal analítico) onde o realce das altas frequências forneceu informações sobre os contatos, descontinuidades e lineamentos regionais.

Resumidamente, as características do sistema e levantamento usado são:

- **Características do Sistema Aeroembarcado:**
 - Aquisição com aeronave de asa-fixa Islander BN2-A, prefixo PT-WOU;
 - Sistema magnético com sensor de vapor de Césio, modelo Scintrex CS-3, com frequência de 10Hz e intervalo de amostragem de 6m;
 - Sistema gamaespectrométrico multicanal modelo Picodas PGAM 1000, com cristais detectores de iodeto de sódio ativado a Tálcio (NaI), 2.048 pol³ voltados para baixo, 512 pol³ voltados para cima, frequência de amostragem de 1 Hz e intervalo entre amostras de 60m;

▪ **Características do Levantamento:**

- Espaçamento das linhas de produção: 250 m;
- Espaçamento das linhas de controle: 2500 m;
- Direção das linhas de produção: 30° - 210° (centro-norte) / 150° - 330° (centro-sul);
- Direção das linhas de controle: 120° - 300° (centro-norte) / 60° - 240° (centro-sul);
- Quilometragem total voada: 85.155,00 km lineares;
- Altura média de vôo sobre o terreno (*drape*): aproximadamente 100 m.

2.5 Petrografia e MEV

As amostras para petrografia foram coletadas durante os trabalhos de campo e etapas de descrição sistemática de testemunhos de sondagem. A caracterização petrográfica em luz transmitida e refletida das brechas com uso de lâminas petrográficas delgado-polidas foi realizada com objetivo de identificar a paragêneses minerais, texturas e micro-estruturas e relações com estágios de alteração hidrotermal, mineralização e evolução tectônica da Faixa Vazante. As lâminas foram confeccionadas no laboratório de laminação da UNICAMP e a análise petrográfica foi realizada no Laboratório de Microtermometria também na mesma instituição.

O microscópio eletrônico de varredura (MEV), instrumento do Instituto de Geociências da Unicamp, é um instrumento que permite a observação e caracterização de materiais orgânicos e inorgânicos em micro escala. Nesse equipamento, o micro volume a ser analisado é irradiado com um feixe fino e focalizado de elétrons que varre a amostra através de toda a sua superfície.

Primeiramente, foram selecionadas 10 lâminas delgada-polidas mineralizadas das ocorrências zincíferas do Olho D'Água, Pamplona, Cercado e Mata II. Estas lâminas foram limpas com um papel macio embebido em um pouco de acetona a fim de remover poeira, marcas de dedos ou gordura que estejam aderidas. Posteriormente no laboratório de MEV do IG-UNICAMP utilizou um metalizador Q150T da empresa *Quorum Technologies*, que vem com uma série de programas ("softwares") disponíveis para realização de uma série de procedimentos. A metalização empregada foi a com carbono (C) a qual é a mais comum em microscopia eletrônica de varredura. Por conta do baixo número atômico deste elemento não são adicionados picos indesejáveis ao espectro apresentando, portanto, mínima influência nas intensidades dos raios-X. É realizada a vácuo (prevenindo a formação de fuligem e a má adesão), por meio da

evaporação, por condução de corrente elétrica, de uma fibra de carbono conforme o programa de funcionamento do equipamento no perfil "*QT Pulse cord evap*".

No Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV é utilizado um microscópio eletrônico de varredura LEO 430i com varredura digital e controlado por um programa de computador, fabricado pela Companhia Zeiss. Acoplado a ele há um espectrômetro de energia dispersiva (EDS) da *Oxford Instruments* para análises semi quantitativas.

O canhão de elétrons do LEO 430 é usado para gerar um feixe fino e focalizado de elétrons sobre a superfície da amostra montada na câmara. O canhão possui como emissor termoiônico – filamento de tungstênio- como fonte de elétrons. Três lentes eletromagnéticas abaixo do canhão focalizam e dão forma ao feixe antes que ele atinja a amostra de modo varredura ou rasterizado. Todo esse conjunto que forma a coluna do MEV e a câmara, onde as amostras são colocadas, operam a vácuo.

Para as imagens e análises em lâminas delgadas-polidas no Laboratório de Microscopia Eletrônica do Instituto de Geociências da UNICAMP, a energia do feixe é mantida em 20 kV e a corrente do feixe que atinge a amostra e ajustada para valores entre 6000 pA, conforme a necessidade de ajuste do brilho/contraste e da qualidade (contagens) das análises EDS. A distância de trabalho é fixada em 19 mm, em virtude da geometria e disposição do detector EDS dentro da câmara. Com essa distância de trabalho é garantida uma maior eficiência na aquisição de sinais EDS da amostra e, portanto, de uma melhor qualidade de análise.

2.6 Análise Química

As Análises químicas de rocha total foram realizadas no Laboratório ALSChemex, Vespasinao, MG, objetivando a caracterização litoquímica das brechas hidrotermais dolomíticas, incluindo a identificação de halos de alteração e assinaturas químicas das zonas hidrotermais e mineralizadas. Os métodos analíticos incluíram ICP-AES para elementos maiores e metais de base, ICP-MS para elementos traço e terras raras e LECO para C e S, tendo sido empregados diferentes métodos de abertura para os conjuntos de elementos, como descritos na tabela 2.1.

Tabela 2. 1. Métodos analíticos utilizados nas análises litoquímicas realizadas no laboratório ALSChemex.

Analytes	Description
Major Elements: Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K, Ti, Mn, P, LOI	Lithium metaborate fusion, ICP-AES
C, S	By Leco
Base Metals: Ag, Co, Cu, Mo, Ni, Pb, Zn, Cd	Four Acid, ICP-AES
Trace Elements and REE's: Ba, Ce, Cr, Cs, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, Hf, Ho, La, Lu, Nb, Nd, Pr, Rb, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Th, Tl, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zr	Lithium borate fusion, ICP-MS
Volatiles: As, Bi, Hg, Sb, Se, Te	Aqua regia, ICP-MS

As amostras foram coletadas durante as etapas de campo e descrição de testemunhos de sondagem, sendo que cada amostra foi individualizada em sacos plásticos, devidamente identificadas, com pesos que variavam de 0,5 a 1,5kg para cada amostra. Posteriormente, todas as amostras foram fotografadas com intuito de prezar pela qualidade da amostragem.

As amostras selecionadas são provenientes dos quatro alvos estudados, como segue:

- Mata II: foram coletadas e analisadas 26 amostras representativas provenientes de testemunhos de sondagem e amostras de superfície assim distribuídas: 8 amostras da rocha encaixante (dolomito e metamargas); 16 amostras da brecha hidrotermal e 2 amostras de hematita.

- Olho D'Água: foram analisadas 24 amostras, sendo 6 da rocha encaixante (dolomito e metamargas); 16 da brecha hidrotermal e 2 amostras da rocha metabásica.

- Mina do Cercado: foram selecionadas 17 amostras, divididas em 9 amostras da rocha encaixante (dolomito e metamargas); 6 amostras da brecha hidrotermal e 2 amostras de hematita.

- Pamplona: um total de 19 amostras foram analisadas, incluindo 9 amostras da rocha encaixante (dolomito cinza e dolomito rosa com intercalação de metapelito) e 10 da brecha hidrotermal.

2.7 Isótopos Estáveis

Análises de isótopos estáveis das fases minerais hidrotermais, do minério e rocha total, incluindo isótopos de oxigênio e carbono em minerais carbonáticos e oxigênio em minerais do minério (quartzo, hematita) foram realizadas visando à definição dos parâmetros relacionados à sua gênese, tais como, temperatura, estado redox e composição isotópica de oxigênio dos fluidos mineralizantes.

A separação mineral (dolomita, quartzo e hematita) foi feita com auxílio de micro retífica Dremel e catação manual com uso de lupa e pinça, objetivando a obtenção de 10 a 20 mg de concentrado de minerais por amostra.

As amostras de carbonatos foram enviadas para análise de isótopos de oxigênio e carbono no Laboratório de Geocronologia do Instituto de Geociências da Universidade Brasília com uso do espectrômetro de massa *Thermo Scientific* MAT 253 do Laboratório de Geocronologia da UnB. O espectrômetro é constituído de três unidades, a fonte de íons, o analisador e o coletor. A primeira unidade bombeia os íons em gás composto de H₂ e He. A segunda unidade através de campo eletromagnético que produz deflexão total é a que analisa todos os gases presentes na amostra exceto H₂. A terceira unidade está localizada no plano focal de deflexão, onde há coleta da espécie analisada. As amostras de carbonato foram processadas no *Kiel IV Carbonate* acoplado ao *Thermo Scientific* MAT 253. A produção de CO₂ a partir do carbonato foi realizada no *Kiel IV Carbonate*, cujo processo é todo controlado por temperatura. A primeira etapa consistiu na dissolução do carbonato por ácido fosfórico (H₂PO₄) em altas temperaturas, com produção de CO₂ e H₂O gasoso. Na segunda etapa, o gás produzido passou por uma armadilha criogênica a -190 °C, onde as impurezas não condensadas foram retiradas. Na terceira etapa o gás foi aquecido até -90 °C para separação de CO₂ e de H₂O. Na etapa final foi produzido um microvolume de CO₂ a partir de processos a vácuo para medição da *p*CO₂. As frações isotópicas de ¹³C e ¹⁸O do microvolume de CO₂ foram medidas no espectrômetro com precisão de $\delta^{13}\text{C} = 0,05\text{‰}$ e $\delta^{18}\text{O} = 0,10\text{‰}$ e o resultado reportado em relação ao padrão PDB (*Pee Dee Belemnite*).

As análises de isótopos de oxigênio em quartzo e hematita foram conduzidas na Universidade Federal de Pernambuco. O oxigênio foi liberado por reação com BrF₅ usando laser de CO₂ como fonte de calor, e convertido a CO₂ por reação com grafita a 750°C, em linha de extração a vácuo. O gás CO₂ obtido foi analisado isotopicamente em espectrômetro de massa. Os resultados estão expressos na notação δ em permil (‰) relativo ao padrão V-SMOW, com precisão melhor que $\pm 0,1\text{‰VPDB}$. As razões isotópicas ¹⁸O/¹⁶O foram determinadas em espectrômetro de massa Delta V Advantage.

2.8 Integração dos Dados Geológicos

Os dados geológicos gerados durante as etapas de campo conjuntamente com os dados aerogeofísicos, petrográficos, químicos e isotópicos foram devidamente tratados com uso dos

softwares ArcGis10, CorelDraw X5, Stereonet®, PetroGraph (Figura 2.2), auxiliando assim ao entendimento do arcabouço estrutural e litológico e evolução dos sistemas hidrotermais da área de estudo.

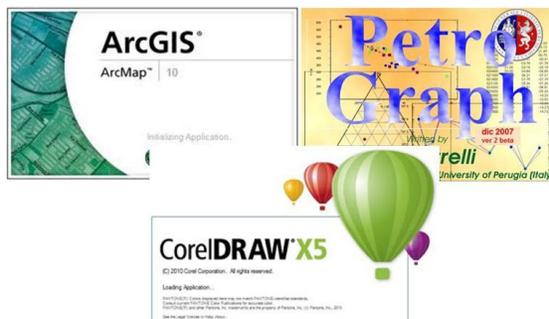


Figura 2. 2. Principais softwares utilizados para integração de dados.

3. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

3.1 Província Tocantins – Aspectos Gerais

A Província Tocantins, localizada no Brasil Central (Almeida, 1967), foi definida por Almeida *et al.*(1981) como um sistema orogênico situado entre os crátons Amazônico (posicionado a NW), São Francisco (posicionado a E) e um terceiro cráton, representado segundo Brito Neves *et al.* (1999), pelo Cráton do Paraná (Paranapanema), posicionado a SW, que estaria encoberto pelas rochas sedimentares da Bacia do Paraná. A colisão (Figura 3.1) desses blocos teria resultado nos cinturões de dobramentos Paraguai-Araguaia, que bordejam o Cráton Amazônico, e Brasília, que bordeja o Cráton do São Francisco (Dardenne, 2000).

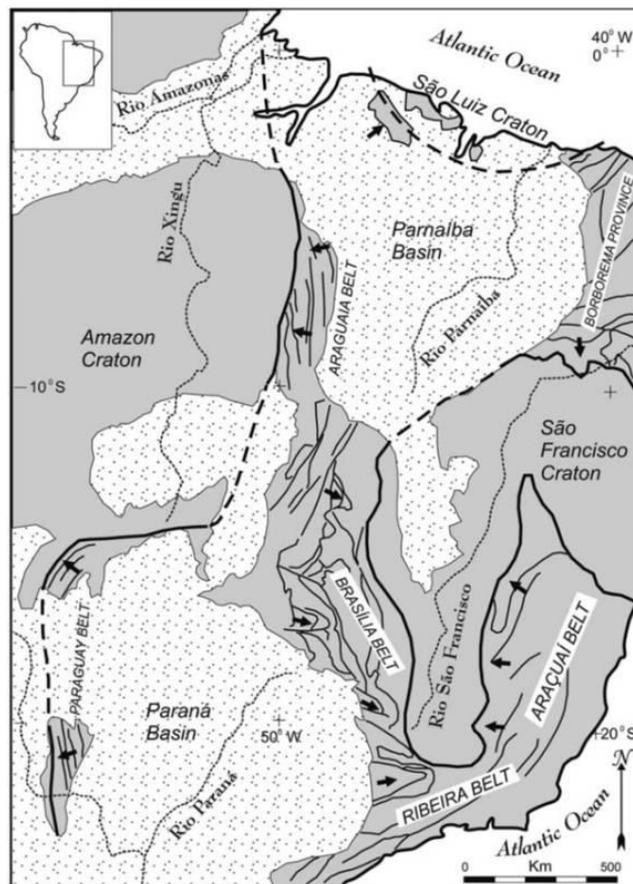


Figura 3. 1. Representação esquemática da Província Tocantins e dos elementos tectônicos do Brasil Central. As linhas fortes representam os limites dos crátons (Valeriano *et al.*, 2008)

A estruturação final da província (Figura 3.2) é representada por núcleos cratônicos estabilizados durante o Transamazônico (ca. 2,0 Ga), circundados por faixas de cavalgamentos e dobramentos desenvolvidos durante o Ciclo Brasileiro há 900 - 650 Ma (Almeida & Hasui, 1984; Schobbenhaus *et al.*, 1984; Brito Neves *et al.*, 1990).

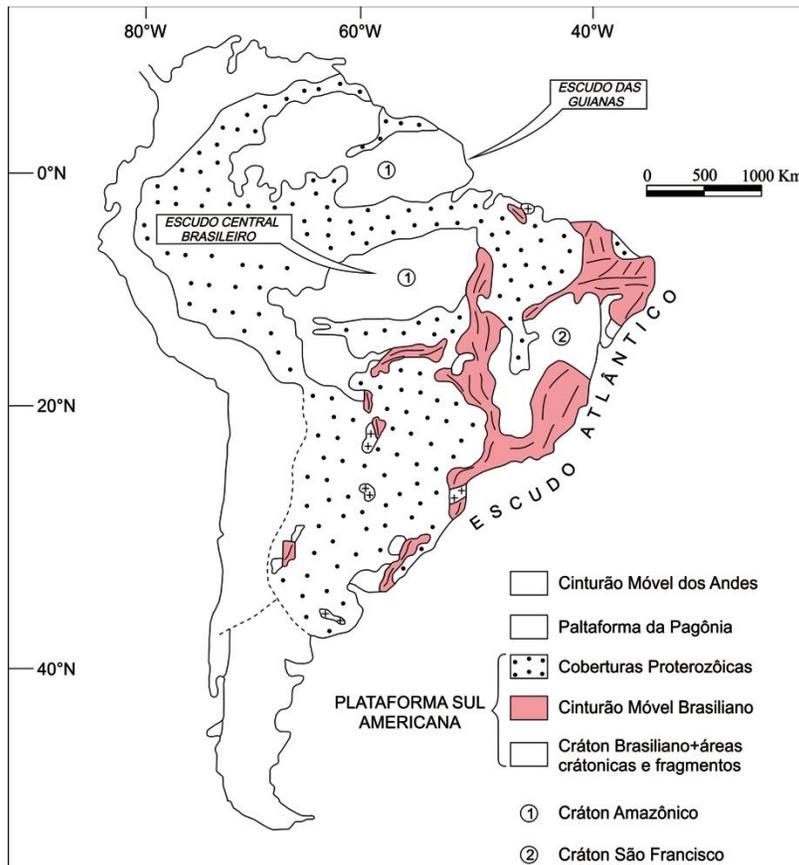


Figura 3. 2. Divisão tectônica da Plataforma Sul-Americana (Almeida, 1978).

O Cráton São Francisco representa uma parte preservada de um antigo núcleo maior denominado Cráton do Paramirim (Almeida, 1977) que não foi afetado por orogêneses posteriores ao ciclo Transamazônico e atuou como antepaís das faixas dobradas que o circundam (Almeida 1981; Almeida *et al.*, 1981; Haraly & Hasui, 1982). Dentre as faixas marginais do Cráton São Francisco destaca-se a Faixa Brasília, na qual se localiza a área específica de estudo.

3.2 Faixa Brasília – Aspectos Gerais

De acordo com Marini *et al.* (1981), Fuck (1994) e Dardenne (2000), a Faixa Brasília (Figura 3.3) se estende por mais de 1000 km ao longo da direção N-S, desde o sul do Estado de

Minas Gerais até o norte do Estado do Tocantins, definida como o conjunto de terrenos e escamas de empurrão de escala crustal que convergiram para leste em direção ao Crátón do São Francisco e é compartimentada em:

- Faixa Brasília Setentrional (FBS), de orientação NE, caracterizada por vários compartimentos nos quais variam, substancialmente, os materiais envolvidos, os litotipos, os graus de metamorfismo, além dos estilos estruturais (Valeriano *et al.*, 2004b). É formada pelo Grupo Araí e seu embasamento e pelo Grupo Paranoá (Meso-Neoproterozóico), Maciço Goiano e o Arco Magmático de Goiás.

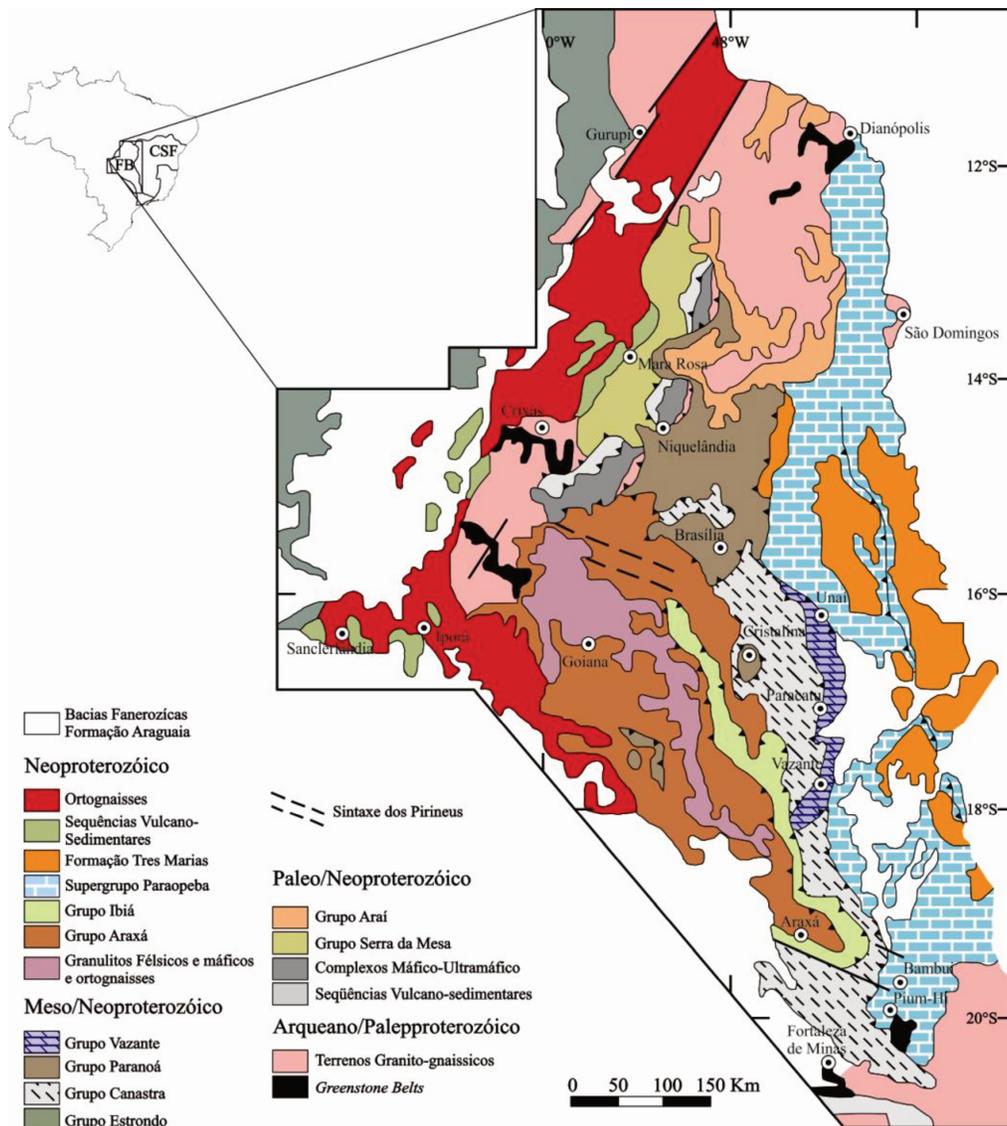


Figura 3. 3. Unidades tectônicas da Faixa Brasília (FB) e da margem oeste do Cratón do São Francisco (CSF), segundo Dardenne (2000).

- Faixa Brasília Meridional (FBM), de orientação NW, na qual as unidades geológicas estão dispostas segundo um complexo sistema imbricado de *nappes* e falhas (Figura 3.4) indicativos de transporte tectônico de grande magnitude (centenas de quilômetros), segundo Dardenne (2000). É formada pelos grupos Canastra e Vazante (Meso-Neoproterozóico), Ibiá e Araxá (Neoproterozóico) e Andrelândia.
- A FBS e FBM se encontram na altura do paralelo de Brasília formando a Megaflexura dos Pireneus (Costa & Angeiras, 1971), onde *trends* estruturais dominantes da Faixa Brasília (NNW ao sul e NNE ao norte) são bruscamente infletidos para a direção E-W (Valeriano *et al.*, 2004b). De acordo com os mesmos autores, a FBS distingue-se em parte da FBM, devido ao particionamento da deformação.

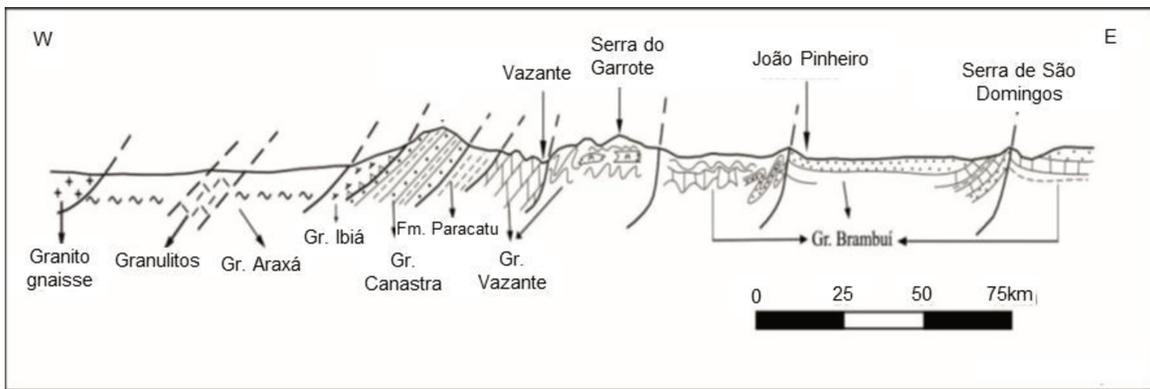


Figura 3. 4. Seção geológica esquemática mostrando as relações entre os grupos Araxá, Ibiá, Canastra, Vazante e Bambuí (Dardenne, 2000).

3.3 Faixa Brasília - Contexto Geotectônico

A evolução geotectônica da Faixa Brasília, de acordo com Valeriano *et al.* (2004b), têm uma história muito antiga. A evolução da Plataforma Sul-Americana teria iniciado no Arqueano (ca. 2,6 Ga) com a formação da crosta continental com término no Neoproterozóico-Eopaleozóico (500-450 Ma) após sucessivos eventos de retrabalhamento, eventos distensivos, orogênicos, fragmentação, subducção e colisão que culminaram no fechamento e aglutinação do Gondwana (Almeida e Hasui, 1984; Schobbenhaus *et al.*, 1984, Brito Neves *et al.*, 1990; Valeriano *et al.*, 2004b). Tais eventos podem ser brevemente resumidos na Figura 3.5 e tabela 3.1.

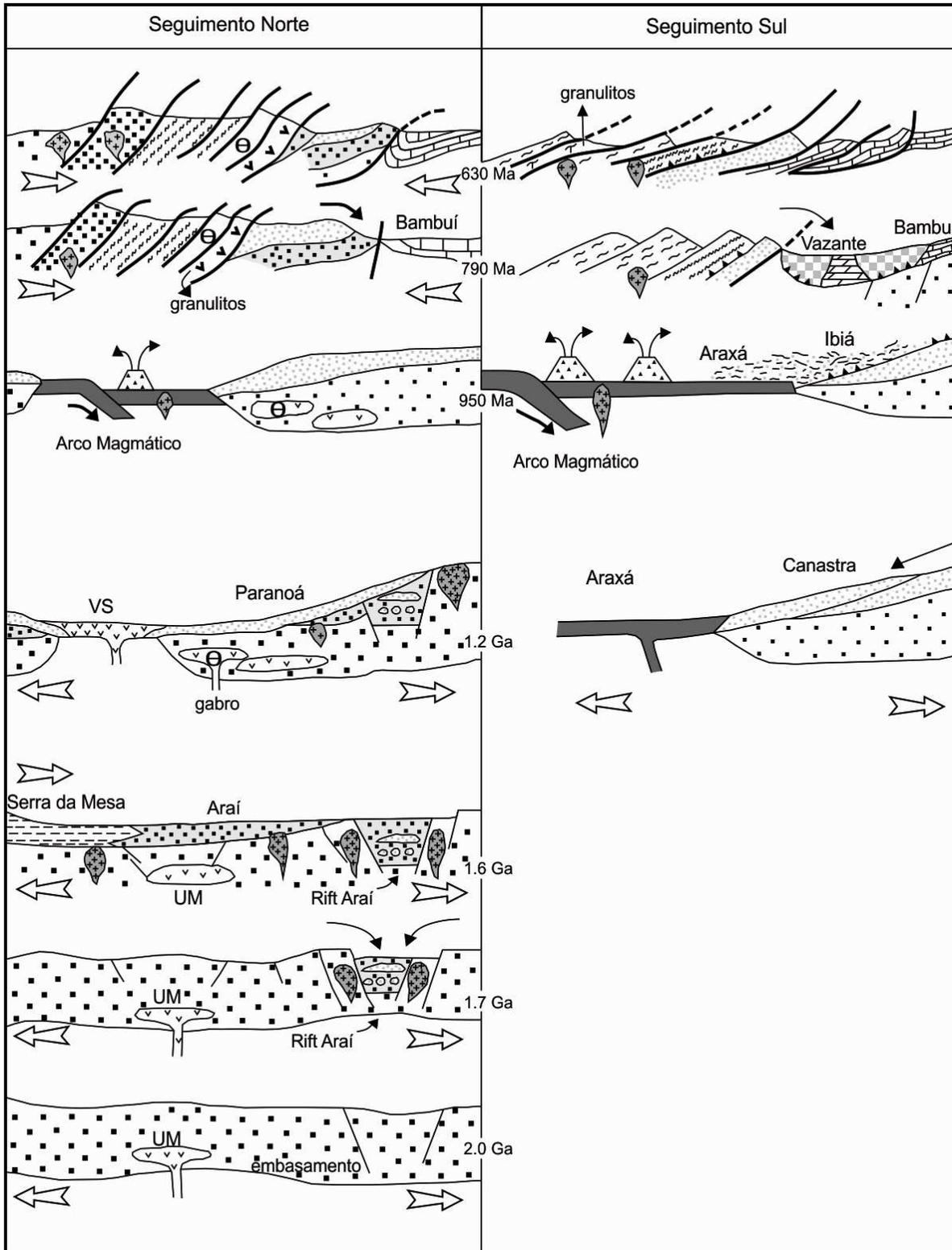


Figura 3. 5. Evolução geotectônica da Faixa Brasília (modificado de Dardenne 2000).

Tabela 3. 1. Tabela esquemática dos principais eventos da evolução geotectônica da Faixa Brasília. Compilação dos dados apresentados em Valeriano *et al.*, 2004b; baseados em diferentes autores: Almeida 1967; Almeida e Hasui, 1984; Almeida *et al.*, 2000; Alkmim *et al.*, 1996; Alkmim *et al.*, 2001; Araújo & Marshak, 1997; Brito Neves *et al.*, 1995; Brito Neves *et al.*, 1996; ; Brito Neves *et al.*, 1999; Brod *et al.*, 1991; Chaves *et al.*, 1997, Dalziel, 1997; Dardenne, 2000; Ferreira Filho *et al.*, 1994; Fonseca *et al.*, 1996; Fuck, 1994; Janasi, 2002; Marini *et al.*, 1981; Moraes *et al.*, 1994; Moraes & Fuck, 1997; Pimentel *et al.*, 1991, 1999; Pimentel & Fuck, 1992;. Pimentel *et al.*, 1999; Piuzana *et al.*, 2003b; Seer, 1999; Silva, 2003; Simões, 1995; Strieder & Nilson, 1992; Trompette, 1994; Unrug, 1996; Valeriano, 1992; Valeriano *et al.*, 2000.

	2,8-2,6 Ga	2,2 -2,0 Ga	1,7 Ga	1,3 - 1,1 Ga	950 - 900 Ma	930 Ma	830 - 750 Ma	640 - 620 Ma	610 Ma	580 a 560 Ma	520 Ma
EVENTOS	Formação da crosta continental no Arqueano.	Retrabalhamento da Crosta Continental durante o Evento Transamazônico (2,2-2,0 Ga)	Eventos distensivos responsáveis pelos sistemas de riftes frequentemente acompanhados de magmatismo anorogênico bimodal	Orogênese Uruçuana, que teria precedido a Orogênese Brasileira (Almeida, 1967); ou existência de um novo rifteamento (Valeriano <i>et al.</i> , 2004)	Episódio Tafrogenético, responsável pela fragmentação do supercontinente Rodínia e à dispersão de múltiplos paleocontinentes, incluindo o São Francisco-Congo	Ocorre subducção e consumo de litosfera oceânica a oeste do Cráton São Francisco	Episódio colisional neoproterozóico envolvendo o Maciço Goiano e as seqüências vulcanossedimentares	Fenômenos de colisão continental, envolvendo metamorfismo de alta pressão seguido de granitogênese de fusão crustal.	Exumação das nappes de fácies anfibolito e granulito e seu cavalgamento sobre os alóctones externos da faixa	Resfriamento do conjunto alóctone da FBM	AGLUTINAÇÃO DO GONDWANA
	Greenstone Belts de Pilar, Crixás e Guarinos	FBS: Grupo Araí e Serra da Mesa	Sequencia Juscelândia, Palmeirópolis e Indaianópolis e Complexo Cana Brava, Niquelândia e Barro Alto	Depositaram-se os Grupos Canastra, Ibiá, Paranoá, Vazante, Araxá e Andrelândia.	Início do Arco Magmático de Goiás	Metamorfismo granulítico e Magmatismo félsico. Grupo Bambuí.	Metamorfismo no AMG, no Maciço Goiano, e nas nappes formadas pelo Grupo Araxá e Granitogênese sincolisional (Socorro-Guaxupé)	Granitos tardicolisionais na Nappe Socorro-Guaxupé	Ciclo/Orogênese Brasileira Aglutinação do Gondwana		

4. GRUPO VAZANTE

4.1 Aspectos Gerais e Litoestratigrafia

O Grupo Vazante pertencente à Faixa Brasília Meridional, e foi assim denominado por Dardenne *et al.* (1998) e Dardenne (2000). A unidade estratigráfica, contudo, foi posicionada de diferentes formas ao longo da história. Inicialmente, Branco & Costa (1961), Braun (1968), Barbosa (1965) e Costa *et al.* (1970) consideraram as rochas aflorantes na região de Vazante e Paracatu pertencentes ao Grupo Bambuí. Após a individualização da Formação Vazante por Dardenne (1978), Dardenne *et al.* (1998) elevou esta unidade à categoria de grupo (Grupo Vazante), dividindo-o, da base para o topo, nas formações Retiro, Rocinha, Lagamar, Serra do Garrote, Serra do Poço Verde, Morro do Calcáreo e Serra da Lapa (Dardenne, 2000).

A evolução dos principais trabalhos realizados na região de Vazante e Paracatu é sintetizada na tabela 4.1.

Tabela 4. 1. Estudos históricos realizados da Região de Vazante.

PESQUISADORES/ TRABALHOS PUBLICADOS	CONSIDERAÇÕES
Angêlo Solis (1933)	Identificação do minério de Zinco (calamina) em Vazante.
Luciano Jacques de Moraes (1955)	Primeira publicação científica sobre a Jazida de Vazante no IX Congresso Brasileiro de Geologia
Branco & Costa (1961), Braun, (1968), Barbosa (1965) e Costa <i>et al.</i> (1970)	Incluíram as rochas aflorantes na região de Vazante/Paracatu no Grupo Bambuí.
Amaral (1968)	Identificou na região de Vazante quatro unidades estratigráficas principais, compostas por rochas metassedimentares pertencentes ao Grupo Canastra, calcários com intercalações de folhelhos da Formação Sete Lagoas do Grupo Bambuí, metassiltitos e folhelhos ardósianos pertencentes à Formação Paraopeba do Grupo Bambuí e depósitos recentes
Cassedanne (1968)	Realizou os primeiros estudos dos ambientes de sedimentação dos litotipos presentes na região de Vazante e não fez correlação desses com o Grupo Bambuí
Dardenne (1974)	Descreveu quatro fácies na região de Vazante: uma fácies sublitoral relativamente mais profunda, uma fácies sublitoral de águas rasas, uma fácies lagunar e uma fácies litorânea oxidante. Correlacionou tais fácies à Formação Paraopeba do Grupo Bambuí
Madalosso & Valle (1978)	Descrevem sistematicamente três grandes unidades e suas respectivas fácies, correlacionando-as à Formação Paraopeba do Grupo Bambuí
Leal <i>et al.</i> (1978)	Compilando dados de prospecção de zinco e chumbo na região de Vazante, descrevem as rochas carbonáticas separando-as em três fácies: <i>fore reef</i> , <i>reef</i> e <i>back reef</i> . Correlacionam estas fácies também à Formação Paraopeba
Dardenne (1978a)	Individualizou a Formação Vazante, subdividida nos membros Morro do Calcáreo, Serra do Poço Verde e Serra do Garrote, mantendo a correlação tradicional com o Grupo Bambuí
Madalosso (1979)	Subdividiu a Formação Vazante em seis fácies (Serra do Garrote, Morro do Calcáreo, Serra do Velosinho, Serra da Lapa, Serra do Landim e Morro Agudo)
Madalosso (1980)	Fez considerações sobre a paleogeografia na região de Paracatu, com argumentos baseados na definição dos ambientes de sedimentação, independentes de qualquer correlação ou concepção tectônica
Campos Neto (1984a)	Dividiu as sequências terrígenas e dolomíticas em três zonas: Zona de Paracatu, Zona de Vazante e Zona das Ardósias. Tais zonas são correlacionadas ao Grupo Paranoá. Sotoposta a estas zonas definiu uma sequência de cobertura de caráter transgressivo que marcaria a passagem para as rochas pertencentes ao Grupo Bambuí
Rigobello <i>et al.</i> (1988)	Redefinem a Formação Vazante de Dardenne (1978), elevando o Membro Serra do Garrote à categoria de formação. As fácies Serra do Landim, Serra do Velosinho e Serra da Lapa (Madalosso 1979 in Rigobello <i>et al.</i> 1988) foram agrupadas na Formação Lapa. A Formação Vazante é considerada predominantemente dolomítica e é subdividida nos Membros Morro do Pinheiro, com fácies inferior e superior, e Pamplona, com fácies inferior, média e superior

Dardenne et al. (1997)	Definem como unidades inferiores da Formação Vazante um conglomerado basal, denominado Membro Arrependido, e uma fácies dolomítica, denominada Membro Lagamar. Duas fácies identificadas como siltitos inferiores e turbiditos são atribuídas à porção superior do Grupo Bambuí
Dardenne et al. (1997)	Apresentam uma divisão em unidades, posicionando os importantes depósitos de fosforitos das regiões de Coromandel, Rocinha e Lagamar na porção basal da Formação Vazante
Dardenne et al. (1998)	Elevam a Formação Vazante à categoria de grupo, identificando cinco grandes unidades: Unidade Psamo Pelítica Inferior de Coromandel, Unidade Psamo Metapelito Carbonatada de Lagamar, Unidade Pelítico Intermediária da Serra do Garrote, Unidade Argilo Dolomítica de Vazante-Paracatu-Unai e Unidade Superior da Serra da Lapa.
Dardenne (2000)	Eleva a Formação Vazante à grupo com as formações Retiro, Rocinha, Lagamar, Serra do Garrote, Serra do Poço Verde, Morro do Calcáreo e Serra da Lapa
Dardenne (2001)	Renomeia a formação basal do Grupo Vazante (Formação Retiro) como Formação Santo Antônio do Bonito
Rodrigues (2008)	Conclui que a ampla maioria dos grãos de zircão do Grupo Vazante apresentam idades U-Pb paleo e mesoproterozóicas, sendo uma pequena, porém não desprezível, população neoproterozóica encontrada em amostras das formações basais Santo Antônio do Bonito e Rocinha (935±14 Ma).
Misi et al. (2011)	Propõe que a parte basal do Grupo Vazante, representada pelas formações Santo Antônio do Bonito e Formação Rocinha seria parte do Grupo Bambuí. .
Oliveira (2013)	Subdivide o pacote carbonático que hospeda o depósito de Zn de Vazante em 6 associações de facies que permitiram a reconstrução paleoambiental da sucessão carbonática. A análise faciológica aliada às interpretações das curvas quimioestratigráficas de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$, permitiram definir quatro estágios evolutivos da bacia carbonática que hospeda a mina de zinco de Vazante: Estágio A – siltitos e folhelhos de plataforma marinha rasa; Estádio B - rampa carbonática com desenvolvimento de planície de maré com ambiente sabhka; Estádio C – superfície de inundação regional e Estádio D – plataforma carbonática com barreira (<i>rinned shelf</i>).

O Grupo Vazante (Dardenne *et al.*, 1998; Dardenne, 2000, 2001) ocorre em uma faixa de aproximadamente 250 km de extensão e 25 km de largura média com orientação geral N-S com vergência das unidades para WSW, delimitados ao leste pelo Grupo Bambuí e ao oeste pelo Grupo Canastra (Figuras 4.1 e 4.2). Ocorre em área dos municípios de Coromandel, Lagamar, Vazante, Paracatu, Unai e hospeda depósitos minerais de zinco (Vazante), zinco e chumbo

(Paracatu – Morro Agudo) e fosfatos (Lagamar) que estão associados à suas seqüências pelíticas-dolomíticas.

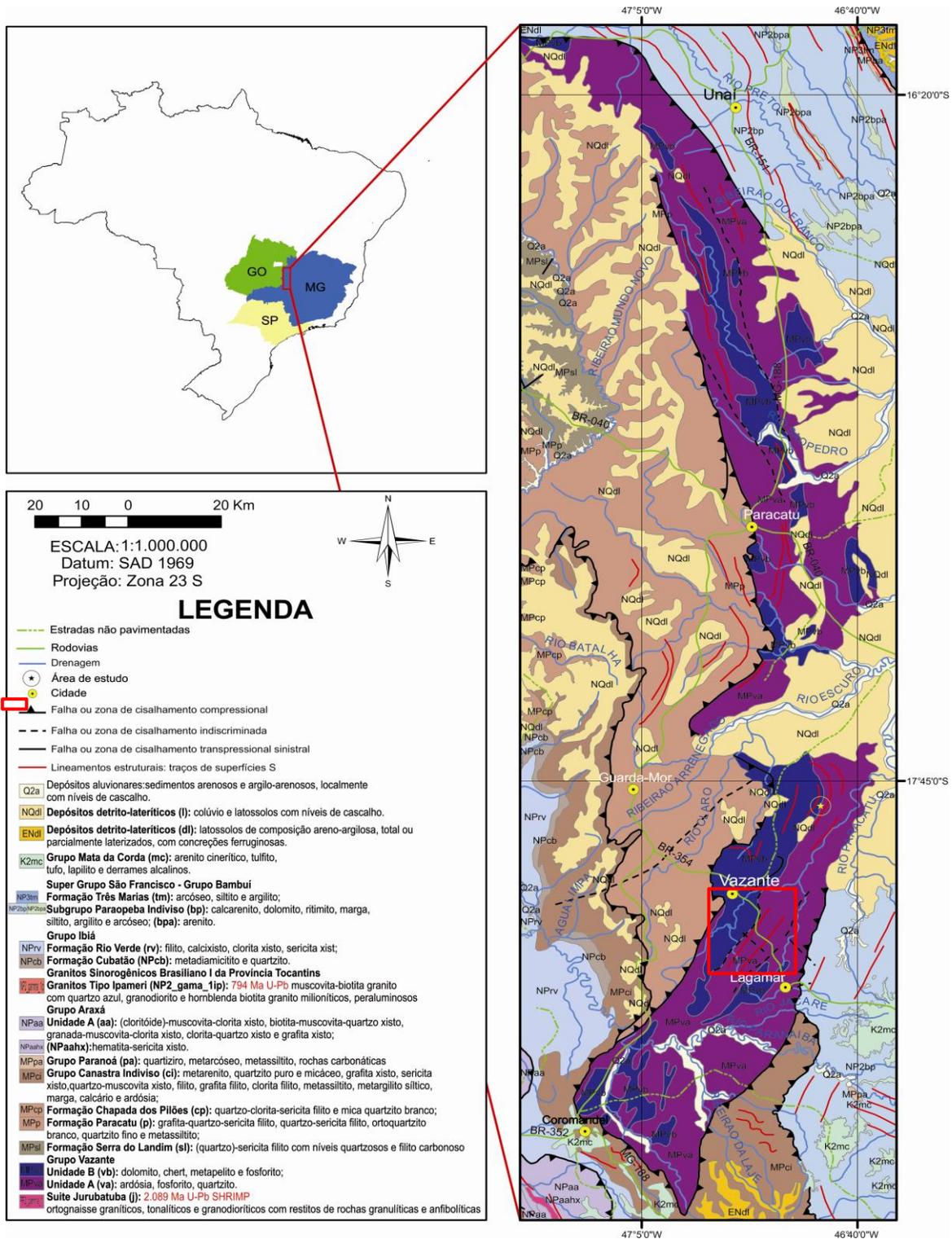


Figura 4. 1. Mapa Geológico Regional da região de Vazante e Paracatu (CPRM, 2004).

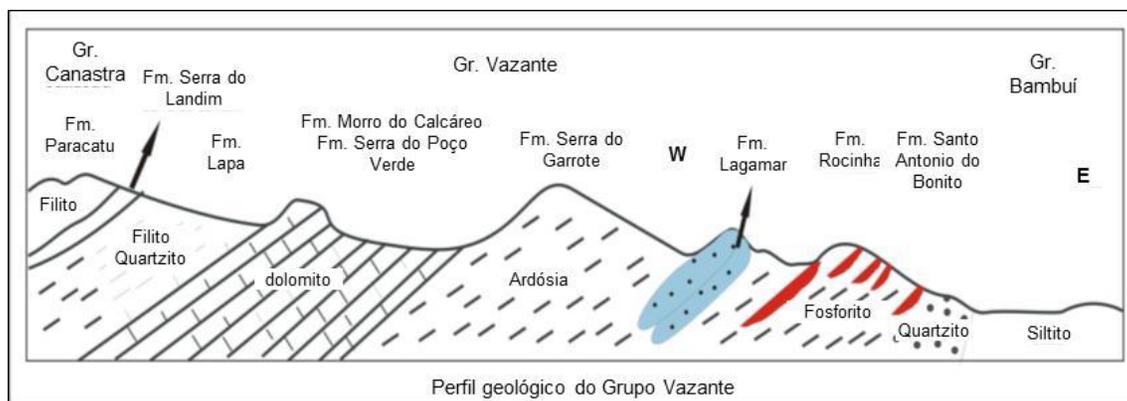


Figura 4. 2. Perfil esquemático do Grupo Vazante, modificado de Dardenne *et al.* (1998).

A divisão estratigráfica do Grupo Vazante adotada neste trabalho é referente à proposta de Dardenne (2000, 2001), que o divide, da base para o topo, nas seguintes formações (Figura 4.3):

1. A seção basal, argilo-carbonática, inclui as formações Santo Antônio do Bonito, Rocinha, Lagamar e Garrote.
 2. A seção de topo, predominantemente dolomítica, inclui as formações Serra do Poço Verde, Morro do Calcáreo e Serra da Lapa.
1. **Formação Santo Antônio do Bonito:** Representa a base do Grupo Vazante é constituída por pacotes métricos de quartzitos brancos ora conglomeráticos, intercalados com níveis pelíticos ardosianos. Próximo aos rios Santo Antônio do Bonito e Santo Inácio ocorrem horizontes de diamictitos com clastos de quartzitos, calcáreos, dolomitos, metassiltitos e granitóides em matriz pelítica, que às vezes se apresenta localmente fosfatada. Os diamictitos representariam fluxos de detritos depositados em águas relativamente profundas por correntes gravitacionais.
 2. **Formação Rocinha:** compreende uma sequência rítmica arenosa e pelítica na base, seguida por um espesso pacote de metapelitos e metassiltitos regularmente intercalados. Passa verticalmente para metapelitos cinza escuro, carbonáticos e piritosos, com finas laminações fosfáticas. Na porção superior dessa formação, metarritmitos (quartzitos e metassiltitos) contêm o depósito de fosfato de Lagamar constituído essencialmente por fosfarenitos.
 3. **Formação Lagamar:** é composta na sua porção basal por alternância de metaconglomerados, quartzitos, metassiltitos e ardósias. Brechas dolomíticas se sobrepõem a esta intercalação às quais sucedem horizontes de calcáreos cinza escuros,

bem estratificados, com intercalações de brechas lamelares e finalmente dolomitos estromatolíticos. Esses últimos formam biohermas de cor bege claro, compostos por dolomitos laminados (esteiras microbianas), dolarenitos e doloruditos oncolíticos, e estromatólitos colunares com laminações convexas e cônicas do tipo *Conophyton* e *Jacutophyton*. Lateralmente e verticalmente, essas biohermas interdigitam-se com metassiltitos carbonáticos e metapelitos ardosianos.

4. **Formação Serra do Garrote:** é constituída por um espesso pacote de metapelitos cinza escuros a cinza esverdeados, às vezes rítmicos, carbonosos e piritosos, com finas intercalações de quartzitos.
5. **Formação Serra do Poço Verde:** é predominantemente dolomítica subdividida em quatro membros da base para o topo:
 - Membro Morro do Pinheiro Inferior – sua constituição é feita por dolomitos cinza-claros e rosados, maciços e por níveis subordinados de dolarenitos, por vezes oncolíticos, brechas lamelares e lentes de estromatólitos colunares.
 - Membro Morro do Pinheiro Superior – este apresenta dolomitos cinza-médios a escuros com estruturas olho-de-pássaro e laminações planas e convolutas, provavelmente de origem relacionada à atividade de cianobactérias. Ocorrem níveis subordinados de dolarenitos, brechas lamelares e filitos carbonosos com pirita.
 - Membro Pamplona Inferior – constituído por filitos carbonáticos, ardósia carbonosa cinza-claro, lilás a esverdeada com níveis dolomíticos finos.
 - Membro Pamplona Médio – compreende dolomitos cinza-claros a rosados com laminações algais, intercalados a níveis de dolarenitos, brechas lamelares e estromatólitos colunares e raras lentes de filito preto.
6. **Formação Morro do Calcáreo:** é caracterizada pela presença de dolomitos róseos estromatolíticos constituindo bióstromos e biohermas com colunas de laminações convexas, associados a dolarenitos oolíticos e oncolíticos e doloruditos (espessura 200 - 300m). Na região de Morro Agudo, Paracatu e Unaí, a Formação Morro do Calcáreo mostra espessuras superiores a 900 m, sendo composta essencialmente por doloruditos evidenciando provavelmente o retrabalhamento de biohermas estromatolíticos parcialmente preservados associados a fácies de dolarenitos intraclásticos oolíticos e

oncolíticos. Essa espessura anormal pode significar que, nessa região, as formações Morro do Calcáreo e Serra do Poço Verde devem representar uma sequência dolomítica única, depositada em continuidade, não sendo possível a individualização das subdivisões observadas na região de Vazante. Nelas são hospedadas as mineralizações de zinco (e chumbo).

7. **Formação Lapa:** O topo do grupo Vazante é representado por filitos carbonosos, metassiltitos carbonáticos, lentes de dolomitos e níveis de quartzitos. As lentes dolomíticas apresentam fácies variadas como dolomitos laminados com esteiras de cianobactérias, dolomitos com estromatólitos colunares e dolomitos com brechas intraformacionais, interdigitados e com a sequência argilo-dolomítica que recobre regionalmente as formações predominantemente dolomíticas do Morro do Calcáreo e da Serra do Poço Verde.

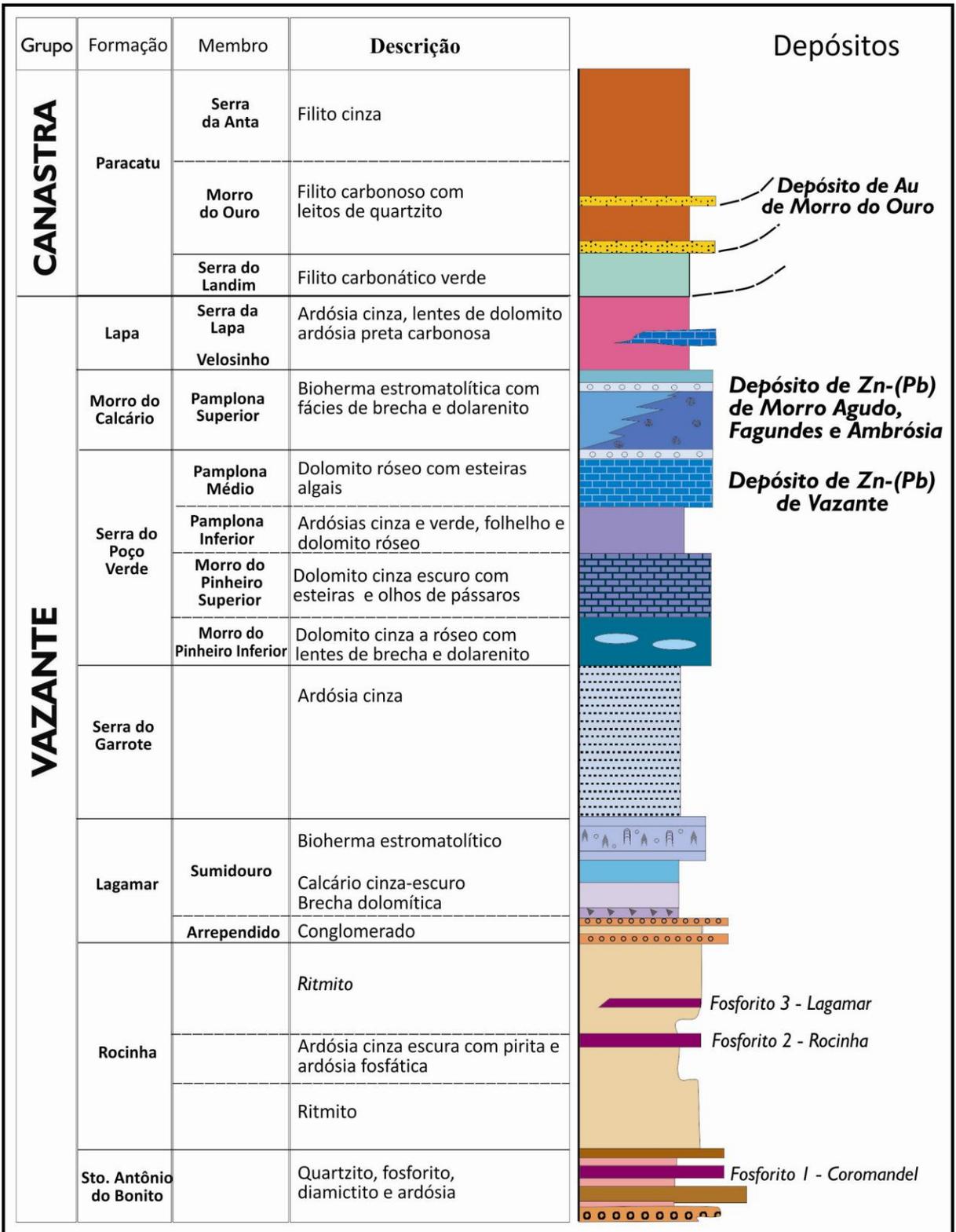


Figura 4. 3. Coluna estratigráfica do Grupo Vazante, Dardenne (2000, 2001).

4.2 Ambiente Geotectônico e Geocronologia

O ambiente de sedimentação e posicionamento estratigráfico do Grupo Vazante ainda são controversos. Dentre as diferentes linhas de pensamento, parte da comunidade científica considera que o Grupo Vazante seria mesoproterozóico e correlato aos grupos Paranoá e Canastra (unidades superiores), relacionado a um paleoalto estrutural gerado por esforços extensivos (Dardenne, 1978a, 1979; Campos-Neto, 1984; Fuck *et al.*, 1993). Na mesma linha de pensamento, Campos-Neto (1984), Almeida (1993) e Fuck (1994) relacionam o Grupo Vazante à sedimentação em margem continental passiva, devido à grande espessura das rochas(meta)-sedimentares na Faixa Vazante (>2500m) em relação às demais unidades proterozóicas. De acordo com Dardenne (1981) e Marini *et al.* (1981), nesse ambiente a deposição teria ocorrido em condições de acentuada subsidência.

Outros autores consideram que a sedimentação do Grupo Vazante teria ocorrido em ambiente análogo ao proposto para o Grupo Bambuí (Thomaz Filho *et al.*, 1998; Martins-Neto *et al.*, 2001; Martins Neto & Alkmim, 2001), associada a bacia de antepais (*foreland*). Presença de clastos de rochas metamórficas, tais como, filito, quartzito e *metachert*, presentes em metaconglomerados da Formação Lapa na região de Unaí (Laranjeira, 1992; Dardenne *et al.*, 1998), indicariam a proveniência a partir das seqüências da Faixa Brasília em uma bacia de rápida subsidência e elevada taxa de sedimentação que se formaria nos primeiros *fronts* de cavalgamentos da Faixa Brasília (Dardenne *et al.*, 1998).

As datações obtidas até hoje nestas rochas também refletem a dificuldade de posicionar o Grupo Vazante na evolução da Faixa Brasília.

A presença de estromatólitos pertencentes ao gênero *Kussiella*, *Colonnella*, *Conophyton*, *Jacutophyton* e *Baicalia* em alguns níveis das unidades carbonáticas do Grupo Vazante, permitiu limitar a idade do grupo entre 950 e 1.350 Ma (Moeri, 1972; Dardenne *et al.*, 1976; Dardenne, 2000) e, conseqüentemente, correlacioná-lo aos grupos Canastra e Paranoá, mesoproterozóicos.

Datações Pb-Pb em galena das minas de Vazante e Morro Agudo apontam idades de 1,2 Ga e 650 Ma (Amaral, 1967, 1968c; Cassedanne & Lasserre, 1969; Cassedanne, 1972; Iyer, 1984; Iyer *et al.*, 1992; Misi *et al.*, 1997, Cunha *et al.*, 2001; Freitas-Silva & Dardenne, 1997), interpretadas como relativas à separação do Pb de sua fonte (1,2 Ga) e a idade da mineralização (650 Ma) próxima à da sedimentação, o que indicaria uma idade de sedimentação também neoproterozóica, análoga à do Grupo Bambuí.

Datações pelo método Rb-Sr em folhelhos do Grupo Vazante indicaram idades de 600 ± 50 Ma (Amaral & Kawashita, 1967) e 680 ± 10 Ma (Couto *et al.*, 1981), semelhantes à idade determinada em rochas do Grupo Bambuí pelo mesmo método, porém refletindo possivelmente o último evento térmico ao qual essas unidades geológicas foram submetidas.

Misi (1997b), a partir de estudos quimioestratigráficos baseados nas razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, nos valores de $\delta^{13}\text{C}$ de calcários micríticos da porção basal do Grupo Vazante (formações Lagamar e Rocinha) e de $\delta^{34}\text{S}$ do sulfato aprisionado no retículo cristalino de minerais carbonáticos, consideraram que a sedimentação das sequências carbonáticas e pelíticas da Formação Vazante, do Grupo Bambuí e do Grupo Una teria ocorrido há 670 – 600 Ma.

Estudos isotópicos realizados por Azmy *et al.* (2001) em amostras de testemunhos de sondagem do Grupo Vazante também indicaram razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e valores $\delta^{13}\text{C}$ em rocha dolomítica e $\delta^{34}\text{S}$ em sulfato aprisionado nos dolomitos comparáveis aos de unidades carbonáticas neoproterozóicas.

Babinski *et al.* (2005) ao realizarem estudos geocronológicos em diques máficos hidrotermalizados presentes na zona de falha de Vazante, na área da Mina de Vazante, obtiveram idades de ca. 2,1 Ga, interpretadas como relativas à herança do embasamento.

Rodrigues (2008), ao realizar estudos de proveniência, concluiu que a ampla maioria dos cristais de zircão detríticos do Grupo Vazante apresenta idades U-Pb paleo e mesoproterozóicas, embora uma pequena, porém não desprezível, população de zircão com idades neoproterozóicas tenha sido encontrada. Em amostras das formações basais Santo Antônio do Bonito e Rocinha, a idade de 935 ± 14 Ma é tida como a idade máxima para a deposição do grupo. O limite mínimo da deposição ainda permanece um tanto impreciso, sendo limitado somente pela idade do pico metamórfico da Faixa Brasília em 630 Ma. Com base nesses dados, Rodrigues (2008) apresentou um novo modelo evolutivo simplificado para o segmento centro-sul da Faixa Brasília (Figura 4.4).

Babinski *et al.* (2005) ao realizarem estudos geocronológicos em diques máficos hidrotermalizados presentes na zona de falha de Vazante, na área da Mina de Vazante, obtiveram idades de ca. 2,1 Ga, interpretadas como relativas à herança do embasamento.

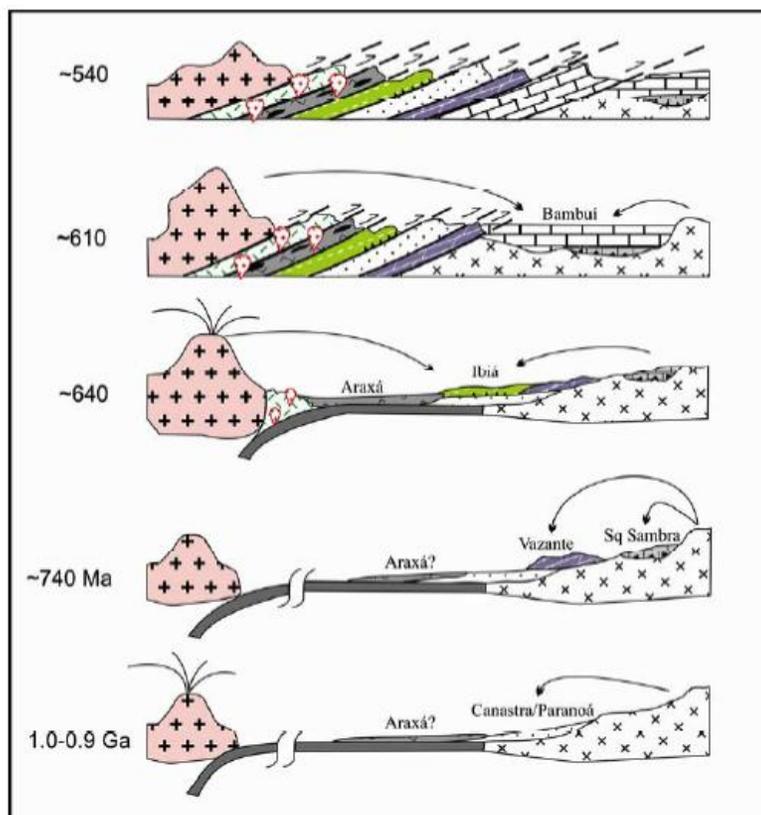


Figura 4. 4. Modelo evolutivo simplificado para o segmento centro-sul da Faixa Brasília (Rodrigues, 2008).

4.3 Geologia Estrutural

O Grupo Vazante possui diferentes litotipos com características reológicas próprias, sendo que tais diferenças refletem o comportamento estrutural de cada unidade. Vários estudos de cunho estrutural foram realizados no Grupo Vazante e serão resumidos abaixo e sintetizados na tabela 4.2.

A estruturação tectônica principal do Grupo Vazante associa-se a esforços exercidos de oeste para leste. Observa-se que as unidades metapelíticas evidenciam dobramento intenso com presença de dobras isoclinais, enquanto os dolomitos comportam-se como blocos resistentes aos esforços, formando pequenas dobras suaves com eixos de direção tanto leste-oeste como norte-sul (Dardenne, 1974).

Para a porção sul da Faixa Vazante (região de Vazante), Ladeira *et al.* (1963) e Amaral (1969) descreveram a ocorrência de zonas de empurrão e/ou cavalgamentos mais antigos e fraturas NW mais recentes, responsáveis pela morfologia atual das várias pequenas serras

presentes na região. Os autores associaram a mineralização de zinco de Vazante com falha orientada segundo N40-50E.

Campos Neto (1984b) apresenta um modelo de evolução tectônica para a Faixa Paracatu-Vazante com sete fases de deformação, sendo que as duas primeiras fases seriam representadas por dobras com eixo para sudoeste. A terceira fase é representada pelos cavalgamentos paralelos às estruturas, enquanto uma quarta fase seria caracterizada por dobras com eixo com caimento para NW. A quinta fase teria resultado em dobras com eixos com caimento para NE. A sexta fase é representada por dobras com eixo leste-oeste e, por último, a sétima fase é representada por falhas transversais.

Freitas-Silva & Dardenne (1992b) sugeriram que a evolução tectônica da região de Paracatu e adjacências teria ocorrido em um único evento orogenético, caracterizado por seis fases. Dardenne *et al.* (1998) sugeriram controle tectônico para a mineralização hidrotermal de zinco, relacionado a fluidos hidrotermais conatos canalizados ao longo de uma falha normal lítrica.

Para Almeida (1993), o Grupo Vazante foi afetado pelo sistema de *nappes* resultantes da compressão que sucedeu a extensão formadora das bacias e que teve reflexo no desenvolvimento das áreas pancratônicas. A fase compressional apresenta características direcionais, segundo Alkmim *et al.* (1989), sendo relacionada à tectônica transpressiva.

Um estudo mais detalhado da evolução tectônica da Falha de Vazante, proposto por Pinho (1990), reconheceu quatro fases de deformação, sendo: (a) fase de caráter extensivo que reativou antigas zonas de fraqueza do embasamento, com movimentação diferencial dos blocos, gerando altos paleogeográficos, importantes durante a deposição do Grupo Vazante; (b) fase compressiva tangencial que gerou reativações com movimentação transcorrente de falhas sin-sedimentares; (c) fase de encurtamento tectônico marcado por falhas de empurrão e (d) fase de caráter extensivo, com alívio da compressão anterior e acomodação dos blocos.

Rostirolla *et al.* (2002), também estudando a Zona de Falha de Vazante (Figura 4.5), definiram cinco fases deformacionais, incluindo fase associada à tectônica de *nappes* da Faixa Brasília (Dardenne 1979, 2000), no Proterozóico, variando de convergente no início (fases D1 e D2), passando a direcional sinistral associada a uma tectônica de escape (fase D3) e posteriormente distensional (fase D4). Esta última fase provavelmente seria relacionada ao relaxamento de tensões pós-convergência. As estruturas da fase D5 referem-se ao registro parcial de um segundo ciclo, correspondendo ao fraturamento generalizado com direção preferencial NW a EW, transversal ao *trend* estrutural do primeiro ciclo (NE), provavelmente relacionado à deformação mesozóica registrada na plataforma Sul-Americana.

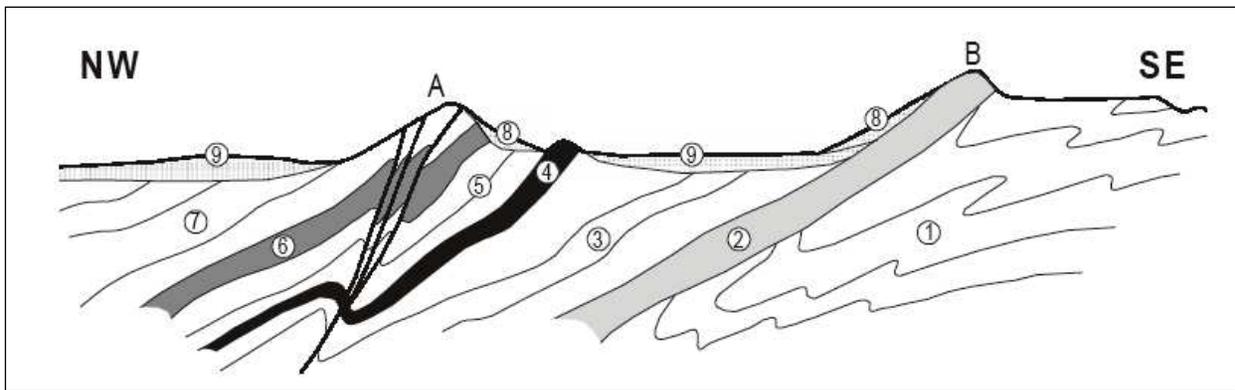


Figura 4. 5. Seção estrutural esquemática: A – Zona de Falha de Vazante; B – Zona de Falha da Serra do Garrote; 1 – metapelitos da Formação Serra do Garrote; 2 – Filitos quartzosos, Formação Serra do Garrote; 3 – Metadolomitos do Membro Morro do Pinheiro Inferior (Rostirolla, 2002).

Tabela 4. 2. Principais estudos estruturais e modelos de evolução tectônica propostos para a Faixa Vazante.

GEOLOGIA ESTRUTURAL - GRUPO VAZANTE										
Ladeira et al. (1963) e Amaral (1969)	Dardenne (1974)	Campos Neto (1984b)		Freitas-Silva & Dardenne (1992b)		Almeida (1993)	Pinho (1990)		Rostirolla et al., 2002	
Região de Vazante	Grupo Vazante	Faixa Paracatu-Vazante		Região de Paracatu		Grupo Vazante	Região de Vazante		Região de Vazante	
		Fase	Principais Características	Fase	Principais Características		Fase	Principais Características	Fase	Principais Características
Mencionaram uma estruturação geral, com a mineralização orientada segundo N40-50E, e a ocorrência de zonas de empurrão e/ou cavalgamentos mais antigos e fraturas NW mais recentes, responsáveis pela morfologia atual das várias pequenas serras presentes na região	Grupo Vazante: Esforço tectônico de Oeste para Leste. Pelitos evidenciam um dobramento intenso que pode chegar a dobras isoclinais e os dolomitos comportam-se como blocos resistentes aos esforços, formando pequenas dobras suaves com eixos de direção tanto leste-oeste, como norte-sul	D1 e D2	Representadas por dobras com eixo para sudoeste	F1	Geradora de uma clivagem de fluxo S1, paralela ao acamamento sedimentar	Foi afetado pelo sistema de nappes resultantes da compressão que sucedeu a extensão formadora das bacias e que teve reflexo no desenvolvimento das áreas pancratônicas	D1	Caráter extensivo reativando antigas zonas de fraqueza do embasamento, com movimentação diferencial dos blocos, gerando altos paleogeográficos;	D1 e D2	Deformação progressiva em regime dúctil, tendo sido responsáveis pela formação do arcabouço regional, com a geração de dobramentos holomórficos em larga escala e superfícies de foliação penetrativas, associadas a uma tectônica convergente com formação de empurrões e dobramentos, que apresentam vergência para E-SE.
		D3	Cavalgamentos paralelos às estruturas	F2	Principal fase de deformação marcada pela clivagem de fluxo F2 que corresponde à foliação regional, gerada com uma foliação do tipo SC.					
		D4	Dobras com eixo para NW	F3	Dobras em chevron e a falhas transcorrentes					
		D5	Dobras com eixos para NE	F4 e F5	São associadas, respectivamente, a kinks e ondulações suaves com incipiente clivagem espaçada					
		D6	Dobras com eixo leste-oeste	F6	Representada por fraturas de cisalhamento e híbridas e falhamentos normais					
		D7	Falhas transversais							
				D2	Fase compressiva tangencial gerando reativações com movimentação transcorrente					
		D3	fase de encurtamento tectônico marcado por falhamentos de empurrão	D4	Sistema distensional NE rúptil, durante o qual a mineralização de zinco foi parcialmente remobilizada					
		D4	fase de caráter extensivo, com alívio da compressão anterior e acomodação dos blocos	D5	Gerou um reticulado de falhas distensionais EW e NW, que controlam, em grande parte, o fluxo hidrológico nos aquíferos cársticos formados em decorrência da dissolução da seqüência carbonática. As relações observadas indicam claramente uma evolução em dois ciclos tectônicos					

5. DEPÓSITOS DE ZINCO NÃO SULFETADO

Os principais depósitos de zinco não sulfetado (Figura 5.1) localizam-se em todos os continentes e podem ser subdivididos em três grupos (Hitzman *et al.*, 2003): supergênicos, hipogênicos (estruturalmente controlado) e hipogênico (estratiforme).

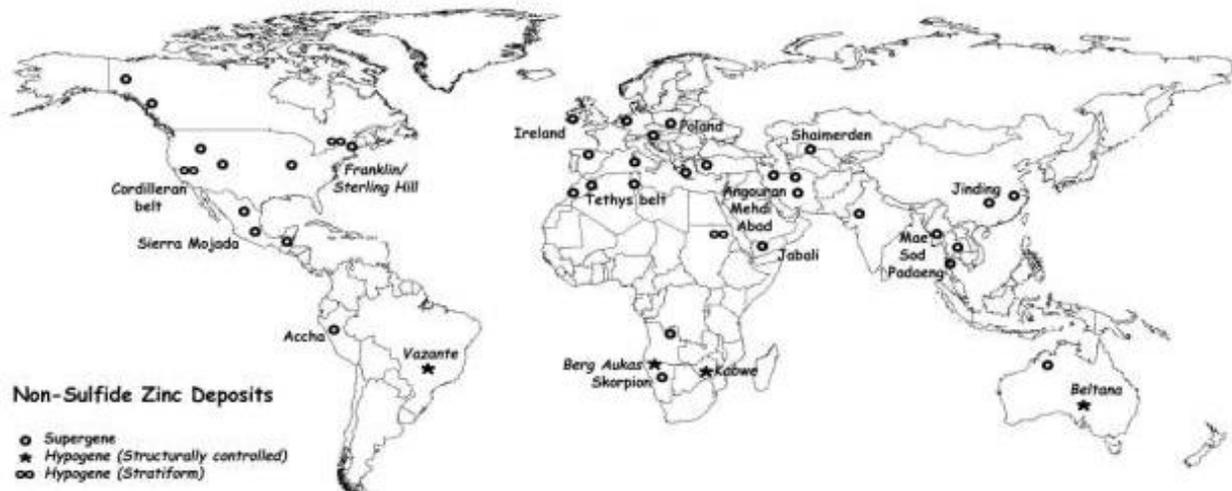


Figura 5. 1. Localização dos principais depósitos de zinco não sulfetado (Boni, 2003).

5.1 Depósitos Supergênicos de Zinco

Em sua maioria, os depósitos de zinco supergênicos, estão localizados entre as latitudes 15°e 40°N (Boni, 2003), refletindo condições climáticas favoráveis à formação de minerais de zinco secundário.

De acordo com Hitzman *et al.* (2003), os principais minerais econômicos que constituem tal tipo de depósito são a *smithsonita*, *hidrozincita* e *hemimorfita*, formados a partir da oxidação de depósitos de zinco sulfetado que podem ser divididos em três subtipos:

I – **Depósitos de substituição direta:** Essencialmente equivalente a gossans ricos em zinco, onde smithsonita e hidrozincita substituem esfalerita. Sua mineralogia (e metalurgia consequente) é bastante complexa, com uma grande variedade de minerais semelhantes aos que ocorrem geralmente em gossans.

II – **Depósitos de substituição da encaixante:** Obtidos por reações entre as águas subterrâneas ácidas contendo zinco e rochas hospedeiras carbonáticas abaixo do lençol freático. O principal mineral de minério é a smithsonita criptocristalina, que forma-se em consequência das diferenças na mobilidade do metal e a separação do zinco do chumbo e do ferro.

III – **Depósitos residuais e preenchimento de carste:** Resultantes da acumulação de minerais secundários de zinco em uma rede de cavidades cársticas. Muitos depósitos supergênicos incluem componentes de mais de uma dessas categorias, levando a subtipos mistos de depósitos.

As características geológicas importantes para a oxidação de sulfetos primários e preservação dos minerais de zinco secundários, incluem (Boni, 2003):

- Soerguimento tectônico após a mineralização primária sulfetada, promovendo a oxidação e o desenvolvimento de sistemas cársticos;
- Fraturadas rochas hospedeiras promovendo o fluxo de fluidos oxidantes e mobilização para zonas favoráveis.
- Presença suficiente de sulfeto de Fe na mineralização primária como um importante controle durante a oxidação para a geração de ácido necessário para a lixiviação e transporte de zinco.

As características principais de depósitos de zinco supergênicos podem ser resumidas conforme a tabela 5.1.

5.2 Depósitos Hipogênicos de Zinco

Este tipo de depósito consiste predominantemente em silicatos de zinco, óxidos e raros sulfetos, sendo a willemita (Zn_2SiO_4) o mineral de minério mais representativo desta classe de depósito (Hitzman *et al.*, 2003). A formação dos corpos de minérios tem sido correlacionada com mistura de fluidos pobres em enxofre, levemente ácidos, reduzidos, ricos em zinco e de baixa a moderadas temperaturas (> 100 °C a <250°C), com fluidos oxidados e mais diluídos, também pobres em enxofre, relacionados à águas subterrâneas, água do mar ou fluidos bacinais re-equilibrados devido à interação com pacotes de rochas oxidadas, tais como *red beds* ou regolitos (Hitzman, *et al.*, 2003).

Os depósitos hipogênicos, de acordo com Hitzman *et al.* (2003), são divididos em dois subtipos:

- **Depósitos hipogênicos estruturalmente controlados:** consiste de veios e corpos irregulares de willemita com esfalerita, hematita e minerais ricos em manganês subordinados;

Tabela 5. 1. Características dos principais depósitos supérgenos de zinco.

	Depósito	Tipo	Aspectos Gerais	Mineralização
Boland et al., 2003	Shaimerden (Cazaquistão)	<i>Wallrock e Direct Replacement</i>	O depósito está hospedado em carbonatos do Carbonífero Inferior presente em uma sucessão vulcânica e encoberto por 40m de coberturas do Cretáceo ao Quaternário	Corpos irregulares (200 x 300m): Hemimorfita, smithsonita e sauconita
Hitzman et al., 2003	Cho Dien (Vietnã)	<i>Residual Karstic</i>	Pequenos corpos de sulfetos de alto teor relacionado a uma intrusão granítica do Triássico nos metassedimentos do Devoniano	Teor entre 10 a 30%: Mineralização ocorre nas cavidades de um platô cárstico. Hemimorfita, Hidrozincita, smithsonita
Moore (1972) e Boni (2003)	Sardenia (Itália)	<i>Partial Replacement</i>	(Paleo-intemperismo) Provavelmente relacionado as condições geomorfológicas do Terciário-Mesozóico. Relações entre intemperismo, soerguimento e erosão.	Teor geralmente acima de 20%: Smithsonita, hemimorfita e hidrozincita
Borg et al., 2003	Skorpion (Namíbia)	<i>Wallrock replacement</i>	Derivado de corpos de sulfeto maciço vulcanogênicos hospedado em uma sucessão vulcano-sedimentar Neoproterozóica. Soerguimento e erosão de rochas hospedeiras e dos corpos de sulfeto maciço em orógeno, permitiu a circulação de fluidos oxidantes precipitando na porosidade secundária da mesma sequência vulcano-sedimentar	Hemimorfita, sauconita e smithsonita
Hirayama (1986); Gilg et al., 2003	Angouran (Irã)	<i>Mixed oxide/sulfide</i>	Está hospedado em um complexo metamórfico Neoproterozóico constituídos de margas e xistos, encobertos por corturas sedimentares (Terciário-Quaternário) e sequência vulcânica. Características apontam para uma origem mista supergênica-hidrotermal (relacionado a circulação de fluidos durante atividade vulcânica)	O depósito consiste em uma capa oxidada, subjacente a um corpo misto de sulfeto-óxido o qual grada para corpos de sulfeto em profundidade - Smithsonita, hidrozincita, hemimorfita, arsenopirita, galena, pirita
Dejonghe (1998).	La Calamine (Belgium)	<i>Palaeo weathering</i>	Oxidação de sulfetos primários e formação de Zn-secundário, se deu a partir da associação do soerguimento, fraturamento e condições climáticas (quente-úmido), as quais permitiram o desenvolvimento de um extenso perfil de intemperismo.	Esfalerita, galena, pirita, marcassita, willemita, smithsonita, hemimorfita, hidrozincita

- **Depósitos hipogênicos estratiformes:** representados por lentes de franklinita-willemita-zincita±gahnita. Estes podem ser uma extensão de depósitos do tipo *Broken Hill* ou relacionados ao metamorfismo de sulfetos de zinco. Outros exemplos mundialmente encontrados deste tipo de depósito são os de Sterling Hill e New Jersey, EUA.

Os principais exemplos de depósito de zinco hipogênicos são Vazante (Brasil), Beltana-Aroona (Austrália), Kabwe (Zâmbia) e Berg Aukas (Namíbia). Estes depósitos apresentam certas similaridades, pois são estruturalmente controlados, formando veios e corpos de minérios localizados ao longo de falhas e tem uma variabilidade de halos hidrotermais bem característicos (Boni, 2003).

5.2.1 Depósito de Aroona Beltana

5.2.1.1 Aspectos Gerais

Localizado na Austrália, o depósito de Aroona-Beltana é classificado como depósito de willemita epigenético controlado por estruturas (Hitzman *et al.*, 2003), com recursos estimados para Beltana de 863.000 t @ 38% Zn e 2,2 % Pb (1974 – pré mina) e para Aroona de 150.000 t @ 34,4% Zn e 1,6% Pb (pré mina). Estes depósitos fazem parte de um distrito de Zn-Pb ± Cu localizados situado a nordeste de Adelaide, no norte de Flinders Ranges, sul da Austrália, que inclui algumas ocorrências menores de depósitos do tipo MVT (Groves *et al.*, 2003).

5.2.1.2 Geologia do Depósito

O depósito de Aroona/Beltana (Figura 5.2) é hospedado por unidades de Flinders Ranges (Groves *et al.*, 2003), que representa uma bacia sedimentar deformada do Proterozóico Inferior ao Cambriano Intermediário, localizada entre complexos do embasamento cristalino paleoproterozóico Thomson *et al.* (1976). A bacia foi desenvolvida em um rifte continental de margem passiva no Neoproterozóico (Preiss, 1987) com deposição de mais de 15 km de sedimentos siliciclásticos e lentes de sedimentos carbonáticos (Coats, 1973). A mineralização de zinco e chumbo é encontrada ao longo do geossinclinal, geralmente associada com litotipos de plataforma carbonática marinha do Cambriano (Groves, *et al.*, 2003).

Os depósitos de willemita de Aroona e Beltana são estruturalmente controlados e extremamente complexos, sendo que ambos estão situados em um corredor de direção NW com presença de mineralização de chumbo e zinco (Groves *et al.*, 2003).

O principal controle do depósito de Aroona está relacionado com a Falha de Aroona (Figura 5.3), com direção NW e mergulho de 45° para NE, associadas a falhas de empurrão de baixo ângulo. A geometria do corpo do minério apresenta forma de um charuto achatado, controlado pela intersecção da unidade estratigráfica favorável e a Falha de Aroona (Groves *et al.*, 2003; Carman, 2003).

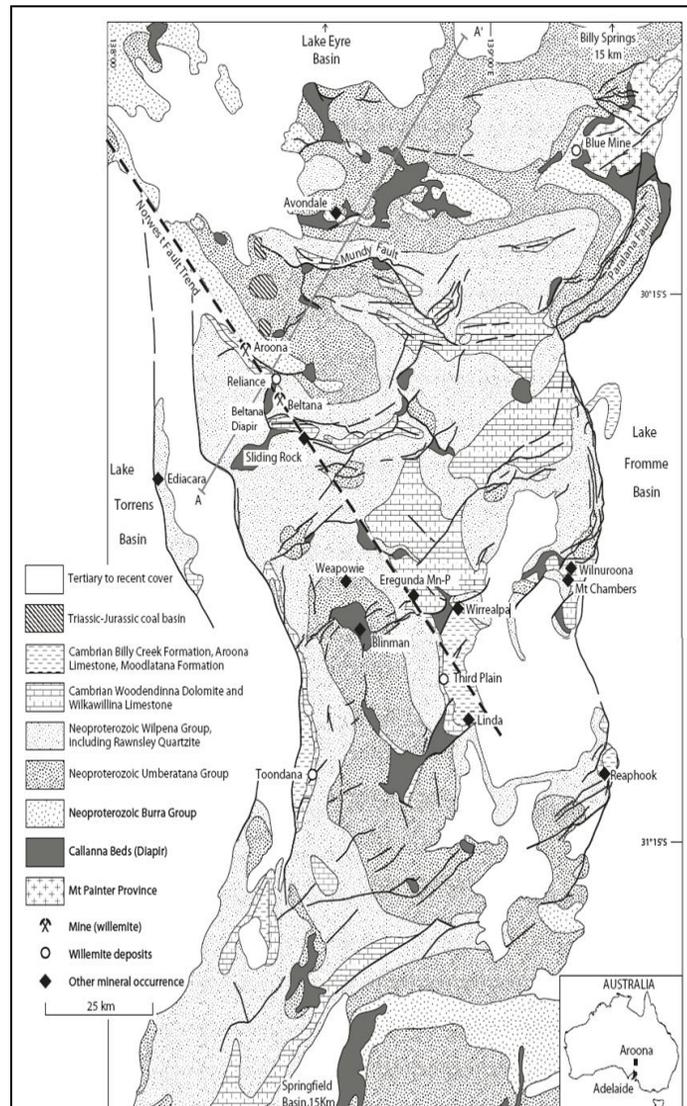


Figura 5. 2. Mapa Geológico dos depósitos de Beltana-Aroona (1:250.000) de Carman (2003).

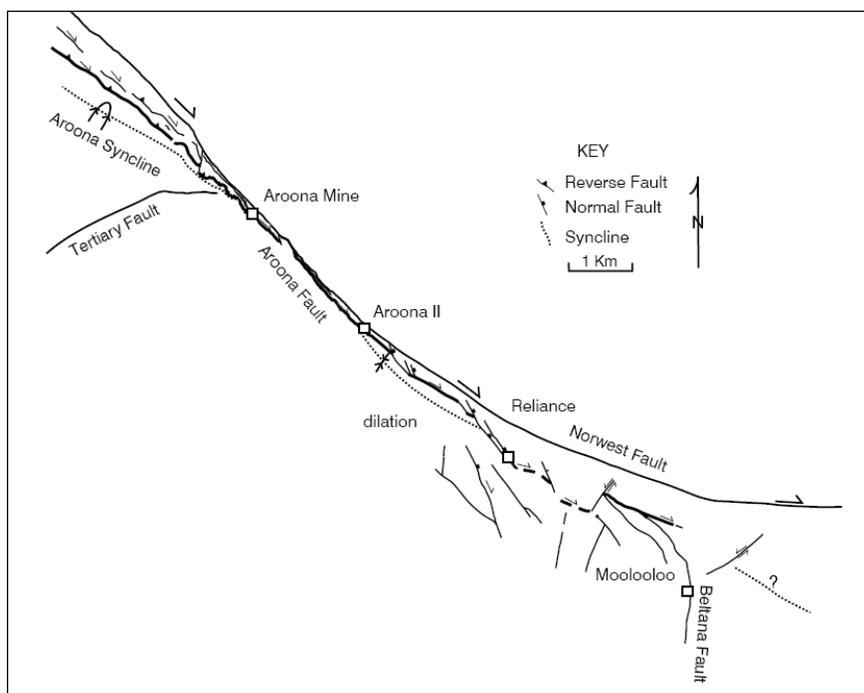


Figura 5. 3. Trend estrutural de Aroona, mostrando a localização da Mina de Aroona (Carman, 2003).

O depósito de Beltana é controlado pela Falha de Beltana, com *trend* aproximado N-S e mergulho de 70° ENE (Carman, 2003), associada às falhas de empurrão de baixo ângulo (25-45°) responsáveis pelo controle da geometria do minério. Estruturas verticais WNW truncam o minério e também são responsáveis pela migração dos fluidos hidrotermais, relacionadas com a deposição de Pb (Groves *et al.*, 2003).

5.2.1.3 Mineralização - Alteração Hidrotermal e Gênese

Os principais minerais de minério formadores dos depósitos de Aroona e Beltana são a willemita (Zn_2SiO_4), smithsonita ($ZnCO_3$), coronadita $Pb(Mn)_8O_{16}$, hedifânio $[Ca, Pb]_5(AsO_4)Cl$ e a mimetita $[Pb_5(AsO_4)Cl]$ (Groves *et al.*, 2003). A textura do minério willemítico inclui amorfos de willemita vermelha maciça, brechas multifásicas, bandamento crustiforme e coliforme, lâminas de willemita fina, textura zebrada e substituição direta de fósseis e laminações algais por willemita. (Groves *et al.*, 2003).

No entorno do depósito de Beltana é possível encontrar um halo de intensa alteração hidrotermal de aproximadamente 400 m, representado por dolomitização, hematita e zonas com baixo teor de zinco (1-3%). O zinco hospeda-se na estrutura cristalina da dolomita enquanto a hematita está presente como um filme ao longo dos planos de clivagem, dando uma coloração

rosa ou vermelho à dolomita. Já a alteração hematítica no entorno do depósito de Aroona é mais restrita, resultado da menor reatividade da dolomita (Groves *et al.*, 2003).

Correlação de eventos da mineralização entre os depósitos de willemita de Aroona e Beltana sugerem mineralização pós-orogênica com uma idade absoluta de 435 ± 5 Ma com base em datação radiométrica de K-Ar em coronadita de Beltana (Groves *et al.*, 2003).

Algumas controvérsias ainda existem sobre a gênese dos depósitos de Aroona e Beltana. Para Muller (1972), o minério com willemita seria resultado de enriquecimento supérgeno de esfalerita-galena em corpos de sulfetos maciços (MVT) e Grubb (1967) propõe que a willemita epigenética estaria relacionada a uma “intrusão” de diápiro de sal.

Groves *et al.* (2003), classifica esses depósitos de willemita como epigenéticos estruturalmente controlados, formados durante a orogenia Delamerian em um paleo-alto, onde a precipitação de willemita e a alteração hidrotermal com hematita-dolomita zincífera seria o resultado de soluções salinas ácidas oxidantes mineralizadas de origem profunda (*deep-seated fluids*) que percolaram estruturas favoráveis ($< 150^\circ\text{C}$). Tal mineralização ocorreu em espaços abertos formados devido à interação com os fluidos ácidos que resultaram em corrosão hidrotermal e brechação hidrotermal possivelmente auxiliados por rupturas tectônicas nos dolomitos.

Carman (2003), estudando o depósito de Aroona, destacou que os corpos de minério willemíticos formaram-se a partir da precipitação sob condições oxidantes de salmouras hidrotermais ricas em metais de baixa temperatura. A deposição de minério iniciou-se com willemita e hematita, seguida pelo decréscimo em hematita e precipitação de willemita crustiforme. Mineraiis com manganês precipitaram-se quando grande parte da willemita já havia sido formada. *Hetaerolite* ($\text{ZnMn}^{3+}2\text{O}_4$), coronadita ($[\text{Zn,Ca,Pb}]_5[\text{AsO}_4]_3\text{Cl}$), *hedyphane* ($[\text{Zn,Ca,Pb}]_5[\text{AsO}_4]_3\text{Cl}$) e willemita formaram-se em *vugs* e na matriz das brechas. Calcita, dolomita e quartzo preencheram os espaços abertos remanescentes e localmente a calcita substituiu a willemita.

A oxidação tardia dos depósitos de Beltana e Aroona resultou localmente na substituição de willemita por hemimorfita e smithsonita (Hitzman *et al.*, 2003).

5.2.2 Depósitos willemíticos da Namíbia e Zâmbia

5.2.2.1 Aspectos Gerais

Localizados na porção sul do continente Africano, depósitos de willemita (Zn_2SiO_4) estão hospedados em rochas carbonáticas proterozóicas da Namíbia e Zâmbia e incluem *Berg Aukas*, *Abenab West* e *Baltika* inseridos no *Otavi Mountain Land*, Namíbia; e *Kabwe*, *Excelsior* e *Star Zinc*, localizados na Zâmbia. Tais depósitos são interpretados de acordo com Hitzman *et al.* (2003) como de origem hipógena-hidrotermal.

5.2.2.2 Geologia dos Depósitos Willemíticos

As ocorrências de willemita situam-se em terrenos neoproterozóicos (*ca.* 850-550Ma) envolvidos na colisão dos crátons Kalahari e São Francisco/Congo (John *et al.*, 2004), como apresentado na Figura 5.4.

Otavi Mountainland - Namíbia

Em Otavi Mountainland (OML), ocorrem mais de 600 prospectos de metais base sulfetados e não sulfetados representando a parte E-W do cinturão orogênico Damara (Melcher, 2003). Esse cinturão é constituído por embasamento paleo-mesoproterozóico, que é encoberto por sucessões sedimentares neoproterozóicas do Supergrupo Damara, no qual rochas carbonáticas são abundantes e hospedam depósitos de sulfetos polimetálicos e depósitos não sulfetados (Terraciano, 2008). As camadas proterozóicas são cortadas por diques básicos e parte estão encobertas por sedimentos clásticos depositados do Cambriano ao Jurássico (Laukamp, 2006).

Zâmbia

Os depósitos localizados na Zâmbia ocorrem em rochas metassedimentares do Proterozóico inferior do Supergrupo *Katanga*, onde os corpos de minérios (willemita e sulfetos) hospedados em rochas dolomíticas foram afetados por metamorfismo regional de fácies xisto verde durante o desenvolvimento do Orógeno *Lufilian*. A margem sul do Arco Lufilian é separado do cinturão Zambezi por uma zona de cisalhamento regional (John *et al.* 2004), que envolveu os terrenos neoproterozóicos da Sequência Supracrustal Zambezi, hospedeiras dos depósitos de willemita.

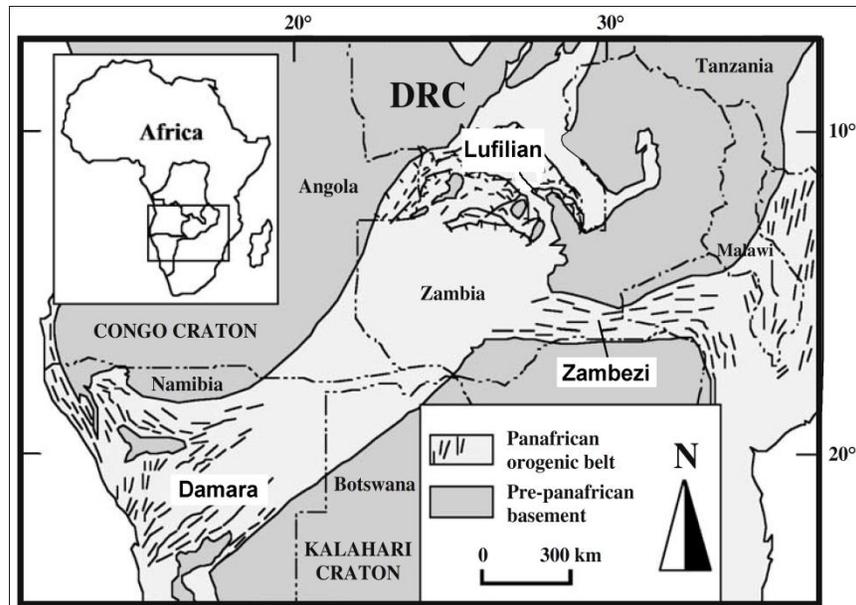


Figura 5. 4. Mapa do Sul da África Central mostrando os cinturões orogênicos Pan-Africanos (Schneider *et al.*, 2007).

5.2.2.3 Mineralização – Alteração Hidrotermal e Gênese

O minério primário de Zn-Pb do depósito de Kabwe (Zâmbia) é constituído por sulfetos epigenéticos que substituem a rocha hospedeira (dolomito Kabwe) e constituem uma série de corpos irregulares (Kamona *et al.*, 2007) na forma de *pipes* ou veios que cortam o dolomito cinza maciço (Kortman, 1972).

O depósito de Zn-Pb-V de Berg Aukas (Namíbia) é hospedado por dolomitos microbiais e, de acordo com Misiewicz (1988), localiza-se próximo a zonas de mudança de fácies da bacia. A mineralização de sulfeto primária (esfalerita) ocorre ao longo do acamamento paralelo à falha, separando diferentes unidades dolomíticas.

De acordo com Terraciano (2008), a mineralização com willemita no sul do continente Africano formou-se em diferentes estágios, supergênico, relacionado aos depósitos Berg Aukas, Abenab West e Baltika localizados na Namíbia e Kabwe na Zâmbia; e hipogênico, correspondente aos depósitos localizados na Zâmbia (Star Zinc e Excelsior). As principais características, definidas por Terraciano (2008), foram:

Mineralização Supérgena:

- Texturas típicas de *gossan* e complexa mineralogia, derivadas da múltipla oxidação e/ou intemperismo de corpos de sulfetos primários, associados aos processos de paleo-intemperismo pós-orogênicos, seguidos do soerguimento cambro-ordoviciano (530-490Ma)
- Ganga carbonática com dolomita em cela (contendo Zn-Pb).
- Inclusões fluidas monofásicas apontando para fluidos meteóricos supergênicos (ou hidrotermal de baixa temperatura).
- Willemita com catoluminescência azul com inclusões de goethita e hematita.

Mineralização Hipogênica:

- Texturas de substituição direta como corpos discordantes;
- Associação próxima com espinélio de zinco (franklinita e gahnita), minerais depositados em estágios tardios de metamorfismo, bem como associação de genthelvita; hematita-especularita.
- Duas fases de inclusões fluidas de médias a altas temperaturas (>200-250°C) e salinidade (>10-12 eq. wt% NaCl);
- Metamorfismo tardio orogênico, possivelmente associado a intrusões graníticas, em tectônica extensional.
- Willemita com catoluminescência verde.

5.2.3 Depósito de Vazante

5.2.3.1 Aspectos Gerais

Localizada no noroeste de Minas Gerais, na cidade homônima, a mina de Vazante é o principal e maior depósito de zinco não sulfetado do mundo (60Mton@20% de Zn), apresentando minérios de zinco constituídos predominantemente por hemimorfita(supérgeno) e willemita (hipógeno), sendo que ambos estão associados à zona de falha (Monteiro, 1997).

Monteiro (2002), estudando o depósito de Vazante, concluiu que este possui algumas características semelhantes a dos depósitos Beltana e Aroona (Austrália), Kabwe, Bob Zinc e Star Zinc (Zâmbia) e Tsumeb (Namíbia), tais como: rochas hospedeiras carbonáticas (dolomitos), minerais de minério (willemita-hematita com franklinita e zincita associada), alteração hidrotermal e formação do minério associada à mistura de fluidos e temperatura

relativamente elevadas (> 200 °C). Porém, devido às características peculiares deste depósito, Monteiro (2002) classificou o depósito de Vazante como do Tipo Vazante.

5.2.3.2 Geologia do Depósito

O depósito de Vazante hospeda-se em zona de falha (Dardenne, 1979; Dardenne *et al.*, 1998; Pinho *et al.*, 1989, 1990; Pinho, 1990; Rostirolla, 2002; e Monteiro, 1997, 2002), definida como uma falha sin-sedimentar, que no evento inicial Brasileiro compressional foi reativada gerando uma falha transcorrente sinistral e inversa, que teria evoluído no final do Brasileiro para uma falha normal lítrica. Tal falha apresenta atitude geral N50E/60NW e geometria complexa anastomosada resultante da intersecção de planos de cisalhamento.

Monteiro (2002) define o controle da mineralização como estratigráfico próximo ao contato entre o Membro Pamplona Inferior (dolomito rosa com intercalações de ardósia cinza a verde) e Membro Morro do Pinheiro Inferior (dolomitos cinza, com *bird's eyes* e laminação algal) e estrutural, relacionado com estruturas subsidiárias, antitéticas e extensionais de uma zona de cisalhamento dúctil – rúptil a rúptil (Figuras 5.5 e 5.6). O minério de Vazante ocorre em veios e corpos podiformes anastomosados limitados por falha (Monteiro, 2002).

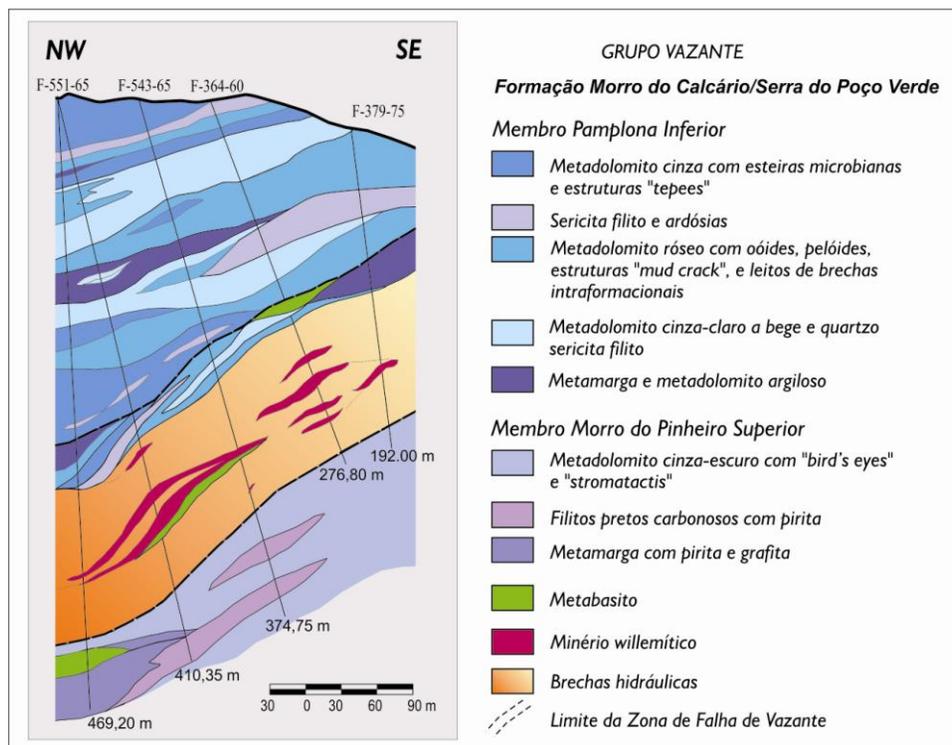


Figura 5. 5. Seção geológica da Mina de Vazante baseada no Perfil 11750E, Sucuri (Monteiro, 2007).

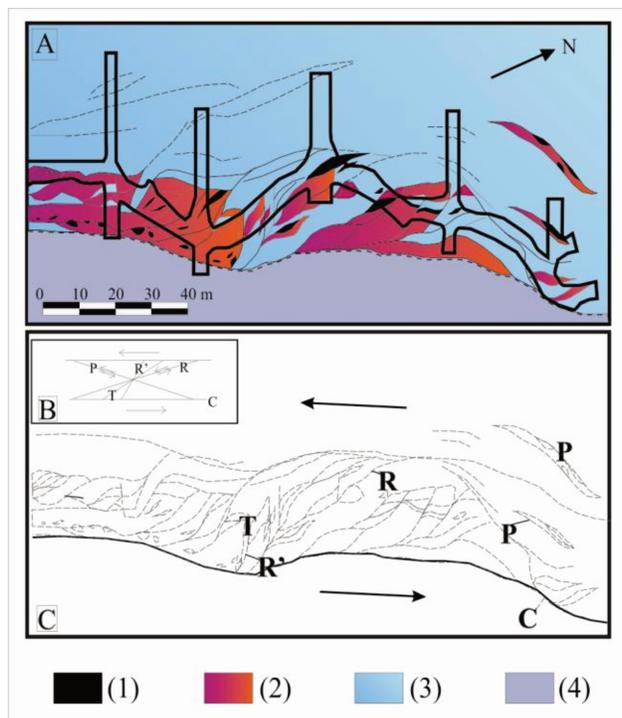


Figura 5. 6. Mapa geológico do Nível 500 da Mina Subterrânea de Vazante, mostrando: (A) A morfologia e a distribuição dos corpos de minério (Cia. Mineira de Metais, 1987); (B) Modelo teórico de relação entre estruturas de Riedel (C, P, R, R' and T); (C) Controles estruturais dos corpos de minério willemítico e sulfetado, relacionados à Zona de Falha de Vazante (Monteiro *et al.*, 1999b). (1) Minério sulfetado; (2) Minério willemítico; (3) Brechas hidráulicas com siderita, ankerita, dolomita, hematita, jaspe e clorita e dolomitos brechados e alterados hidrotermalmente (Membro Pamplona Inferior); (4) Dolomitos hidrotermalizados (Membro Morro do Pinheiro Superior) com veios de siderita, dolomita e hematita).

5.2.3.3 Mineralização – Alteração Hidrotermal e Gênese

A mineralização de Vazante, de acordo com Monteiro (1997, 2002) e Monteiro *et al.* (1999, 2006, 2007), pode ser subdividida em dois grupos, sendo:

- Mineralização primária: atualmente a principal do depósito de Vazante, sendo formada por bolsões podiformes de willemita, hematita, siderita e dolomita, com franklinita, zincita, magnetita, clorita, barita, smithsonita e apatita subordinados, imbricados tectonicamente a corpos restritos de sulfetos com esfalerita e galena hospedados por dolomitos brechados intensamente hidrotermalizados. A mineralização foi considerada como posterior ao pico metamórfico, sincrônica ao desenvolvimento da zona de cisalhamento (Monteiro, 2002).
- Mineralização secundária (calamina): esta ocorre em profundidades de até 50m, sendo constituída, principalmente, por hemimorfita, hidrozincita, smithsonita e

piromorfita, relacionada com zonas de brechas de colapso controladas por fraturas e falhas NE (Amaral, 1968; Rigobello *et al.*, 1988; Monteiro, 2002).

Texturalmente, a willemita apresenta textura granoblástica ou fibrorradiada, apresentando-se localmente deformada, brechada e cataclasada, já os sulfetos ocorrem orientados segundo a foliação milonítica, em vênulas tardias que cortam o minério willemítico e em brechas cataclásticas, nas quais representam o cimento entre fragmentos de cristais de willemita (Monteiro, 2002).

A alteração hidrotermal, associada ao processo que originou também o minério willemítico do depósito de Vazante é representada por intensa sideritização, hematitização, dolomitização, cloritização, silicificação e forte brechação, subdivididas por Monteiro (2002) em três fases, resumidas abaixo:

1. A primeira fase de hidrotermalismo pré-mineralização foi responsável pela silicificação, dolomitização (substituição dos dolomicritos por dolomita esparítica hidrotermal) e preenchimento de vênulas e veios com carbonatos de ferro (ankerita e siderita), dolomita e jaspe.
2. Uma segunda fase de hidrotermalismo (sin-mineralização) foi associada com a mineralização sulfetada, seguida a formação de uma complexa zona de brechas hidráulicas e mineralização willemítica resultante de processos de substituição e precipitação direta a partir dos fluidos hidrotermais;
3. Uma fase final do evento hidrotermal responde pela formação de vênulas tardias de esfalerita, brechas cataclásticas que possuem fragmentos de willemita e substituição de rochas mineralizadas por hematita, dolomita e, subordinadamente, clorita.

O modelo genético proposto por Monteiro (1997, 2002) para o depósito de Vazante propõe mistura de fluidos metalíferos derivados da própria bacia e do embasamento com baixo conteúdo de enxofre reduzido, com alta razão fO_2/fS_2 , com fluidos meteóricos canalizados em zona de cisalhamento responsável pela formação de veios e brechas preenchidas por siderita, dolomita, hematita e jaspe e pela mineralização willemítica de Vazante.

Babinski *et al.* (2005), com base em estudos geocronológicos e de geoquímica isotópica nos diques máficos presentes na zona de falha de Vazante, concluíram que a composição isotópica de Pb de cristais de titanita hidrotermal dos metabasitos e de galena podem reforçar a importância da

processos epigenéticos hidrotermais, associados com evento Brasileiro para a gênese dos depósitos de zinco na região de Vazante-Paracatu.

Misi *et al.* (2005), a partir de valores de $\delta^{34}\text{S}$ de esfalerita e galena, identificou que estas são menos enriquecidas em ^{34}S quando comparadas com o sulfetos de Morro Agudo, mas os valores ainda são positivos. Baixa concentração de enxofre dissolvido na solução hidrotermal poderia ter levado a precipitação dos minerais silicáticos. Hitzman (1997a) percebendo a associação de hematita e silicato de zinco em Vazante, sugeriu que a precipitação do minério ocorreu sob condições de alta fugacidade de oxigênio com rápido resfriamento.

De acordo com Monteiro *et al.* (2006), a homogeneidade química e isotópica da esfalerita de Vazante indica formação a partir de uma única fonte de enxofre e metais. As baixas razões Zn/Cd em esfalerita de Vazante, indicativas de baixos conteúdos de enxofre reduzido (ΣSred) no fluido hidrotermal, é semelhante à da esfalerita inicial de outros depósitos sulfetados da Faixa Vazante-Paracatu (Morro Agudo e Fagundes), refletindo a circulação regional de fluidos metalíferos. No entanto, em Vazante não há o registro de participação de salmouras, também metalíferas, com elevados valores de razões $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$, derivados de sequências clásticas e pelíticas ricas em matéria orgânica, que pode ter representado importante fonte de enxofre adicional para os depósitos sulfetados. Os autores associaram essa fonte adicional à migração episódica de fluidos derivados dos filitos carbonosos da Formação Lapa durante os eventos compressivos brasileiros, semelhante à “*tectonic brines*”.

Monteiro *et al.* (2007), a partir de balanços de massa, caracterizaram fortes ganhos relativos em SiO_2 , $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{T})}$, Rb, Sb, V, U e La em rochas próximas à zona de brechas e nos corpos de minério willemítico. Próximo à zona de falha, halo de alteração hidrotermal é revelado pelas composições isotópicas de oxigênio e carbono das rochas hidrotermalizadas, o que difere a Mina de Vazante dos demais depósitos sulfetados da Faixa Vazante-Paracatu.

Appold e Monteiro (2009), através de modelamento numérico, mostram que a mistura de um fluido quente, moderadamente salino, ácido, metalífero com um fluido meteórico residente (*ground water*), frio, diluído, básico, pobre em metais pode produzir uma associação de minerais hidrotermais e de minério coerente com os padrões do depósito de Vazante.

Lemos (2011), em estudo do Extremo Norte da Mina de Vazante, observa que a associação de minério dessa área (willemita, franklinita, zincita e hematita) refletiria condições físico-químicas resultantes do processo de mistura entre fluidos metalíferos, quentes e ascendentes, e o

fluido meteórico residente na bacia (paleoaquífero), mais frio, que seriam ainda relativamente quentes (150-250 °C), mas sob condições de pH neutro. Isso poderia refletir influxo ao longo de falhas e permanência relativamente longa do fluido metalífero quente no paleoaquífero alimentado por fluidos de origem meteórica, que estariam em equilíbrio com as rochas hospedeiras carbonáticas. A evolução dos fluidos teria favorecido a maior precipitação de hematita nos estágios finais de desenvolvimento da Falha de Vazante, resultando em substituição parcial dos corpos willemíticos já formados.

Slezak (2012) e Slezak *et al.* (2014), também em estudo do Extremo Norte, definiram quatro tipos de brechas, sendo:

- Tipo 1: distal em relação ao corpo de minério willemítico ($ZnSiO_4$), com fraca brechação e alteração hidrotermal com formação de Fe-carbonatos;

- Tipo 2: forte alteração com Fe-carbonatos e intensa brechação;

- Tipo 3: brecha com substituição por hematita, usualmente proximal ao tipo 4.

- Tipo 4: brecha mineralizada com willemita, contendo três gerações de willemita, bem como hematita (Fe_2O_3), e franklinita ($ZnFe_2O_4$). Na porção sul do depósito, veios sulfetados tardios de galena, esfalerita, prata nativa e covelita cortam o minério willemítico.

Slezak (2012) sugere que a mineralização de zinco foi formada através da mistura entre um fluido bacinal metalífero oxidante com baixo conteúdo de enxofre, ácido, e um fluido meteórico, mais frio e mais oxidante.

6. CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL

6.1 Estratigrafia

As ocorrências zincíferas aqui definidas referem-se às áreas localizadas a sul e leste do município de Vazante, contemplando as ocorrências do Mata II, Pamplona, Olho D'Água e Mina do Cercado que estão inseridas na porção sul do Grupo Vazante.

6.2.1 Geofísica - Aerogamaespectrometria

Com o intuito de auxiliar o mapeamento litológico em superfície foram utilizados dados de gamaespectrometria regional que visam ao mapeamento da distribuição de U, Th e K nas rochas pela quantificação da radiação gama emitida por esses elementos no processo de desintegração atômica, auxiliando assim na identificação do contraste entre as principais unidades geológicas de composições distintas.

Na área de estudo, uma análise comparativa entre os mapas de assinatura geofísica e a distribuição das unidades litológicas mostra que existe uma correlação ou coerência entre ambos, evidenciando o contato entre as unidades carbonáticas (Formação Morro do Calcáreo e Formação Serra do Poço Verde) e unidades pelíticas (Formação Serra da Lapa e Formação Serra do Garrote), embora não permita discriminar as fácies litológicas dolomíticas e pelíticas dessas unidades (Figura 6.1).

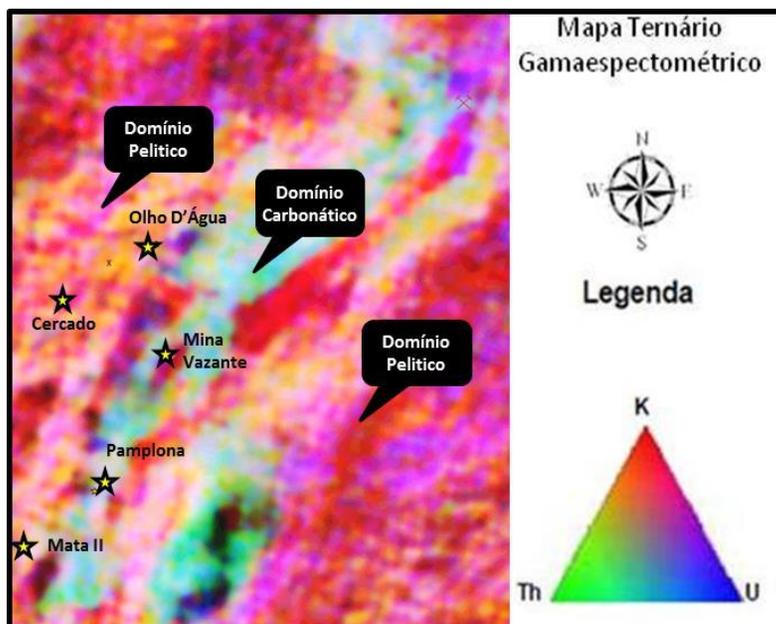


Figura 6. 1. Mapa gamaespectrométrico (K, Th, U – RGB) dos domínios litológicos da Faixa Vazante e unidades geofísicas.

As rochas pelíticas, em geral, estão representadas nas tonalidades avermelhadas (K - potássio), indicando uma maior concentração de argilominerais portadores de potássio. As rochas dolomíticas, por sua vez, por não apresentarem quantidades significativas de argilominerais e possuírem uma maior concentração de sílica, estão representadas nas tonalidades mais claras, em azul e verde.

6.2.2 Unidades Litológicas

As unidades litológicas identificadas no entorno das ocorrências zincíferas Olho D'Água, Mata II, Pamplona e Mina do Cercado incluem as seguintes formações geológicas do Grupo Vazante, da base para o topo (Figura 6.2): Formação Serra do Garrote, Formação Serra do Poço Verde, Formação Morro do Calcáreo e Formação Serra da Lapa, conforme definido por Dardenne (2000). Vale destacar que não foram cartografadas neste trabalho as formações superficiais, incluindo depósitos coluvionares e colúvio-aluvionares (Figura 6.3)

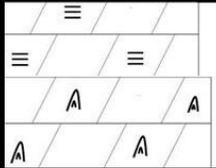
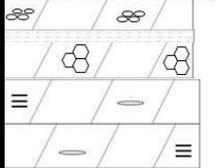
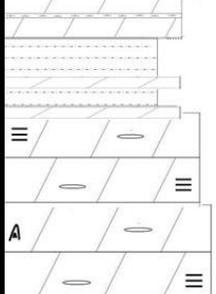
FORMAÇÃO	COLUNA	FÁCIES (descrições)	Ocorrências
Serra da Lapa		Rocha silte-arenosa, amarelada, com dolomitos cinza escuro, laminados interdigitados, metamargas cinza a ocre finamente estratificadas entre níveis metapelíticos e carbonáticos, filitos carbonosos de cor preto e localmente lentes de quartzitos.	<p>Ocorrência Zincífera Mata II/Olho D'Água</p> <p>Ocorrência Zincífera Mina do Cercado</p> <p>Ocorrência Zincífera Pamplona</p> <p>Mina de Vazante</p>
Morro do Calcáreo		Topo: Dolomito cinza claro a escuro com laminações algais e localmente com estromatólitos colunares e <i>birds eyes</i> . Base: Dolomito cinza claro, recristalizado, localmente silicificado com presença de estromatólitos colunares (até 10cm) . Localmente laminações algais onduladas.	
Serra do Poço Verde		Topo: Dolomitos cinza á róseos com mudcracks, laminações algais, brechas intraformacional e intercalações de níveis métricos de metapelito e filito carbonoso.	
		Intermediário: Rocha silte-argiloso/filito carbonoso/metaritimito cinza a ocre, sedoso com intercalações de dolomito fino cinza claro a escuro localmente com laminações algais e <i>birds eyes</i> . Base: Dolomitos cinza a cinza escuro, com laminações algais algais, <i>bird's eyes</i> , brecha intraformacional e localmente estromatólitos	
Serra do Garrote		Topo: filito/ardósia carbonosa, de cor preto e piritoso Base: Pelito cinza a róseo silte-argiloso, bandado com intercalações de filito carbonoso e lentes de quartzitos.	

Figura 6. 2. Coluna estratigráfica esquemática da área de estudo, segundo Dardenne (2000), mostrando o posicionamento estratigráfico dos alvos de estudo.

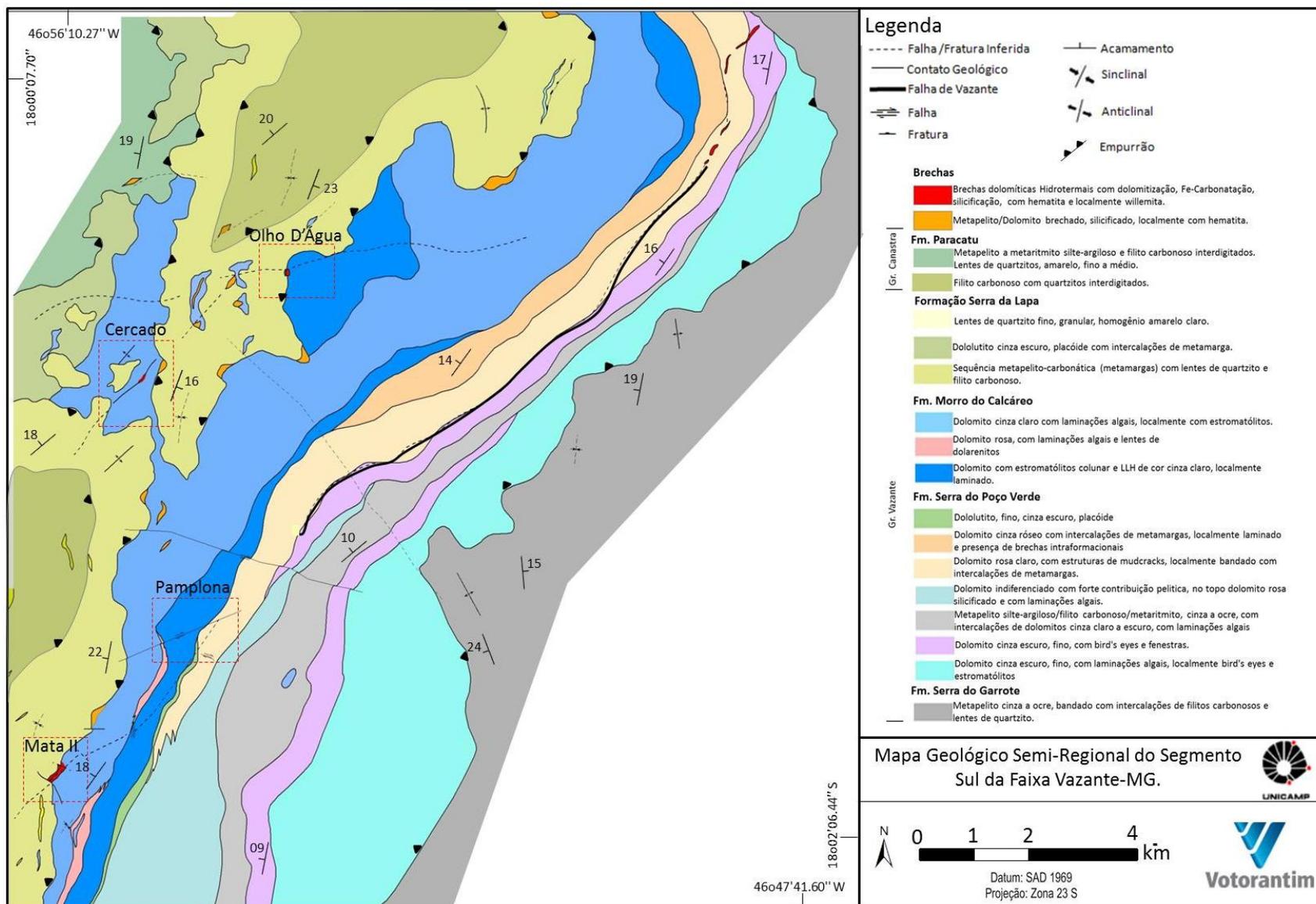


Figura 6. 3. Mapa Geológico semi-regional da área de estudo e posicionamento das ocorrências zincíferas Pamplona, Mata II, Olho D'Água e Mina do Cercado, 1:25000. Modificado Relatório Interno Votorantim Metais 2011.

6.2.2.1 Formação Serra do Garrote

Situada na porção leste e correspondendo a 12% da área de estudo (Figura 6.3), esta unidade geomorfologicamente é caracterizada por formar relevos montanhosos, com declives acentuados, cristas agudas, drenagens encaixadas e vegetação escassa. É constituída na base por metapelite cinza a róseo silte-argiloso, bandado, com intercalações de filito carbonoso e lentes de quartzito inequigranular, fino a médio. No topo, esta unidade apresenta predominância de filito/ardósia carbonosa (Figura 6.4a), de cor preta quando mais preservados e cor bege quando já intemperizados (Figura 6.4c e 6.4d), com laminações de espessura milimétrica e com planos bem definidos, comumente preenchidos por pirita.

O contato entre as formações Serra do Garrote e Serra do Poço Verde, localmente, é caracterizado por uma brecha metapelítica silicificada (Figura 6.4b), pontualmente com formação de hematita e óxido de manganês.

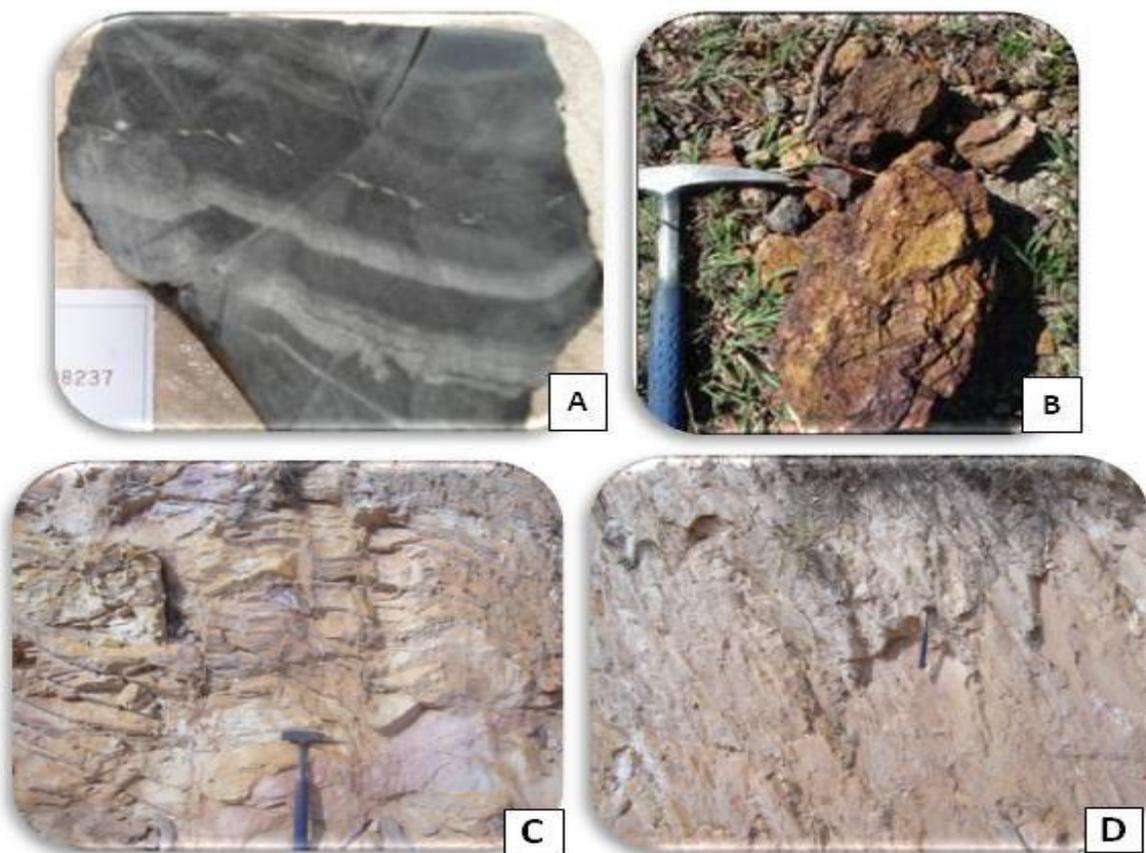


Figura 6. 4. (a) Filito carbonoso de cor preta da Formação Serra do Garrote (b) Brecha metapelítica no contato entre as unidades Formação Serra do Garrote e Formação Serra do Poço Verde; (c, d) Filito carbonoso alterado, de cor bege da Formação Serra do Garrote.

6.2.2.2 Formação Serra do Poço Verde

Situada na porção centro-leste do mapa (Figura 6.3) e ocupando aproximadamente 33% da área de estudo, a Formação Serra do Poço Verde geomorfologicamente representa morros isolados com cristas arredondadas, declives medianamente acentuados, com vegetação exuberante e quando intemperizada gera uma cobertura regolítica de cor vermelha, fina, argilosa e magnética.

Essa formação é constituída por uma sucessão de dolomitos recristalizados e diferenciados entre si. Pertencente aos membros Morro do Pinheiro inferior e superior, a base do pacote sedimentar é caracterizada por dolomitos cinza a cinza escuro (Figura 6.5a), com esteiras algais suavemente onduladas, *bird's eyes e fenestrae* preenchidas predominantemente por dolomita esparítica branca, brecha intraformacional e, localmente, estromatólitos e dolarenitos.

Na porção intermediária, correlata ao Membro Pamplona Inferior, ocorre metapelito silte-argiloso (Figura 6.5b), filito carbonoso e meta-ritmito cinza a ocre, sedoso, com intercalações de dolomito fino cinza claro a rosa escuro, localmente com laminações algais. No topo, pertencente ao Membro Pamplona Médio, dolomitos cinza a róseos com *mudcracks*, nódulos de barita, laminações algais (Figuras 6.5c e 6.5d) e intercalações de níveis métricos de metapelito, geralmente representado por filito carbonoso, são reconhecidos.

6.2.2.3 Formação Morro do Calcáreo/ Membro Pamplona Superior

A Formação Morro do Calcáreo ocorre na porção centro-oeste (Figura 6.3) correspondendo a 25% da área de estudo. Esta unidade tem as mesmas características geomorfológicas da Formação Serra de Poço Verde, ou seja, representa morros isolados com cristas arredondadas, declives medianamente acentuados, com vegetação exuberante e quando intemperizada gera uma cobertura regolítica de cor vermelha, fina, argilosa e magnética.

É constituída na base por um bioherma estromatolítico do tipo colunar (centimétrico a decimétrico), com laminações suavemente onduladas, cinza claro, recristalizado, localmente silicificado e com presença de níveis métricos de metapelitos intercalados (Figura 6.6a). No topo é caracterizado por um dolomito cinza claro a escuro com laminações algais onduladas (Figura 6.6b), localmente, com a presença de estromatólitos colunares. Ao longo do contato entre a Formação Morro do Calcáreo e a Formação Serra da Lapa é comum a ocorrência de uma brecha dolomítica hidrotermal, que hospeda as ocorrências zincíferas Mata II e Olho D'Água.

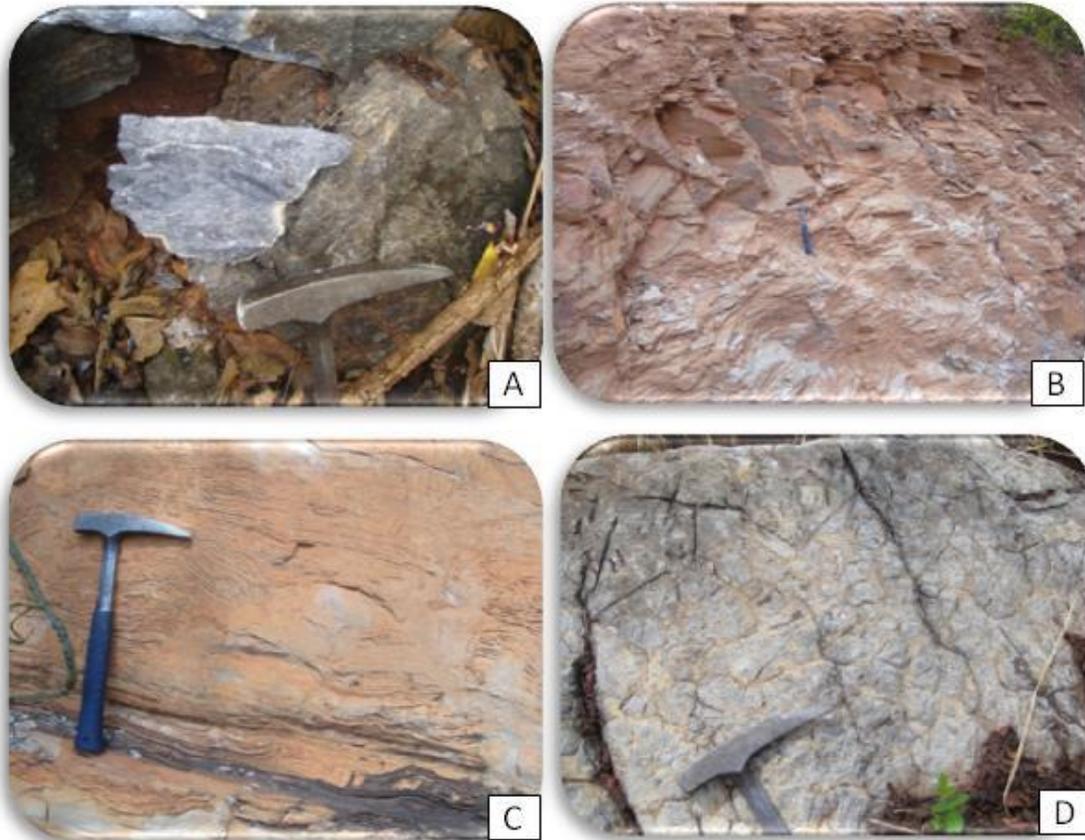


Figura 6. 5. (a) Dolomito cinza escuro com “bird’s eyes” da Formação Serra do Poço Verde; (b) Metapelitos de cor ocre; (c) Dolomito laminado de cor rosa; (d) Dolomito rosa com “mudcracks”.

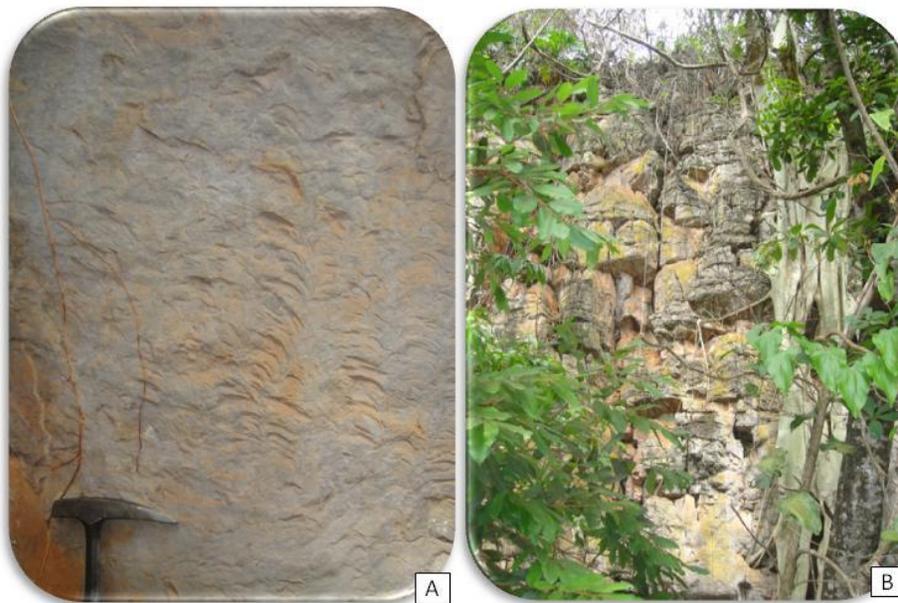


Figura 6. 6. (a) Estromatólito colunar; (b) Dolomito laminado da Formação Morro do Calcáreo.

6.2.2.4 Formação Serra da Lapa

A Formação Serra da Lapa situa-se na porção oeste do mapa (Figura 6.3) e ocupa 30% da área de estudo. Essa unidade caracteriza-se por formar relevos montanhosos, com cristas medianamente arredondadas, declives acentuados, drenagens encaixadas e vegetação escassa. Litologicamente é formada por uma sequência de metapelito carbonático (Figura 6.7a), representada por uma sucessão de metapelito silte-arenoso de coloração amarelada com dolomitos cinza escuro laminados interdigitados, metamargas cinza a ocre finamente estratificada (Figura 6.7b) entre níveis pelíticos e carbonáticos, filitos carbonosos de cor preta, com laminações de espessura milimétrica com planos bem definidos e, localmente, intercalações lenticulares de quartzitos com granulação fina a média, de coloração amarelada.

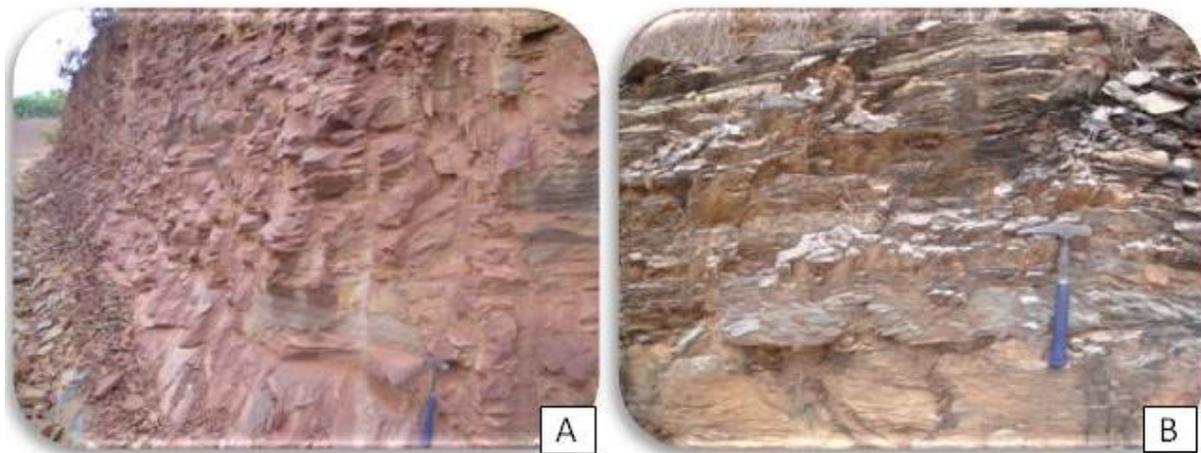


Figura 6. 7. (a) Metapelitos avermelhados da Formação Serra da Lapa; (b) Metamargas com alternâncias entre níveis pelíticos e carbonáticos.

7. CONTEXTO GEOLÓGICO DAS BRECHAS DOLOMÍTICAS E OCORRÊNCIAS ZINCÍFERAS

7.1 Alvo Mata II

A ocorrência zincífera Mata II (Figura 7.1) situa-se a 5 km a sudoeste do município Vazante, no domínio dos dolomitos da Formação Morro do Calcáreo em contato com os metapelitos da Formação Serra da Lapa. Neste contato ocorre uma brecha dolomítica hidrotermal com direção aproximada N25E/40NW (Figura 7.2 e 7.3).



Figura 7. 1. Visão geral da ocorrência zincífera do Mata II.

7.1.1 Rochas hospedeiras

As unidades geológicas presentes na ocorrência zincífera Mata II são pertencentes à Formação Morro do Calcáreo na base e Formação Serra da Lapa no topo (Figura 7.2 e 7.3). A Formação Morro do Calcáreo aflora na porção sudeste, representando 45% da área do mapa de detalhe da ocorrência do Mata II, com atitude aproximada de N25E/20NW, com espessura máxima identificada de 200m (conforme sondagem VZMAF001), sendo constituída na base por um dolomito cinza a róseo, estromatolíticos (até 8cm), localmente laminado (Figuras 7.4a e 7.4b), e no topo por dolomito cinza claro/escuro a róseo, com laminações algais e pequenas intercalações(10cm) de dolarenitos. Esta unidade quando intemperizada em superfície gera uma cobertura regolítica de cor vermelha, fina, argilosa e magnética.

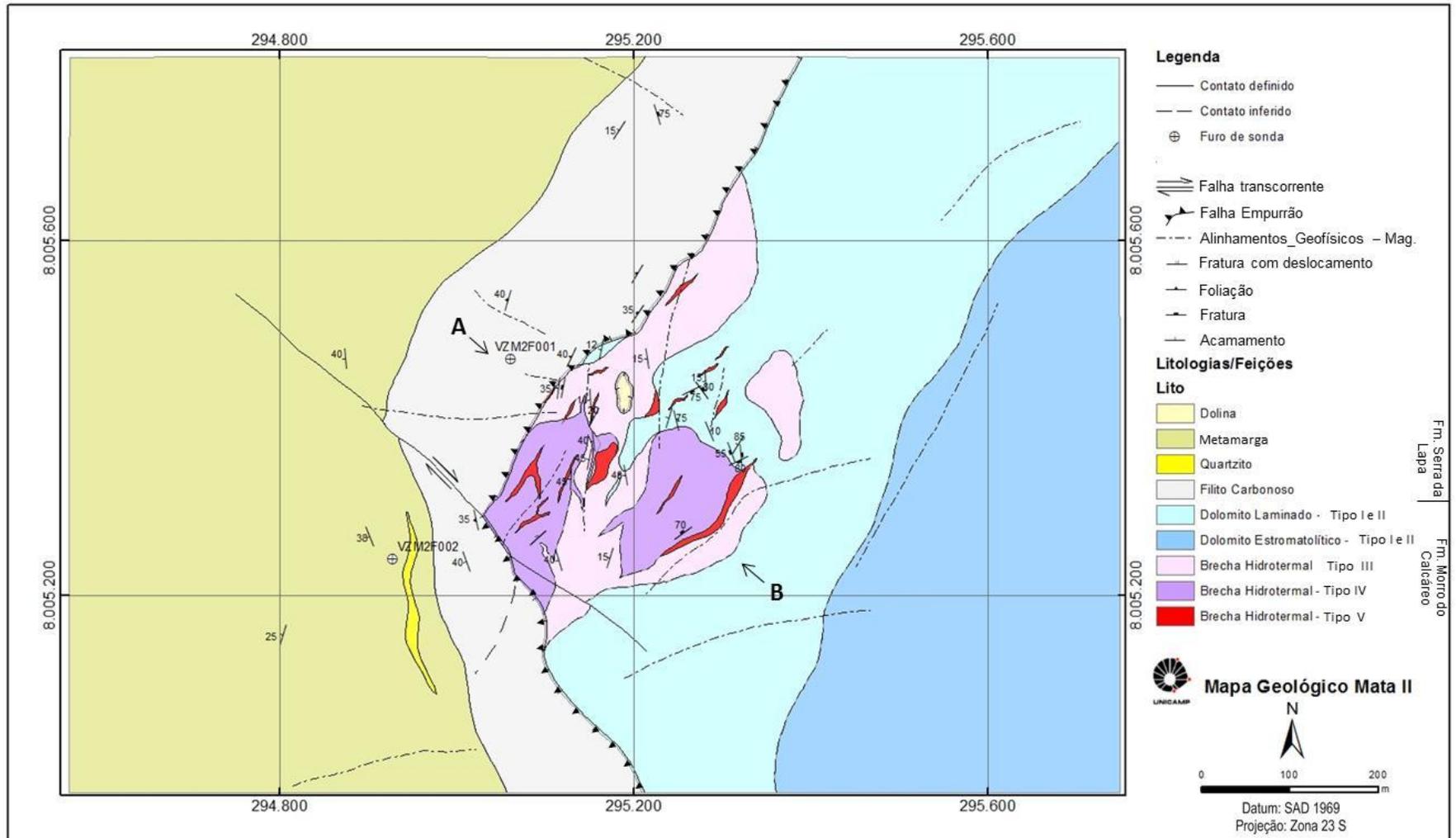


Figura 7. 2. Mapa Geológico da ocorrência zincífera do Mata II, este estudo.

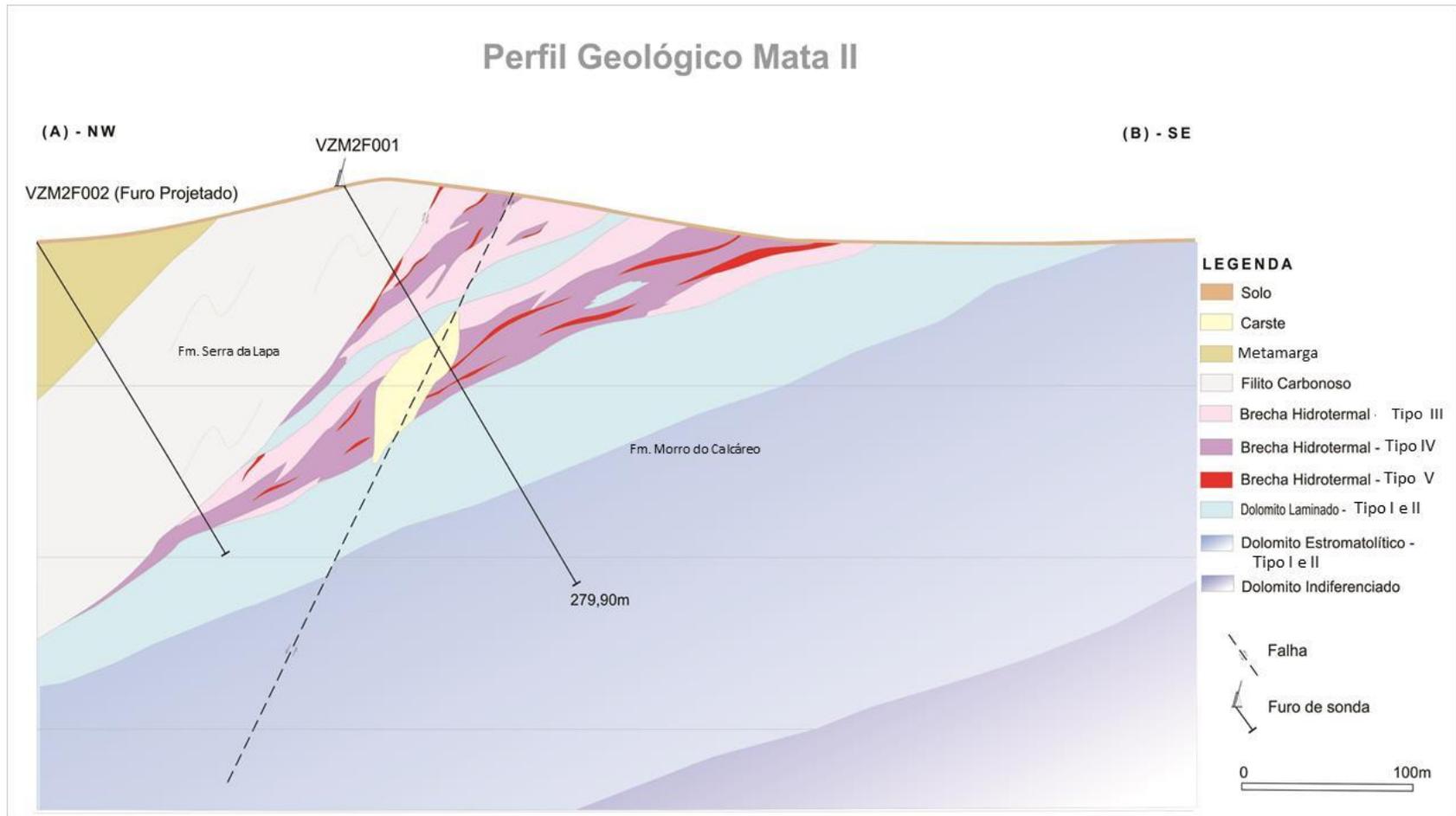


Figura 7. 3. Perfil Geológico da ocorrência zincífera do Mata II, este estudo.



Figura 7. 4. (a) Afloramento de dolomito cinza a róseo laminado da Formação Morro do Calcáreo na Área de Mata II; (b) Dolomito laminado em testemunhos de sondagem (VZM2F001).

Petrograficamente, o dolomito é constituído por cristais de dolomita micrítica a micro-esparítica (90%) com finos agregados de quartzo (8%) e óxido-hidróxido de ferro amorfo de coloração alaranjada associados a finas vênulas (2%). Os minerais carbonáticos são representados por cristais de dolomita anhedrais a subhedrais apresentando contato entre si medianamente difusos e irregulares (fábricas não planares). A estrutura sedimentar preservada é identificada pela variação na granulometria dos grãos carbonáticos (Figura 7.5a), que variam de micro-esparíticos a micríticos, e por vezes apresentam textura granoblástica. Vênulas, bolsões e lentes anastomosadas e irregulares são preenchidos por dolomita esparítica (Figura 7.5b e 7.5c), que também preenche espaços vazios (“vugs”) na rocha sedimentar, com dimensões que variam de 500 a 2000 μm .

A Formação Serra da Lapa aflora na porção oeste (Figura 7.2) representando 40% da área de estudo, com espessura estimada de 190 m (Figura 7.3), com direção N20W/40SW na porção sudoeste do mapa e N25E/40NW na porção noroeste da área de estudo. Esta unidade é formada por filito carbonoso, preto, piritoso na base e por uma sequência metapelito-carbonática (metamargas) de cor cinza, finamente (mm) estratificada (Figura 7.6a e 7.6b) e lentes de quartzito granular, fino a médio, amarelo no topo. Esta unidade é caracterizada por formar pequenos morrotes e quando intemperizada gera solo de cor amarelado

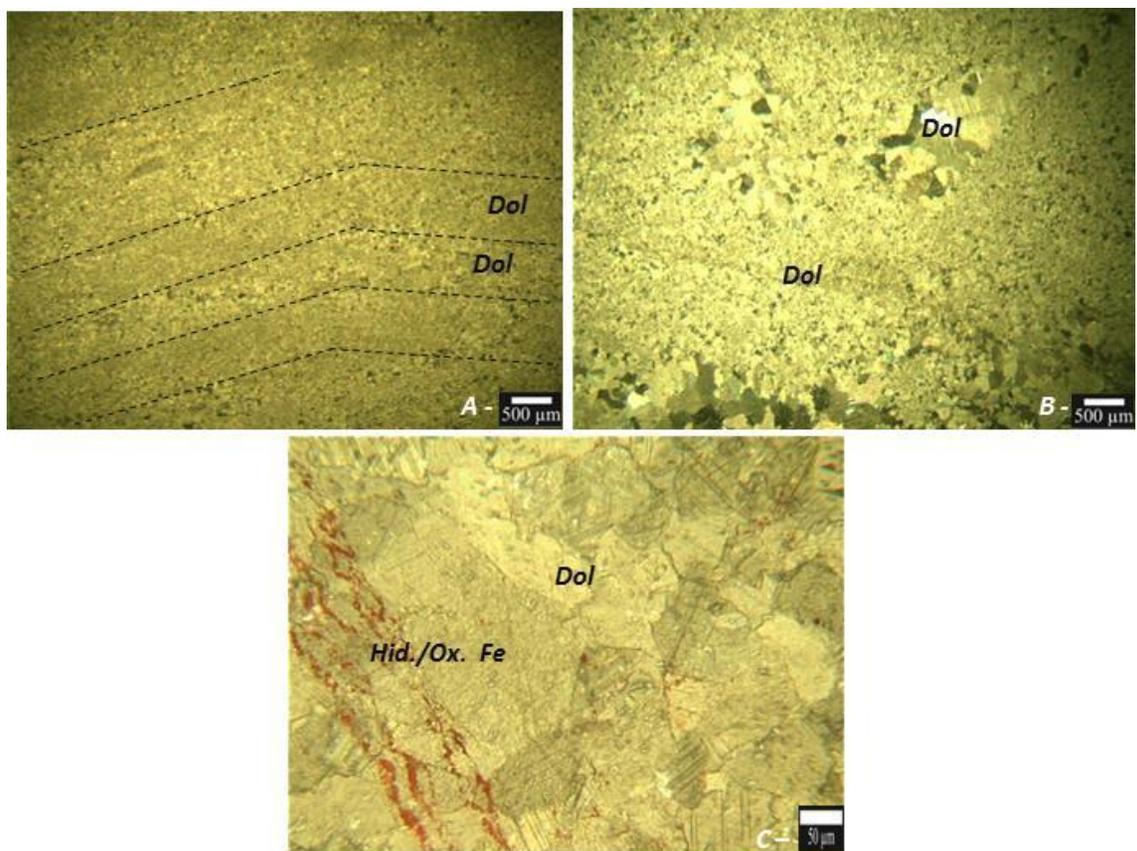


Figura 7. 5. Em (a) estruturas sedimentares, representada por laminação, preservadas em dolomito da Formação Morro do Calcáreo; (b) Dolomita micrítica a microesparítica e bolsões preenchidos com dolomita esparítica; (c) Zona de substituição dos dolomicritos por dolomita esparítica e vênulas com hidróxido de ferro;



Figura 7. 6. Em (a) Afloramento de metamarga da Formação Serra da Lapa na Área de Mata II; (b) Metamarga em testemunhos de sondagem (VZM2F002).

Em escala microscópica, o filito carbonoso apresenta textura granolepdoblástica (Figura 7.7a e 7.7c), sendo que a coloração preta vista macroscopicamente é derivada da presença de

material carbonoso (25%) disposto paralelamente à foliação. Esta mesma foliação, localmente crenulada e dobrada, é definida pela orientação de finos cristais de sericita (45%) e pequenos agregados de cristais de quartzo (27%) e pirita (Figura 7.7b) finamente disseminada (3%) com dimensões médias de 100µm. Outra variação litológica desta unidade estratigráfica é uma rocha classificada como meta-marga (Figura 7.7d) finamente estratificada/bandada com níveis quartzo dolomítico (79%) e esteiras algais (20%) e pirita finamente disseminada (1%).

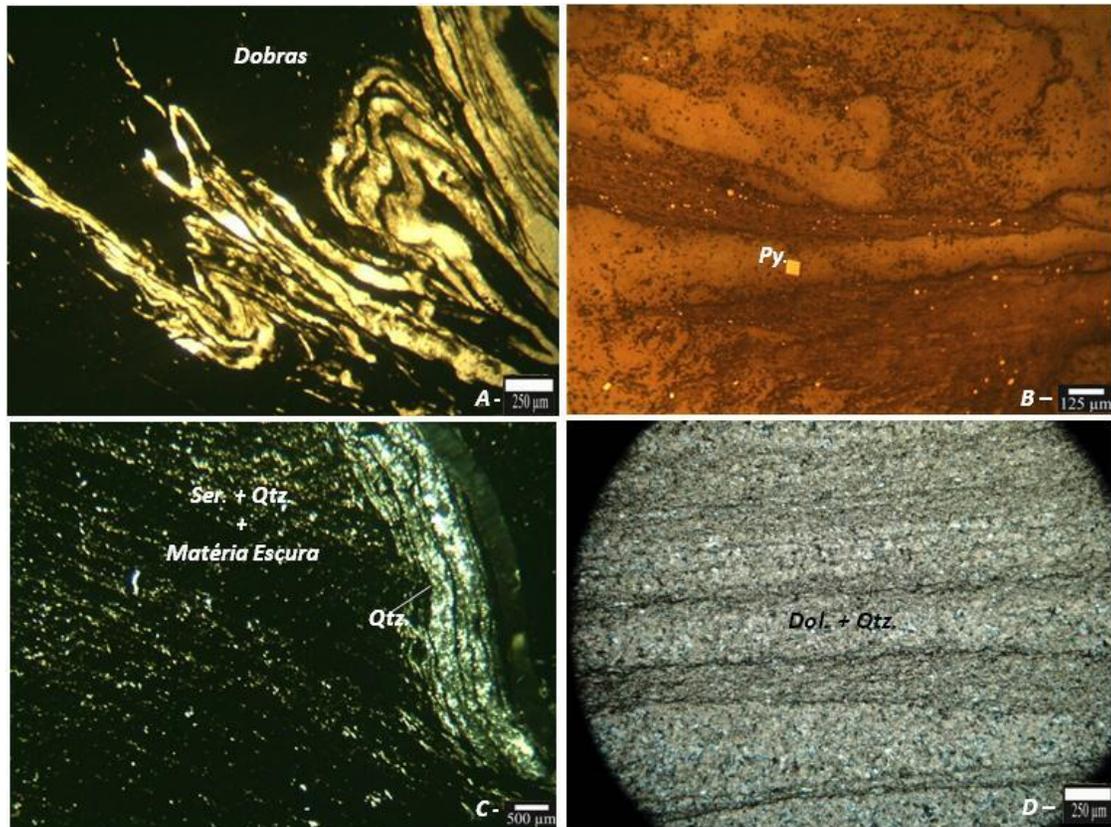


Figura 7. 7. Em (a) Filito carbonoso dobrado da Formação Serra da Lapa; luz transmitida e polarizadores cruzados; (b) Pirita euhédrica e finamente disseminada; luz refletida em filito carbonoso; (c) Filito Carbonoso com vênulas com calcedônia e quartzo; luz transmitida e polarizadores cruzados (d) Esteiras algais com níveis constituídos por quartzo e dolomita; luz transmitida e polarizadores cruzados.

7.1.2 Brecha Dolomítica – Mata II

No contato entre as duas unidades, Formação Morro do Calcáreo e Formação Serra da Lapa, localizado na porção central e correspondendo a 15% da área de estudo, ocorre uma brecha dolomítica hidrotermal com atitude geral N25E/40NW, distribuída superficialmente por uma área de 200 m de largura por 300m de comprimento, com espessura variando de poucos metros (5m) até 110m (Figura 7.3). Contudo, como resultado desse estudo foi possível reconhecer em

testemunhos e no mapeamento em superfície cinco tipos principais de rochas dolomíticas com evidências de alteração hidrotermal, tais como mudança de coloração e composição mineralógica (tipos I e II), que evoluem para brechas dolomíticas (tipos III a V), Figura 7.8.

TIPO	FOTO MACROSCÓPICA	CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS	TIPO	FOTO MACROSCÓPICA	CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS	TIPO	FOTO MACROSCÓPICA	CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS
TIPO I		Dolomitos estromatolíticos e laminados, com estruturas sedimentares bem como sua coloração característica cinza preservada. Modificação pontual da cor das rochas que passam a apresentar coloração cinza a rosa.	TIPO II		Rochas dolomíticas estromatolíticas e laminadas, com estrutura sedimentar preservada (laminação algal e colunas estromatolíticas). Em quase sua totalidade apresenta uma coloração rosa.	TIPO III		Brecha dolomítica clasto suportada, constituída por clastos dolomíticos subarredondados a angulosos, às vezes fraturados, com tamanhos variando desde alguns milímetros até 10 cm, exibem coloração cinza a rosa e em alguns casos possuem estruturas sedimentares preservadas imersos em uma matriz fina de cor vermelha escuro (jaspe).
TIPO IV		Brecha dolomítica matriz suportada, constituídas por clastos de dolomitos totalmente rosados, subarredondados, com tamanhos que variam desde alguns milímetros até 3 cm, sem estrutura sedimentar preservada, imersos em uma matriz fina, de cor vermelho escuro (jaspe)	TIPO V		Dissolução total da rocha carbonática original, sem a presença de clastos dolomíticos, com contatos entre minerais difusos e irregulares, com cristais grandes de quartzo imersos em uma matriz de cor vermelho escuro, fina (jaspe).			

Figura 7. 8. Características macroscópicas dos cinco tipos de rochas dolomíticas alteradas hidrotermalmente e brechas dolomíticas da ocorrência do Mata II.

Estes diferentes litotipos podem ser reconhecidos em um mesmo afloramento (Figura 7.9), não apresentando uma continuidade lateral ou em profundidade bem definida.



Figura 7. 9. Brecha hidrotermal dolomítica e suas variações laterais associadas à diferentes estágios e/ou intensidade de alteração hidrotermal na área de Mata II.

Em escala microscópica, os cinco tipos principais de rochas dolomíticas com evidências de alteração hidrotermal, são assim descritas:

- **Tipo I**

O tipo I é representado por rocha micro-esparítica, com estruturas sedimentares preservadas (estromatolítica e laminada) evidenciadas pela diferença dos tamanhos dos grãos carbonáticos. É constituída por cristais de dolomita (89%), subdivididos em cristais de dolomita micro-esparítica (77%), sendo esta o constituinte principal da rocha carbonática, e Fe-Carbonatos e dolomita esparítica (14%), planar a subhedral (Figuras 7.10a e 7.10b), por vezes associada a zonas de fraturas, pequenos bolsões e vênulas (Figura 7.10c) de óxido/hidróxido de Fe (6%). Também foi observada a presença de finos agregados de cristais de quartzo (<3%).

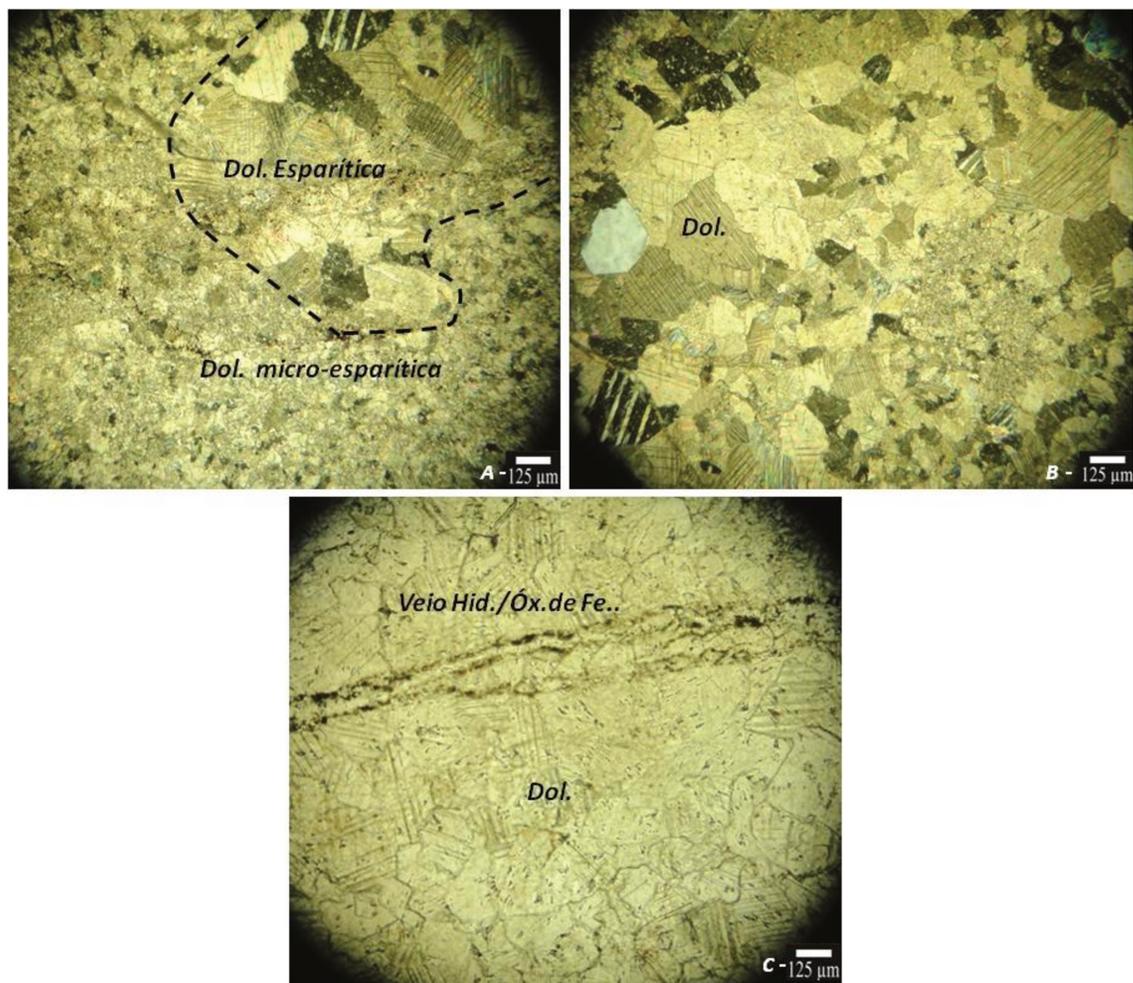


Figura 7. 10. Em (a) Bolsões de dolomita esparítica em dolomicroesparito; (b) Dolomita esparítica subhedral; (c) Dolomita esparítica e vênulas de hidróxido de ferro. Fotomicrografias em luz transmitida com polarizadores cruzados (a e b) e descruzados (c).

- **Tipo II**

O tipo II é corresponde a uma rocha dolomítica com laminação sedimentar reliquiar preservada e cimentação por dolomita esparítica e quartzo (Figura 7.11a e 7.11c). É constituído por cristais de dolomita micro-esparítica (72%) e dolomita esparítica (20%), de cor bege claro a transparente, grande variação de hábito, anhedral a subhedral, com contatos entre os demais cristais parcialmente definidos e irregulares. Nos veios, os cristais de dolomita são maiores e mais desenvolvidos (esparíticos), subhedrais. Dolomita esparítica também ocorre como cimentação ao longo da laminação. O quartzo é encontrado na forma de cristais anhedrais, transparentes, em pequenos nódulos (Figura 7.11b) e/ou agregados (6%). Localmente foi observado hidróxido e óxido de ferro (Figura 7.11d), amorfos ou tabulares, de coloração

alaranjada associados principalmente a zonas de dolomita esparítica. Pirita (2%) euhedral, cúbica, associada a zonas de fraturas também foram identificadas.

Texturalmente foi reconhecida dolomita radial (Figura 7.11c) e nódulos de sílica (Figura 7.11b). A coloração rosa identificada macroscopicamente também pode estar associada à oxidação da matéria orgânica e formação de hidróxidos de ferro, que ocorrem principalmente nas porções nas quais a dolomita micro-esparítica e radial foram completamente substituídas por dolomita esparítica não-planar (Figura 7.11d).

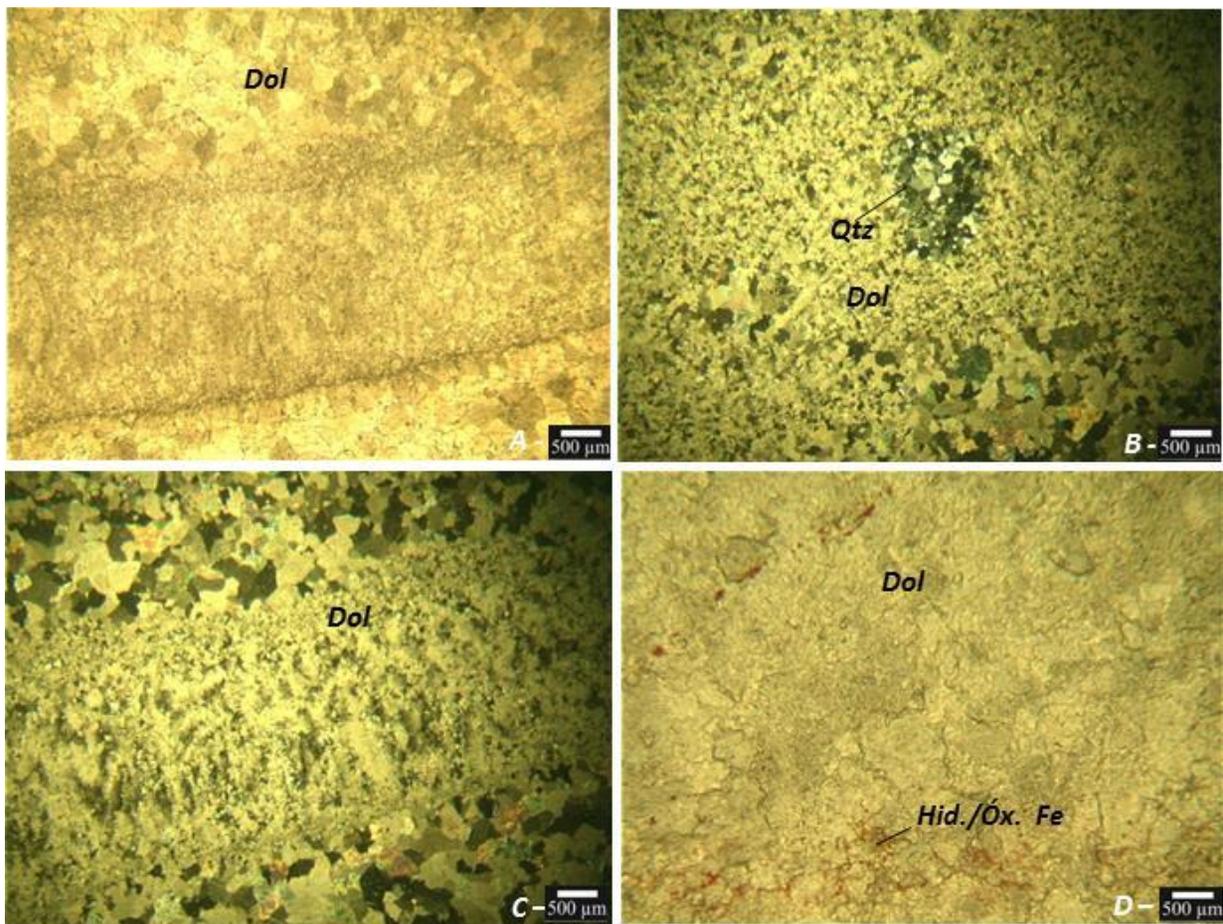


Figura 7. 11. Em (a), laminação reliquiar (luz transmitida; polarizadores descruzados); (b) Nódulos com calcedônia e quartzo (luz transmitida; polarizadores cruzados); (c) Dolomita com textura radial (luz transmitida; polarizadores cruzados); (d) Dolomita esparítica e hidróxido de Fe (luz transmitida; polarizadores cruzados).

- **Tipo III**

O tipo III corresponde a uma brecha hidrotermal clasto suportada (Figura 7.12a). A continuidade de estruturas em diferentes clastos evidencia fragmentação *in situ* a discreto transporte. Os clastos são constituídos por cristais de dolomita micro-esparítica (35%) e esparítica (39%), imersos em uma matriz de cor avermelhada a marrom (Figura 7.12b e 7.12c) constituída por quartzo (10%), dolomita esparítica e hematita (10%) limonitizada (Figura 7.12d e 7.12e)

A dolomita, mineral predominante na matriz, apresenta cor bege claro a transparente, contatos com demais cristais medianamente difusos e irregulares. A dolomita esparítica exhibe estrutura radial e contatos definidos, porém irregulares. O quartzo ocorre em agregados de cristais anhedrais a subhedrais, por vezes arredondados, transparentes, presentes na matriz da brecha hidrotermal ou em veios tardios, com contatos entre minerais bem definidos. A hematita, com hábito anedral a subhedral, às vezes tabular, ocorre na matriz da brecha em cristais poucos desenvolvidos (cimento) ou na forma de cristais bem desenvolvidos, que em sua maioria encontram-se limonitizados (Figura 7.12e). Pirita euédrica (1%), disseminada ao longo da matriz da brecha, localmente envolta por sílica hidrotermal (Figura 7.12d) também foi identificada.

Também foi identificado um sistema de *network* de fraturas que separam os clastos de dolomita e são preenchidas por hematita, quartzo e dolomita esparítica (Figura 7.12a e 7.12b). A presença de hidróxido e óxido de Fe (5%) nos interstícios dos grãos da matriz da brecha confere a este litotipo uma cor avermelhada vista em escala macroscópica (Figura 7.12d).

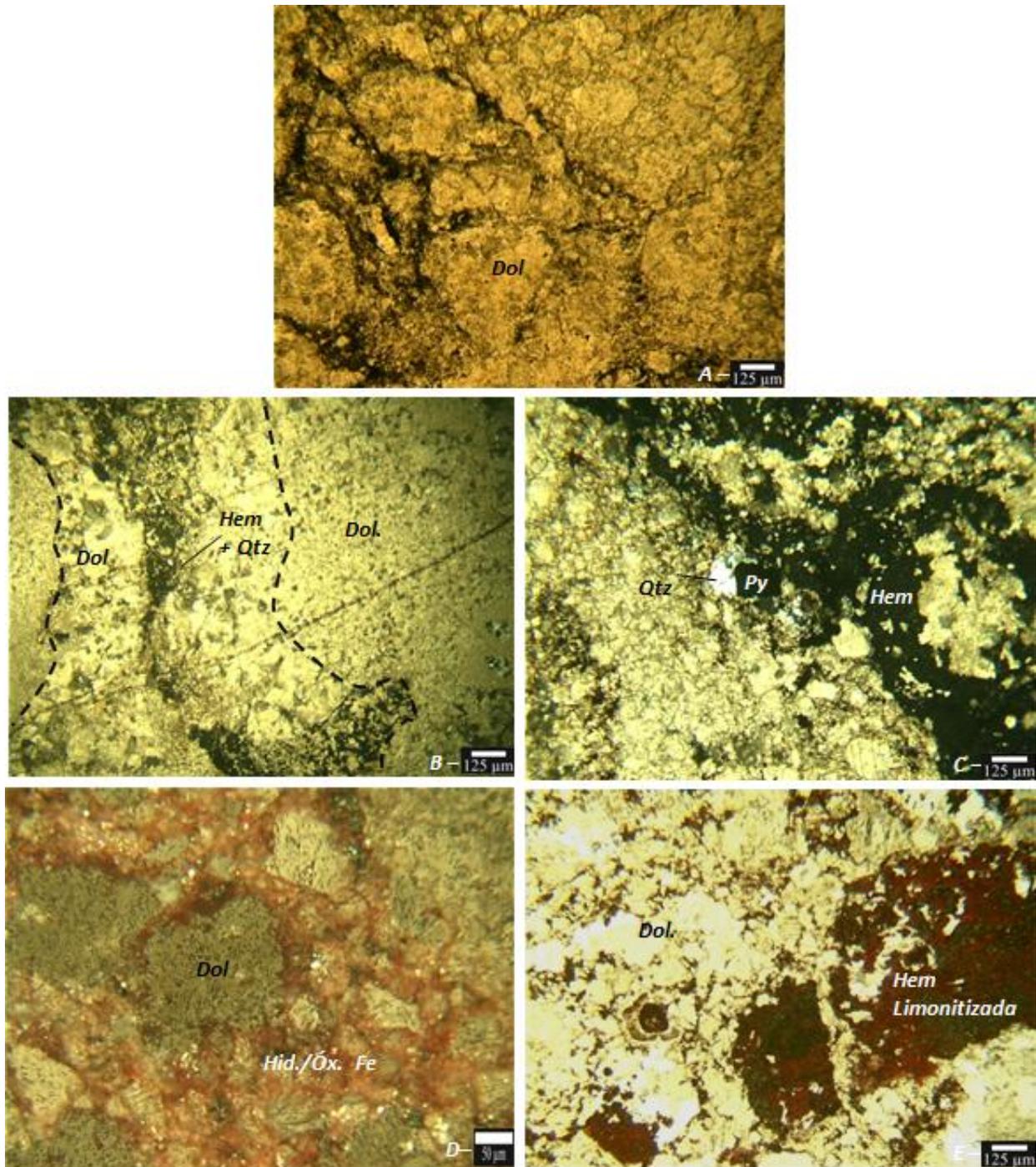


Figura 7. 12. Em (a) “Network” de fraturas preenchidas por hematita e hidróxidos de ferro em rocha dolomítica (luz transmitida, polarizadores descruzados); (b) Clastos de dolomito separados (in situ) por uma matriz constituída por quartzo, dolomita esparítica e hematita (luz transmitida, polarizadores descruzados); (c) Pirita envolta por quartzo hidrotermal e hematita (luz transmitida, polarizadores descruzados); (d) Interstícios de grãos de dolomita preenchidos por hidróxido e óxido de Fe (luz refletida, polarizador cruzado); (e) Hematita limonitizada (luz transmitida, polarizadores descruzados).

- **Tipo IV**

Este tipo de brecha é matriz suportada (Figura 7.13a) e constituída por clastos de dolomito formados por dolomita micro-esparítica (20%) com contatos difusos e irregulares e dolomita esparítica (30%). A matriz é constituída por agregados de quartzo (34%) com tamanhos variados, anhedral e calcedônia (Figura 7.13a, 7.13b e 7.13d), hematita subhedral em sua maioria limonitizada (5%) e hidróxido/óxido de Fe (11%) amorfo presente nos interstícios dos grãos de quartzo e nos clastos de dolomitos (Figura 7.13c). Pontualmente barita euhédrica também foi identificada (traço – Figura 7.13c). Quartzo ocorre em bolsões com textura de preenchimento de espaços abertos por dissolução. A presença de hidróxido e óxido de Fe disseminado por toda a rocha resulta na coloração rosa avermelhada vista macroscopicamente.

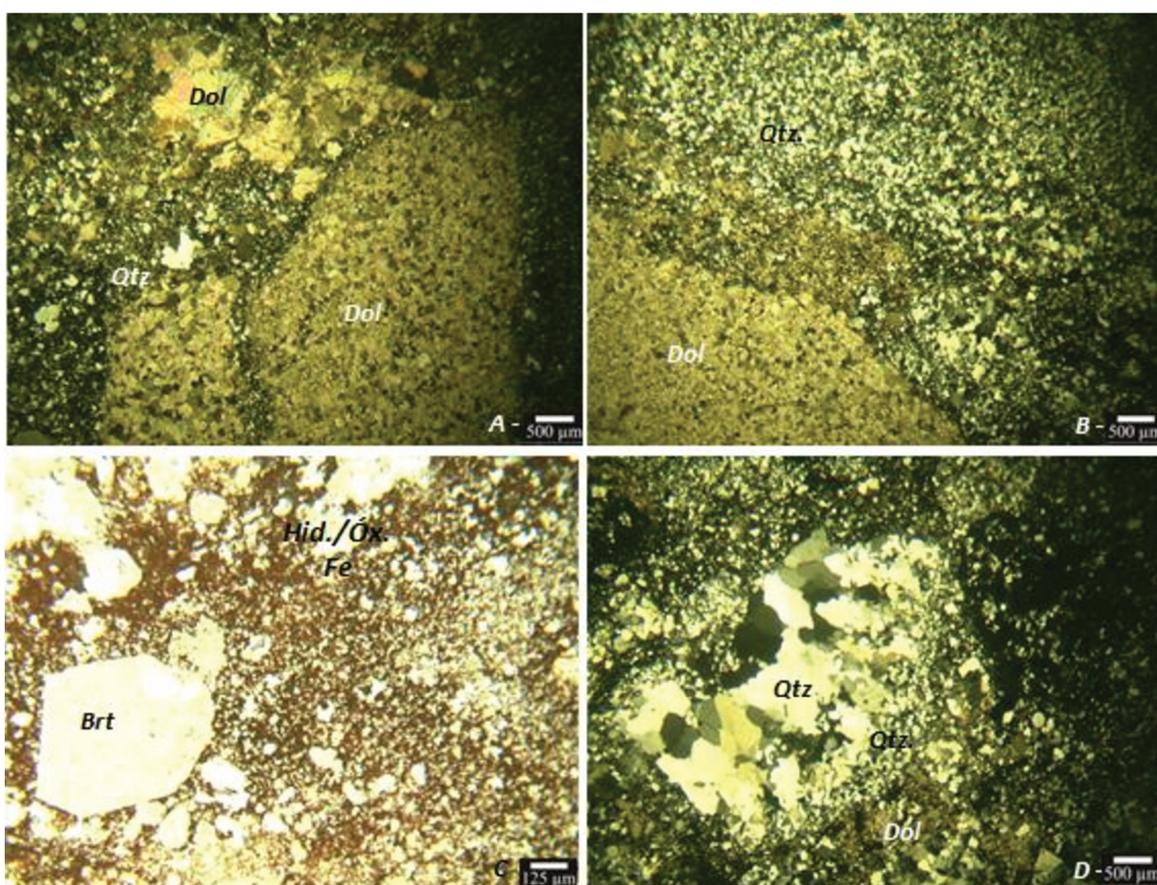


Figura 7. 13. Em (a) Clastos subarrendados de rocha dolomítica envoltos por matriz constituída por quartzo microcristalino e dolomita esparítica (luz transmitida; polarizadores cruzados); (b) Finos agregados de quartzo e calcedônia ao redor de clasto de dolomito (luz transmitida; polarizadores cruzados); (c) Matriz da brecha composta por barita, hematita, quartzo e hidróxido/óxido de Fe (luz transmitida; polarizadores descruzados); (d) Quartzo com textura de preenchimento de espaços abertos indicada pelo crescimento de cristais perpendicularmente à parede da cavidade (luz transmitida; polarizadores cruzados)

- **Tipo V**

Este tipo de brecha pode ser considerado como uma brecha hidrotermal matriz suportada, constituída em quase sua totalidade por agregados de quartzo (40%) anedral (Figura 7.14a), localmente com cristais zonados e com tamanhos variando entre 50 μ m a 500 μ m, hematita subhedral (Figura 7.14e) disseminada ou em agregados (35%), localmente em cristais alongados, e hidróxido de ferro (25%), amorfo. Esse último preenche os espaços intersticiais entre cristais de quartzo (Figura 7.14b e 7.14c), preenche zonas de fraturas tardias, bem como resulta do processo de limonitização da hematita. Neste estágio não foram encontrados cristais de dolomita, que, possivelmente foram consumidos durante processos de dissolução do dolomito. A dissolução permitiu que os espaços vazios deixados fossem preenchidos pelos “grandes” cristais de quartzo, com os quais associam-se, pontualmente, pequenas paletas de sericita. Nota-se também a presença de estilólitos que truncam os cristais de quartzo (Figura 7.14d), evidenciando uma deformação tardia à sua formação. Também são observados cristais de clorita, associados à matriz constituída por quartzo e hematita (Figura 7.14f).

A partir de estudos de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram identificadas outras fases minerais na brecha do tipo V. Além da presença de quartzo (SiO_2), hematita (Fe_2O_3) e clorita. Também foi reconhecido feldspato potássico (KAlSi_3O_8) em cristais anhedrais com 10 μ m a 50 μ m. Entre as fases minerais subordinadas foram identificados apatita, barita, zircão e minerais portadores de ETR, tais como xenotima (YPO_4) e monazita (Figura 7.15a e 7.15b), com tamanhos inferiores a 25 μ m e dispersos na matriz da brecha. Foram também reconhecidos sulfetos, representados por galena (PbS) e covellita (CuS), além de óxido de cobre, possivelmente cuprita (Cu_2O) que ocorre em cristais com tamanhos inferiores a 20 μ m (Figura 7.15c, 7.15d e 7.15e) associados ao quartzo com textura grossa.

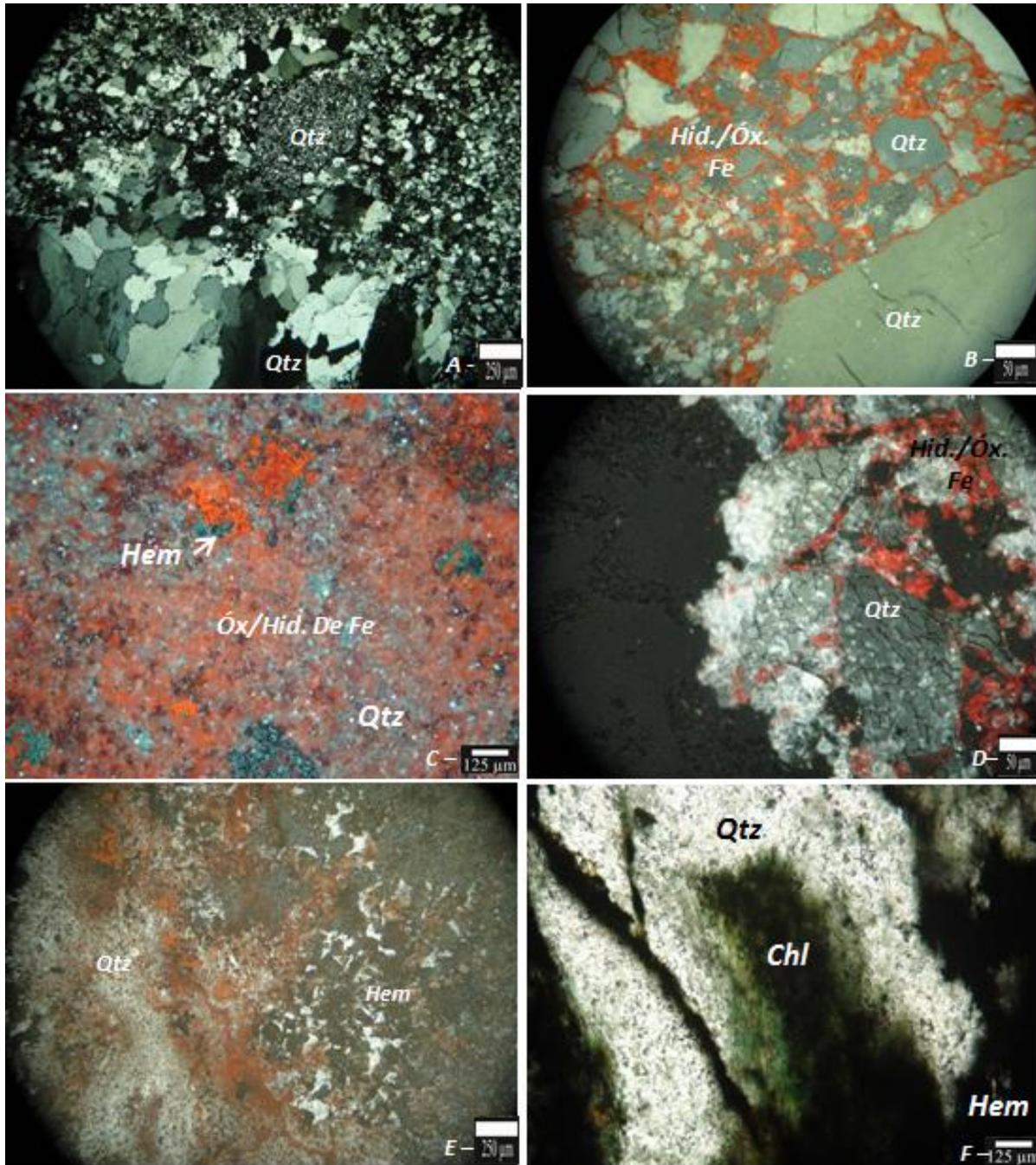


Figura 7. 14. Em (a) Agregados de cristais de quartzo com diferentes tamanhos (luz transmitida; polarizadores cruzados); (b) Óxido/hidróxido de ferro preenchendo interstícios entre os cristais de quartzo (luz refletida; polarizadores cruzados); (c) Matriz da brecha composta por quartzo, hematita e óxido/hidróxido de Fe (luz refletida; polarizadores cruzados); (d) Quartzo fraturado com hidróxido/óxido de ferro nos interstícios (luz refletida; polarizadores cruzados); (e) Presença de hematita e quartzo + óxido/hidróxido de Fe (f) Clorita associada ao quartzo e hematita (Luz transmitida, polarizador descruzado).

A pirolusita (MnO_2), ocorre sob a forma de finos cristais, anhedrais, com tamanho inferior a $40\mu m$, associados principalmente com hematita (figura 7.15e).

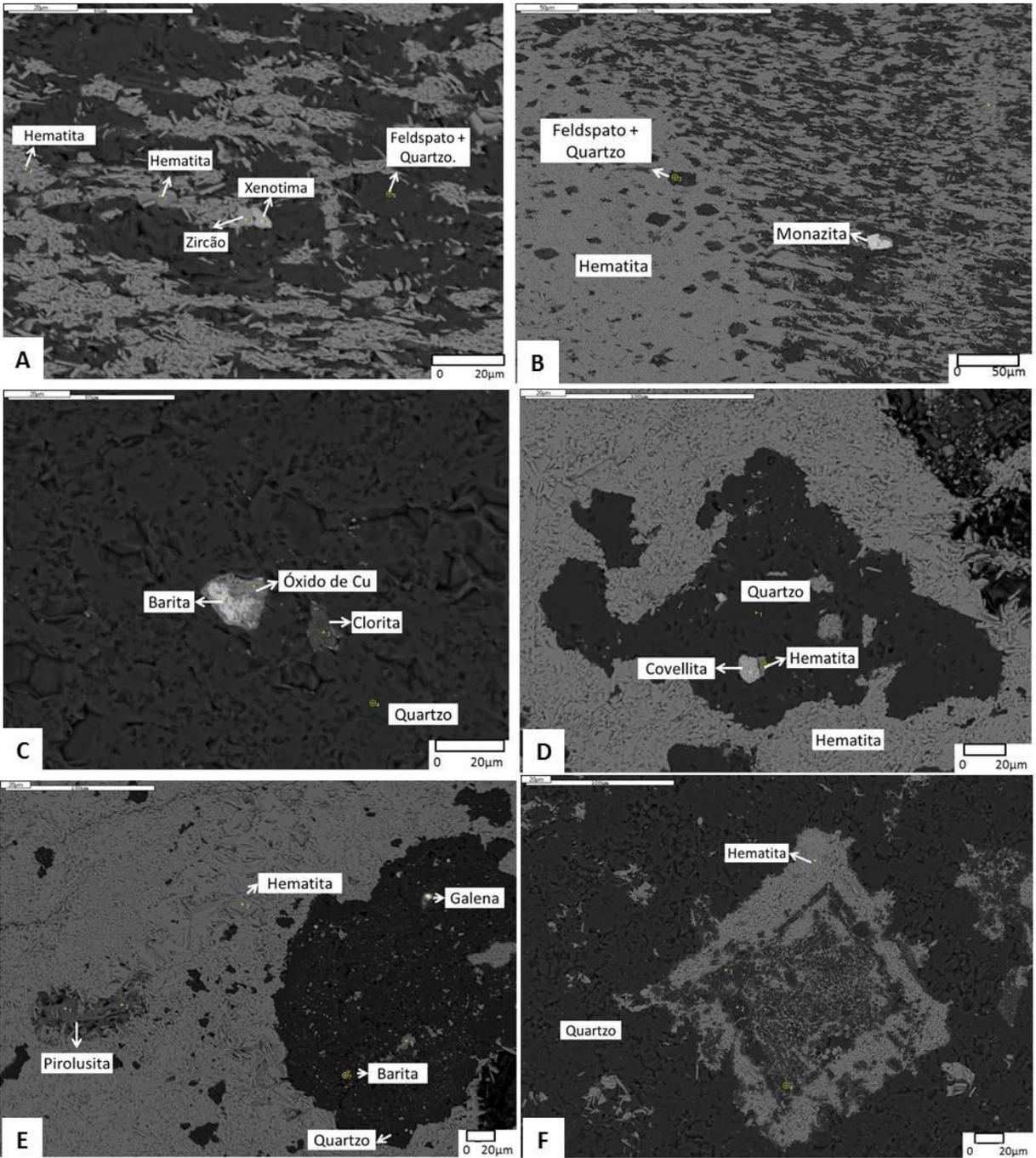


Figura 7. 15. Imagens de elétrons retro-espalhados obtida com uso de MEV em brechas dolomíticas hidrotermais do tipo V na ocorrência zincífera do Mata II. Em destaque (a) presença de xenotima e zircão; (b) monazita; (c) presença de barita e óxido de Cu envolto por cristais de quartzo; (d) Covellita; (e) pirolusita em meio a hematita e fino cristal de galena incluído no quartzo; (f) Quartzo e hematita que possivelmente representa pseudomorfo de dolomita.

De acordo com as relações texturais e formação mineral nos diferentes estágios da brecha hidrotermal observados em escala macroscópica e principalmente microscópica, pode-se definir a sequência paragenética da ocorrência zincífera Mata II, conforme apresentado na Figura 7.16.

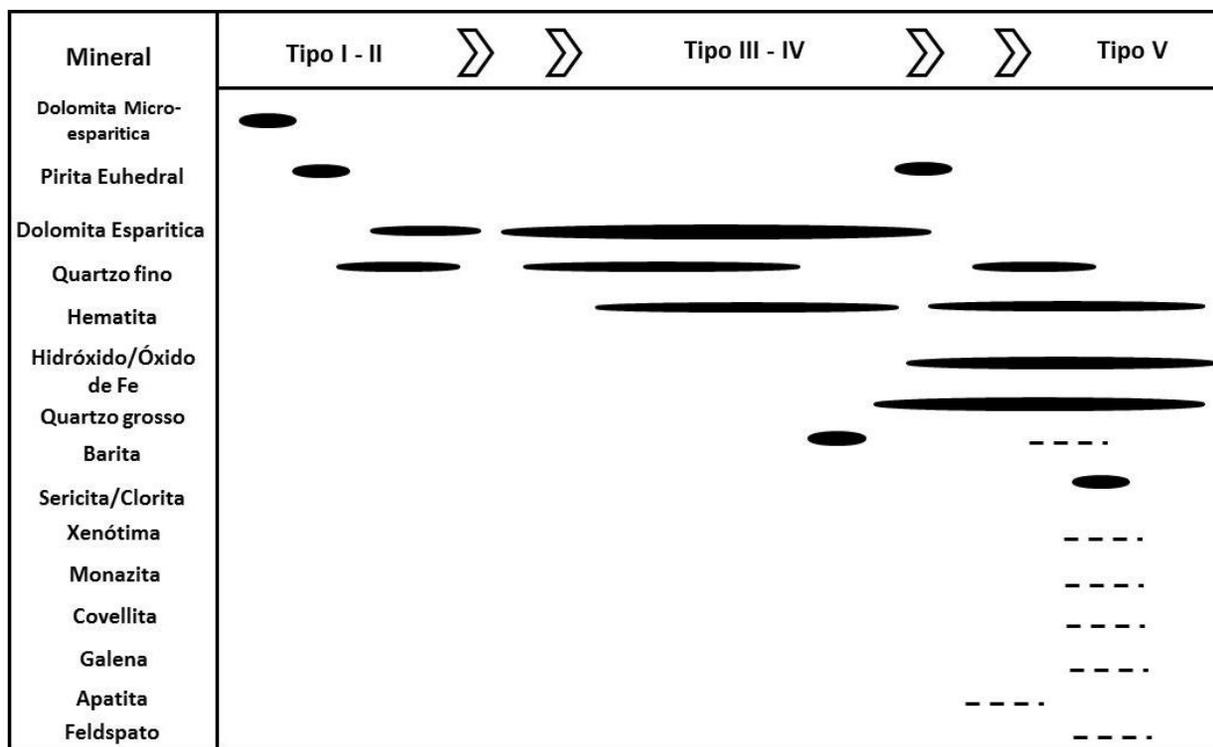


Figura 7. 16. Sequência paragenética das brechas dolomíticas hidrotermais da ocorrência zincífera do alvo Mata II.

7.2 Alvo Olho D'Água

A ocorrência zincífera Olho D'Água (Figura 7.17) situa-se a 4km ao norte do município Vazante e está situada no mesmo contexto geológico semi-regional da ocorrência do Alvo Mata II, ou seja, hospeda-se nos dolomitos da Formação Morro do Calcáreo em contato com os metapelitos da Formação Serra da Lapa. Neste contato ocorre uma brecha dolomítica hidrotermal com envoltória com atitude aproximada de N45E/30NW (Figura 7.18 e 7.19).



Figura 7. 17. Visão geral da ocorrência zincífera do Olho D'Água, mostrando relevo característico da Formação Serra da Lapa ao fundo.

7.2.1 Contexto Geológico

As unidades geológicas presentes na área da ocorrência zincífera Olho D'Água são representadas pela Formação Morro do Calcáreo e pela Formação Serra da Lapa no topo, respectivamente (Figura 7.18 e 7.19). A Formação Morro do Calcáreo representa aproximadamente 48% da área de estudo (Figura 7.18), aflora na porção sudeste do mapa com atitude aproximada de N60E/18NW, e apresenta espessura máxima identificada de 220m (conforme sondagem VZODF002). É constituída na base por um dolomito/dolorudito estromatolítico cinza a róseo, localmente laminado e intercalado com lentes de metamargas finamente estratificadas, de cor cinza a ocre, e no topo por dolomito fino (Figuras 7.20a, 7.20b e 7.20c), cinza a róseo, com laminações algais, intercalado a lentes de dolomitos estromatolíticos. Esta unidade quando intemperizada gera uma cobertura regolítica de cor vermelha, fina, argilosa e magnética.

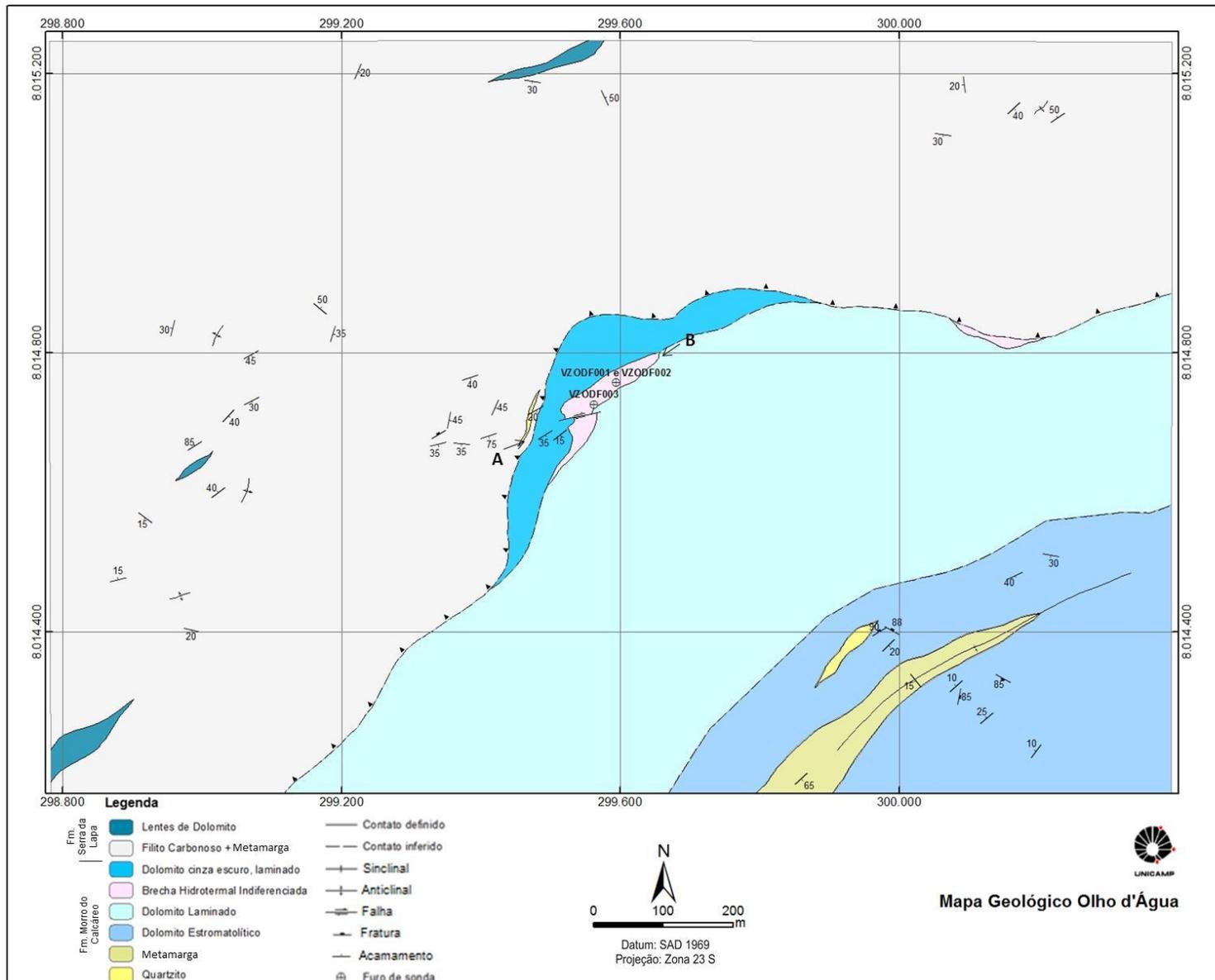


Figura 7. 18. Mapa Geológico da ocorrência zincífera Olho D'Água, este estudo.

Perfil Olho D'Água

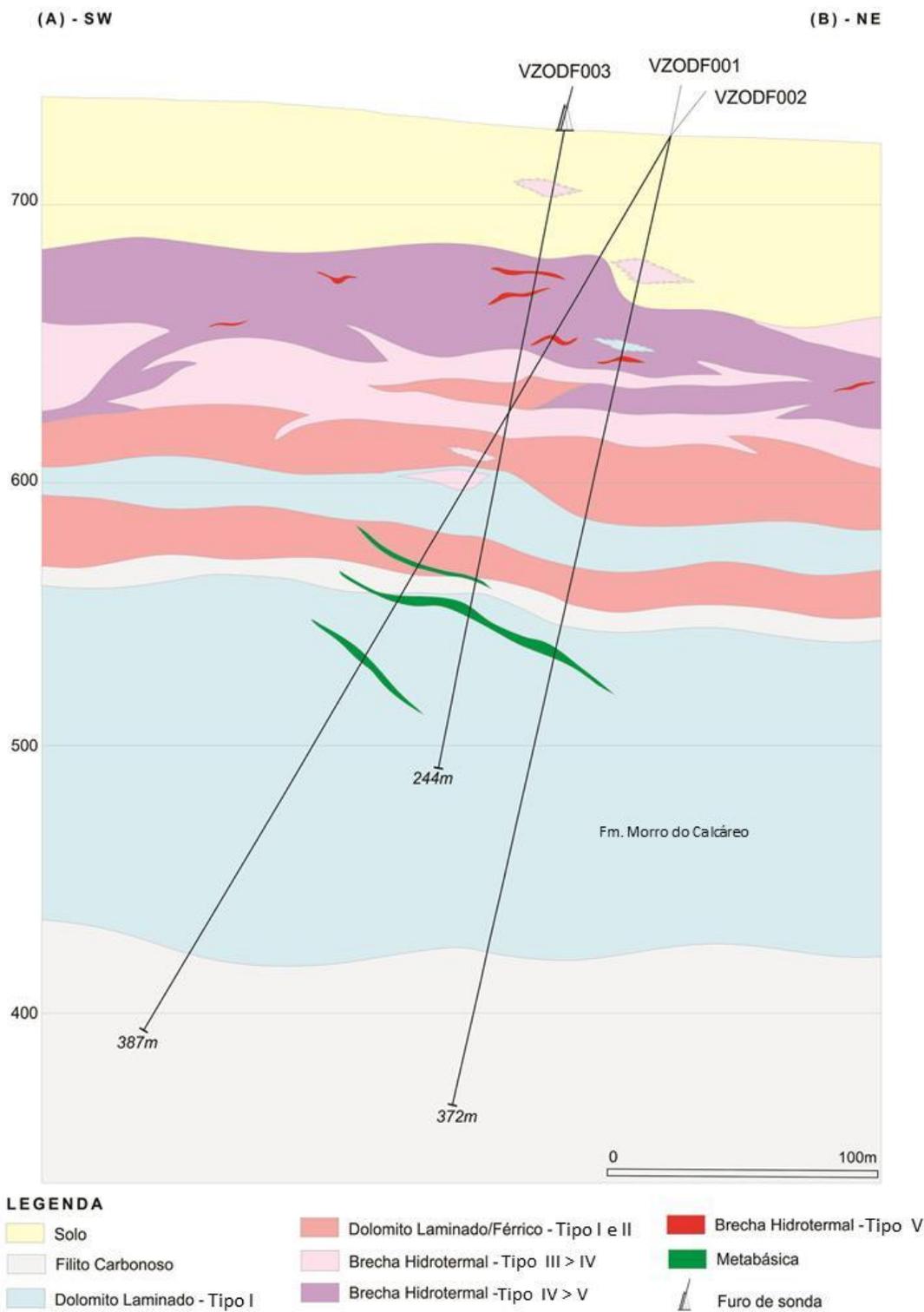


Figura 7. 19. Perfil geológico da ocorrência zincífera Olho D'Água, este estudo.



Figura 7. 20. (a) Dolomito cinza laminado da Formação Morro do Calcáreo na área da ocorrência Olho D'Água; (b) Dolomito levemente brechado, cinza a róseo, da Formação Morro do Calcáreo; (c) Dolomito cinza laminado em testemunho da sondagem VZODF001.

O dolomito fino, laminado, microscopicamente é representado por uma rocha dolomítica com textura brechada, micro-esparítica (70%), localmente com dolomita esparítica com textura em sela (Figura 7.21a). Clastos angulosos de dolomito com evidências de brechação *in situ* são envoltos por uma matriz constituída por quartzo (10%) e dolomita esparítica (15%), (Figura 7.21b, 7.21c). Apresenta vênulas preenchidas por dolomita esparítica com textura de preenchimento de espaços abertos, com crescimento das bordas para o centro com pirita (5%) subhedral associada (Figura 7.21d). Dentre as variações locais desta unidade na área em apreço (Figura 7.21 e; 7.21f), também foi possível identificar uma rocha dolomítica fina, micro-esparítica, laminada com grãos de quartzo arredondados (indicativos de origem clástica) e cristais de dolomita micro-esparítica. Estilólitos preenchidos por hidróxido/óxido de ferro e quartzo hidrotermal também foram observados, assim como sericita finamente disseminada na matriz.

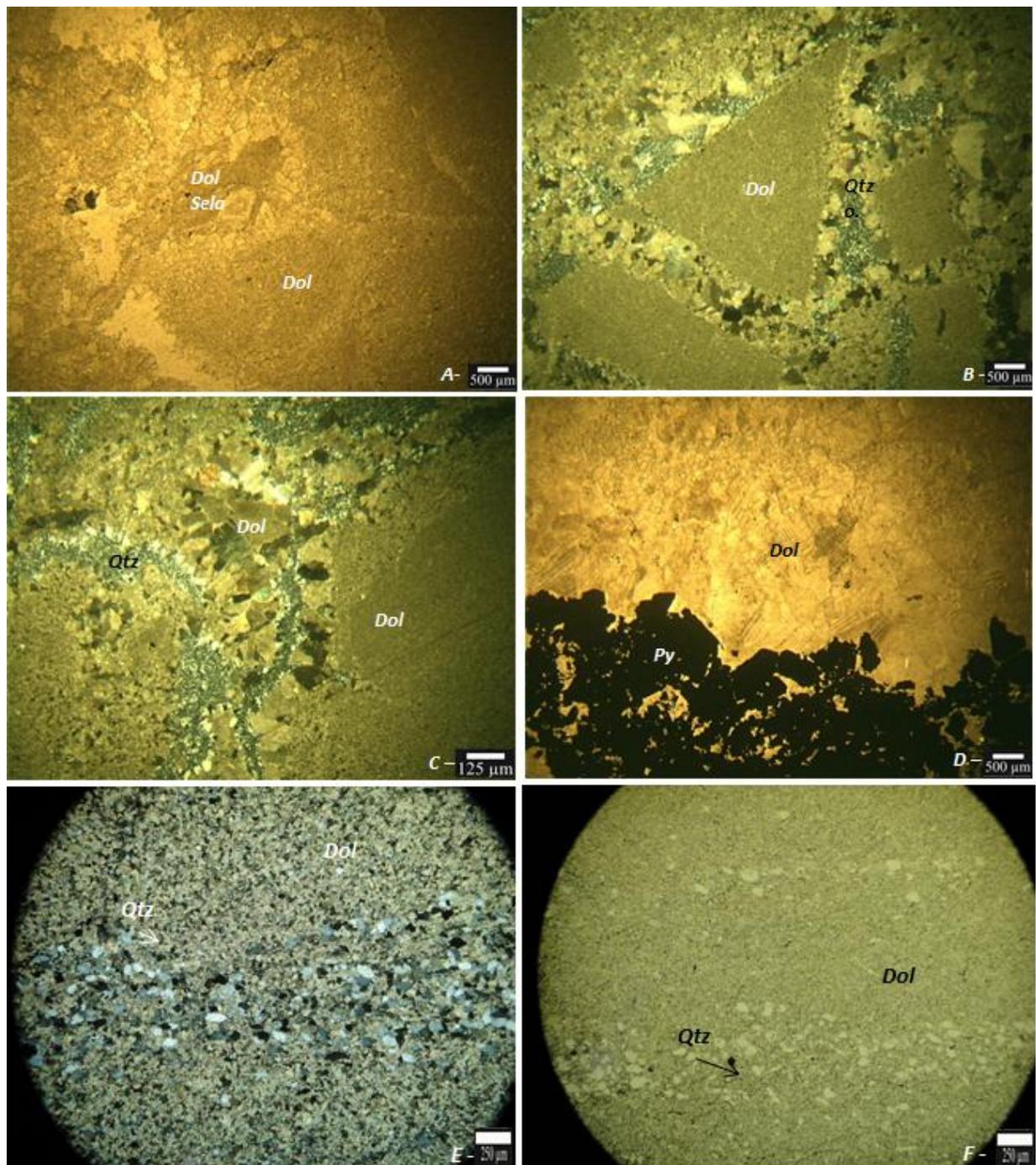


Figura 7. 21. (a) Dolomito brechado com dolomita esparítica em sela entre fragmentos de dolomicrito-dolomicroesparito (luz transmitida; polarizadores descruzados); (b) Dolomito brechado com clastos angulosos de dolomicrito envoltos por dolomita esparítica e finos agregados de quartzo e calcedônia (luz transmitida; polarizadores cruzados); (c) Dolomito com textura brechada (luz transmitida; polarizadores descruzados) com matriz constituída por calcedônia e dolomita esparítica; (d) Dolomita esparítica e pirita associada com texturas de preenchimento de espaços vazios (luz transmitida; polarizadores descruzados); (e) Bandamento caracterizado por níveis com grãos de quartzo arredondados e outros com predominância de dolomita microesparítica (luz transmitida; polarizadores descruzados); (f) Idem (e) com polarizadores descruzados.

A Formação Serra da Lapa aflora na porção noroeste e representa 45% da área de estudo (Figura 7.18), com espessura estimada de 200 m, com direção aproximada de N70E e dispõe de um caimento ora para SE ora para NW formando dobras abertas e suaves com eixos NE-SW. Esta unidade é formada por uma sequência metapelito-carbonática com níveis de filito carbonoso, preto, piritoso, intercalado com metamargas cinza esverdeadas, finamente estratificadas (Figura 7.22a e 7.22b). Também nesta unidade foram identificadas pequenas lentes de quartzitos, de granulação fina a média, com coloração amarelada e lentes de dolomito fino, cinza escuro, laminado. Esta unidade é caracterizada por formar pequenos morrotes e quando intemperizados os litotipos geram solo de cor ocre a amarelado.



Figura 7. 22: Em (a) Afloramento de metamarga da Formação Serra da Lapa; (b) filito estratificado alterado.

O filito carbonoso da Formação Serra da Lapa apresenta granulometria fina, textura granolepdoblástica, às vezes milonítica, finamente estratificada com níveis ricos em material carbonoso e sericita/muscovita dispostos paralelamente à foliação S1 e níveis de quartzo microcristalino, localmente estirados segundo a foliação milonítica (Figura 7.23a e 7.23d). Nota-se a presença de veios de quartzo tardios à estruturação da rocha (Figura 7.23b), crenulação e fraturas tardias que deslocam os veios de quartzo (Figura 7.23c). Este filito carbonoso é constituído predominantemente por material siliciclástico e sericita. O filito evidencia metamorfismo na fácies xisto verde com formação de sericita e cisalhamento responsável por recristalização dos cristais de quartzo e geração de estruturas deformacionais, incluindo o estiramento dos cristais e desenvolvimento de pares S-C.

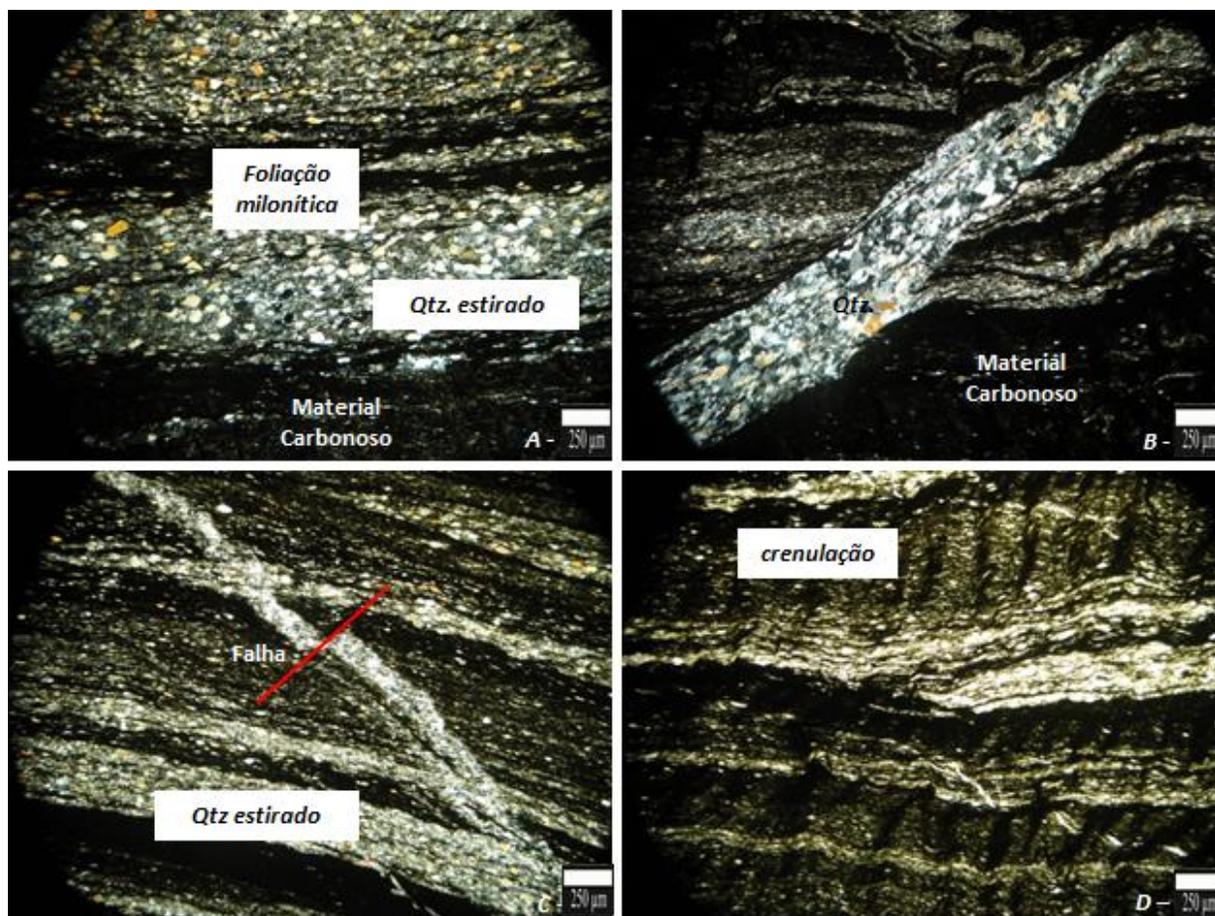


Figura 7. 23. Em (a) Material carbonoso e foliação milonítica com quartzo estirado; (b) Vênulade quartzo discordante da foliação milonítica com cristais de quartzo também estirados; (c) Microfalhas que deslocam as vênulas de quartzo; (d) Crenulação em filito carbonoso (luz transmitida; polarizadores cruzados)

Uma particularidade desta área de estudo é a presença em superfície de alguns blocos de rocha metabásica, que em subsuperfície (Figura 7.19) aparecem de forma discordante em relação à estruturação local (S0). Apresentam espessura de até 3m e coloração verde escura, fina, com discreta borda de reação com a encaixante (dolomito) e discreto magnetismo.

7.2.2 Brecha Dolomítica – Olho D’Água

A brecha dolomítica hidrotermal da ocorrência zincífera Olho D’Água aflora na forma de um *gossan* alongado (Figura 7.24a) no contato entre as unidades geológicas da Formação Morro do Calcáreo e da Formação Serra da Lapa. Localiza-se na porção central e corresponde a 7% da área de estudo (Figura 7.18). A envoltória geral desta brecha apresenta atitude N45E/30NW, distribuída superficialmente por uma área de 20m de largura por 80m de comprimento, com espessura relativa em profundidade de aproximadamente 100m (Figura 7.19).

Esta discreta ocorrência zincífera é constituída em superfície por dois *fronts* principais de alteração hidrotermal (Figura 7.24b), representados por:

- Rocha dolomítica com alteração férrica, de coloração avermelhada com vênulas de dolomita branca e localmente calamina. Esta rocha corresponderia ao envelope da alteração hidrotermal.
- Substituição total da rocha encaixante, com formação de rocha de textura grossa com dolomita branca, hematita, jaspe, siderita, calamina e willemita.



Figura 7. 24. (a) Visão geral do afloramento (gossan); (b) Dolomito cinza, mais preservado e evidências de alteração hidrotermal resultantes em dolomito vermelho com alteração férrica (acima) e rocha com textura grossa constituída por hematita, dolomita, siderita, calamina e willemita(direita).

A partir de descrições de testemunhos de sondagem realizados na área de estudo, correspondente aos furos VZODF001, VZODF002 e VZODF003, foi possível individualizar em subsuperfície uma variação de 5 (cinco) tipos de rochas modificadas por processos hidrotermais e brechas dolomíticas hidrotermais de acordo com suas características texturais, cor e composição, descritas a seguir (Figura 7.25).

TIPO	FOTO MACROSCÓPICA	CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS	TIPO	FOTO MACROSCÓPICA	CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS	TIPO	FOTO MACROSCÓPICA	CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS
TIPO I		Dolomitos estromatolíticos e laminados, com estruturas sedimentares bem como sua coloração característica cinza preservada. Modificação pontual da cor das rochas que passam a apresentar coloração cinza a rosa.	TIPO II		Rochas dolomíticas estromatolíticas e laminadas, com estrutura sedimentar preservada (laminação algal e colunas estromatolíticas) ou totalmente obliteradas pela alteração hidrotermal mais intensa. Em quase sua totalidade apresenta uma coloração avermelhada.	TIPO III		Brecha dolomítica hidrotermal clasto suportada, constituída por clastos dolomíticos subarredondados a angulosos, as vezes fraturados, com tamanhos variando desde alguns milímetros até 6 cm, em parte totalmente hidrotermalizados (rosados) até parcialmente hidrotermalizados (cinza), formada por uma matriz fina, ferruginosa, dolomítica
TIPO IV		Brecha dolomítica matriz suportada com clastos de dolomito avermelhados, com dimensões variáveis de 0.3 cm até 8 cm, subarredondados a angulosos, sem estrutura sedimentar preservada, suportados por uma matriz constituída por dolomita esparítica branca, com cristais bem desenvolvidos.	TIPO V		Substituição total da rocha encaixante por minerais hidrotermais de textura grossa, representados por dolomita branca, jaspe, hematita, siderita e localmente willemita em superfície. Este tipo de rocha apresenta pequena espessura lateral (< 50 cm) e pequeno desenvolvimento longitudinal (< 5m). Magnetismo discreto			

Figura 7. 25. Características macroscópicas dos cinco tipos de rochas modificadas por processos hidrotermais e brechas dolomíticas da ocorrência do Olho D'Água.

Em escala microscópica, os cinco tipos de dolomitos hidrotermalizados e brechas identificadas são semelhantes aos descritos na ocorrência Mata II, porém com pequenas diferenças abaixo descritas:

- **Tipo I**

Os litotipos do Tipo I correspondem ao grupo de rochas dolomíticas com estruturas sedimentares bem como coloração cinza característica dos dolomitos inalterados, com fraca brechação e com alguma alteração de Fe-Carbonatos com pequenas porções nas quais a cor das rochas passa a ser rosada (Figura 7.26).

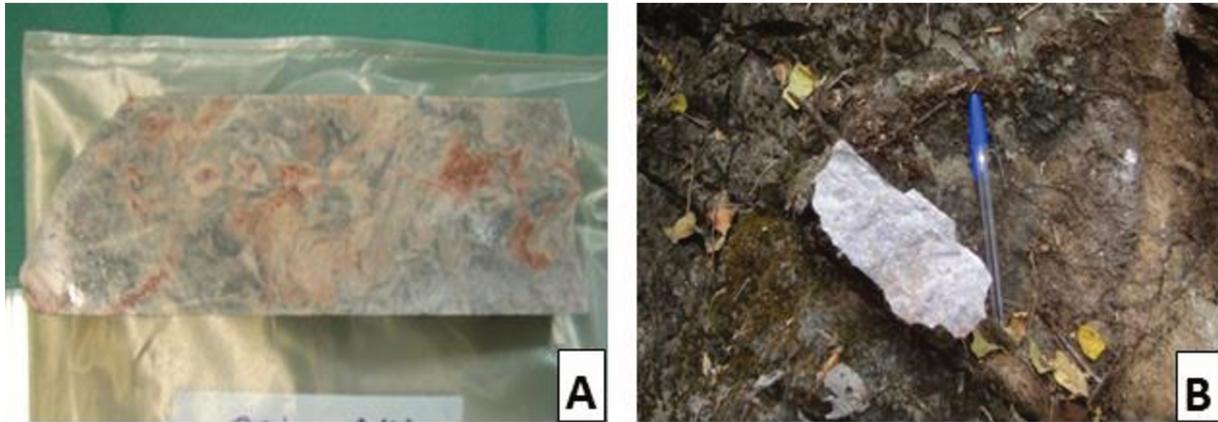


Figura 7. 26. Em (A, B) - Processos de Fe-Carbonatação modificando a coloração da rocha original dolomítica de cor cinza para uma coloração cinza a rosada. Dolomito com baixa interação fluido rocha.:

- **Tipo II**

Litotipos correspondente ao tipo II são reconhecidos com coloração avermelhada em superfície formando um envelope da zona mineralizada. São representados por rocha dolomítica fina micro-esparítica, localmente com estrutura sedimentar preservada dada pela variação granulométrica dos grãos carbonáticos e localmente textura brechada. É constituída predominantemente por dolomita (85%) com contatos medianamente difusos, irregulares, envoltos por óxido e hidróxido de Fe (12%) amorfos (Figura 7.27a e 7.27b), de coloração vermelho alaranjado, que é responsável pela coloração avermelhada em escala macroscópica das rochas. Finos veios tardios de dolomita esparítica (Figura 7.27b) e pequenos agregados de quartzo (3%) também são identificados.

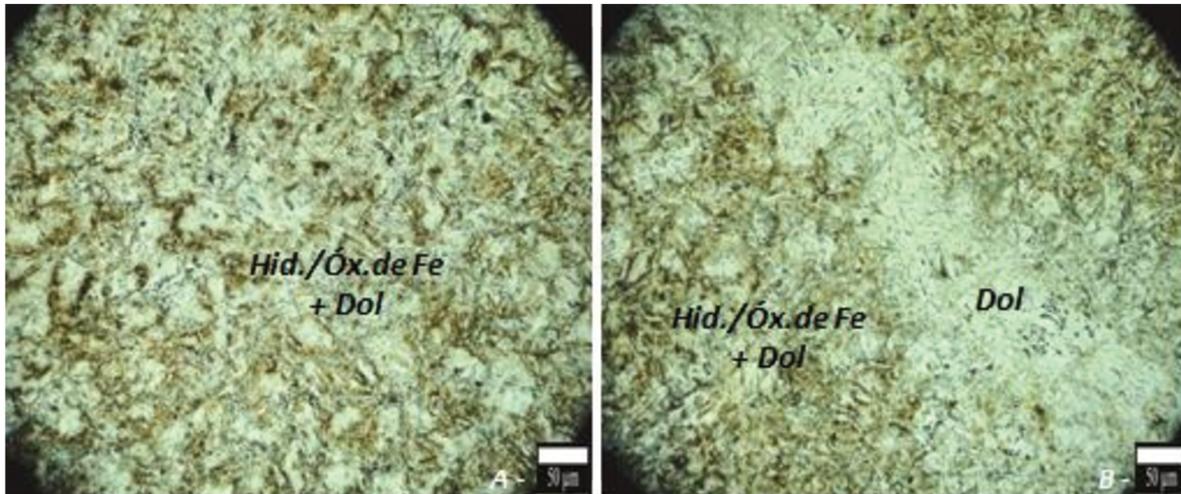


Figura 7. 27. (a) Rocha dolomítica com hidróxido/óxido de ferro entre os grãos carbonáticos, que confere cor avermelhada à rocha (b) vênula com dolomita esparítica que evidencia novos pulsos de fluidos hidrotermais posteriores ao “staining” por hidróxidos de ferro (luz transmitida; polarizadores descruzados).

- **Tipo III**

O tipo III é representado por uma brecha hidrotermal clasto suportada (Figura 7.28a). Os clastos são constituídos por cristais de dolomita microesparítica (55%) e partículas carbonáticas, principalmente oncólitos (Figura 7.28b e 7.28c), enquanto cristais de dolomita esparíticos associam-se à matriz (23%) da zona brechada/fraturada. Estes clastos evidenciam brechagem *in situ*, com baixa movimentação. Hematita (3%) limonitizada e óxido/hidróxido de ferro (19%) preenchem interstícios entre cristais de dolomita esparítica da matriz (Figura 7.28d e 7.28e) conferindo a esta uma coloração avermelhada. Nos clastos dolomíticos não se observa presença de hidróxido/óxido de Fe, o que provavelmente preserva a cor cinza original da rocha. Nota-se também a presença de vênulas tardias com hidróxido/óxido de Fe e com dolomita esparítica e a presença de estilólitos preenchidos por hidróxido/óxido de Fe (Figura 7.28d).

- **Tipo IV**

Este tipo de brecha é ora clasto suportada ora matriz suportada, com partículas carbonáticas oncolíticas mais finas constituindo a rocha carbonática (microesparítica) e cristais carbonáticos mais desenvolvidos, esparíticos associados à zona brechada como mostrado nas Figuras 7.29a, 7.29b e 7.29c. Estes clastos dolomíticos apresentam evidências de cominuição e dissolução parcial. A hematita associa-se à matriz da brecha e aos clastos de dolomito, que apresentam também óxido-hidróxido de Fe (Figura 7.29d), que confere a estes a coloração avermelhada vista macroscopicamente.

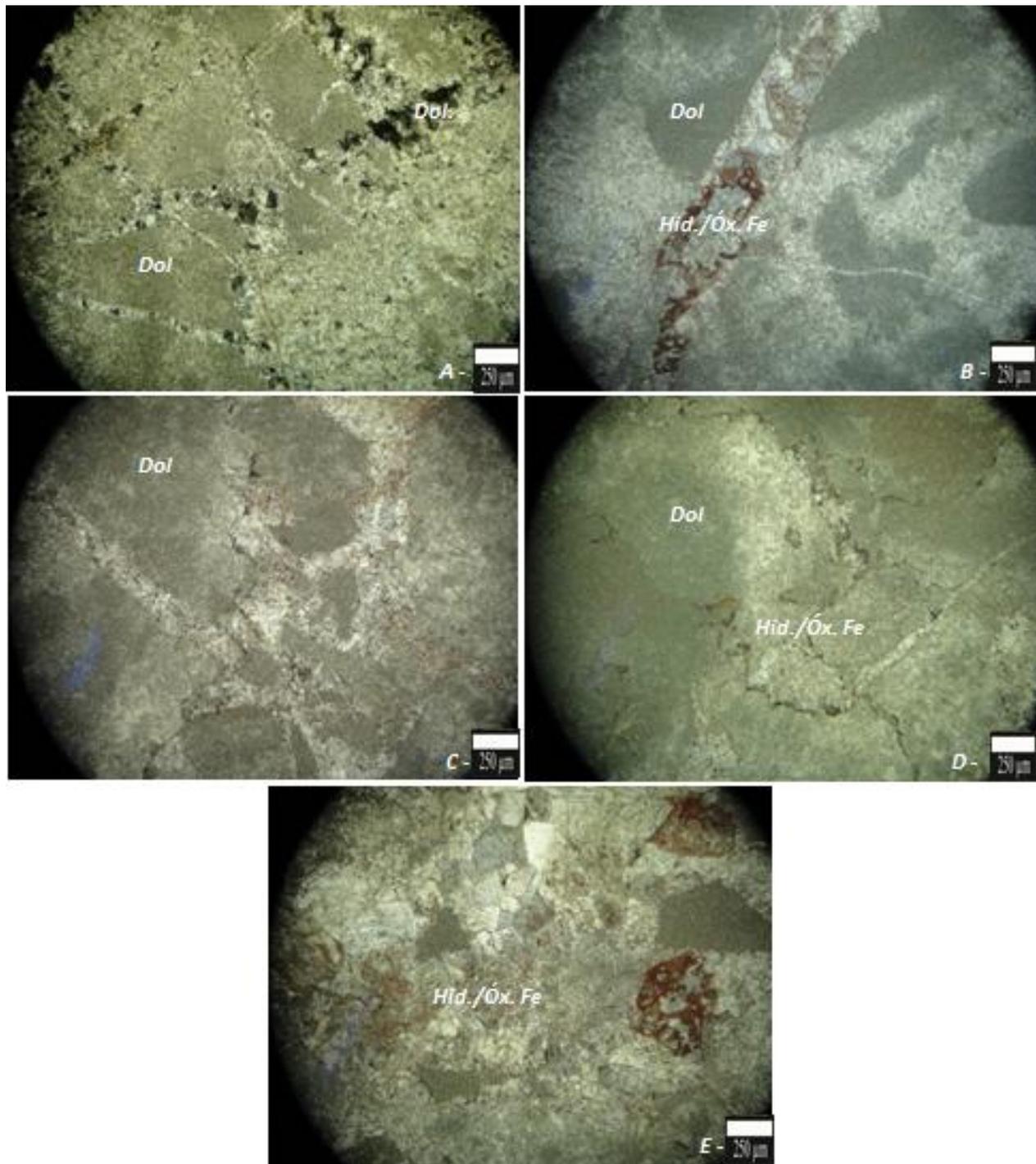


Figura 7. 28. Em (a, b, c) Clastos de dolomita separados por network de fraturas preenchidas por dolomita esparítica e óxido/hidróxido de Fe. Luz transmitida, polarizadores cruzados em (a) e descruzados em (b) e (c); (d) Estilólitos com concentração de óxido/hidróxido de Fe (luz transmitida; polarizadores descruzados); (e) Dolomita esparítica e hematita limonitizada (luz transmitida; polarizadores cruzados).

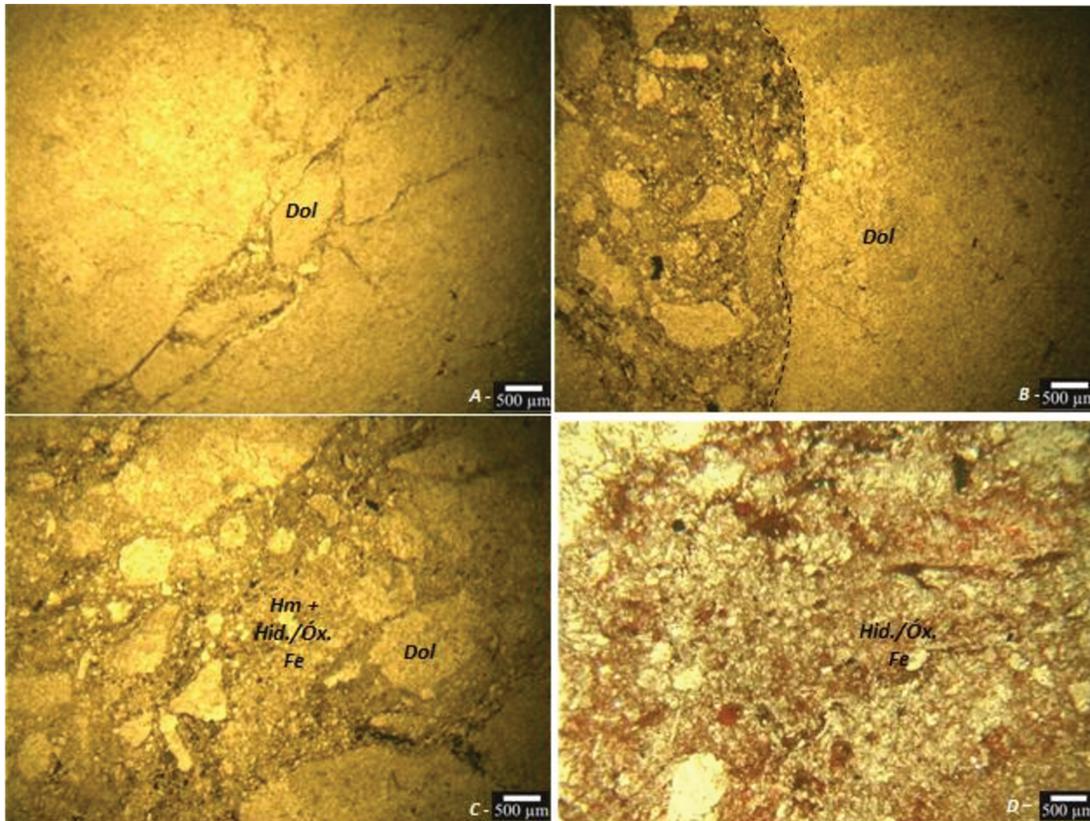


Figura 7. 29. Em (a) Dolomito fraturado; (b) Dolomito preservado em contato com zona brechada; (c,d) Brecha hidrotermal com clastos de dolomito e matriz composta por dolomita esparítica, hematita e óxido/hidróxido de Fe (luz transmitida; polarizadores descruzados).

- **Tipo V**

Nas brechas do Tipo V, clastos do dolomito apresentam cristais de dolomita microesparítica com contatos difusos e não definidos, com hidróxido/óxido de Fe (Figura 7.30a) nos espaços intragranulares, o que confere cor vermelha à rocha. Dolomita esparítica, com textura planar, límpida, ocorre na zona brechada constituída por hematita limonitizada (Figura 7.30b). Também são observadas falhas tardias a este arranjo e duas gerações de vênulas de dolomita esparítica (Figura 7.30c e 7.30d).

Nota-se a presença de franklinita (20-40µm) associada à trama hematítica e dolomita esparítica (Figura 7.30e e 7.30f) da matriz da brecha. Esse mineral ocorre em pequenos cristais, subhedrais, sem reflectância interna, com hematita em suas bordas, sugerindo seu consumo parcial. A hematita também apresenta estirada e deformada. Também foram identificados cristais de willemita, granular, com tamanhos médios de 200µm, birrefringência alta, dispersos e associados a vênulas de dolomita esparítica (Figura 7.30g) e vênulas preenchidas por dolomita cortando o arranjo anterior (Figura 7.30h).

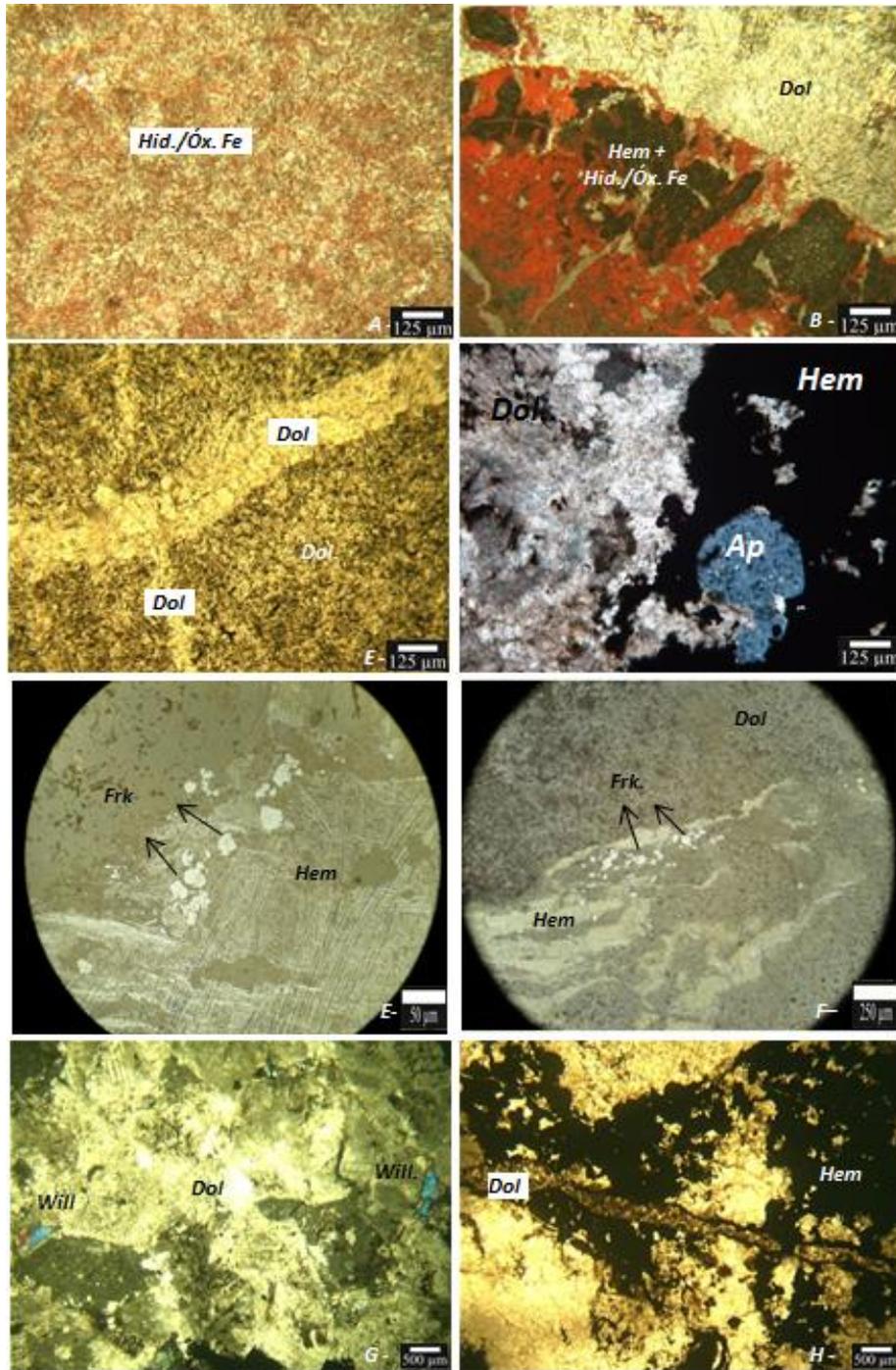


Figura 7. 30. Em (a) Dolomita associada a óxido/hidróxido de Fe (luz transmitida; polarizadores descruzados); (b) Hematita limonitizada e dolomita esparítica límpida (luz transmitida; polarizadores descruzados); (c) Duas gerações de vênulas de dolomita esparítica que truncam a rocha dolomítica com concentrações de goethita (luz transmitida; polarizadores cruzados); (d) Dolomita esparítica associada com apatita e hematita (luz transmitida; polarizadores descruzados); (e) Cristais subhedrais, arredondados, de franklinita associada com hematita e dolomita esparítica (luz refletida); (f) Hematita estirada associada aos cristais de franklinita (luz refletida); (g) Cristais de dolomita esparítica e willemita (luz transmitida, polarizadores cruzadas); (h) Vênula de dolomita cortando hematita (luz transmitida, polarizadores descruzados).

Análises de microscopia eletrônica de varredura da brecha do tipo V confirmaram a presença de quartzo (SiO_2), hematita (Fe_2O_3), dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] e clorita ($(\text{Mg,Al,Fe})_{12}(\text{Si,Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_{16}$), Figuras 7.31a, 7.31b e 7.32c. Texturalmente, na brecha do tipo V são observados cristais de hematita subhedral com tamanhos que variam de $20\mu\text{m}$ até tamanhos superiores a $200\mu\text{m}$ com fraturas preenchidas por dolomita (Figura 7.31a) ou clorita (Figura 7.31b). Também destaca-se a presença de hematita anhedral, preenchendo fraturas em meio a dolomita esparítica. Os minerais subordinados são representados principalmente por apatita [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F,OH,Cl})$], com tamanho inferior a $<10\mu\text{m}$, associada principalmente à massa dolomítica.

No tipo V da brecha, tanto a dolomita como a clorita apresentam Zn em sua estrutura cristalina, formando dolomita zincífera e clorita zincífera respectivamente (Figura 7.31d).

Para este caso em particular, não foram encontrados sulfetos de zinco e chumbo, porém foram identificados cristais de cerussita (PbCO_3), anhedral, com tamanho médio de $20\mu\text{m}$, inserido nos cristais de dolomita zincífera (Figura 7.31a).

De acordo com as relações texturais e formação mineral nos diferentes estágios da brecha hidrotermal observados em escala macroscópica e principalmente microscópica, pode-se definir a sequência paragenética da ocorrência zincífera Olho D'Água (Figura 7.32).

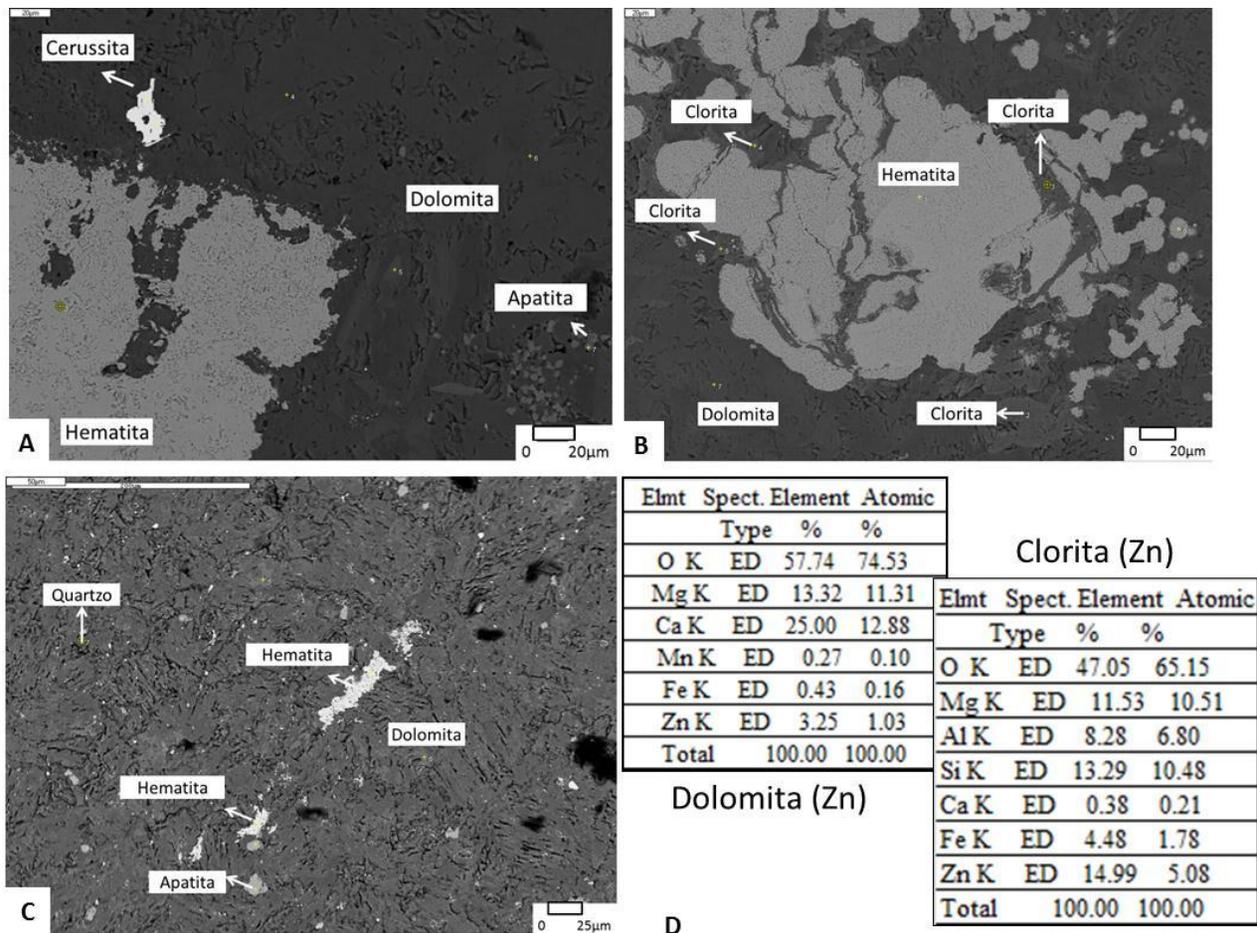


Figura 7. 31. Imagens de elétrons retro-espalhados obtida com uso de MEV em brechas dolomíticas hidrotermais do tipo V na ocorrência zincífera Olho D'Água. Em destaque (a) Cerussita e fino cristais de apatita; (b) hematita com fraturas preenchidas por clorita; (c) dolomita com finos cristais de quartzo e apatita disseminados; (d) análise EDS de dolomita e cloritas zincíferas.

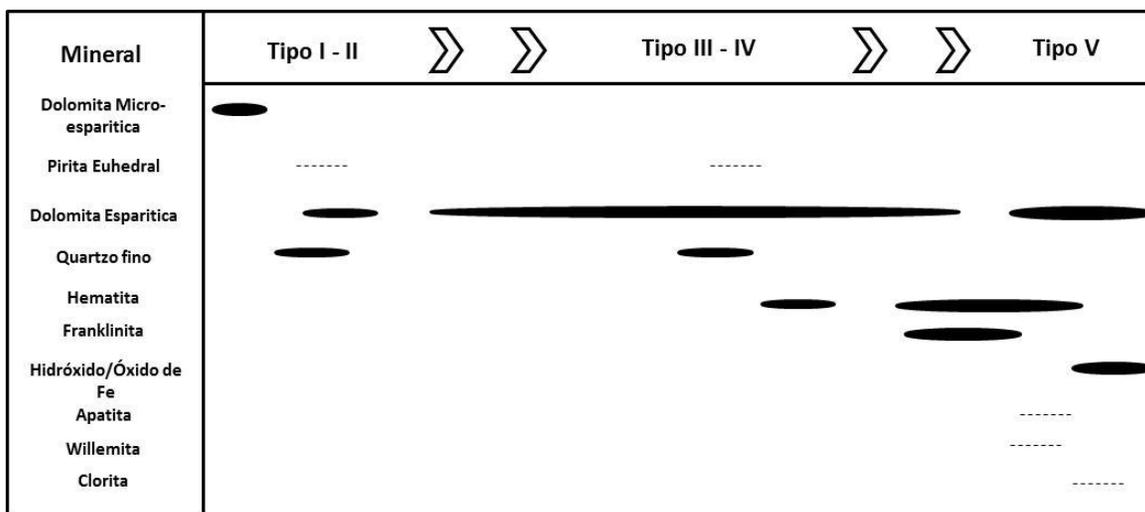


Figura 7. 32. Sequência paragenética para a ocorrência zincífera do Olho D'Água.

7.3 Alvo Cercado

A Mina do Cercado (Figura 7.33) corresponde a um corpo de minério willemítico lavrado a céu-aberto, em uma cava irregular, com 200m de comprimento por 40m de largura, localizado a 2km a oeste do município de Vazante.



Figura 7. 33. Visão parcial da Cava da Mina do Cercado.

A envoltória da mineralização é controlada por uma falha normal com atitude N35E/75NW (Figura 7.34 e 7.35).

7.3.1 Contexto Geológico

A antiga área de exploração da Mina do Cercado está inserida em dolomito da Formação Morro do Calcáreo e Formação Serra do Poço na base e metamargas/metapelitos da Formação Serra da Lapa no topo.

A Formação Morro do Calcáreo aflora na porção centro-oeste e corresponde aproximadamente a 50% da área de estudo, com atitude geral de N20E, formando dobras suaves, abertas, com caimento ora para SE ora para NW com valor médio de inclinação de 15° e com espessura mínima conhecida de 100 m. Esta unidade é constituída por dolomito localmente dolarenítico, silicificado, fino, de cor cinza, localmente com esteiras algais e na base um dolomito de cor cinza a róseo, intercalado com lentes de dolomito margoso, cinza, finamente estratificado entre níveis metapelíticos e dolomíticos, provavelmente pertencente a formação Serra do Poço Verde. (Figura 7.36a e 7.36b).

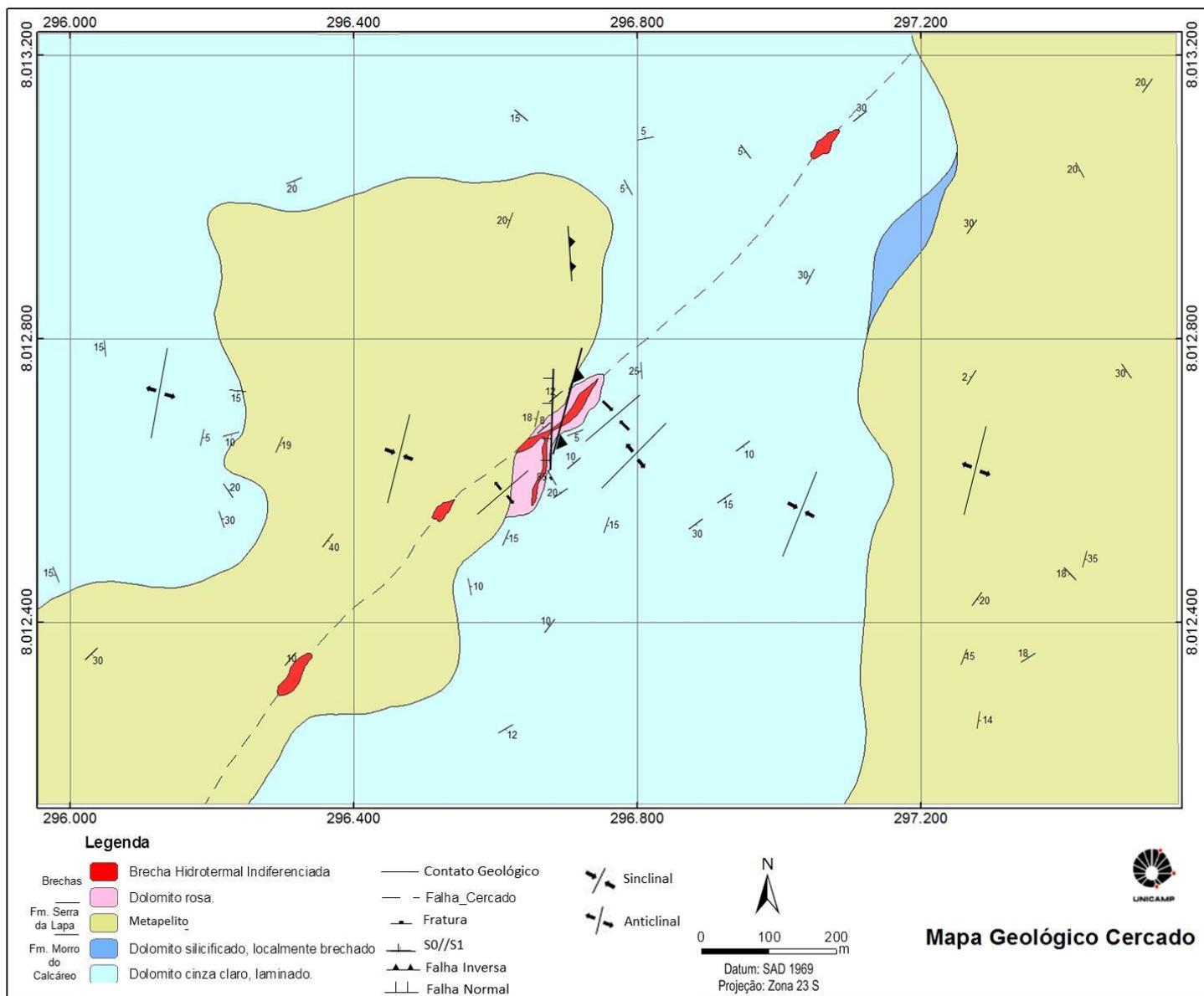


Figura 7. 34. Mapa geológico da Mina do Cercado, este estudo.

Perfil Esquemático da Mina do Cercado



Coordenadas UTM:
296680m E, 8012700m N

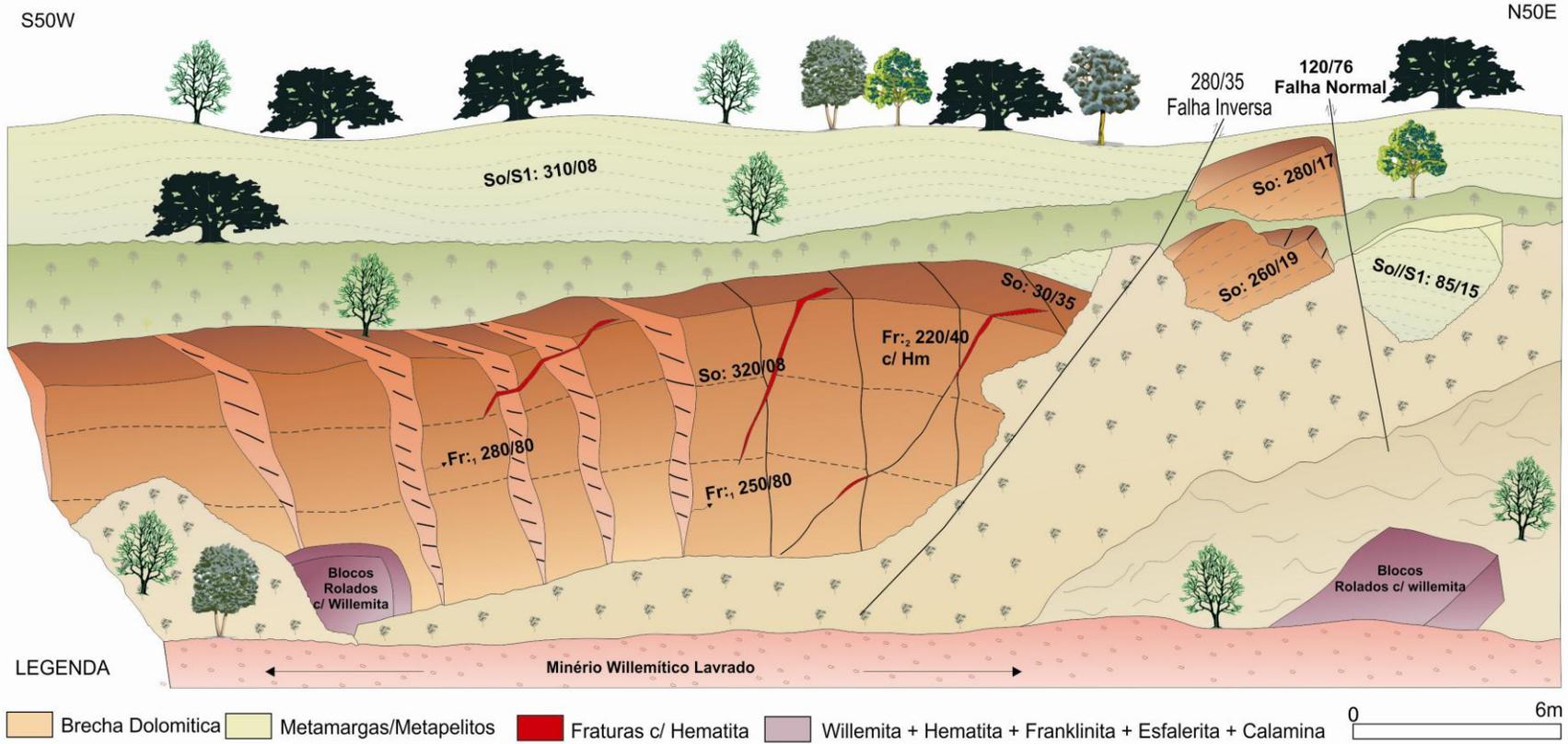


Figura 7. 35. Esquema da Mina do Cercado, este estudo.

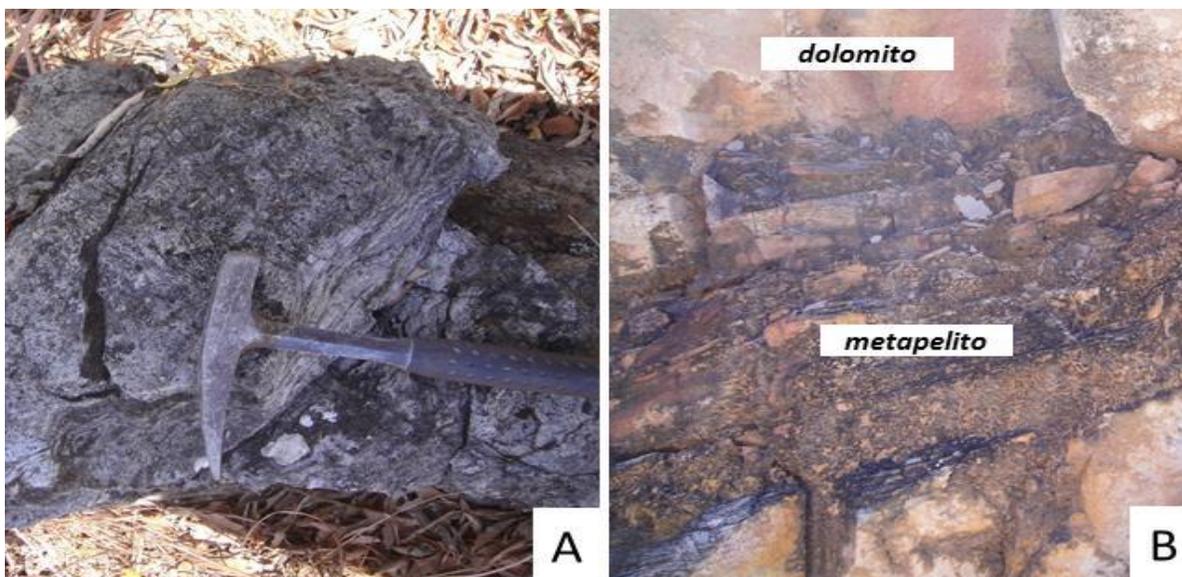


Figura 7. 36. (a) Dolomito cinza, fino, da Formação Morro do Calcáreo; (b) Dolomito cinza claro, fino, maciço da Formação Morro do Calcáreo intercalado a metapelitos;

Em escala microscópica, é representado por dolomito laminado, com granulometria predominantemente submilimétrica (micrítica), com lamelas e bolsões anastomosados e irregulares preenchidos por dolomita esparítica (15%) e quartzo (Figura 7.37a). É constituído em sua totalidade por cristais de dolomita (75%) com finos agregados ou nódulos de quartzo (3%) e óxido-hidróxido de ferro (2%) associados a zonas de fraturas (Figura 7.37b). Disseminada na matriz carbonática, percebe-se a existência de sericita, finamente disseminada (<1%).

Apresenta evidências de cisalhamento, com grãos carbonáticos estirados e alongados segundo uma foliação milonítica (foto 7.37c e 7.37d).

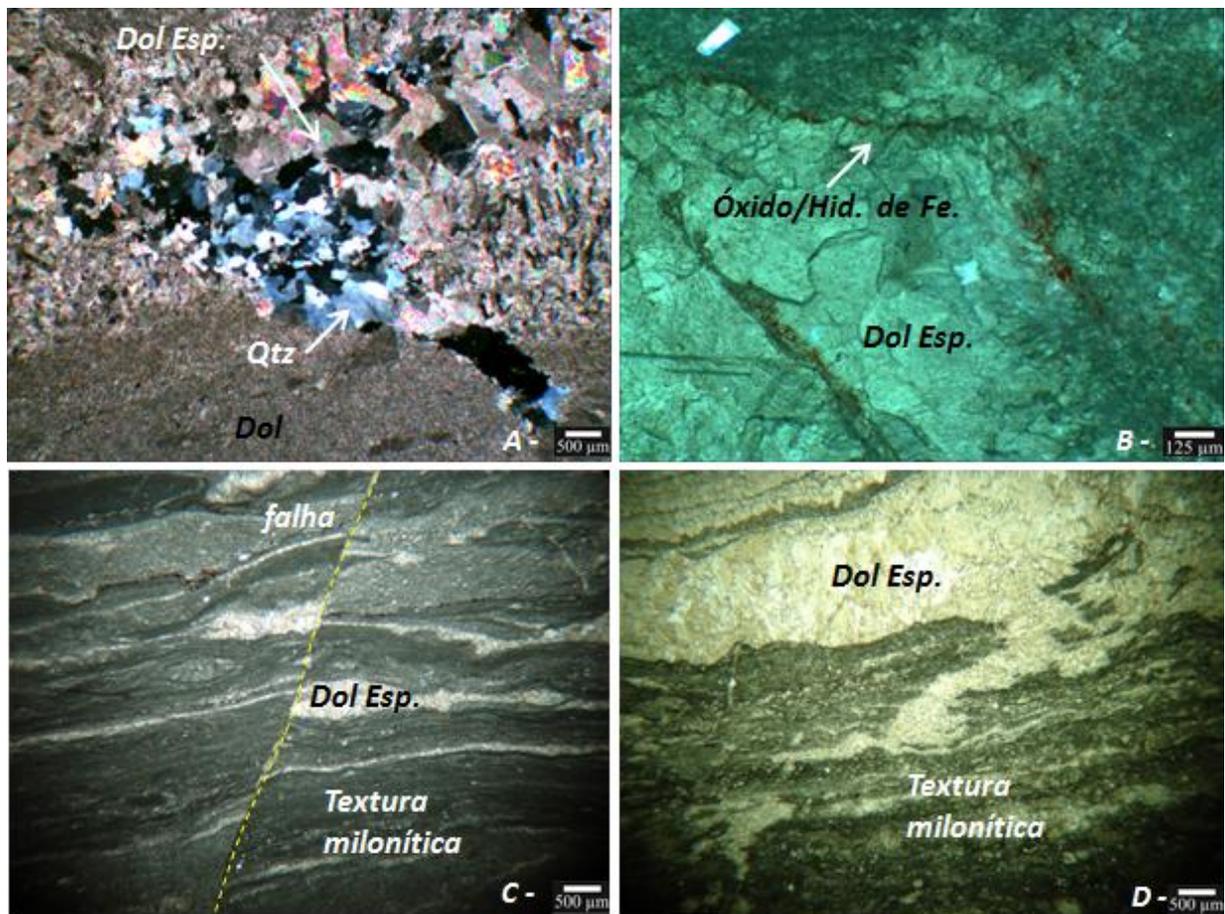


Figura 7. 37. (a) Bolsões de dolomita esparítica e quartzo truncando a laminação do dolomito micrítico a microesparítico (luz transmitida; polarizadores cruzados); (b) Fraturas e estilólitos com concentrações de óxido/hidróxido de Fe limitando bolsões preenchidos por dolomita esparítica, indicando dissolução sob pressão (luz refletida); (c) Estrutura milonítica e falha tardia em rocha dolomítica com cimentação esparítica ao longo da foliação (luz transmitida; polarizadores descruzados); (d) Estrutura milonítica truncada por dolomita esparítica, que também preenche bolsões paralelos à foliação da rocha dolomítica (luz transmitida; polarizadores descruzados)

A Formação Serra da Lapa corresponde a 45% da área de estudo e aflora na porção leste e central da área, capeando os dolomitos (Figura 7.34). Esta unidade apresenta o mesmo comportamento estrutural dos dolomitos, ou seja, forma dobras suaves e abertas com caimento ora para SE ora para NW com valor médio de 15° e com espessura mínima conhecida de 10 m. Litologicamente é constituída por uma sequência metapelito-carbonática com níveis de filito carbonoso, preto, piritoso intercalado com níveis de metamargas cinza esverdeadas, finamente estratificada entre níveis pelíticos e dolomíticos.

A metamarga é laminada, constituída por grãos de quartzo e de feldspato angulosos a subarredondados, de granulação de areia muito fina, medianamente selecionado, intercalado com uma massa marrom acinzentada composta por sericita fina, localmente milonitizada (Figura 7.38a, 7.38b). Nota-se também a presença de grande quantidade de óxido-hidróxido de ferro associados a este bandamento rico em quartzo (Figura 7.38c e 7.38d).

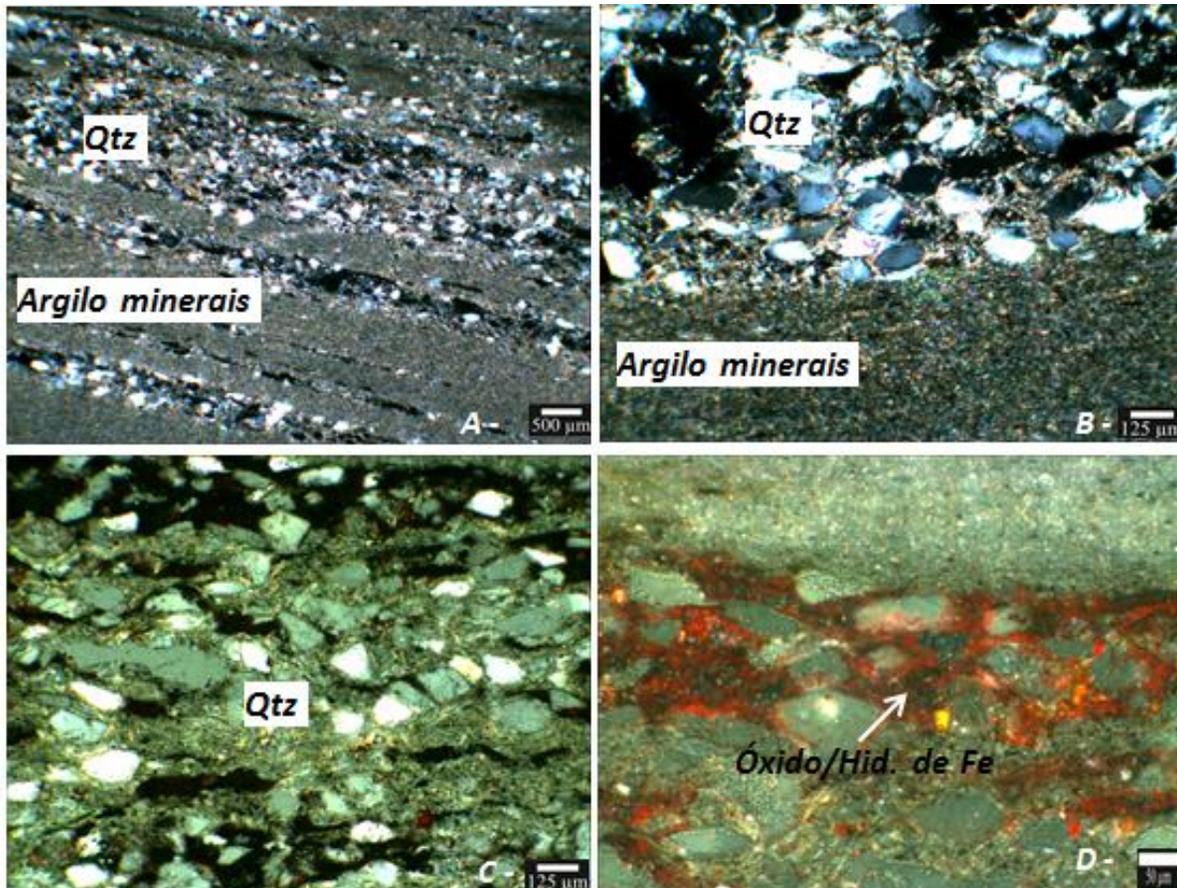


Figura 7. 38. (a) Rocha constituída por quartzo e sericita com estrutura milonítica(luz transmitida; polarizadores cruzados); (b) Bandas constituídas por quartzo e sericita fina (luz transmitida; polarizadores cruzados); (c) Cristais de quartzo orientados e estirados(luz transmitida; polarizadores cruzados); (d) Goethita em espaços intragranulares em metamarga (luz refletida, polarizadores cruzados).

7.3.2 Brecha Dolomítica - Cercado

A brecha dolomítica da Mina do Cercado corresponde a 5% da área de estudo (Figura 7.34) e neste caso em particular, diferentemente do que ocorre nas ocorrências zincíferas Mata II e Olho D'água, não é possível identificar um zoneamento hidrotermal bem delineado da brecha. Contudo, a brecha apresenta uma envoltória representada de dolomitos róseos com intercalações de metapelitos, localmente brechados (Figura 7.39a, 7.39b), silicificados, contendo porções mineralizadas discretamente magnéticas e fortemente deformadas com formação de degrau e estrias de falha (Figura 7.39c, 7.39d). Essas zonas mineralizadas são compostas por calamina e willemita em associação com hematita, clorita e, localmente pirita (Figura 7.39e, 7.39f), e são hospedadas ao longo de um plano de falha normal com atitude geral N35E/75NW. De acordo com as observações realizadas na cava de exploração, este plano de falha apresenta uma suavização de seu mergulho em profundidade (45°), acompanhada pelo adelgaçamento da zona mineralizada ou até mesmo seu desaparecimento.

A brecha dolomítica de coloração rosada, que marca a envoltória da zona mineralizada, é caracterizada por apresentar uma foliação milonítica bem definida, com cristais carbonáticos estirados e alongados (Figura 7.40a), localmente com cimentação esparítica (Figura 7.40b), texturas não planares, estilólitos preenchidos por hidróxido/óxido de ferro (Figura 7.40c e 7.40d) e com vênulas de dolomita esparítica ramificadas e anastomosadas que truncam a foliação milonítica. Composicionalmente é representada por uma rocha dolomítica micrítica (73%) com cristais de quartzo anhedrais, subangulosos (20%), óxido/hidróxido de Fe (5%) amorfos entre os grãos carbonáticos ou em preenchimentos de estilólitos e sericita (Figura 7.40e), subhedral (2%) orientada ao longo da foliação milonítica

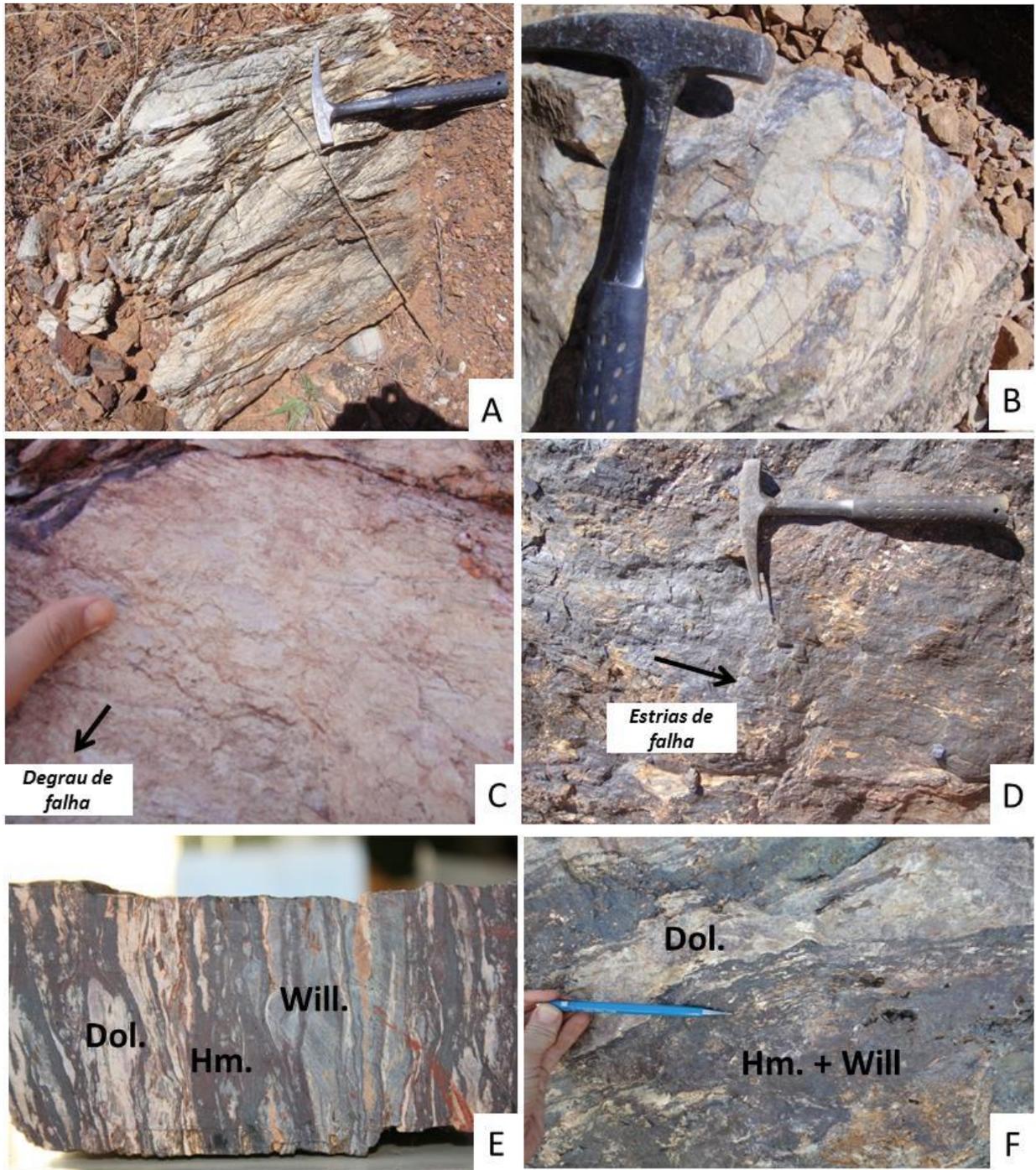


Figura 7. 39. Em (a) dolomito de coloração rosada, com network de fraturas anastomosadas, (b) dolomito rosa, brechado com clastos angulosos; (c) degrau de falha no dolomito róseo; (d) estrias de falha em plano com hematita; (e,f) zona mineralizada com dolomita, hematita e willemita orientadas ao longo de foliação milonítica.

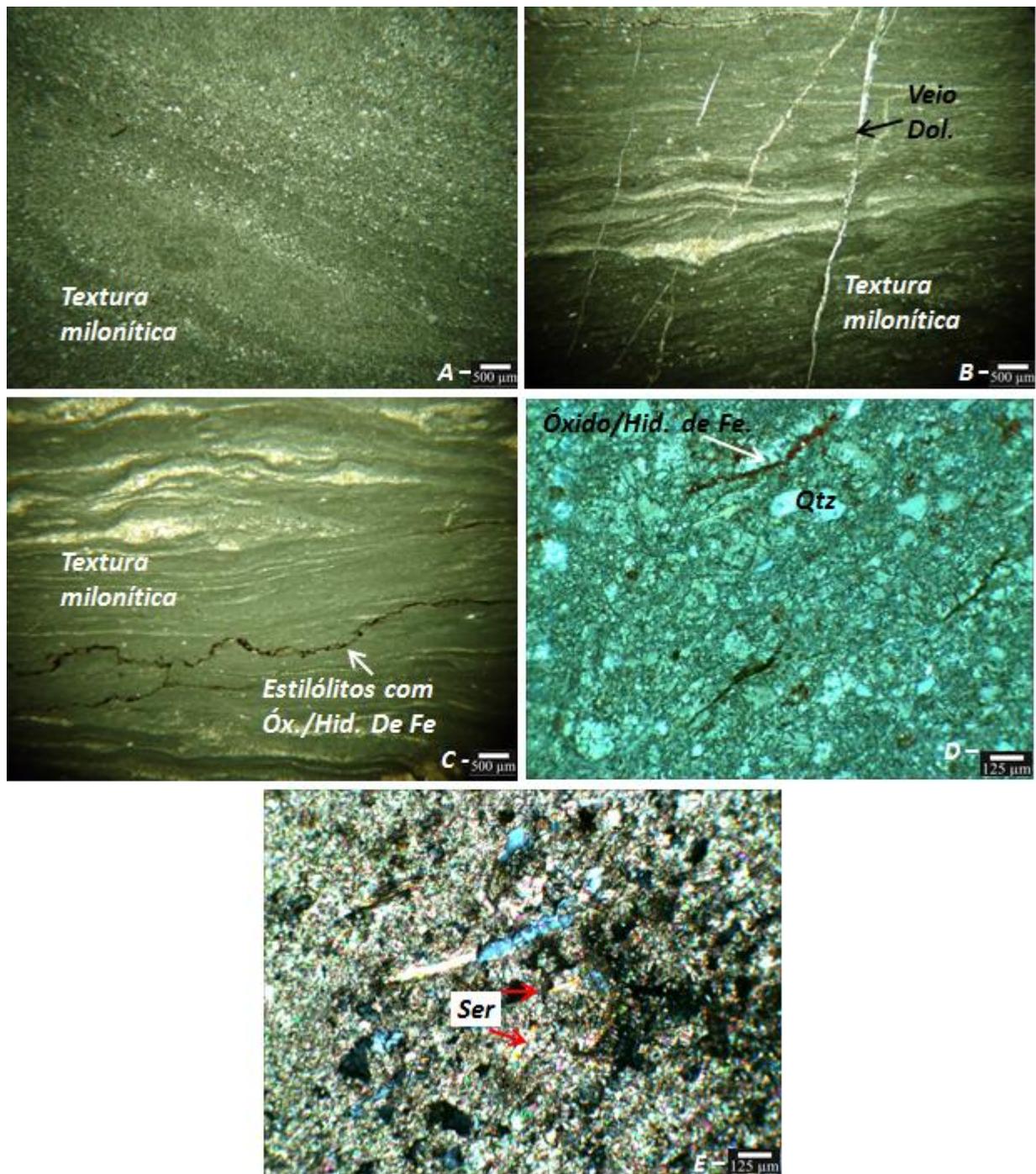


Figura 7. 40. Em (a) foliação milonítica em rocha dolomítica micrítica (luz transmitida; polarizadores descruzados); (b) foliação milonítica em rocha carbonática micrítica com cimentação esparítica concordante aos planos de foliação truncada por finas vênulas de dolomita discordantes (luz transmitida; polarizadores descruzados); (c) textura milonítica e estilólitos preenchidos por óxido/hidróxido de Fe, sugerindo dissolução sob pressão (luz transmitida; polarizadores descruzados); (d) fraturas preenchidas por óxido/hidróxido de Fe (luz refletida, polarizadores cruzados); (e) cristais de sericita dispersos no dolomito brechado (luz transmitida; polarizadores cruzados).

Estruturas rúpteis tardias preenchidas por dolomita esparítica truncam a cimentação esparítica e a foliação milonítica (Figura 7.40b).

A brecha mineralizada, magnética em superfície, é constituída por dolomita, hematita, clorita, quartzo, willemita e vênulas de esfalerita e galena em escala macroscópica. Ao microscópio, foi identificada uma brecha dolomítica hidrotermal com foliação milonítica, evidenciada por orientação e estiramento mineral, sem estrutura sedimentar preservada, constituída principalmente por cristais de dolomita micrítica (23%), dolomita esparítica (19%), hematita (15%) localmente limonitizada, willemita (24%), cristais subhedrais de franklinita (4%), quartzo hidrotermal (5%), óxido/hidróxido de ferro (10%) e subordinadamente micas (sericita) e zincita (<1%).

A hematita apresenta-se orientada ao longo da foliação milonítica ou preenche estruturas rúpteis tardias discordantes ao plano da foliação milonítica. A willemita ocorre deformada e cortada pela hematita orientada ao longo de planos de foliação milonítica (Figura 7.41a) ou ainda associada à dolomita esparítica (Figura 7.41b) e truncada por zonas com concentração de deformação preenchidas por óxidos de ferro (Figura 7.41c). Esta é encontrada com hábito fibrorradiado (Figura 7.41e), às vezes com óxido/hidróxido de ferro nas bordas (Figura 7.41g), ou forma granular (Figura 7.41f). Localmente, relíquias de willemita também ocorrem no centro de bolsões de hematita.

Também nota-se a presença de nódulos de agregados de quartzo preenchendo os interstícios entre os cristais de willemita, hematita e dolomita esparítica (Figura 7.41h) e de óxido-hidróxido de ferro preenchendo os espaços vazios da matriz da brecha e nas bordas de cristais de willemita, planos de clivagem e fraturas (Figura 7.41g). Outro destaque é a presença de vênulas tardias preenchidas por quartzo e hematita limonitizada e vênulas de esfalerita. Vale ressaltar a presença de um evento tardio de dolomitização que corta todo o arranjo anterior.

Além da willemita, observa-se a presença de franklinita, subeuedral, granular, isótropa, com tamanho médio de 20 μm (Figura 7.42a, 7.42b e 7.42c), associada a vênulas de hematita e disseminada juntamente com os cristais de willemita (7.42d). Outro mineral de zinco identificado foi a esfalerita, com isotropia e índice de refração elevado, sendo ainda, fina e disseminada ao longo de fraturas associadas com zincita (Zn,Mn)O, conforme Figura 7.42e e 7.42f.

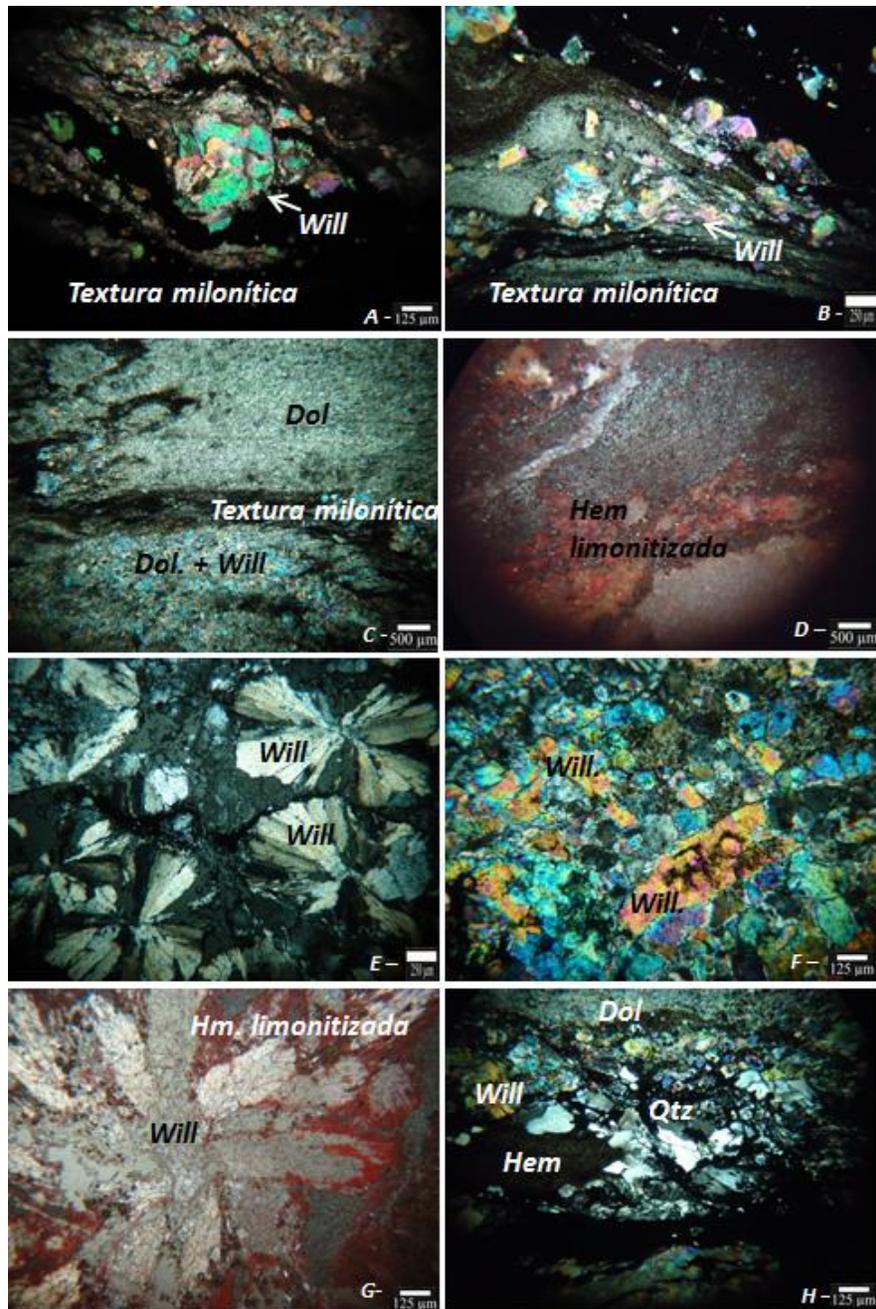


Figura 7. 41. Em (a) cristais de willemita deformada cortados pela hematita orientada ao longo de planos de foliação milonítica (luz transmitida; polarizadores cruzados); (b) Willemita e dolomita esparítica deformadas em rocha com textura milonítica (luz transmitida; polarizadores cruzados); (c) Willemita granular fina associada com dolomita e truncada por zonas com concentração de deformação com óxidos de ferro (luz transmitida; polarizadores cruzados); (d) Hematita limonitizada orientada ao longo da foliação milonítica (luz transmitida; polarizadores cruzados); (e) Willemita fibrorradiada (luz transmitida; polarizadores cruzados); (f) Willemita granular (luz transmitida; polarizadores cruzados); (g) Willemita fibrorradiada com óxido-hidróxido de ferro nas bordas dos cristais e planos de clivagem e fraturas (luz refletida, polarizadores cruzados); (h) Quartzo hidrotermal associado com a willemita, hematita e dolomita esparítica (luz transmitida; polarizadores cruzados).

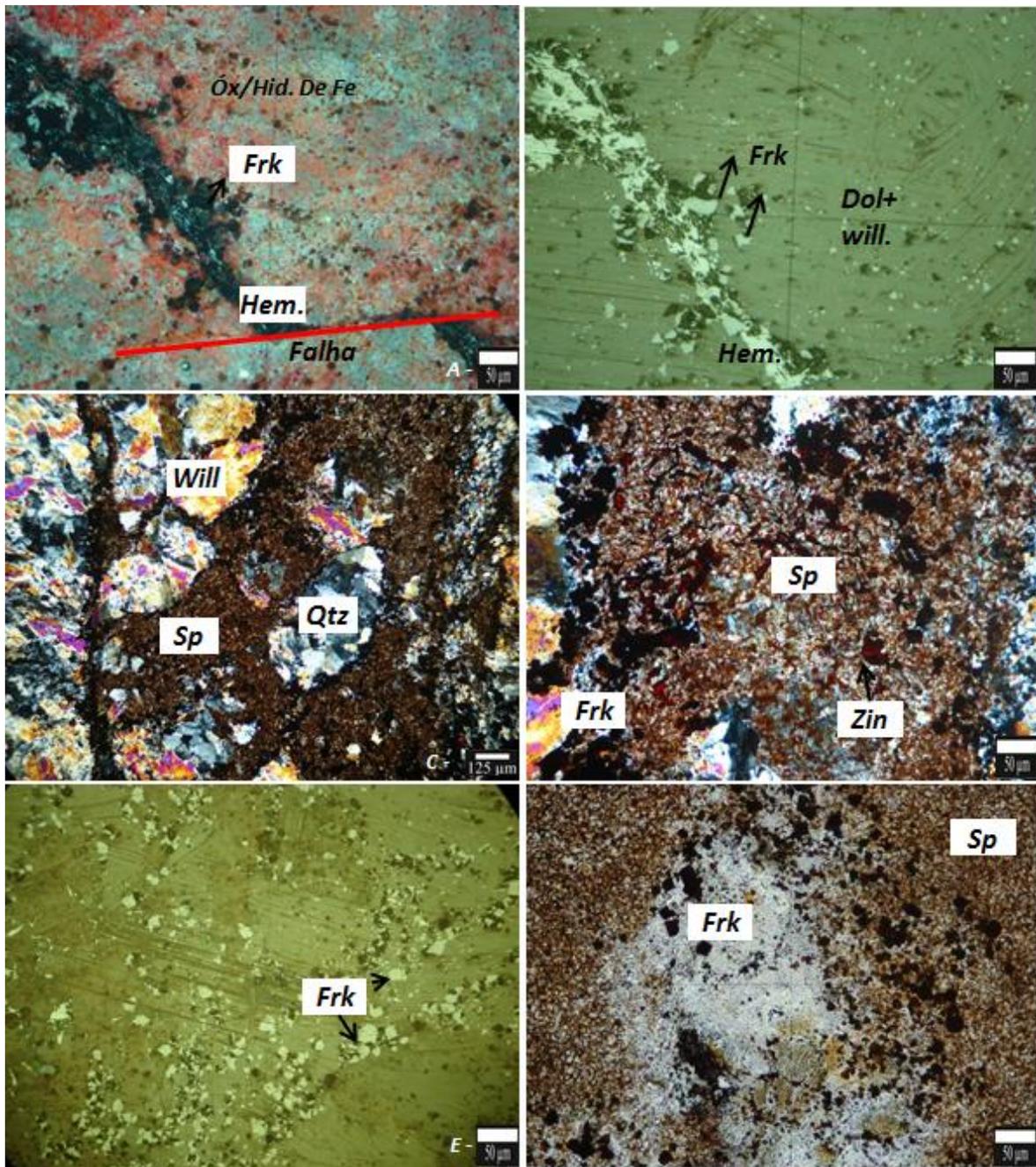


Figura 7. 42. (a,b) vênulas de hematita com franklinita associada (luz refletida, polarizadores cruzados e descruzados); (c) Cristais subhedrais de franklinita (luz refletida, polarizadores descruzados); (d) Franklinita com willemita e esfalerita (luz transmitida, polarizadores descruzados); (e) Esfalerita em fraturas cortando cristais fibrorradiados de willemita e quartzo (luz transmitida, polarizadores cruzados); (f) Esfalerita, franklinita e zincita (luz transmitida, polarizadores cruzados).

Em complemento a petrografia, o MEV permitiu caracterizar e detalhar as fases minerais subordinadas e seu modo de ocorrência na zona mineralizada da ocorrência zincífera do Cercado. Franklinita ($(\text{Zn},\text{Mn},\text{Fe})_2\text{O}_4$) subeuhedral a euhedral, com tamanho médio de 20 μm , e willemita (Zn_2SiO_4) fibrorradiada e granular com tamanho médio de 50-100 μm são os principais minerais de minério de zinco (Figura 7.43a, 7.43b, 7.43e). Os sulfetos encontrados são a esfalerita (ZnS) e a galena (PbS), ambos formando pequenos e finos agregados minerais, subarredondados, com tamanho inferior a 10 μm , disseminados ou inclusos na willemita (Figura 7.43c e 7.43d).

Em meio aos cristais de hematita e franklinita, foi possível identificar um óxido de Mn e Pb, provavelmente coronadita ($\text{Pb}(\text{Mn})_8\text{O}_{16}$), (Figura 7.43f).

Neste caso, de modo análogo ao observado na ocorrência Olho D'Água, o MEV possibilitou a identificação de dolomita e cloritas zincíferas na Mina do Cercado (Figura 7.43g). Nota-se também a presença de uma foliação milonítica, onde os minerais de willemita e hematita estão fraturados e levemente alongados, preenchidos por dolomita zincífera (Figura 7.43g).

Em superfície, a alteração intempérica das rochas mineralizadas geram carbonato de zinco, provavelmente smithsonita (ZnCO_3).

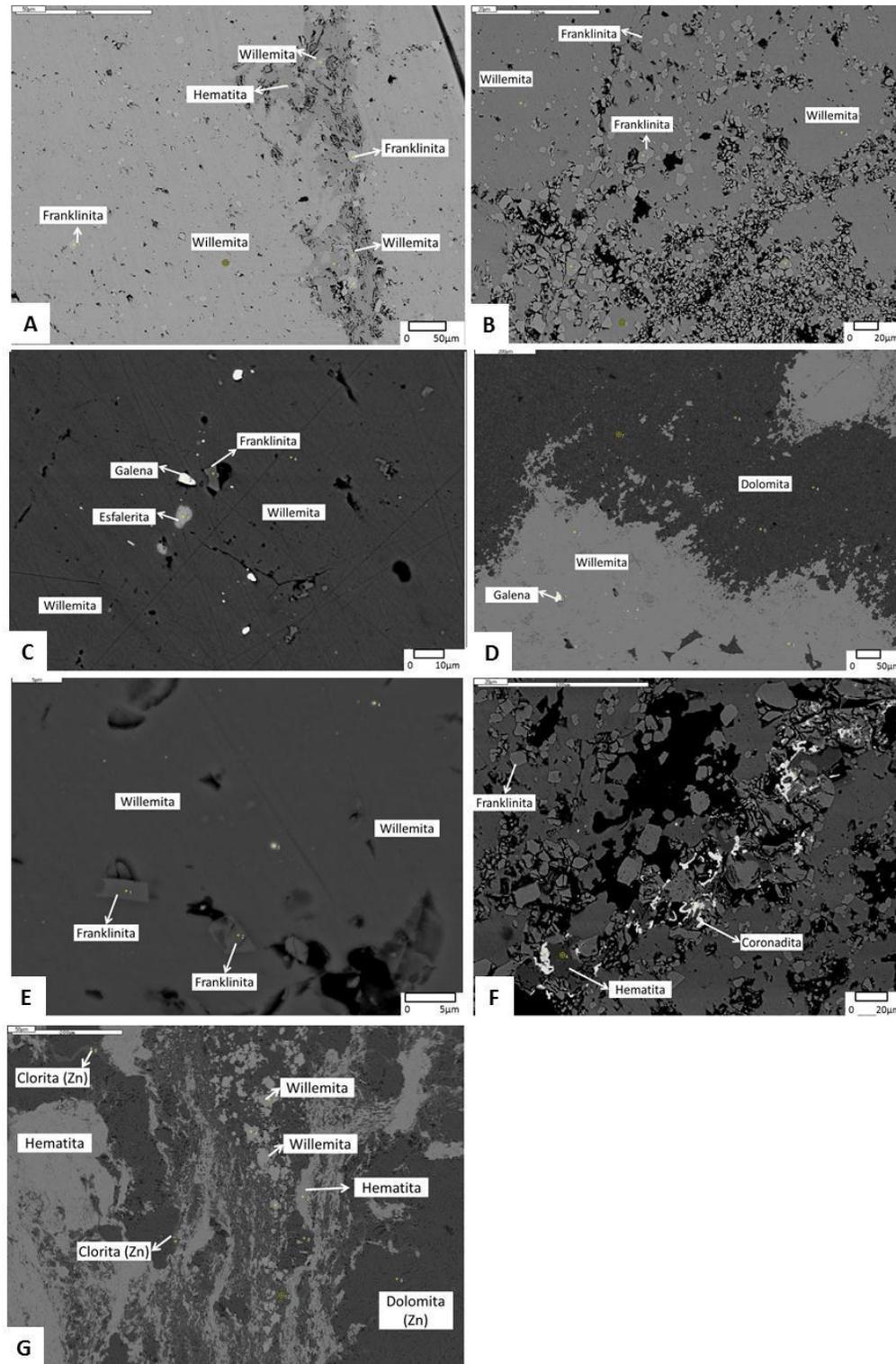


Figura 7. 43. Imagens de elétrons retro-espalhados obtida com uso de MEV em brechas dolomíticas mineralizadas na mina do Cercado. Destaque em (a,b) cristais arredondados de franklinita disseminados em matriz formada por willemita; (c) fino cristais de galena e esfalerita em matriz de willemita; (d) fino cristal de galena; (e) principais minerais de zinco (franklinita e willemita); (f) Coronadita preenchendo espaços vazios; (g) foliação milonítica.

De acordo com as relações texturais observadas em escala macroscópica e principalmente microscópica, pode-se definir a sequência paragenética da Mina do Cercado conforme a Figura 7.44.

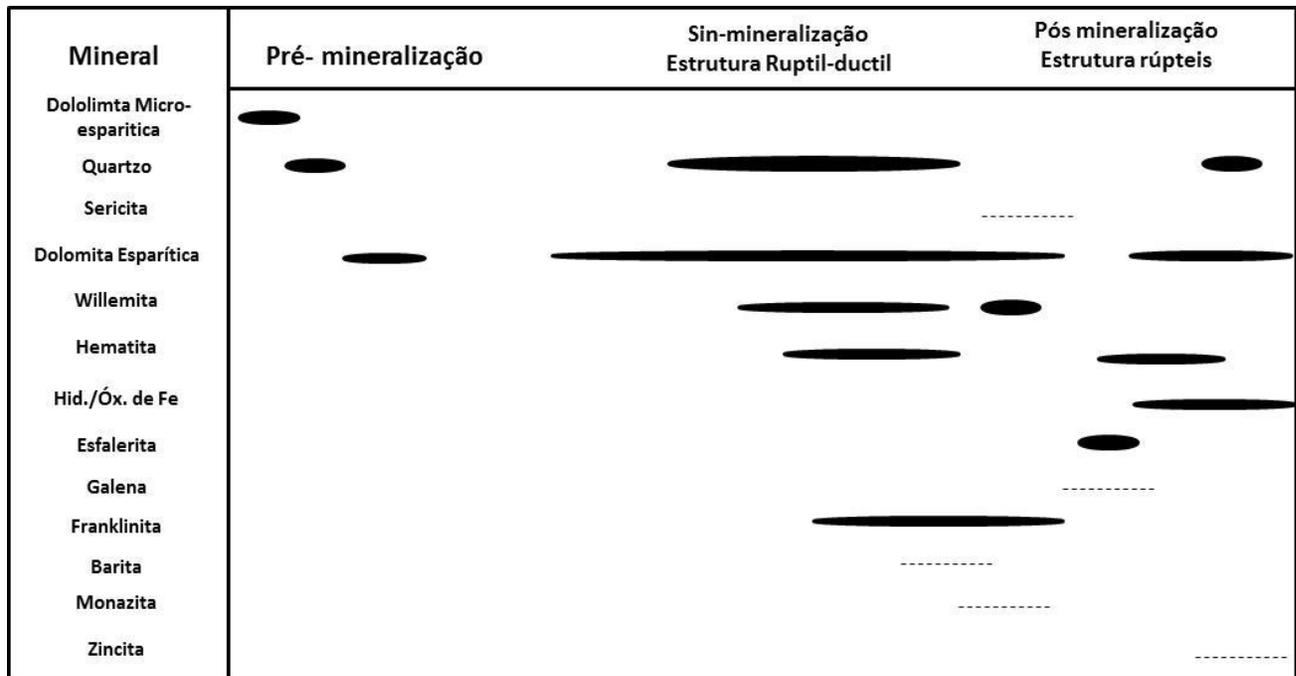


Figura 7. 44. Sequência paragenética para Mina do Cercado.

7.4 Alvo Pamplona

A ocorrência zincífera do Pamplona localiza-se a sul da cidade de Vazante (Figura 7.45), atualmente dentro dos limites urbanos da cidade, o que dificultou o levantamento geológico de superfície. A mineralização é estruturalmente controlada (N70E/60NW) e constituída por willemita, hematita, jaspe, dolomita e calamina. Insere-se no contexto geológico das formações Morro do Calcáreo (dolomitos estromatolíticos e laminados) e Serra do Poço Verde (dolomitos róseos a cinza, laminados com contribuição pelítica), conforme demonstra as Figuras 7.46 e 7.47.



Figura 7. 45. (a) e (b) Visão do afloramento Pamplona, inserido no limite urbano do município de Vazante.

7.4.1 Geologia

As unidades geológicas presentes na ocorrência zincífera do Pamplona são representadas pela Formação Morro do Calcáreo no topo e pela Formação Serra do Poço Verde na base (Figura 7.46 e 7.47). A Formação Morro do Calcáreo aflora na porção noroeste do mapa, ocupa 48 % da área de pesquisa, e apresenta atitude aproximada de N30E/15NW e espessura máxima identificada de 220 m (Figura 7.47). Esta unidade é constituída na base por um dolomito estromatolítico, cinza, e no topo por dolomito fino, laminado e de cor cinza (Figura 7.48b e 7.48d). A Formação Serra do Poço Verde ocorre na porção sudeste e representa 46% da área de estudo, com atitude de N35E/15NW, sendo constituída na base por dolomito cinza escuro laminado com *bird's eyes* e no topo por dolomito cinza a róseo, fino, com texturas de *mudcraks* e brechas intraformacionais (Figura 7.48a e 7.48c), localmente intercalado com rocha metapelítica (até 15cm).

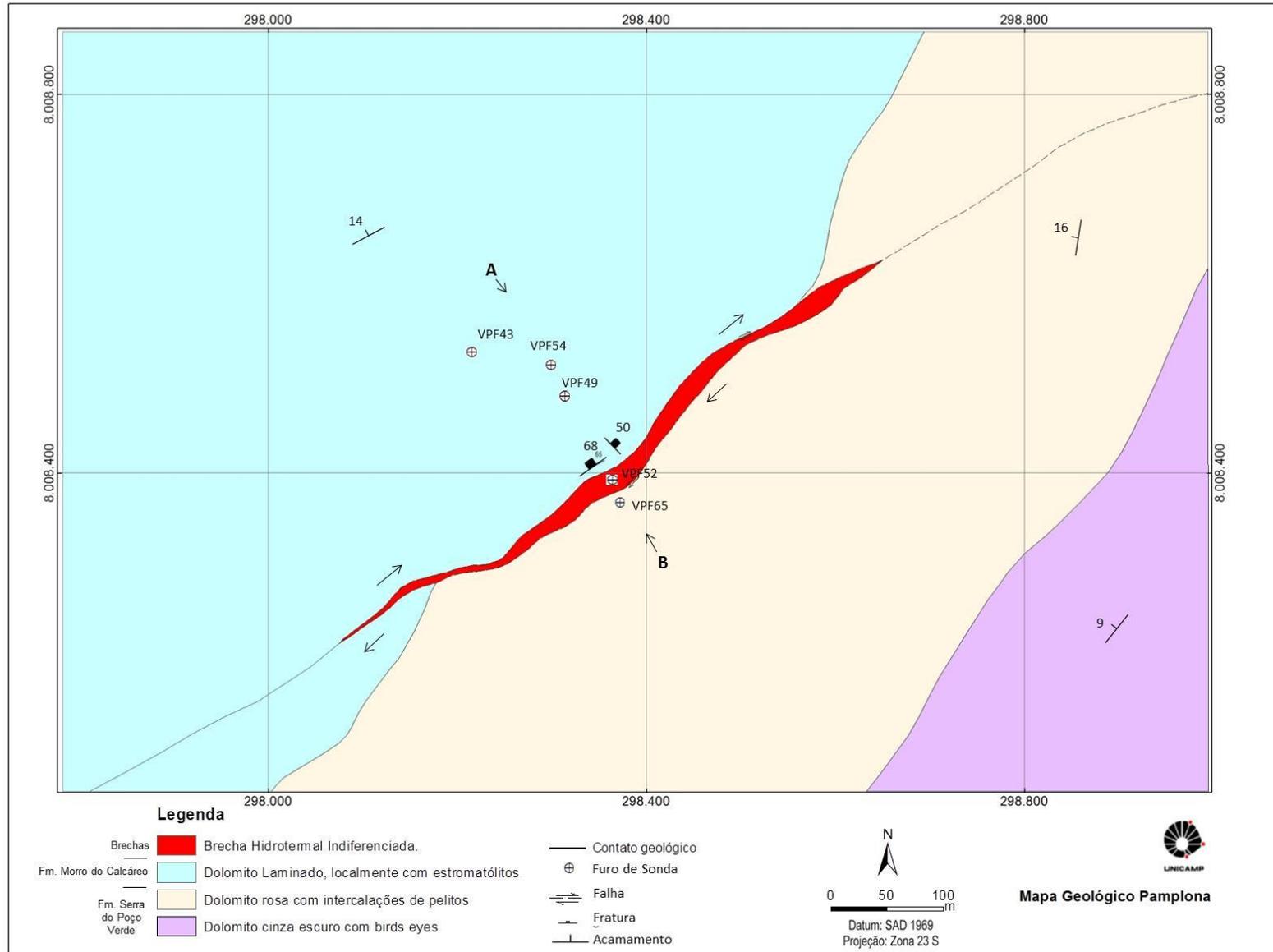


Figura 7. 46. Mapa geológico da ocorrência zincífera Pamplona, este estudo.

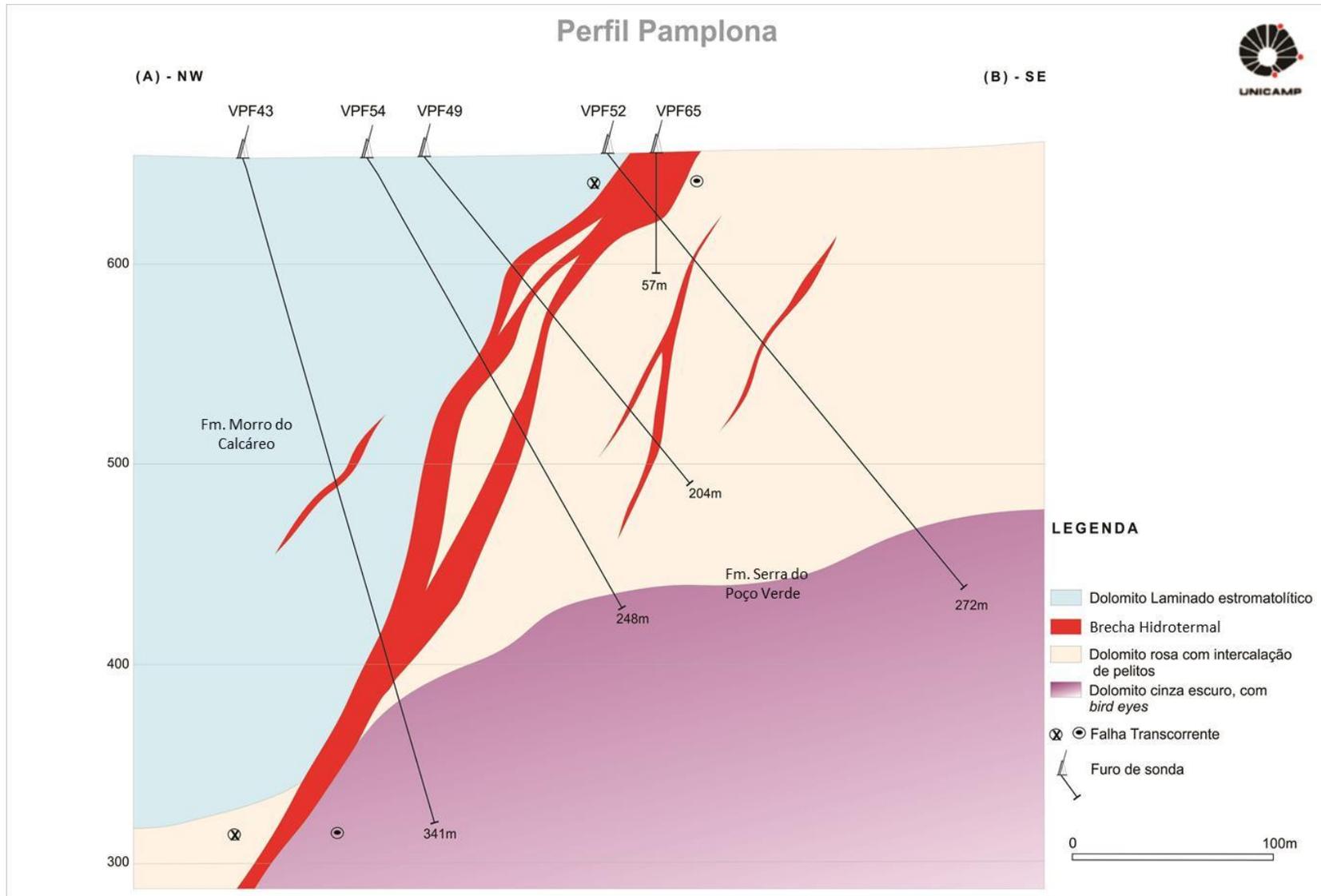


Figura 7. 47. Perfil geológico do Alvo Pamplona, este estudo.



Figura 7. 48. (a) Dolomito laminado, rosa, da Formação Serra do Poço Verde; (b) Dolomito cinza, maciço da Formação Morro do Calcáreo; (c) Dolomito rosa com intercalação de metapelito em testemunho de sondagem – Formação Serra do Poço Verde; (d) Dolomito cinza, laminado em testemunho de sondagem – Formação Morro do Calcáreo.

O dolomito cinza pertencente à Formação Morro do Calcáreo e corresponde a uma rocha dolomítica fina, constituída por cristais de dolomita micrítica a microesparítica (97%), anhedrais, apresentando contato definidos e irregulares (fábricas não planares). Embora tectonizado (estiramento mineral), o dolomito apresenta estrutura sedimentar preservada e foi identificada pela variação na granulometria dos grãos carbonáticos (Figura 7.49a). Os demais 3% desta rocha são representados por finas vênulas anastomosados e irregulares preenchidas por dolomita esparítica (Figura 7.49b) e localmente por quartzo (anhedral e microcristalino), que cortam a estrutura sedimentar reliquia da rocha.

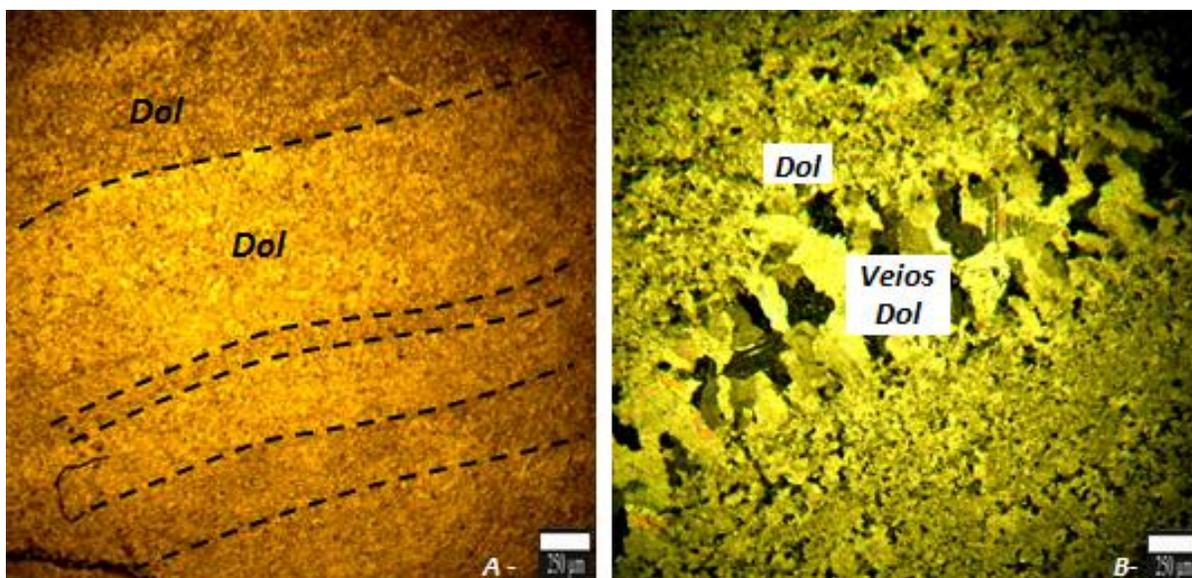


Figura 7. 49. (a) Dolomito com estrutura sedimentar laminada preservada (luz transmitida; polarizadores descruzados); (b) Vênulas preenchidas por dolomita esparítica, em dolomito tectonizado (luz transmitida; polarizadores cruzados)

O dolomito rosa apresenta variação composicional indicativa de sedimentação mista terrígena/carbonática e pode ser descrito e subdivido em:

1 – Nível carbonático: constituído por uma rocha carbonática formada por cristais de dolomita microesparítica (66%) com texturas não planares (Figura 7.50a), com bandamento composicional evidenciado pela intercalação de níveis ricos em material carbonoso (15%) de cor cinza escuro (Figura 7.50b). Nota-se a presença de dolomita esparítica (Figura 7.50c) paralelamente ao acamamento sedimentar (9%) e/ou preenchendo fraturas tardias (3%). Também associados a estes veios tardios, encontram-se finos agregados de quartzo (Figura 7.50d) microcristalino (5%).

2 – Nível terrígeno: Rocha bandada (Figura 7.51a e 7.51b) constituída por cristais de quartzo angulosos a subarredondados (50%), de tamanho de areia muito fina, medianamente selecionado associados a óxido/hidróxido de Fe (15% - Figura 7.51c) intercalado com uma massa marrom acinzentada composta por argilo-minerais (32%) com uma coloração bege (Figura 7.51d), de granulação fina, as vezes placóides e associados com cristais de quartzo subarredondados.

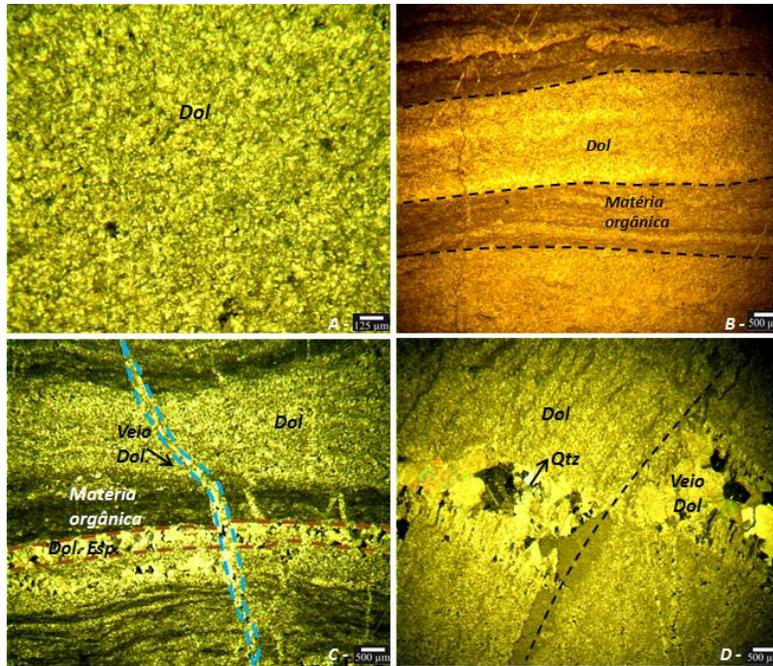


Figura 7. 50. (a) Matriz microesparítica em rocha dolomítica rósea (luz transmitida; polarizadores descruzados); (b) Bandamento composicional representado por alternância entre níveis com material carbonoso e dolomita (luz transmitida; polarizadores descruzados); (c) Dolomita esparítica paralela ao acamamento sedimentar e preenchendo veios tardios (luz transmitida; polarizadores cruzados); (d) Veios preenchidos por dolomita esparítica e quartzo truncando a estrutura reliquiar da rocha (luz transmitida; polarizadores cruzados).

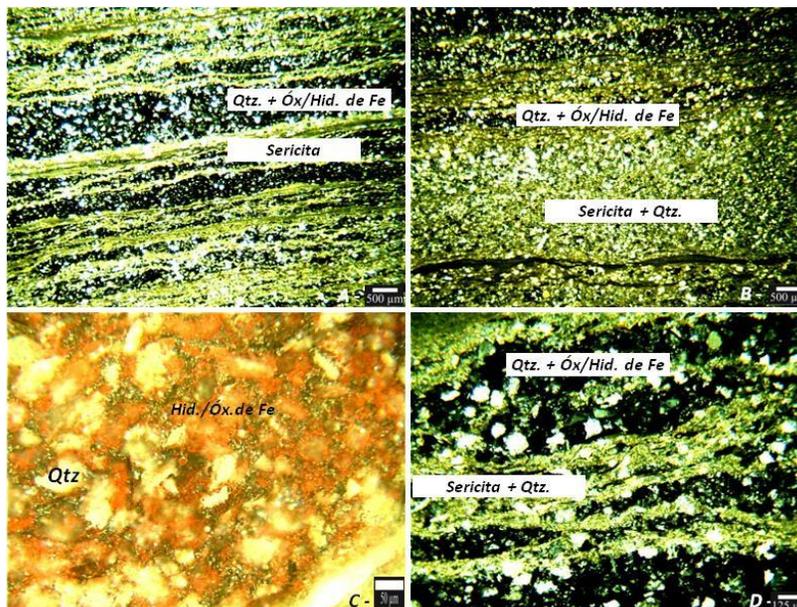


Figura 7. 51.(a, b) Bandamento composicional definido por concentrações de material carbonoso e sericita (luz transmitida; polarizadores cruzados); (c) Cristais de quartzo envolvidos por óxido/hidróxido de Fe (luz refletida, polarizadores cruzados); (d) Detalhe do bandamento composicional entre níveis de quartzo + sericita e níveis de quartzo e óxido/hidróxido de Fe (luz transmitida; polarizadores cruzados)

7.4.2 Brecha Dolomítica - Pamplona

A brecha dolomítica da ocorrência zincífera Pamplona corresponde a 6% da área de estudo (Figura 7.46) e apresenta uma envoltória discreta representada por dolomitos róseos. A zona de brecha associa-se a um plano de cisalhamento normal, com direção aproximada N70E/55NW, que justapõe lateralmente duas unidades geológicas diferentes e posições estratigráficas distintas, a leste a Formação Serra do Poço Verde e a oeste a Formação Morro do Calcáreo. A brecha é constituída por dolomito rosado, férrico, com vênulas de carbonato de ferro e localmente com vênulas de hematita. A mineralização de zinco é hospedada pela brecha e constituída por hematita, dolomita, carbonato de ferro e, principalmente, willemita associada a dolomita férrica e jaspe, com estruturas de cisalhamento preservadas.

De acordo com as observações identificadas em campo, os estágios do desenvolvimento e principais características da brecha dolomítica do Pamplona são representados na Figura 7.52.



Figura 7. 52. (a) Sequência de amostras representativas da evolução da brecha dolomítica da ocorrência zincífera Pamplona; (b) Dolomito brechado rosa (c) Rocha dolomítica com hematita e dolomita, cisalhado da zona de brecha; (d) Zona mineralizada com willemita e hematita, com estruturas de cisalhamento.

A brecha dolomítica possui matriz composta por dolomita fina (micrítica), recristalizada, com contatos difusos e irregulares, com óxido e hidróxido de ferro amorfos, irregulares, de coloração vermelho alaranjado. Goethita associa-se a zonas de veios preenchidos por dolomita esparítica e quartzo e, principalmente, aos interstícios da matriz carbonática micrítica (Figura 7.53a). A brecha apresenta inúmeras fraturas e vênulas ramificadas e anastomosadas preenchidas por dolomita esparítica, quartzo (Figura 7.53b, 7.53c) e, localmente, por hematita (Figura 7.53e).

A presença de vênulas de dolomita branca (Figura 7.53c) deslocadas quando interceptadas pelos estilólitos, sugere que houve dissolução sob pressão da rocha devido aos esforços compressivos, enquanto os veios formaram-se perpendicularmente nas zonas de extensão.

A rocha mineralizada possui foliação milonítica moderadamente desenvolvida, com minerais deformados e estirados, sem estrutura sedimentar preservada.

A willemita (25%) encontra-se disseminada na matriz da brecha dolomítica e ocorre em cristais granulares de até 25 μm (Figura 7.54a) ou fibrorradiados de até 350 μm (Figura 7.54b). Localmente preenche veios discordantes (Figura 7.54c e 7.54d), anastomosados e irregulares que cortam o arranjo anterior.

Também, foram identificadas vênulas preenchidas por dolomita esparítica (25%) distribuídas ao longo de ao menos três gerações (Figura 7.54e, 7.54f e 7.54h) às vezes, truncando cristais de willemita (Figura 7.54g). A hematita (20%), por sua vez, é comumente encontrada limonitizada (Figura 7.54j), subhedral/anhedral (Figura 7.54d e 7.54g). Localmente, a willemita granular é cortada por veios de hematita em fase mais tardia, cortando ou substituindo os cristais de willemita pré existentes (Figura 7.54f). O quartzo (5%), de origem hidrotermal, foi encontrado em pequenos nódulos ou agregados, com contatos entre minerais difusos (Figura 7.54i).

Preenchendo os interstícios dos cristais que compõe a brecha (Figura 7.54j), destaca-se a presença de óxido/hidróxido de Fe (10%), que também constituem fases mais tardias, preenchendo fraturas. Estruturas rúpteis, microfalhas, cortam todo o arranjo acima descrito (Figura 7.54d).

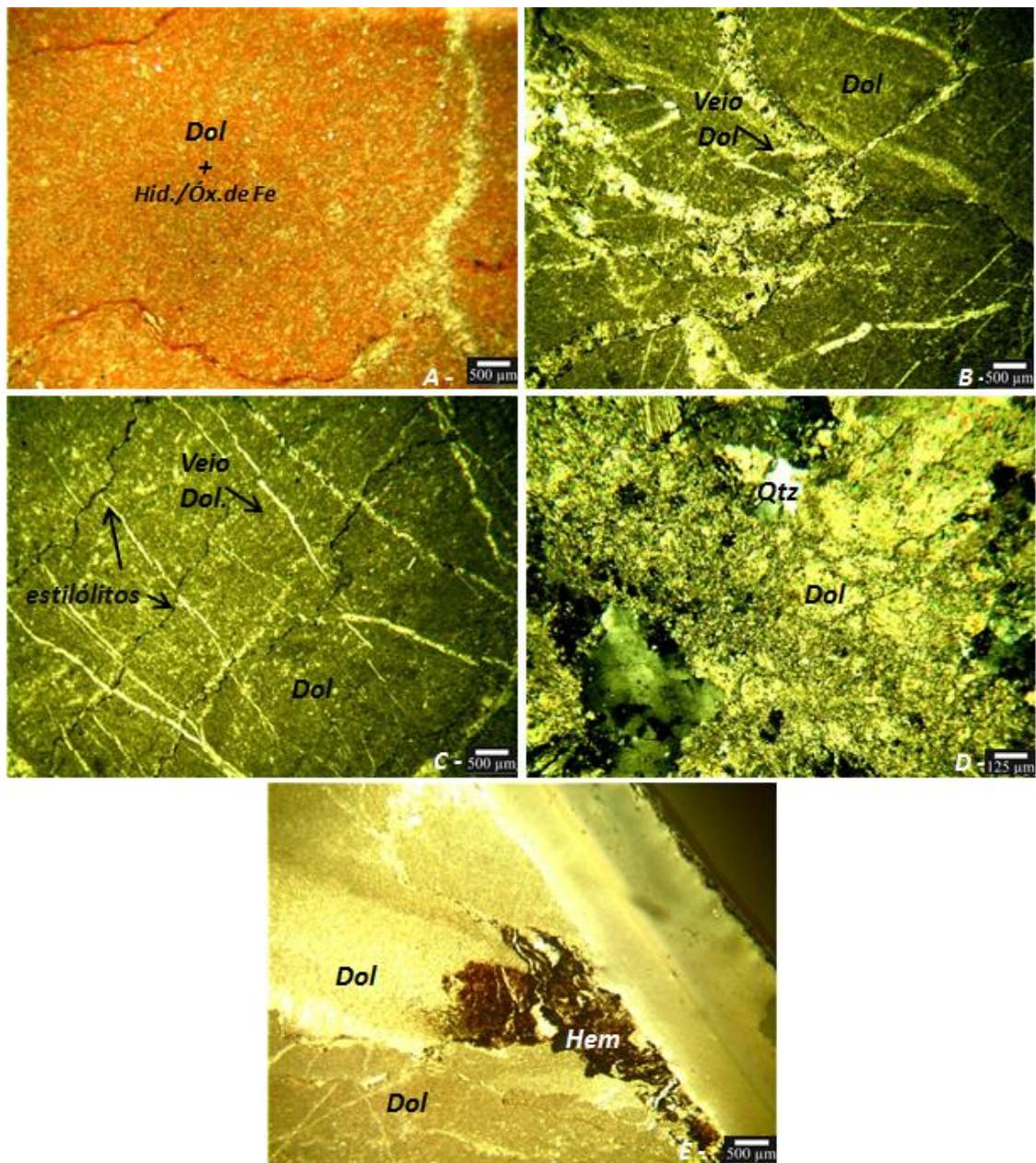


Figura 7. 53. (a) Matriz de rocha dolomítica com óxido/hidróxido de Fe (luz refletida) cortada por finas vênulas dolomíticas límpidas; (b) Veios de dolomita esparítica (*stockwork*) (luz transmitida, polarizadores cruzados); (c) Veios de dolomita esparítica e estilólitos (luz transmitida, polarizadores cruzados); (d) Quartzo associado à dolomita nas brechas (luz transmitida, polarizadores cruzados); (e) Hematita limonitizada associada com dolomita esparítica (luz refletida, polarizadores cruzados).

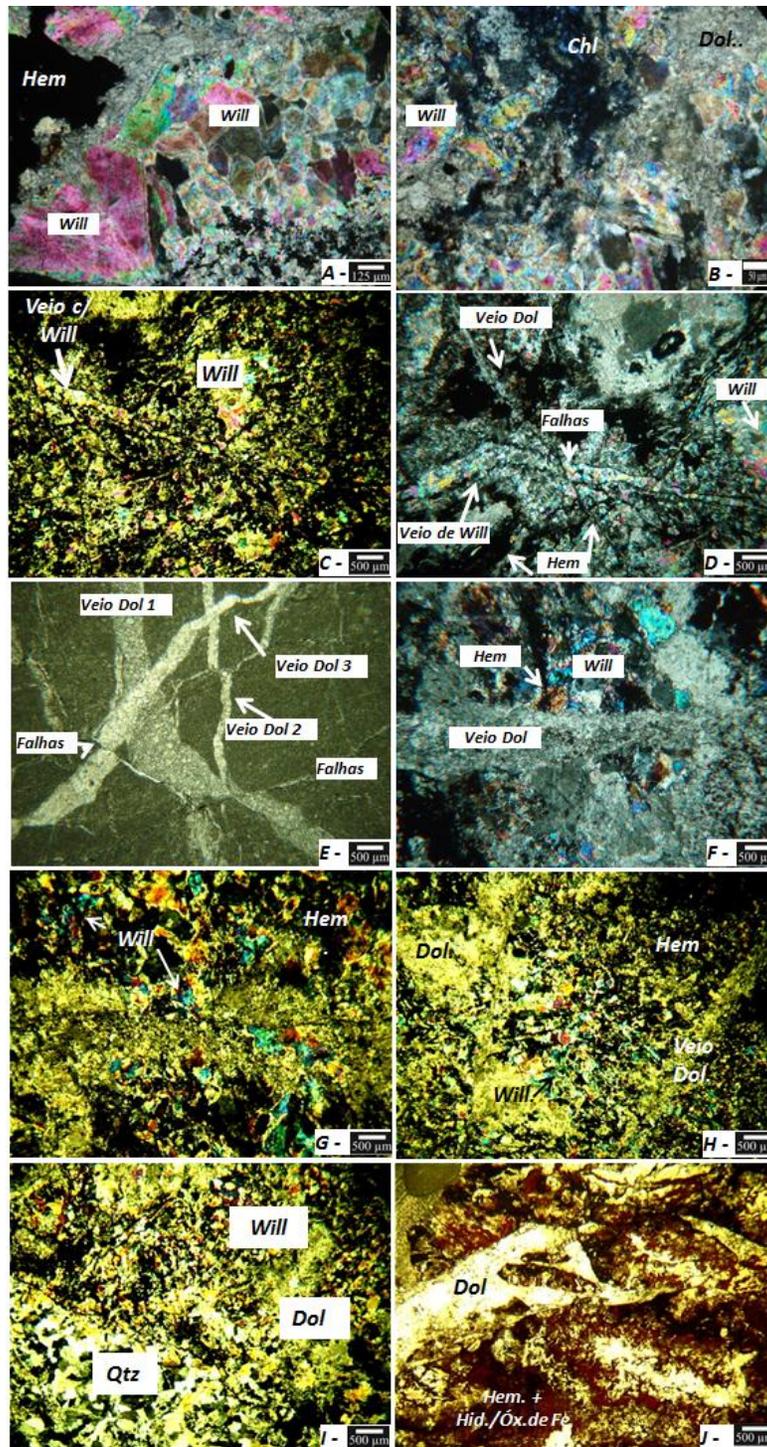


Figura 7. 54. (a) Willemita granular (luz transmitida, polarizadores cruzados); (b) Willemita granular associada a clorita e dolomita esparítica (luz transmitida, polarizadores cruzados) (c) Willemita granular e veio preenchido por willemita truncando fase inicial; (d) Willemita granular e em veios, com hematita e falhas tardias; (e) Três gerações de veios de dolomita; (f) Willemita granular cortada por veios de hematita e este arranjo cortado por veios de dolomita (g) Willemita granular e veios de dolomita tardio; (h) Hematita, willemita, dolomita e veios de dolomita; (i)

Willemita granular e quartzo hidrotermal; (j) Hematita limonitizada, óxido/hidróxido de ferro e cristais de dolomita esparítica.

No MEV também se percebe que a zona mineralizada é composta por minerais deformados, orientados e fraturados (Figura 7.55a e 7.55b), predominantemente representados por dolomita $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$, hematita (Fe_2O_3) e willemita (Zn_2SiO_4). Subordinadamente, ocorre apatita em pequenos agregados minerais, subarredondados, com tamanho médios de $10\ \mu\text{m}$ (Figura 7.55a) e de modo análogo às demais ocorrências, também foi encontrada clorita zincífera (Figura 7.55a)

Para esta ocorrência, destaca-se a presença de piromorfita $[\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}]$ com forma alongada, tamanho médio de $200\ \mu\text{m}$, associado à willemita (Figura 7.55b).

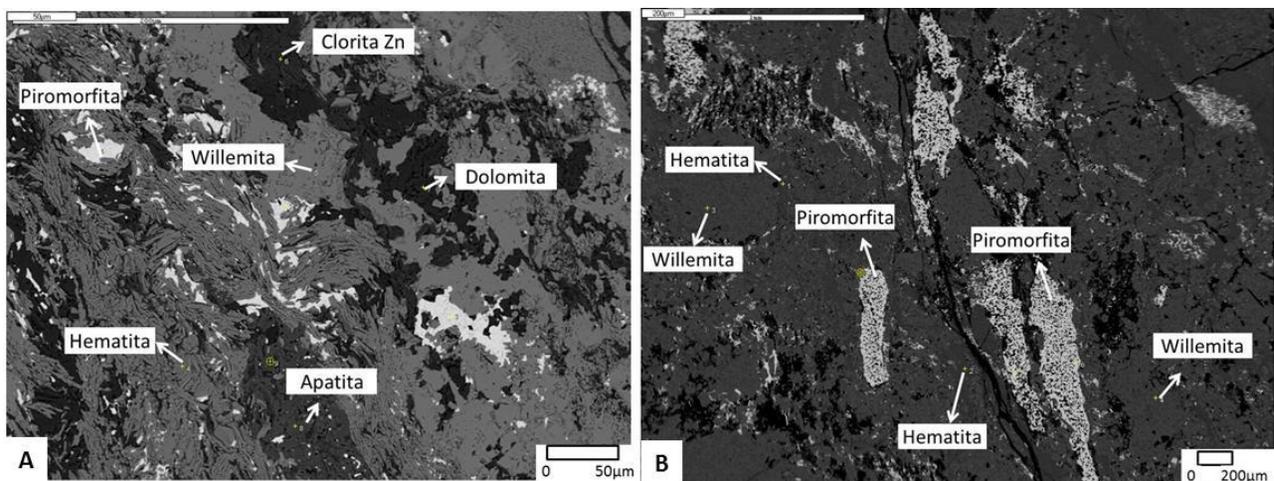


Figura 7. 55. Imagens de elétrons retro-espalhados obtida com uso de MEV em brechas dolomíticas hidrotermais do tipo V do Alvo Pamplona, mostrando em (a) a associação de willemita, hematita, dolomita, clorita, hematita e piromorfita e (B) associação entre piromorfita e hematita em zona mineralizada com willemita.

De acordo com as informações acima descritas, a síntese da evolução paragenética da área de Pamplona é apresentada na Figura 7.56.

Mineral	Pré- mineralização	Sin-mineralização Estrutura Rúptil-ductil	Pós mineralização Estrutura rúpteis
Dol. Micro-esparítica	●		
Quartzo	●	●	●
Matéria carbonosa	●		-----
Dol. Esparítica		●	●
Willemita		●	●
Hematita		●	●
Hid./Óx. de Fe			●
Sericita			-----
Apatita			-----
Galena			-----
Clorita			-----

Figura 7. 56. Sequência paragenética para a ocorrência zincífera do Pamplona.

8. LITOGEOQUÍMICA

As análises químicas de cada unidade litológica bem como dos vários tipos de brechas dolomíticas encontradas nas diferentes ocorrências zincíferas foram conduzidas com o objetivo de determinar as assinaturas relacionadas aos vários estilos de mineralização e alteração hidrotermal. Os resultados químicos completos podem ser encontrados no Anexo I.

As rochas dolomíticas mais preservadas e pouco afetadas pelo hidrotermalismo pertencentes às formações Morro do Calcáreo e Serra do Poço Verde apresentam conteúdos de MgO que variam de 19% até 21,5% e de CaO entre 27,2% a 30,3%, sendo classificadas como dolomito calcítico (Olho D'Água e Pamplona) e dolomito (Cercado e Mata II), Figura 8.1.

Com o objetivo de identificar e comparar o enriquecimento e as perdas relativas de elementos químicos selecionados nos vários tipos de brecha e rochas menos alteradas hidrotermalmente das ocorrências zincíferas aqui estudadas, foram realizados balanços de massa pelo método gráfico de Grant (1986). A evolução das perdas e ganhos relativos foi caracterizada a partir da comparação de uma amostra hidrotermalizada *versus* uma amostra menos alterada hidrotermalmente (por exemplo, brecha do Tipo I *versus* dolomito inalterado do Morro do Calcáreo).

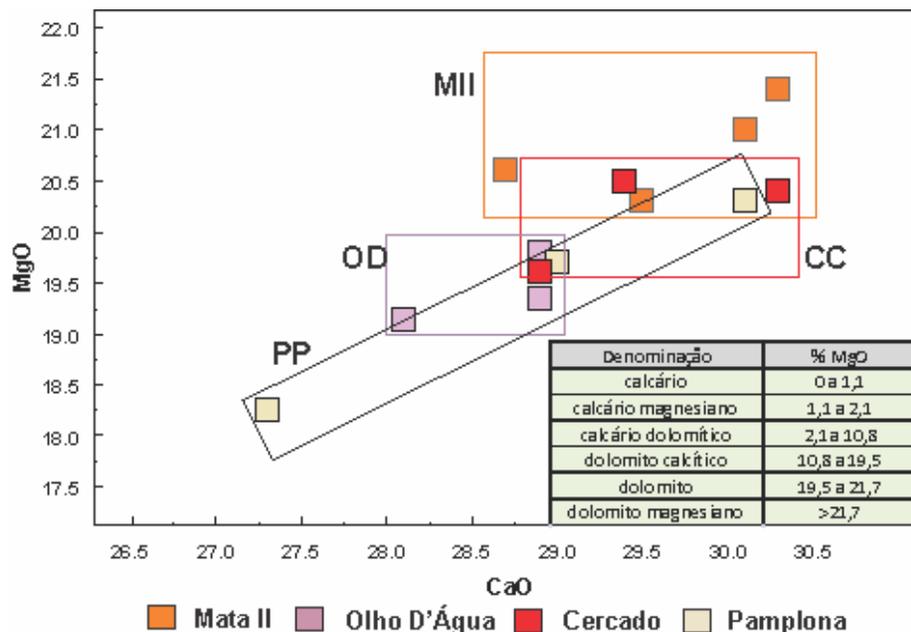


Figura 8. 1. Classificação das rochas dolomíticas para os alvos estudados. PP = Pamplona; OD = Olho D'Água; CC = Cercado; MII = Mata II.

A reta Isocon foi construída considerando-se como elementos relativamente imóveis o Al_2O_3 e Zr.

- **Mata II** (Figura 8.2): O diagrama ISOCON para amostra de brecha do tipo I *versus* dolomitos inalterados do Morro do Calcáreo revela que a brecha do tipo I é discretamente enriquecida em Zn, V, Pb, As, SiO_2 e Fe_2O_3 . Quando comparada à brecha do tipo II em relação à brecha do tipo I, enriquecimento relativo em Sb, W, V, Fe_2O_3 e P_2O_5 e uma discreta perda em SiO_2 , Pb, Zn, Cs, SrO e BaO são identificados. A brecha do tipo III apresenta uma variação multielementar mais significativa quando comparada com a brecha do tipo II, apresentando ganho relativo em Pb, Zn, V, Cd, SiO_2 , Fe_2O_3 , Sb, Cs, Hg, Cr_2O_3 e SrO e, conseqüentemente, uma depreciação em CaO, MgO, C, W, Mo, Ta e Ba.

A brecha do tipo IV apresenta composição química muito semelhante àquela da brecha do tipo III, contudo é observada uma discreta perda relativa em Hg, Zn, Ba e V. Contudo, a brecha do tipo V apresenta um enriquecimento em Ba, V, Sb, As, Bi, ETR, SiO_2 , Fe_2O_3 , P_2O_5 , SrO, Na_2O e Cr_2O_3 e perda relativa de Zn, CaO, MgO, Cd, Th e MnO quando comparada à brecha do tipo IV.

- **Olho D'Água**(Figura 8.3): Comparando o litotipo menos alterado hidrotermalmente com a brecha do tipo I, observa-se enriquecimento relativo em Pb, Zn, Ba, SrO e um discreto aumento em ETR. A brecha do tipo II apresenta ganhos em Zn, Pb, Cd, As e Fe_2O_3 e perdas de Ba, SrO, CaO, MgO quando comparada com a brecha do tipo I.

Em comparação com a brecha do tipo II, a brecha do tipo III não apresenta ganhos ou perdas muito significativas, embora discretas perdas relativas em Zn, Pb, Zr, As, K_2O e ETR sejam observadas.

A brecha do tipo IV em comparação com a brecha do tipo III apresenta ganho relativo discreto em Pb, Cd, Cu, Sb, Fe_2O_3 , Hg e Bi e perdas de Na_2O , SrO e Ba. A brecha do tipo V apresenta ganho em ETR, Zn, Pb, Sb, Fe_2O_3 , Hg, U, As, V, P_2O_5 , Bi, Co e Cd e perda relativa em MgO, CaO e Ba quando comparada com a brecha do tipo IV.

- **Cercado**(Figura 8.4): A brecha dolomítica de cor rosa presente na Mina do Cercado comparativamente às rochas encaixantes pouco alteradas hidrotermalmente apresenta enriquecimento discreto em Zn, Pb, Cd e Hg e uma perda em CaO, MgO, BaO, Sr e Sb. Contudo, quando a comparação é feita em relação à brecha mineralizada, essa revela enriquecimento evidente em Hg, Cd, Pb, Zn, V, As, Ag, Sb, U, SiO₂, Fe₂O₃, Na₂O, Se, Bi, Cu e perdas em K₂O, SrO, BaO, MgO, CaO e ETR.

- **Pamplona** (Figura 8.5):comparação entre as rochas encaixantes, revela que o dolomito rosa pertencente à Formação Serra do Poço Verde possui uma concentração maior em Zn, Pb, Hg e BaO em relação aos dolomitos estromatolíticos da Formação Morro do Calcáreo. A brecha dolomítica, desenvolvida basicamente no dolomito rosa, apresenta ganhos relativos em Zn, Pb, Cu, Cd, As, Sb, Hg, P₂O₅ e SrO, porém nenhuma perda significativa foi observada. A brecha mineralizada em relação à brecha não mineralizada possui ganho significativo em Zn, Pb, Ba, V, Cd, Ag, U, Cu, As, Sb, Se, Hg, Na₂O e Fe₂O₃ e perda discreta em ETR, K₂O e TiO₂, MgO e CaO.

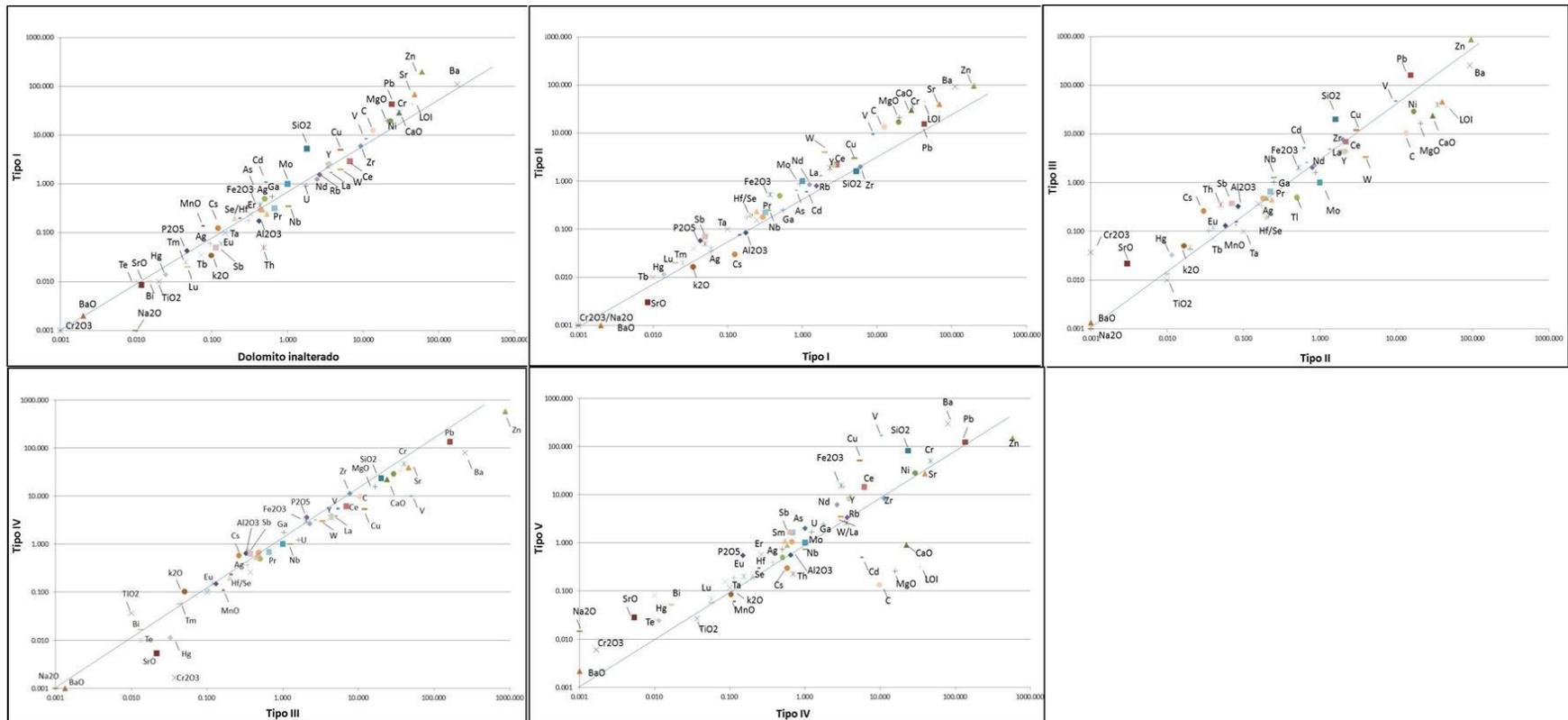


Figura 8. 2. Diagrama Isocon mostrando as perdas e ganhos relativos durante a evolução do processo hidrotermal para as rochas encaixantes e diferentes tipos de brecha na ocorrência Mata II.

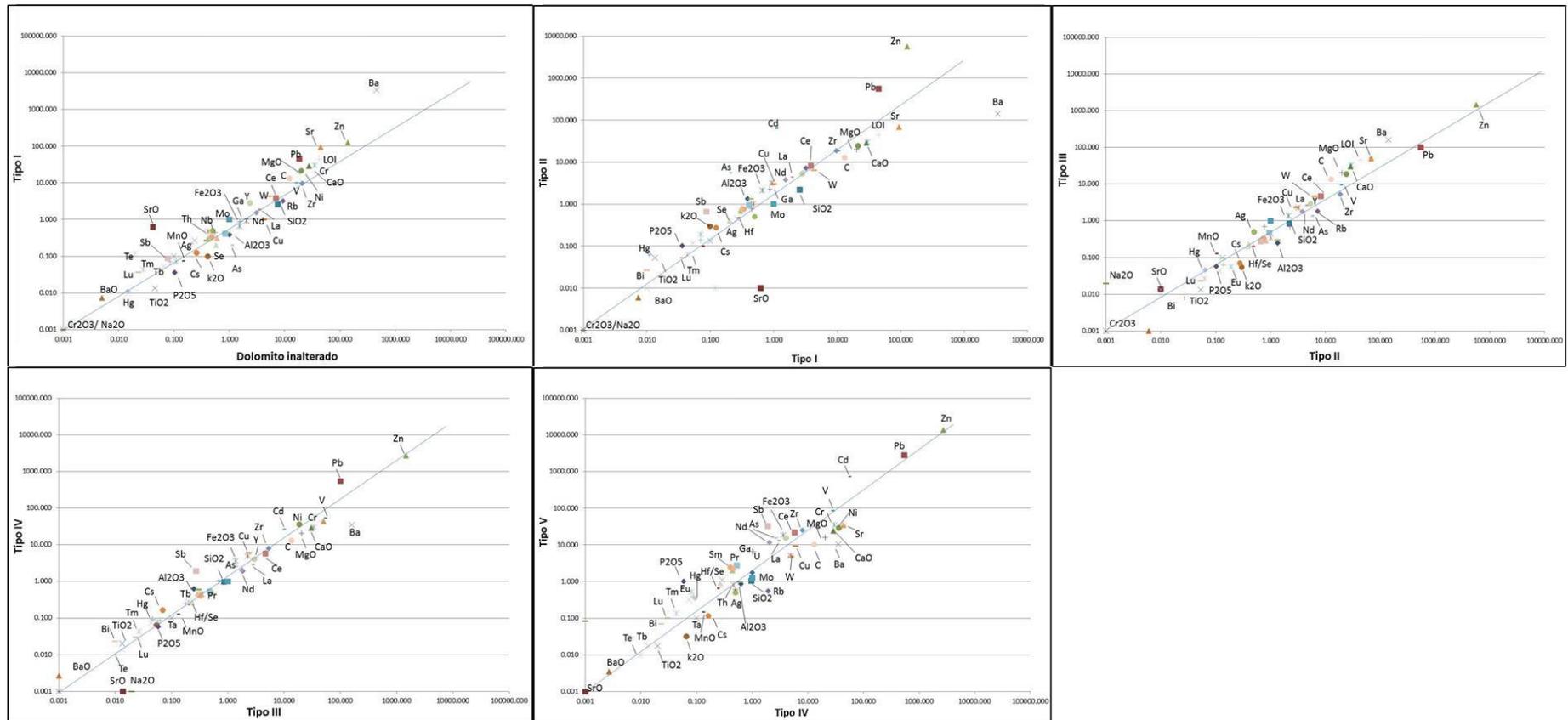


Figura 8. 3. Diagrama Isocon mostrando as perdas e ganhos relativos durante a evolução do processo hidrotermal para as rochas encaixantes e diferentes tipos de brecha na ocorrência Olho D'Água.

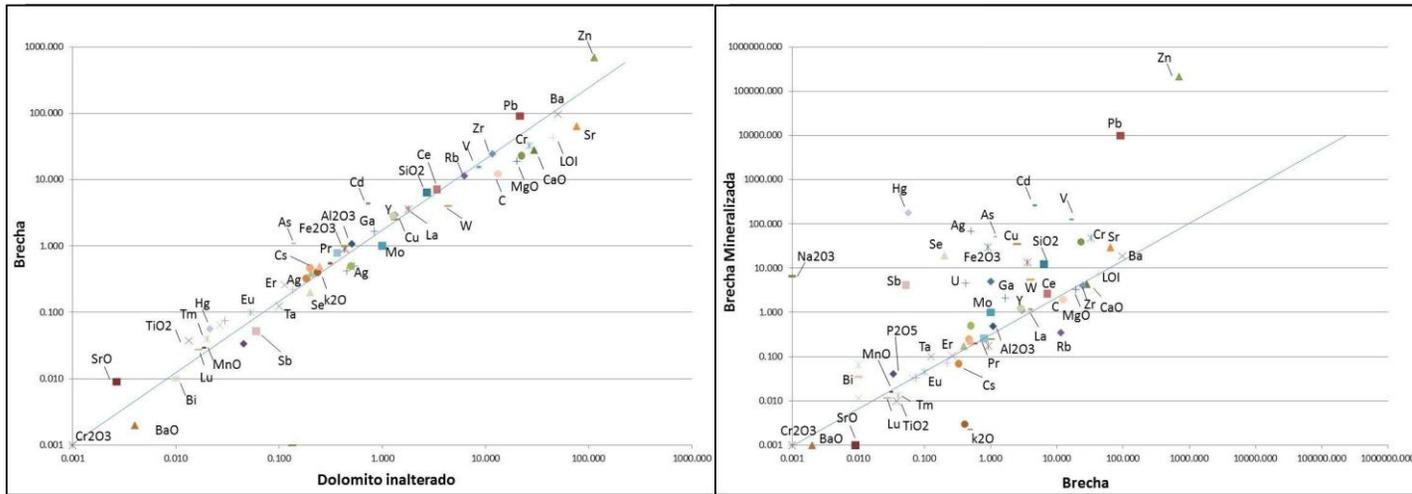


Figura 8. 4. Diagrama Isocon mostrando as perdas e ganhos relativos durante a evolução do processo hidrotermal para as rochas encaixantes e diferentes tipos de brecha na ocorrência Cercado.

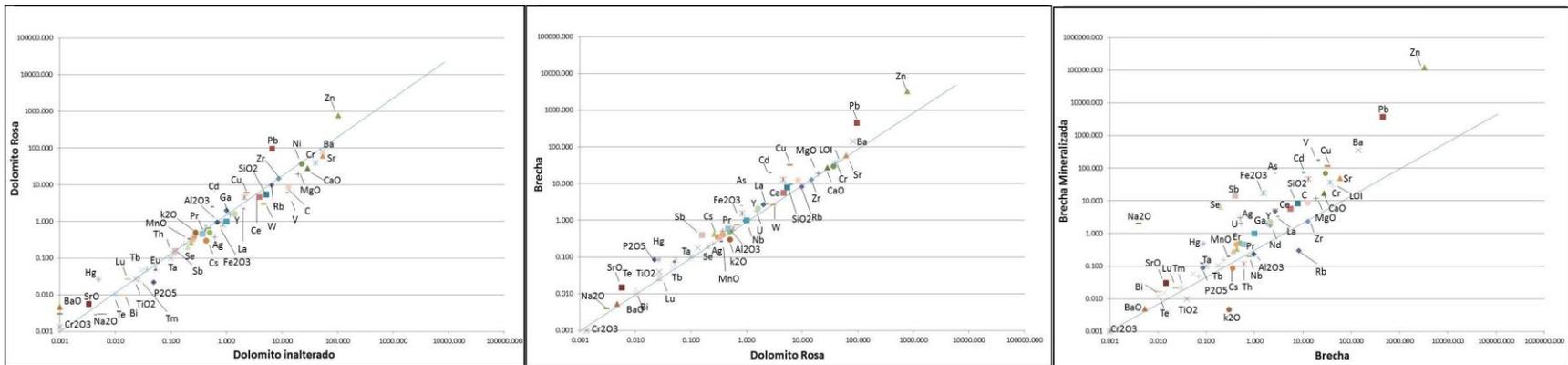


Figura 8. 5. Diagrama Isocon mostrando as perdas e ganhos relativos durante a evolução do processo hidrotermal para as rochas encaixantes e diferentes tipos de brecha na ocorrência Pamplona.

De acordo com o balanço de massa, a evolução da composição química das brechas hidrotermais nas ocorrências estudadas pode ser resumida na Figura 8.6:

		Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	Tipo V
Mata II	Ganho	Zn, V, Pb, As, SiO ₂ e Fe ₂ O ₃	Sb, W, V, Fe ₂ O ₃ e P ₂ O ₅	Pb, Zn, V, Cd, SiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , Sb, Cs, Hg, Cr ₂ O ₃ e SrO	Não significativo	Ba, V, Sb, As, Bi, ETR, SiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , P ₂ O ₅ , SrO, Na ₂ O e Cr ₂ O ₃
	Perda		SiO ₂ , Pb, Zn, Cs, SrO e BaO	CaO, MgO, C, W, Mo, Ta e Ba	Hg, Zn, Ba e V	Zn, CaO, MgO, Cd, Th e MnO
		Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	Tipo V
Olho D'Água	Ganho	Pb, Zn, Ba, SrO + ETR	Zn, Pb, Cd, As e Fe ₂ O ₃	Não significativa	Pb, Cd, Cu, Sb, Fe ₂ O ₃ , Hg, Bi	ETR, Zn, Pb, Sb, Fe ₂ O ₃ , Hg, U, Co, Cd, As, V, P ₂ O ₅ , Bi, Cd
	Perda		Ba, SrO, CaO, MgO	Zn, Pb, Zr, As, K ₂ O e ETR.	Na ₂ O, SrO e Ba	MgO, CaO, Ba
		Brecha	Brecha Mineralizada			
Cercado	Ganho	Zn, Pb, Cd e Hg	Hg, Cd, Pb, Zn, V, As, Ag, Sb, U, SiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , Na ₂ O, Se, Bi, Cu			
	Perda	CaO, MgO, BaO, Sr e Sb	K ₂ O, SrO, BaO, MgO, CaO + ETR			
		Brecha	Brecha Mineralizada			
Pamplona	Ganho	Zn, Pb, Cu, Cd, As, Sb, Hg, P ₂ O ₅ , SrO	Zn, Pb, Ba, V, Cd, Ag, U, Cu, As, Sb, Se, Hg, Na ₂ O Fe ₂ O ₃			
	Perda	Não significativa	ETR, K ₂ O e TiO ₂ , MgO e, CaO.			

Figura 8. 6. Principais enriquecimentos e perdas químicas nos diferentes tipos de brechas para as ocorrências estudadas.

Com o objetivo de complementar o entendimento das variações químicas nos diferentes tipos de brechas e rochas encaixantes, nota-se que:

- CaO e MgO

A concentração média dos teores de CaO e MgO para os dolomitos pouco alterados é de 30% e 20%, respectivamente. No entanto, o conteúdo de CaO e MgO decresce gradualmente nos diferentes tipos de brechas da ocorrência Mata II (Figura 8.7a), resultando em conteúdos nas brechas do tipo V inferiores a 4% de CaO e 1% de MgO. Esta mesma variação é identificada no Cercado e Pamplona (Figura 8.7c e 8.7d), com teores na brecha mineralizada variando de 1-10% de MgO e de CaO na Mina do Cercado e de 4-18% de CaO e 6-13% de MgO para a ocorrência Pamplona. Na ocorrência Olho D'Água (Figura 8.7b), a variação obtida foi mais discreta, com valores acima de 10% de MgO e de 17% de CaO para a brecha mineralizada.

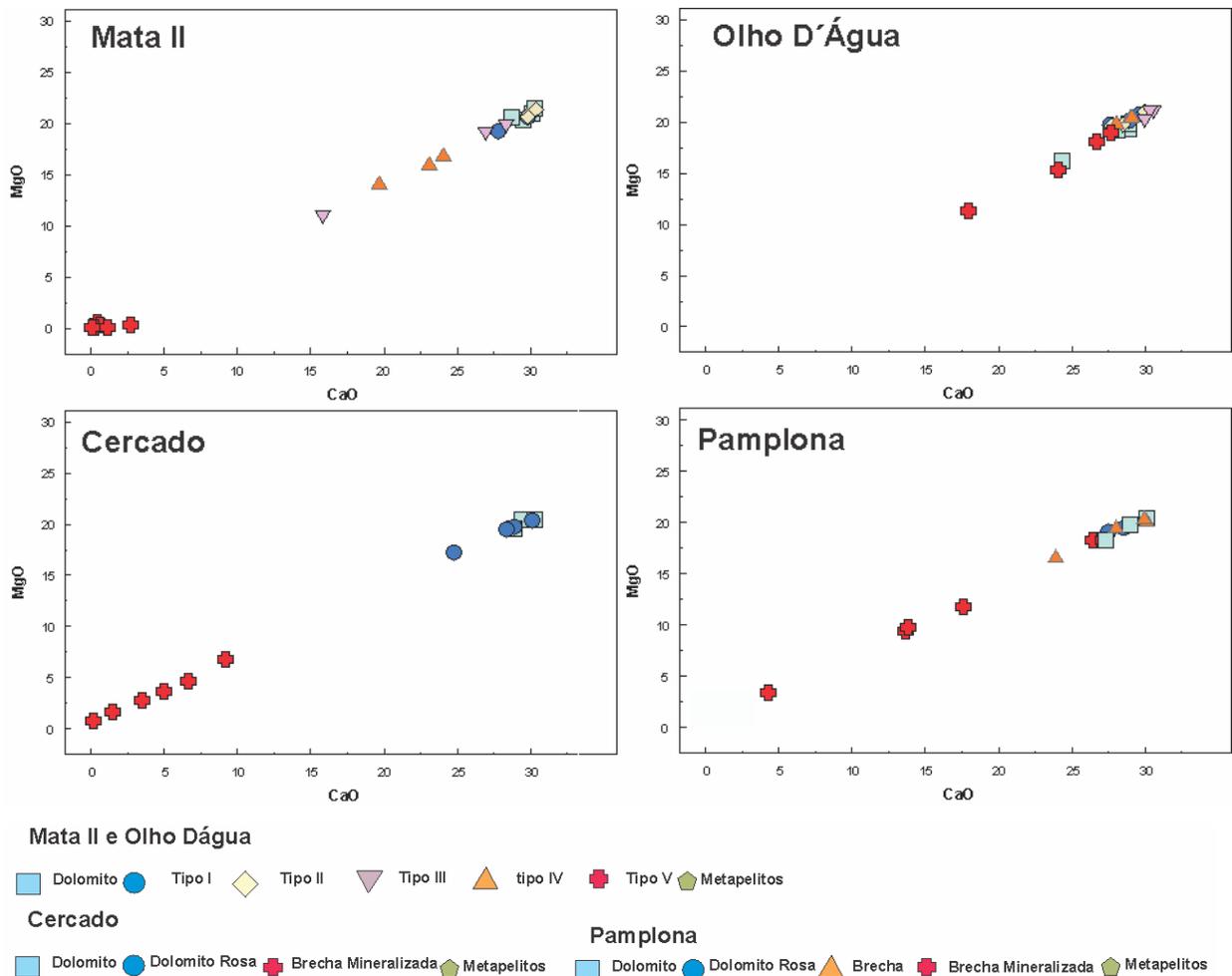


Figura 8. 7. Diagramas mostrando a variação dos conteúdos de CaO e MgO nas diferentes ocorrências zincíferas por litótipos.

- Fe₂O₃ e SiO₂

A concentração de Fe₂O₃ é mais elevada nas brechas do tipo V (Mata II e Olho D'Água) e nas brechas mineralizadas da Mina do Cercado e da ocorrência Pamplona (Figura 8.8). A concentração mais elevada foi encontrada na Mina do Cercado com valores de até 75% de Fe₂O₃. Para as demais ocorrências, os valores máximos obtidos de Fe₂O₃ foi de 45%.

O conteúdo de SiO₂ é mais elevado notoriamente na ocorrência Mata II (Figura 8.8a), com valores de até 97% na brecha do tipo V. Também fica evidente um acréscimo gradual no teores de SiO₂ nos diferentes tipos de brechas do Mata II. Para as demais ocorrências, o aumento nos conteúdos de SiO₂ é mais discreto para as brechas mineralizadas do Cercado e Pamplona (Figura 8.8c e 8.8d) e é praticamente nula para os diferentes tipos de brecha e rochas encaixantes do Olho D'Água (Figura 8.8b).

Não é observada correlação positiva entre SiO_2 e Fe_2O_3 em nenhum dos alvos, entretanto, na brecha do tipo V do Alvo Mata II a correlação negativa entre esses óxidos é sugerida.

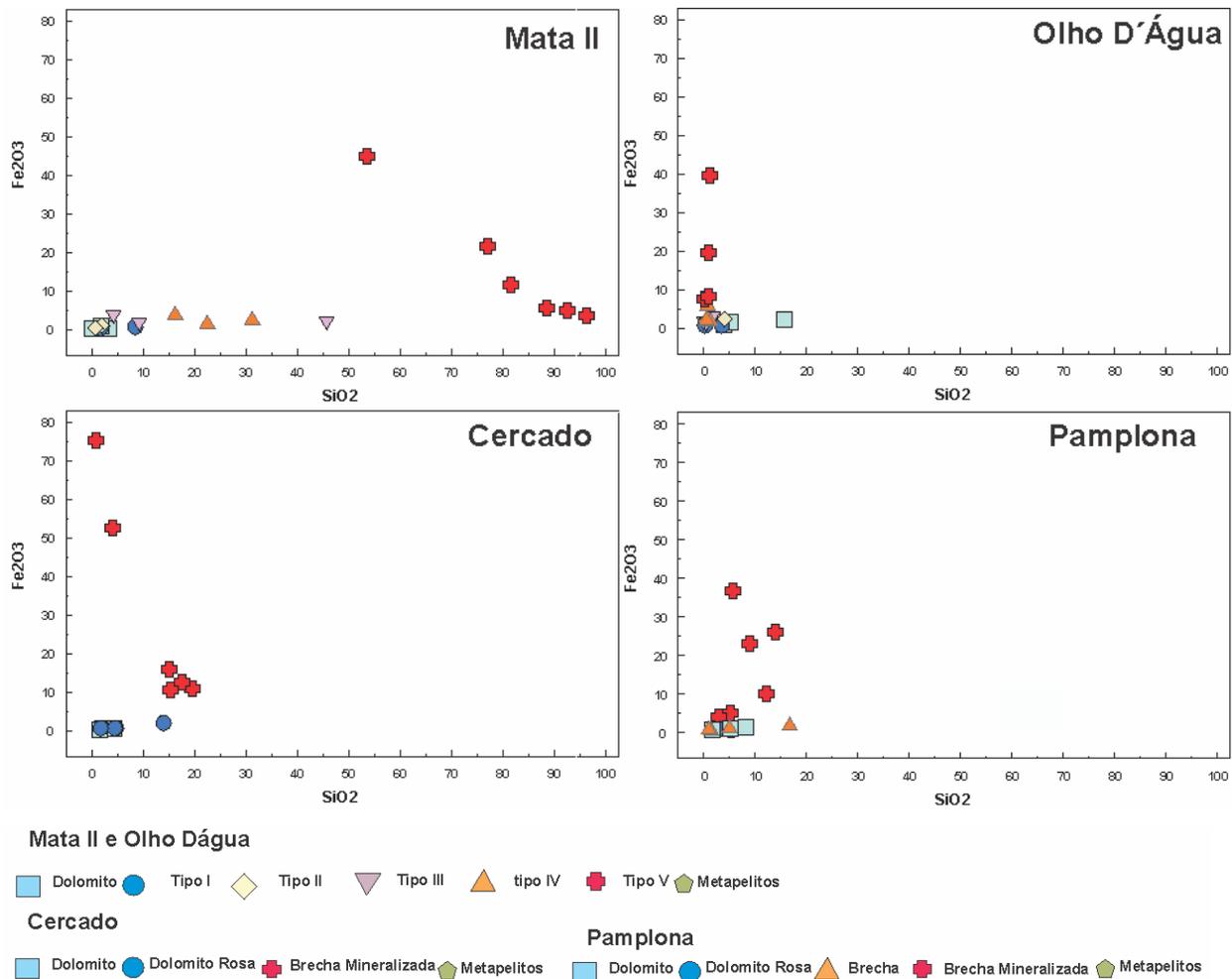


Figura 8. 8. Diagramas mostrando a distribuição do Fe_2O_3 e SiO_2 nas diferentes ocorrências zincíferas por litotipos

- Zn e Pb

Em termos de interesse econômico para minério de zinco e chumbo (Figura 8.9), as brechas dolomíticas com conteúdo de metais são representadas por: 1° Mina Cercado (média de 21% de Zn e 1,7% de Pb); 2° Pamplona (média de 12,28% de Zn e 0,37% de Pb) e 3° Olho D'Água (média de 1,36% de Zn e 0,27% de Pb), enquanto a brecha dolomítica da ocorrência do Mata II não apresenta valores anômalos (<500ppm) para metais. Correlação positiva entre Zn e Pb é verificada para todos os alvos, assim como aumento progressivo do conteúdo de metais

acompanhando a evolução das brechas, exceto no caso do alvo Mata II, no qual essa tendência não é tão clara.

Os minerais identificados como portadores de zinco em sua estrutura são a willemita (Olho D'Água, Pamplona e Cercado) dolomita zincífera (nas quatro ocorrências estudadas), clorita zincífera (Olho D'água e Pamplona), franklinita (Olho D'água e Cercado) e esfalerita (Cercado).

Os minerais portadores de chumbo são a galena (Mata II, Cercado e Pamplona) e minerais de origem supérgena tais como cerussita (Olho D'Água e piromorfita (Pamplona).

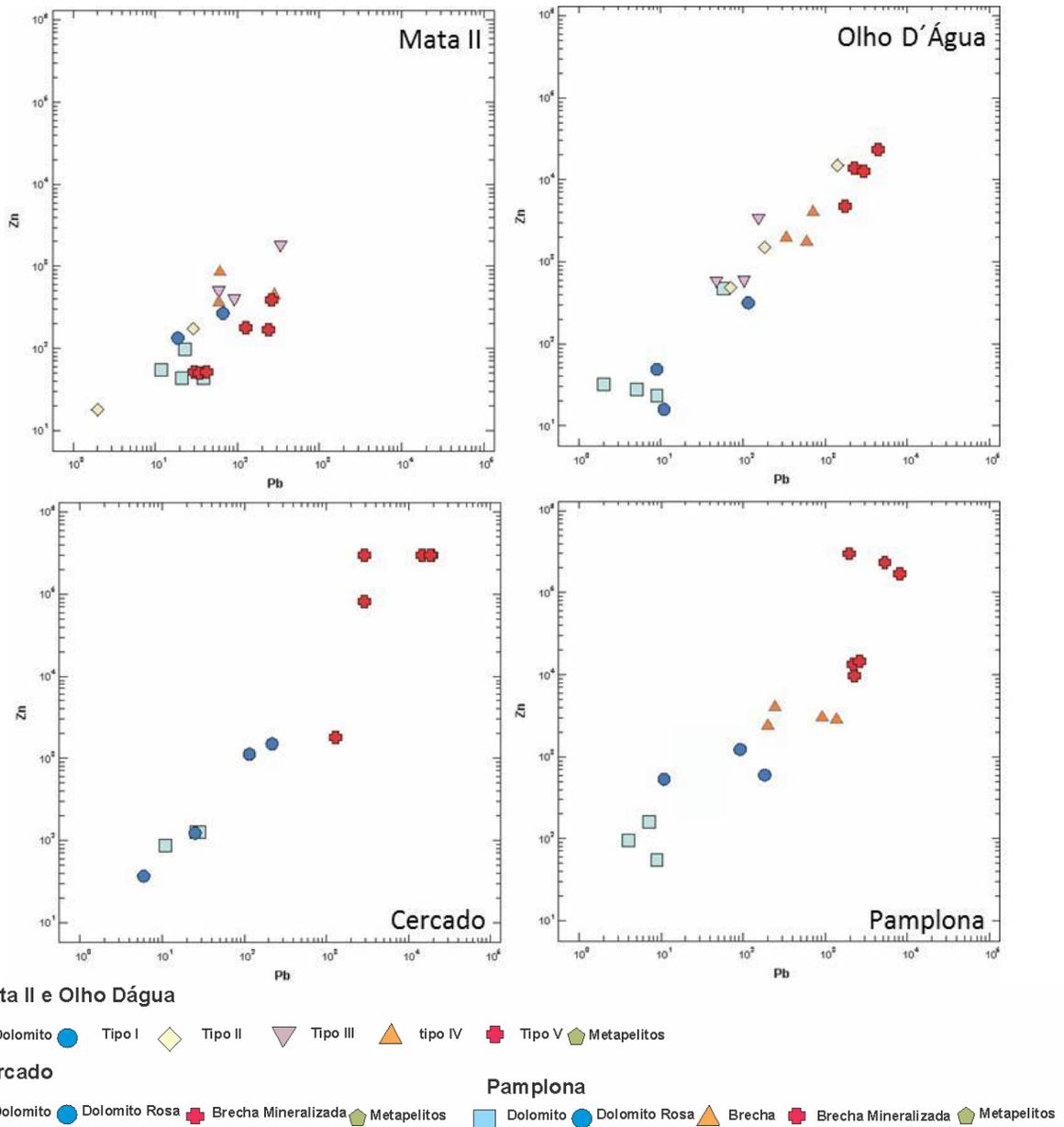


Figura 8. 9. Distribuição dos conteúdos de Zn e Pb (em ppm) nas ocorrências estudadas.

- Elementos Terras Raras (ETR)

A concentração dos elementos terras raras não é muito significativa nas diferentes ocorrências zincíferas estudadas (Figura 8.10). Contudo, destaca-se um padrão de distribuição destes elementos no Mata II e Olho D'Água (8.10a e 8.10b), nos quais os dolomitos encaixantes e brechas do tipo I e tipo II apresentam os menores conteúdos de ETR ao passo que a brechas do tipo III, IV e V apresentam os maiores valores destes elementos, indicando um progressivo enriquecimento relativo em ETR. Quando comparado com as rochas pelíticas da Formação Serra da Lapa, percebe-se que estes litotipos apresentam uma concentração natural de elementos terras raras superior àquelas apresentadas pelos demais litotipos na área de estudo, porém apresentam o mesmo padrão de distribuição de ETR com leve e discreto enriquecimento de elementos terras raras leves (ETRL) em relação aos pesados.

A concentração dos ETR na Mina do Cercado e Pamplona (8.10c e 8.10d) revela um padrão de distribuição inverso ao observado para as ocorrências zincíferas do Mata II e Olho D'Água, uma vez que a brecha mineralizada nestes casos apresentam concentrações semelhantes de ETR observadas nos litotipos dolomíticos presente no entorno da mineralização, diferindo da assinatura dos metapelitos.

O principal mineral portador de ETR identificado neste estudo é a monazita, presente nas ocorrências do Cercado e Mata II, finamente disseminados nas brechas hidrotermais.

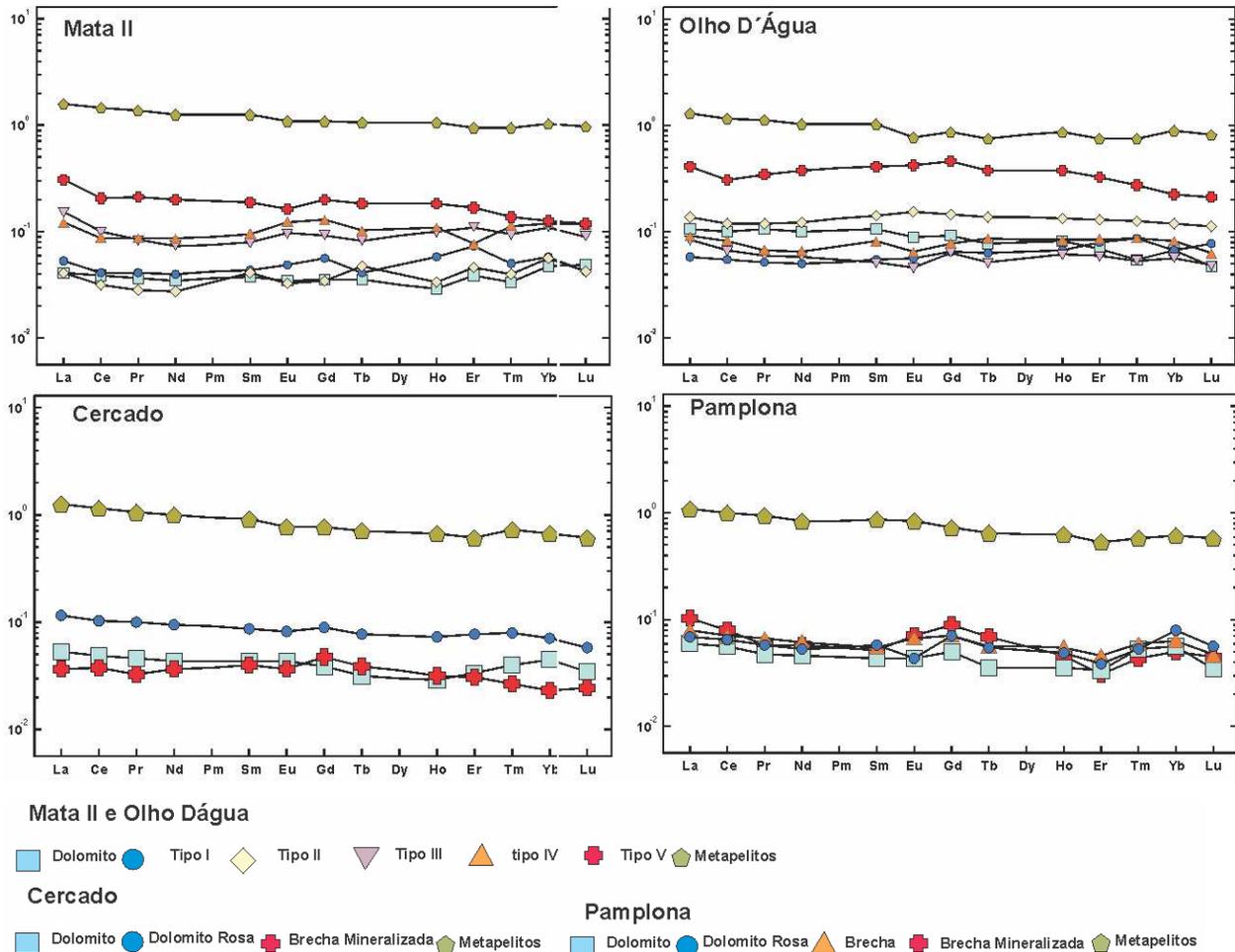


Figura 8. 10. Diagramas mostrando a distribuição do ETR nas diferentes ocorrências zincíferas por litotipos normalizados pelo NASC (*North American Shale Composition - Haskin & Haskin, 1966*).

- Correlação Multielementar

Para definir possíveis assinaturas da mineralização para as ocorrências estudadas, foram confeccionados matrizes de correlações multielementares entre todos os litotipos encontrados em cada ocorrência zincífera. Para a definição dos valores críticos de correlação foram utilizado graus de liberdade para probabilidade = 99% (Figura 8.11), para definir o conjunto de elementos relacionados com o zinco presentes em todos os grupos de rochas, ou seja, encaixantes dolomíticas e mineralizadas.

Graus de liberdade (N - 2)	Prob = 95% ou $\alpha = 0,05$	Prob = 99% ou $\alpha = 0,01$
1	0,999	1,000
2	0,975	0,995
3	0,930	0,977
4	0,881	0,949
5	0,836	0,917
6	0,795	0,886
7	0,758	0,855
8	0,726	0,827
9	0,697	0,800
10	0,671	0,776
11	0,648	0,753
12	0,627	0,732
13	0,607	0,712
14	0,590	0,694
15	0,574	0,677
16	0,559	0,662
17	0,545	0,647
18	0,532	0,633
19	0,520	0,620
20	0,509	0,608
21	0,498	0,596
22	0,488	0,585
23	0,479	0,574
24	0,470	0,564
25	0,461	0,555
26	0,454	0,546
27	0,446	0,538
28	0,439	0,529
29	0,432	0,522
30	0,426	0,514
32	0,414	0,500
34	0,402	0,487
36	0,392	0,475
38	0,382	0,464
40	0,373	0,454
42	0,365	0,444
44	0,357	0,435
46	0,349	0,426
48	0,343	0,418
50	0,336	0,410
55	0,321	0,393
60	0,308	0,377
65	0,297	0,364
70	0,287	0,351
80	0,269	0,330
100	0,241	0,297
125	0,216	0,267
150	0,198	0,244
200	0,172	0,212
400	0,122	0,151
1000	0,077	0,096

Figura 8. 11. Valores críticos dos índices de correlação entre duas variáveis (KOZAK, A. 1966)

Os principais resultados obtidos foram (Figura 8.12):

- Ag, Pb, As e Se estão presentes nas três ocorrências nas quais foram identificadas mineralização de zinco (Pamplona, Cercado e Olho D'Água).

- Cercado e Pamplona apresentam maiores similaridades entre si, destacando-se a presença de Na₂O, Se, Cu, Ag, Pb e As, e diferindo quanto à presença de Hg na ocorrência do Pamplona.

- Na ocorrência Olho D'Água fica evidente a correlação positiva com o ETR, além de V, Co, Sb e Cd.

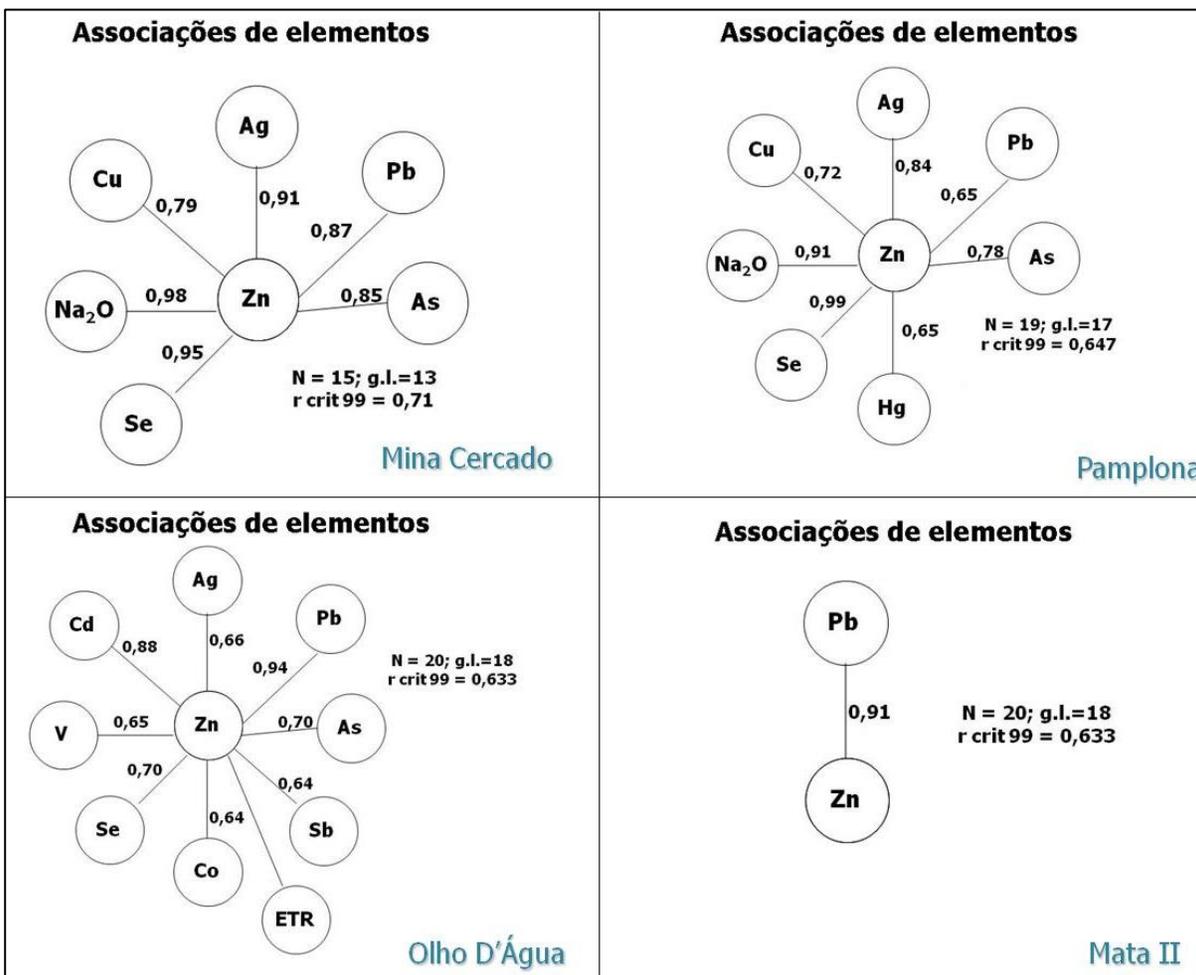


Figura 8. 12. Diagrama de correlações de elementos para os casos estudados.

Complementando o estudo anterior, para os elementos químicos carregados pelos fluídos hidrotermais, percebe-se que as brechas mineralizadas do Pamplona, Cercado e Olho D'Água, além do maior conteúdo de Zn e Pb, também possuem o maior enriquecimento relativo em alguns elementos que complementam a assinatura geoquímica do minério willemítico e das brechas da Mina de Vazante. Dentre esses elementos presentes nos estágios hidrotermais da brecha mineralizada, temos (Figura 8.13):

- Mata II: Fe₂O₃, SiO₂, V, ETR, Sb, As, Bi, P₂O₅, Pb, V, Ba, Cd, SrO, Na₂O e Cr₂O₃;
- Olho D'Água: Fe₂O₃, Zn, Pb, As, Hg, Sb, V, ETR, P₂O₅, Cd, Ag, Se, Bi, Co, U.
- Cercado: Fe₂O₃, SiO₂, Zn, Pb, As, Hg, Sb, Ba, Se, Ag, V, Na₂O, Cu.

- Pamplona: Fe₂O₃, SiO₂, Zn, Pb, As, Hg, Sb, Ba, Se Ag, V, Cu, Cd, Na₂O.

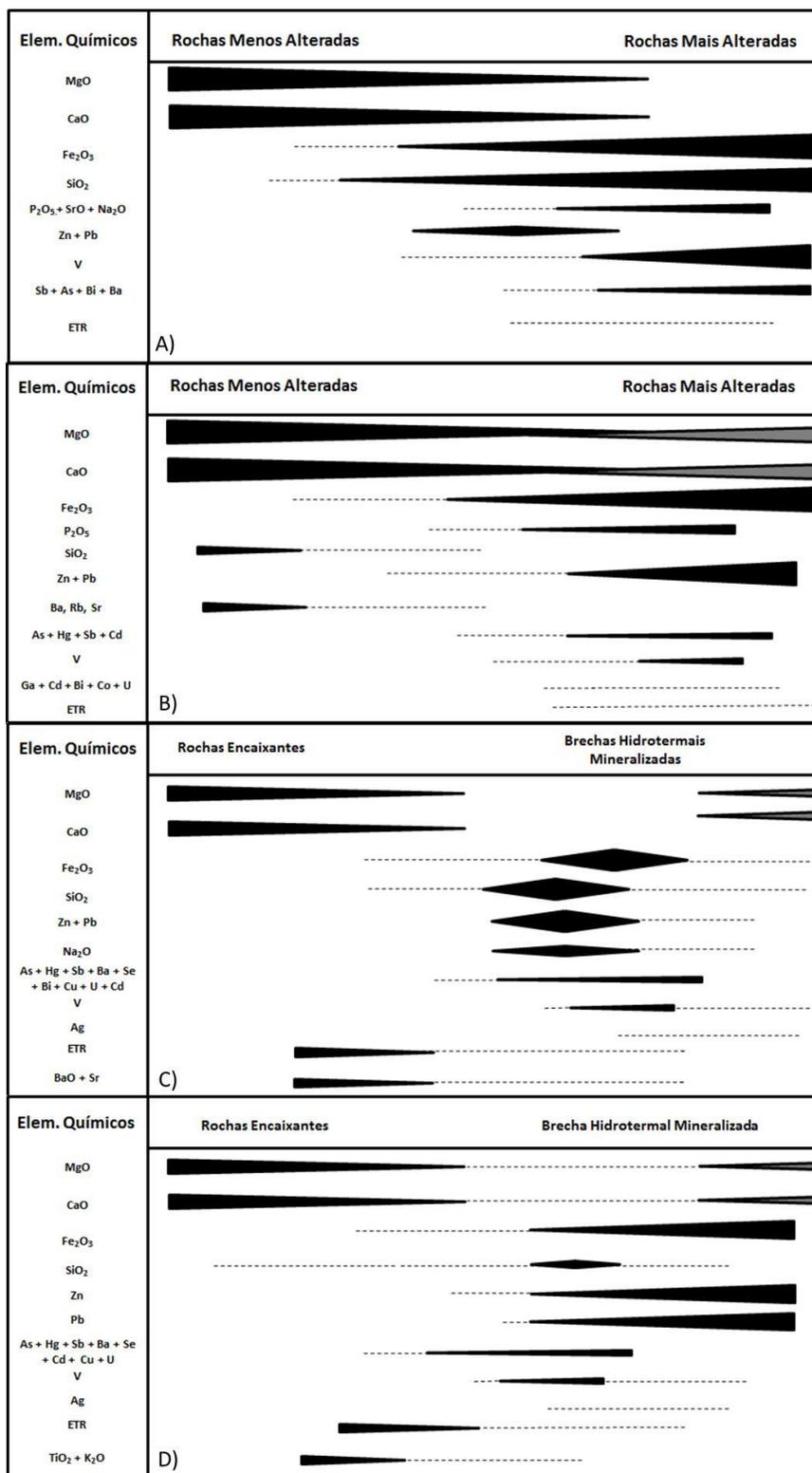


Figura 8. 13. Evolução química das brechas hidrotermais para as ocorrências zincíferas Mata II (a), Olho D'Água (b), Cercado (c) e Pamplona (d).

9. ISÓTOPOS ESTÁVEIS

9.1 Análise Isotópicas de Carbono e Oxigênio

Análises de isótopos estáveis (Anexo II) de oxigênio e carbono em rocha total e em minerais representativos dos diferentes litotipos das ocorrências zincíferas de Mata II, Olho D'Água, Pamplona e Mina do Cercado fornecem informações relativas aos fluidos hidrotermais, às rochas hospedeiras e aos mecanismos de interação fluido-rocha.

9.2 Rochas hospedeiras

As rochas hospedeiras das ocorrências zincíferas do Mata II, Olho D'Água e Cercado estão hospedados na Formação Morro do Calcáreo, enquanto na ocorrência Pamplona, a rocha hospedeira é pertencente às formações Serra do Poço Verde e Morro do Calcáreo.

Em geral, as rochas dolomíticas preservadas dos alvos estudados (Figura 9.1) possuem valores aproximados de $\delta^{13}\text{C}$ entre -0,51‰ e +2,72‰ PDB e de $\delta^{18}\text{O}$ entre +22,09‰ e +28,13‰ V-SMOW. Esta ampla variação da composição isotópica de oxigênio e carbono foi também verificada por Azmy *et al.* (2001) e Monteiro (2002) em amostras consideradas preservadas de dolomita micrítica a microesparítica nas rochas dolomíticas do Grupo Vazante.

9.3 Rochas alteradas hidrotermalmente

No alvo Olho D'Água, observa-se decréscimo gradual dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ dos dolomitos encaixantes para as brechas dolomíticas hidrotermais, com valor mínimo de $\delta^{13}\text{C}$ de 0,64‰ na brecha do tipo V e de $\delta^{18}\text{O}$ de 15,46‰ para a brecha do tipo IV (Figura 9.1b). Esta tendência não é tão clara no alvo Mata II (Figura 9.1a), porque duas amostras de dolomitos inalterados apresentam os mais baixos valores de $\delta^{13}\text{C}$. Contudo, as brechas apresentam valor mínimo encontrado de $\delta^{13}\text{C}$ de 0,78‰ (brecha do tipo III) e de $\delta^{18}\text{O}$ de 21,80‰ (brecha do tipo IV). Na Mina do Cercado, entretanto, há um forte contraste entre os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ das rochas encaixantes e mineralizadas (Figura 9.1c), sendo identificados valores de $\delta^{13}\text{C}$ para as rochas mineralizadas de 0‰ até -4,07‰ e de $\delta^{18}\text{O}$ entre 18,54‰ até 23,74‰.

Para a ocorrência Pamplona (Figura 9.1d), observa-se decréscimo gradual mais acentuado dos valores de $\delta^{18}\text{O}$, acompanhado por diminuição mais sutil dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ das rochas dolomíticas com pouca alteração hidrotermal para as brechas mineralizadas. As últimas apresentam valores de $\delta^{13}\text{C}$ de 0,20‰ a 0,75‰ e de $\delta^{18}\text{O}$ de 19,24‰ a 22,06‰.

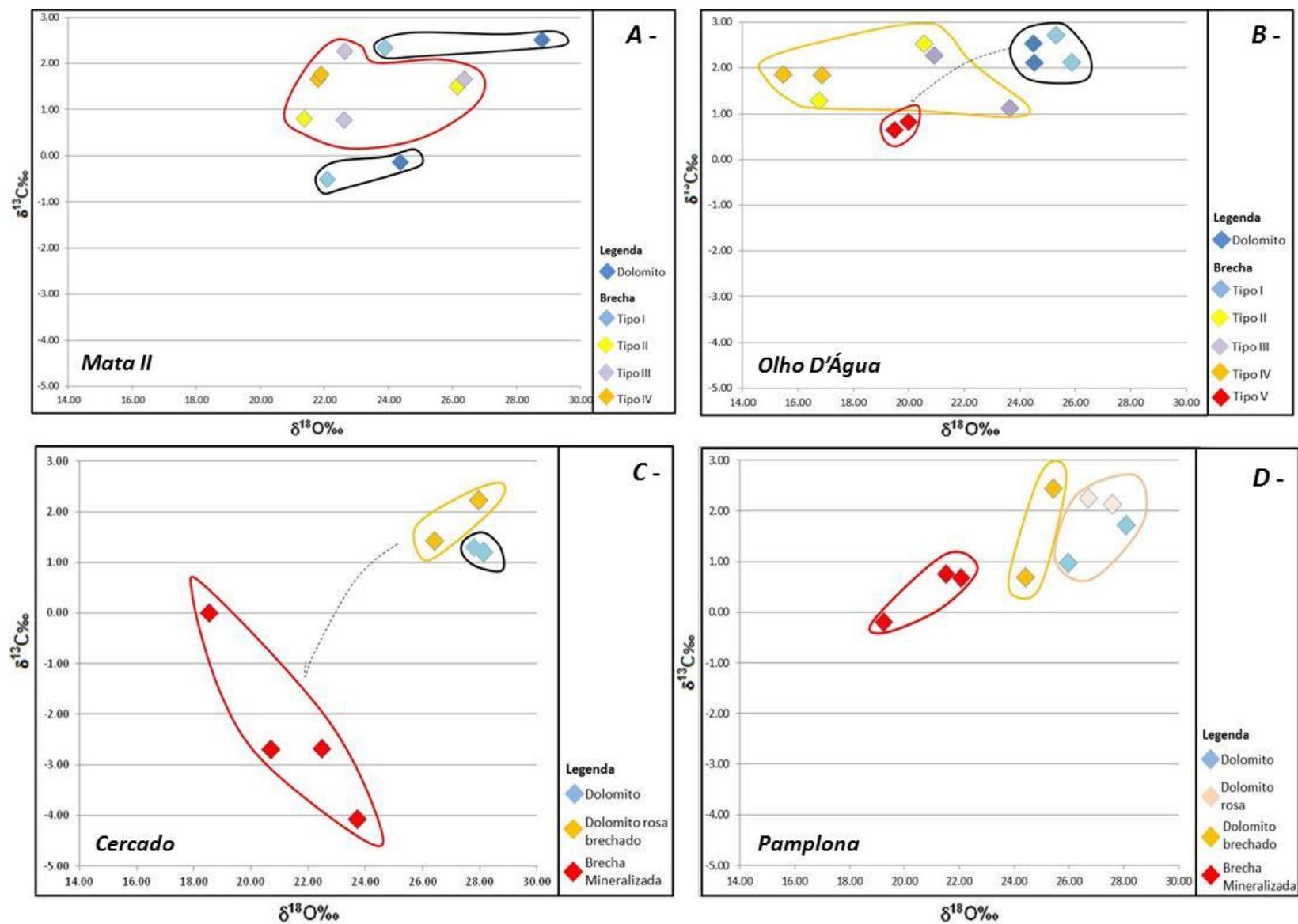


Figura 9. 1. Composição isotópica de carbono ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}\text{‰}$) e oxigênio ($\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}\text{‰}$) em rocha total para os diferentes litotipos encontrados nas ocorrências zincíferas de (a) Mata II; (b) Olho D'Água; (c) Mina do Cercado; (d) Pamplona.

Quando são comparadas as rochas mineralizadas das ocorrências do Olho D'Água, Cercado e Pamplona (Figura 9.2), os valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$ das ocorrências Pamplona e Olho D'Água são semelhantes, diferentemente da Mina do Cercado, na qual tendência de covariância isotópica negativa dos valores $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$ é observada.

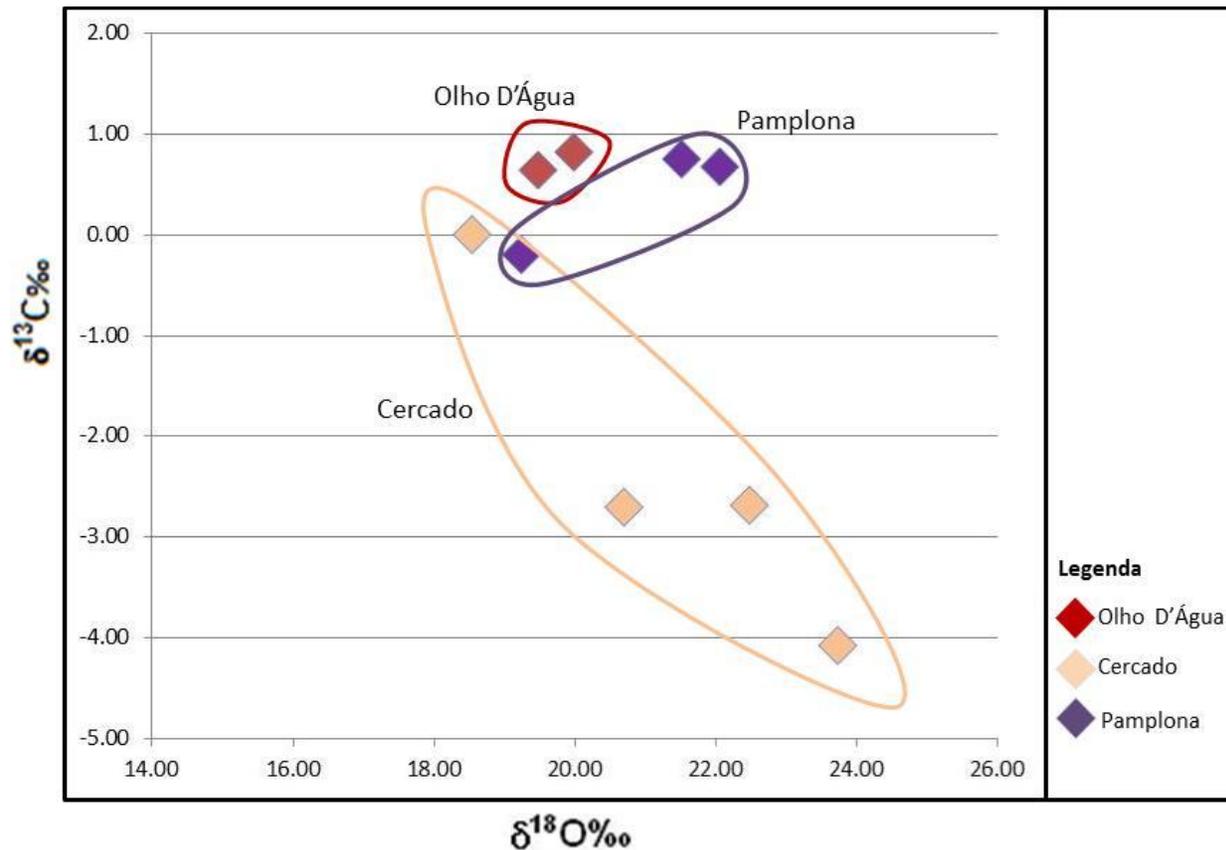


Figura 9. 2. Composição isotópica de carbono ($\delta^{13}\text{C}\text{‰}_{\text{PDB}}$) e oxigênio ($\delta^{18}\text{O}\text{‰}_{\text{SMOW}}$) em rocha total para rochas mineralizadas nas áreas de Olho D'Água, Pamplona e Cercado.

De acordo com os dados isotópicos já publicados para a Mina de Vazante e Morro Agudo (Monteiro, 2002; Monteiro *et al.*, 1999; 2006; 2007; Rubo & Monteiro, 2010), percebe-se que os dolomitos preservados e hidrotermalizados das áreas de Olho D'Água, Cercado e Pamplona possuem o mesmo *trend* marcado pelo decréscimo gradual dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ identificado para as minas ou depósitos de zinco da Faixa Vazante (Figura 9.3a e 9.3b). Entretanto, valores mais baixos de $\delta^{13}\text{C}$ em relação aos demais depósitos hospedados pelo Grupo Vazante são registrados em amostras da Mina de Cercado.

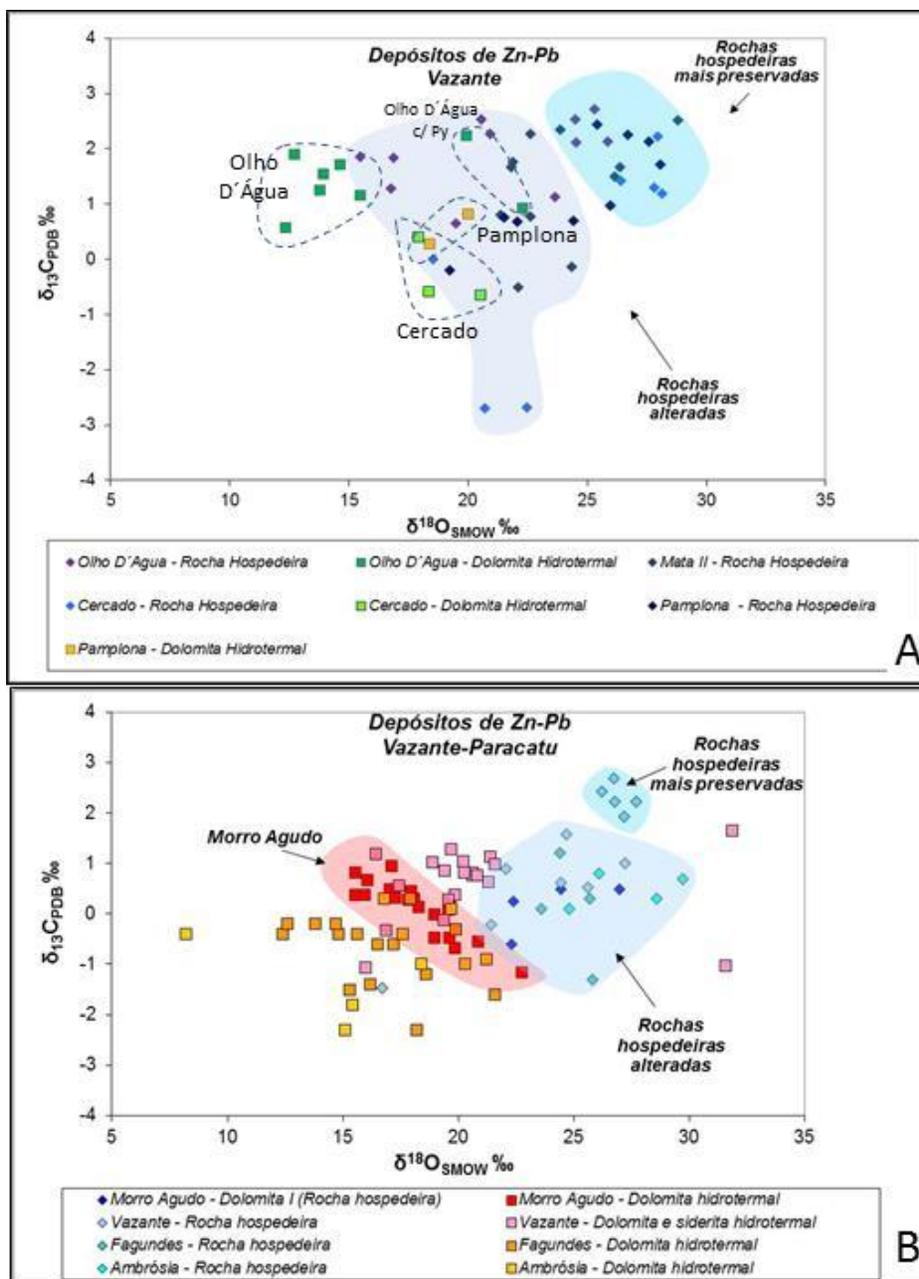


Figura 9. 3. (a) Composições isotópicas de carbono e oxigênio de dolomita das ocorrências do Olho D'Água, Cercado e Pamplona. Fonte dos dados: Este estudo. (b) Comparação entre as composições isotópicas de carbono e oxigênio em minerais carbonáticos dos depósitos de Morro Agudo, Vazante e outros depósitos de Zn-Pb hospedados no Grupo Vazante Fonte dos dados: Monteiro *et al.* (1999; 2007); Rubo & Monteiro (2010).

9.4 Assinaturas isotópicas de carbonatos hidrotermais

As análises isotópicas de carbono e oxigênio de dolomita hidrotermal (tabela 9.1; Figuras 9.4 e 9.5) das ocorrências estudadas revelam que:

Tabela 9. 1. Composição isotópica de minerais hidrotermais (dolomita, hematita e quartzo) das áreas Mata II, Olho D'Água, Pamplona e Cercado.

<i>Alvo</i>	<i>Furo/Ponto</i>	<i>Profundidade</i>	<i>Amostra</i>	<i>Mineral</i>	$\delta^{13}\text{C}\%$ (SMOW)	$\delta^{18}\text{O}\%$ (SMOW)
Mata II	VZM2F001	57,45	FHB_01	Hm		9,30
	VZM2F001	57,45	FHB_06	Qtz		17,10
	VZM2F001	57,45	FHB_04	Hm		6,90
	VZM2F001	57,45	FHB_08	Qtz		15,00
	FHB-32	Superfície	FHB_02	Hm		-2,50
	FHB-32	Superfície	FHB_02	Hm		0,40
	FHB32	Superfície	FHB_07	Qtz		24,00
	FHB-33	Superfície	FHB_03	Hm		-1,00
	FHB-36	Superfície	FHB_05	Qtz		23,30
OD	VZODF001	81,45	FHB_11	Dol	1,55	13,94
	VZODF001	81,45	FHB_18	Hm		1,10
	VZODF001	81,45	FHB_12	Dol	1,25	13,78
	VZODF001	81,45	FHB_19	Hm		-0,90
	VZODF003	54,95	FHB_09	Dol	1,16	15,47
	VZODF003	55,40	FHB_10	Dol	1,71	14,63
	VZODF001	251,85	FHB_13	Dol c/py	0,92	22,30
	VZODF001	53,00	FHB_14	Dol	0,57	12,34
	VZODF001	251,85	FHB_15	Dol c/py	2,23	19,91
	VZODF001	85,40	FHB_16	Dol	1,90	12,71
	FHB-53	Superfície	FHB_17	Hm		2,70
	FHB-52	Superfície	FHB_20	Hm		-0,50
PP	VZPF54	107,50	FHB_21	Dol	0,82	19,99
	VZPF54	107,50	FHB_25	Hm		-1,80
	VZPF52	37,60	FHB_22	Dol	0,29	18,40
	VZPF52	37,60	FHB_23	Hm		
	VZPF49	178,60	FHB_24	Hm		5,10
CC	FHB-87	Superfície	FHB_31	Dol	0,40	17,91
	Bloco I	Superfície	FHB_32	Dol	-0,58	18,34
	FHB-97	Superfície	FHB_33	Dol	-0,65	20,53

• Olho D'Água: a dolomita esparítica associada com pirita apresenta valor de $\delta^{13}\text{C}$ entre +0,92‰ e 2,23‰ e de $\delta^{18}\text{O}$ entre +19,21‰ e +22,3‰, com assinatura isotópica próxima àquela observada para dolomita e siderita hidrotermal da Mina de Vazante. A dolomita sin-mineralização possui valores de $\delta^{18}\text{O}$ menores (+12,71‰ e +15,47‰), porém próximos daqueles observados para dolomita hidrotermal dos depósitos sulfetado, tais como Morro Agudo, Fagundes e Ambrósia (Figura 9.3 e 9.4), e valor de $\delta^{13}\text{C}$ entre +1,16‰ e 1,90‰.

• Pamplona e Cercado: assinaturas semelhantes àquelas identificadas para dolomita/siderita hidrotermal de Vazante foram observadas em amostras do Pamplona, enquanto que no Cercado os valores são próximos aos relativos à dolomita hidrotermal de Morro Agudo, com valores de $\delta^{13}\text{C}$ entre -0,65‰ e +0,82‰, e valor de $\delta^{18}\text{O}$ entre +17,91‰, e +20,53‰.

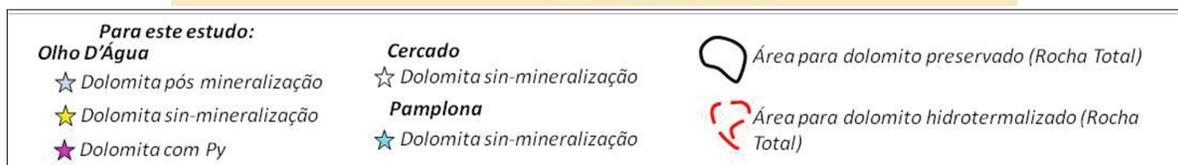
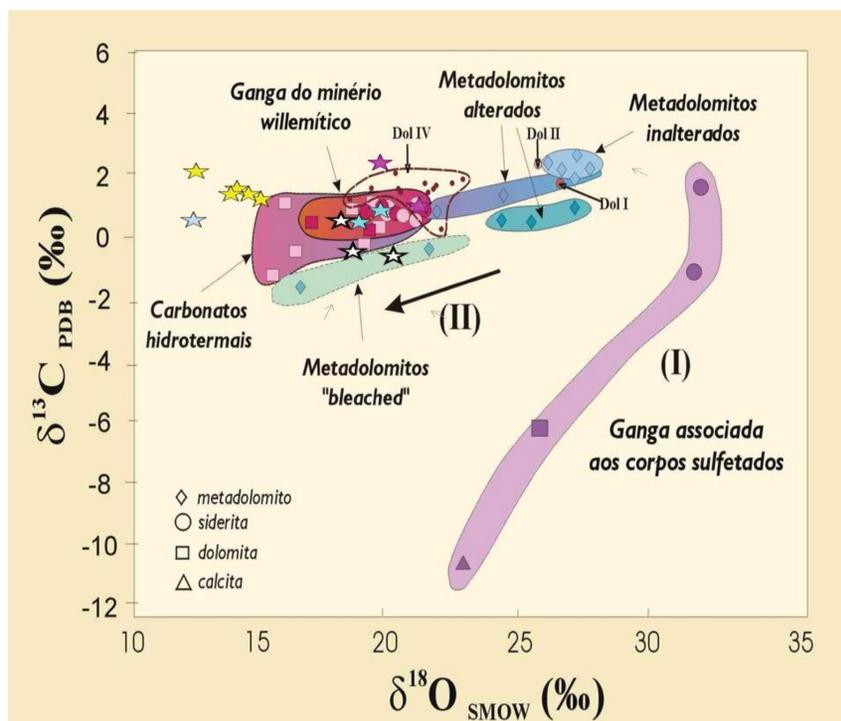


Figura 9. 4. Comparação entre as composições de carbono e oxigênio em minerais carbonáticos do depósito de Vazante. (Monteiro, 2000; Monteiro *et al.* (2007) e dolomita hidrotermal das áreas do Olho D'Água, Cercado e Pamplona (este estudo)

9.4.1 Cálculo de Temperatura

Com intuito de estimar a temperatura de formação das ocorrências zincíferas aqui estudadas, foram realizadas análises de isótopos estáveis de oxigênio das fases minerais hidrotermais (quartzo, hematita e dolomita).

Os cálculos foram baseados nas composições isotópicas de oxigênio de pares minerais com evidências de equilíbrio textural, principalmente separadas a partir de uma mesma amostra. A equação de fracionamento isotópico utilizada nos cálculos de temperatura de Zheng (1991) foi adotada para o par quartzo-hematita. Para o par dolomita-hematita, foram estimadas temperaturas a partir dos fatores de fracionamento dolomita-água e hematita-água de diferentes autores (Böttcher, 1994; Matthews e Katz, 1977; Golyshev *et al.*, 1981; Yapp, 1990), como apresentado na Tabela 9.2.

Em relação ao alvo Mata II, as temperaturas obtidas para dois pares hematita-quartzo, resultaram em temperaturas excessivamente elevadas (>560 °C), sugerindo desequilíbrio isotópico entre os minerais analisados. Os valores de $\delta^{18}\text{O}$ dessas duas amostras de hematita (6,9 e 9,3‰) consideradas nos cálculos diferem de todas as demais amostras de hematita analisadas para os diferentes alvos. Cálculos realizados a partir dos demais pares hematita-quartzo (n = 3) resultaram em temperaturas entre 137 °C e 169 °C.

Para a área de Olho D'Água, as temperaturas estimadas com o uso de diferentes equações de fracionamento isotópico para pares dolomita-hematita (n = 4) resultaram em diferenças de até 55 °C. As temperaturas mínimas variaram de 155 a 169 °C e as máximas de 205 a 230 °C, mas um par também resultou em temperatura mais elevada (> 290 °C), como apresentado na Tabela 9.2.

Temperatura elevada também foi obtida para um par dolomita-hematita da área de Pamplona (> 260 °C), enquanto estimativas considerando-se a composição isotópica de oxigênio de outro par resultou em temperaturas anormalmente baixas (62 °C a 68 °C). Cálculos não foram realizados para a Mina do Cercado, devido à problemas analíticos na obtenção dos dados relativos à hematita.

9.4.2 Composição Isotópica do Oxigênio dos Fluidos Hidrotermais

Os valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ para o fluido em equilíbrio com as fases minerais hidrotermais (quartzo, hematita e dolomita) dos alvos Mata II, Olho D'Água e Pamplona foram estimados considerando-se as composições isotópicas de oxigênio dos minerais e as temperaturas estimadas para os diferentes pares minerais (Tabela 9.3).

Considerando-se que dois pares minerais do Alvo Mata II resultaram em temperaturas excessivamente elevadas ($> 560\text{ }^\circ\text{C}$), foram utilizados nos cálculos as temperaturas mínimas obtidas para os demais pares do mesmo alvo ($140\text{ }^\circ\text{C}$), conforme apresentado na Tabela 9.2. No entanto, no caso de todos os pares minerais do Alvo Mata II, os valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluido}}$ são distintos para quartzo e hematita, implicando que tais minerais não formaram-se simultaneamente a partir do mesmo fluido hidrotermal, ou seja, há clara evidência de desequilíbrio isotópico entre os pares minerais. Os cálculos sugerem tanto participação de fluidos com valores mais elevados de $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluido}}$ (7,7‰ a 12,1‰), como com menores valores (-1,3‰ a 4,2‰) para a formação de hematita e quartzo.

Na área de Olho D'Água, valores muito próximos de $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluido}}$ foram estimados para cada par mineral, o que pode evidenciar equilíbrio isotópico. Em temperaturas mais baixas ($155\text{ }^\circ\text{C}$), os valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluido}}$ estimados a partir de dolomita e hematita foram de 2,2‰ e 2,5‰, respectivamente, enquanto em temperaturas um pouco mais altas ($205\text{ }^\circ\text{C}$), valores também mais elevados de $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluido}}$ foram obtidos (4,0‰ e 4,8‰). Para o par de temperatura mais elevada ($290\text{ }^\circ\text{C}$), valor de $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluido}}$ de 8,3‰ foi estimado.

Para a área de Pamplona, menores valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluido}}$ (-4,5‰) foram estimados para os fluidos a partir de dolomita e hematita, a $62\text{ }^\circ\text{C}$, enquanto em condições de maiores temperaturas ($260\text{ }^\circ\text{C}$), fluidos isotopicamente enriquecidos ($\delta^{18}\text{O} = 11,4$ a $11,7\text{‰}$) semelhantes aos caracterizados no alvo Mata II teriam sido responsáveis pela mineralização willemítica associada com hematita e dolomita.

Adicionalmente aos cálculos realizados a partir da composição isotópica de pares minerais, foi também estimada a composição dos fluidos em equilíbrio com as demais amostras de dolomita hidrotermal analisadas, inclusive aquelas da Mina Cercado, a $150\text{ }^\circ\text{C}$, $200\text{ }^\circ\text{C}$ e $250\text{ }^\circ\text{C}$, utilizando-se a equação de fracionamento isotópico dolomita- H_2O de Golyeshev *et al.*, 1981), com objetivo de caracterizar possíveis reservatórios para os fluidos hidrotermais.

Comparações com as composições isotópicas dos fluidos em equilíbrio com dolomita das demais mineralizações zincíferas da Faixa Vazante (tabela 9.4) foram feitas a partir dos cálculos a 200 °C, que representa um valor intermediário relativo aos intervalos de temperaturas (130 a 260 °C) estimadas a partir do estudo de inclusões fluidas e isótopos estáveis para os depósitos de zinco hospedados em rochas do Grupo Vazante (Monteiro, 2002), sendo condizente com as condições teóricas de estabilidade da willemita em depósitos de zinco hipógenos (Brugger *et al.*, 2003) e com os cálculos geotermométricos realizados nesse estudo.

Tabela 9. 2. Temperaturas estimadas a partir de isótopos estáveis de oxigênio para pares quartzo-hematita e dolomita-hematita para os alvos Mata II, Olho D'Água e Pamplona

Alvo	Amostra	Par	$\delta^{18}\text{O mineral}$ ‰	$\delta^{18}\text{O hematita}$ ‰	$\delta_{\text{min}}-\delta_{\text{hm}}$	$T^{\circ}\text{C}$	$T^{\circ}\text{C}$	$T^{\circ}\text{C}$	$T^{\circ}\text{C}$
						Zheng (1991)	Böttcher(1994) e Yapp (1990)	Matthews e Katz (1977) e Yapp (1990)	Golyshev et al. (1981) e Yapp (1990)
Mata II	FHB_01/06	Qtz-Hm	17,1	9,3	7,8	586,8			
	FHB_04/08	Qtz-Hm	15,0	6,9	8,1	569,7			
	FHB_02/07	Qtz-Hm	24,0	-2,5	26,5	136,6			
	FHB_02/07	Qtz-Hm	24,0	0,4	23,6	168,7			
	FHB_03/05	Qtz-Hm	23,3	-1,0	24,3	160,4			
OD	FHB_11/18	Dol-Hm	13,9	1,1	12,8		289,9	345,2	297,2
	FHB_12/19	Dol-Hm	13,8	-0,9	14,7		205,1	230,4	212,5
	FHB_09/19	Dol-Hm	15,5	-0,9	16,4		154,8	168,2	162,0
	FHB_10	Dol-Hm	14,6	-0,9	15,5		179,3	198,1	186,7
PP	FHB_21/25	Dol-Hm	20,0	-1,8	21,8		61,6	61,9	67,9
	FHB_22/24	Dol-Hm	18,4	5,1	13,3		263,3	307,6	270,8

Tabela 9. 3. Composição isotópica de oxigênio calculadas para fluidos em equilíbrio com quartzo, dolomita e hematita dos alvos Mata II, Olho D'Água e Pamplona, considerando-se as condições mínimas de temperatura estimadas pelos cálculos termométricos e as equações de fracionamento isotópico entre quartzo-H₂O (Matsuhisa *et al.*, 1979), dolomita-H₂O (Golyshev *et al.*, 1981) e hematita-H₂O (Yapp, 1990).

Alvo	Amostra	Par	T°C (Mínima)	$\delta^{18}\text{O}$ mineral ‰	$\delta^{18}\text{O}$ fluido ‰	$\delta^{18}\text{O}$ hematita ‰	$\delta^{18}\text{O}$ fluido ‰
Mata II	FHB_01/06	Qtz-Hm	140	17.1	0.8	9.3	12.1
	FHB_04/08	Qtz-Hm	140	15.0	-1.3	6.9	9.7
	FHB_02/07	Qtz-Hm	140	24.0	7.7	-2.5	0.3
	FHB_02/07	Qtz-Hm	165	24.0	9.9	0.4	4.2
	FHB_03/05	Qtz-Hm	165	23.3	9.2	-1.0	2.8
OD	FHB_11/18	Dol-Hm	290	13.9	8.2	1.1	8.3
	FHB_12/19	Dol-Hm	205	13.8	4.0	-0.9	4.8
	FHB_09/19	Dol-Hm	155	15.5	2.2	-0.9	2.5
	FHB_10	Dol-Hm	180	14.6	3.3	-0.9	3.5
PP	FHB_21/25	Dol-Hm	62	20.0	-4.5	-1.8	-4.0
	FHB_22/24	Dol-Hm	260	18.4	11.4	5.1	11.7

Tabela 9. 4. Equação de fracionamento isotópico dolomita-H₂O de Golyshev *et al.* (1981) e valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ estimados a partir da composição isotópica do oxigênio da dolomita hidrotermal das ocorrências Olho D'Água, Cercado, e Pamplona calculadas para temperaturas de 150°C, 200°C e 250°C.

	Amostra	Tipo	$\delta^{13}\text{C}\%$	$\delta^{18}\text{O}\%$	$\delta^{18}\text{O}\%$	150°C	200°C	250°C
	Olho D'Água	FHB - 09	Dolomita sin Mineralização	1.16	-14.93	15.47	1.77	5.42
FHB - 10		Dolomita sin Mineralização	1.71	-15.75	14.63	0.93	4.58	7.23
FHB - 11		Dolomita sin Mineralização	1.55	-16.41	13.94	0.24	3.89	6.54
FHB - 12		Dolomita sin Mineralização	1.25	-16.57	13.78	0.08	3.73	6.38
FHB - 13		Dolomita branca com Py	0.92	-8.30	22.30	8.60	12.25	14.90
FHB - 14		Dolomita branca (tardia)	0.57	-17.97	12.34	-1.36	2.29	4.94
FHB - 15		Dolomita branca com Py	2.23	-10.62	19.91	6.21	9.86	12.51
FHB - 16		Dolomita sin Mineralização	1.90	-17.61	12.71	-0.99	2.66	5.31
Pamplona	Amostra	Tipo	$\delta^{13}\text{C}\%$	$\delta^{18}\text{O}\%$	$\delta^{18}\text{O}\%$			
	FHB - 21	Dolomita sin Mineralização	0.82	-10.55	19.99	6.29	9.94	12.59
	FHB - 22	Dolomita sin Mineralização	0.29	-12.09	18.40	4.70	8.35	11.00
Cercado	Amostra	Tipo	$\delta^{13}\text{C}\%$	$\delta^{18}\text{O}\%$	$\delta^{18}\text{O}\%$			
	FHB - 31	Dolomita sin Mineralização	0.40	-12.56	17.91	4.21	7.86	10.51
	FHB - 32	Dolomita sin Mineralização	-0.58	-12.14	18.34	4.64	8.29	10.94
	FHB - 33	Dolomita sin Mineralização	-0.65	-10.02	20.53	6.83	10.48	13.13

As composições isotópicas do fluido em equilíbrio com a dolomita hidrotermal (Figura 9.5) das áreas de Pamplona e Cercado, a 200 °C são semelhantes às estimadas para o minério willemítico da Mina de Vazante (valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ entre +7,86‰ a +10,48‰). Os fluidos em equilíbrio com a dolomita do Olho D'Água apresentam um intervalo maior de valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$, associado com as diferentes gerações do mineral, sendo que a dolomita associada com pirita apresenta valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ entre +9,86‰ a +12,25‰, enquanto que o valor de $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ estimado a partir da composição da dolomita pós mineralização é de +2,29‰. Valores intermediários de $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ foram estimados para o estágio de mineralização do Olho D'Água (+2,66‰ a +5,42‰). Assim como nos demais depósitos, observa-se diminuição dos valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ com a evolução paragenética do depósito, considerando-se manutenção da temperatura.

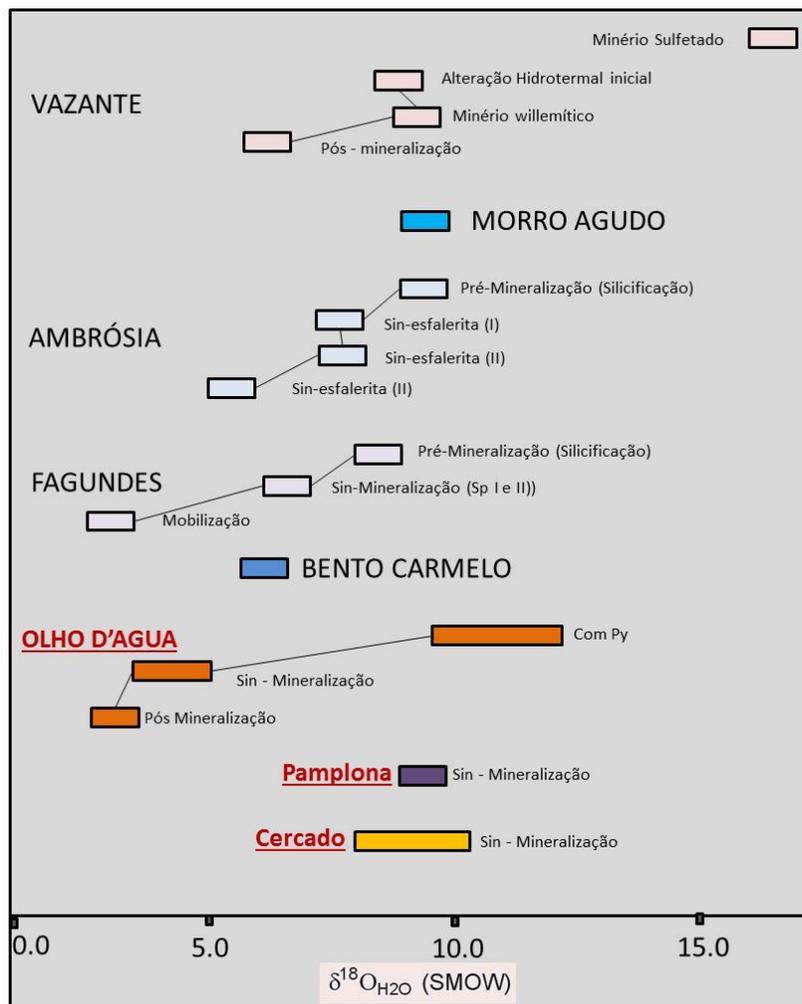


Figura 9. 5. Composições isotópicas de oxigênio médias calculadas, a 200°C, a partir da equação de fracionamento isotópico dolomita-H₂O de Golyeshev *et al.* (1981) para o fluido hidrotermal em equilíbrio com dolomita das áreas de Olho D'Água, Pamplona e Cercado e comparação com valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ dos demais depósitos da Faixa Vazante (Monteiro, 2002), considerando-se a mesma temperatura.

10. DISCUSSÃO

10.1 Relações Estruturais, Químicas e Formação das Brechas Dolomíticas

Para depósitos do tipo MVT, na maioria dos casos, o conduto para circulação dos fluidos mineralizantes não é representado somente por uma falha principal e sim por um conjunto de sistemas de falhas (Leach *et al.*, 2010), que permitem a circulação intensa destes fluidos metalíferos, inicialmente meteóricos, por toda bacia. A reologia dos dolomitos permitiu a instalação de zonas de fraturas e falhas importantes na circulação dos fluidos metalíferos durante a evolução da Faixa Brasília. Adicionalmente, rochas impermeáveis, tais como metamargas e filitos carbonosos, formam grandes barreiras estratigráficas para estes fluidos ricos em metais.

Devido à cobertura regolítica espessa para o segmento sul da faixa Vazante (até 120 m), possíveis estruturas não aflorantes foram delineadas na área de estudo com o auxílio da geofísica (aeromagnetometria - derivada vertical), onde o realce das altas frequências forneceu informações sobre os contatos, discontinuidades e lineamentos regionais, que tem papel fundamental na circulação regional de fluidos basinais.

Com base nestas informações, foi possível caracterizar controles tectônicos para os possíveis condutos dos fluidos hidrotermais (Figura 10.1), sendo:

- Controle NE-SW, paralelos ao alinhamento estrutural da Mina de Vazante, Mina do Extremo Norte, Mina do Cercado e ocorrência zincífera do Mata II.
- Controle ENE-WSW, para as ocorrências zincíferas do Olho D'Água e Pamplona, que convergem ao *trend* NE-SW.
- Controle NW-SE, fraturas provavelmente correlacionadas a zonas com maiores dissoluções presentes na área de estudo.

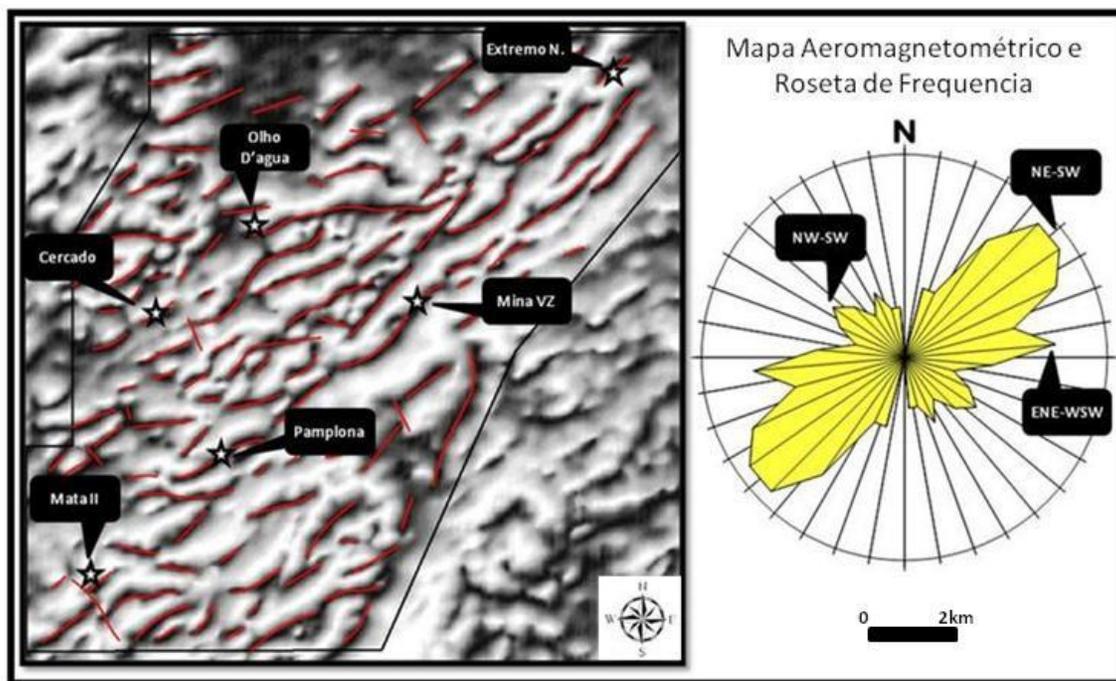


Figura 10. 1. Mapa aeromagnetométrico (derivada vertical) mostrando os principais alinhamentos magnéticos (-----) e ocorrências zincíferas da área de estudo; (direita) Roseta de frequência dos alinhamentos magnéticos preferenciais.

De um modo geral, a formação das principais estruturas e, conseqüentemente, a circulação de fluidos regionais para o segmento sul da faixa Vazante, pode ser resumido na Figura 10.2 e Figura 10.3.

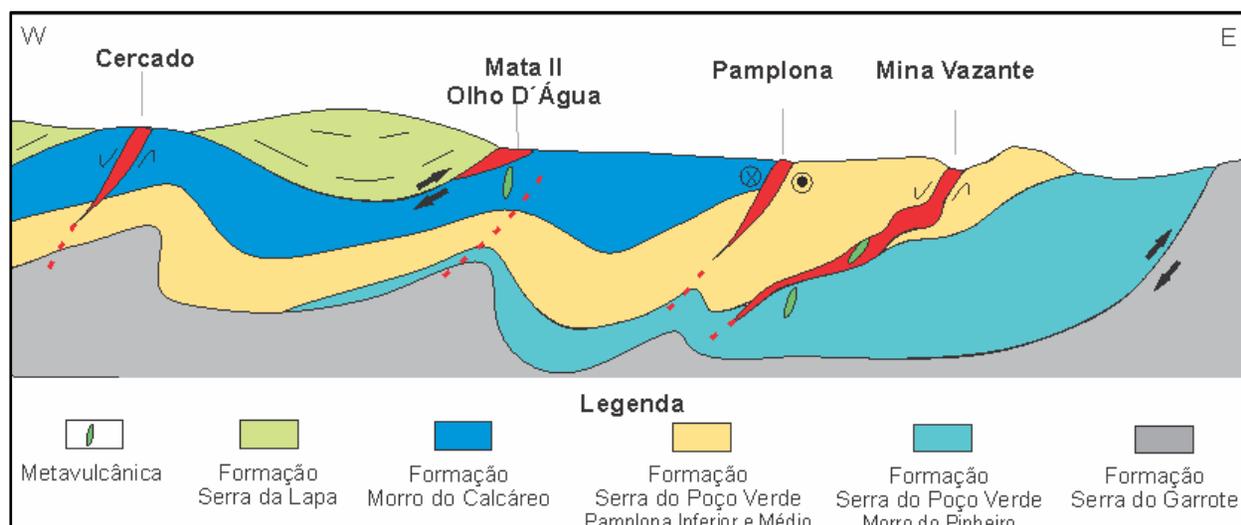


Figura 10. 2. Perfil geológico esquemático (sem escala) para os principais alvos estudados.

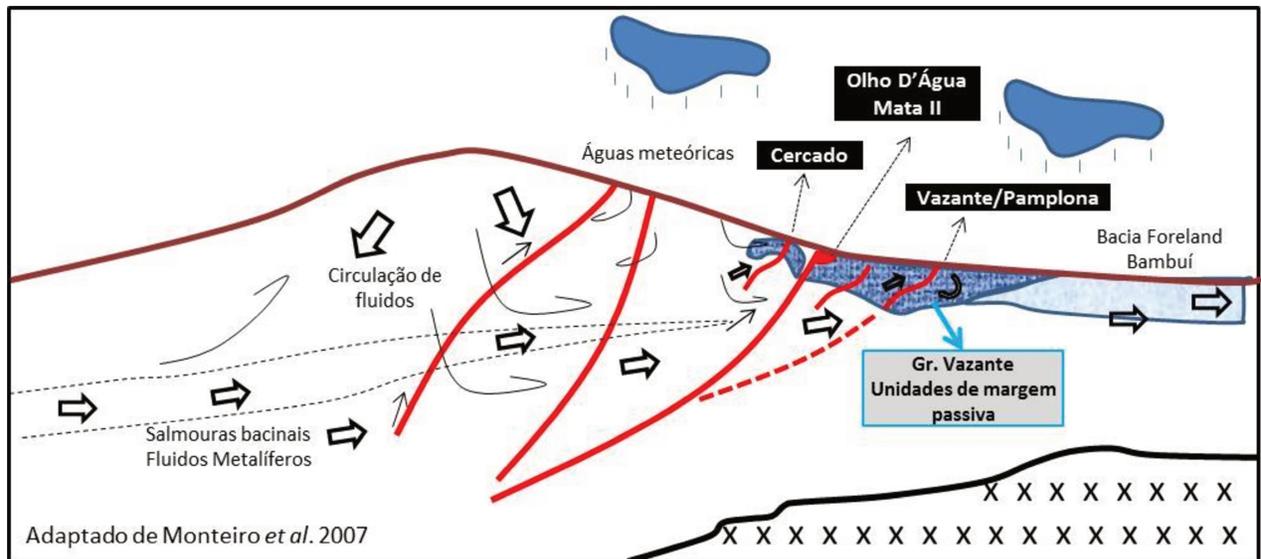


Figura 10. 3. Modelo esquemático (sem escala) para circulação de fluidos regionais e posição dos principais alvos estudado.

Deste modo, este trabalho propõe dois modelos conceituais para a formação das brechas hidrotermais, sendo:

- *Brecha Hidrotermal Estruturalmente Controlada com Relevante Posição Estratigráfica:*

Neste grupo enquadram-se as brechas hidrotermais dolomíticas das ocorrências zincíferas do Olho D'Água e Mata II, correlacionada à fase final compressiva da Faixa Brasília, responsável pelo empilhamento atual da Faixa Vazante.

Neste caso, as brechas estão inseridas em zonas de dilatação e vênulas correlacionadas ao movimento de empurrão, localmente com componente deformacional direcional, ocasionadas por zonas de inflexão local (contato irregular entre rochas pelíticas e carbonáticas) geradas por diferentes condições reológicas entre os dolomitos da Formação Morro do Calcáreo e metapelitos/metamargas da Formação Serra da Lapa. Deste modo, estas brechas apresentam dimensões restritas e não se prolongam por todo o contato entre estas unidades (Figura 10.4).

Estas zonas de dilatação com fraturas e falhas proporcionariam a formação de áreas de alívio de pressão e, conseqüentemente, a migração dos fluidos ascendentes e descendentes. O contato representaria uma barreira física para o fluido hidrotermal (Figura 10.5).

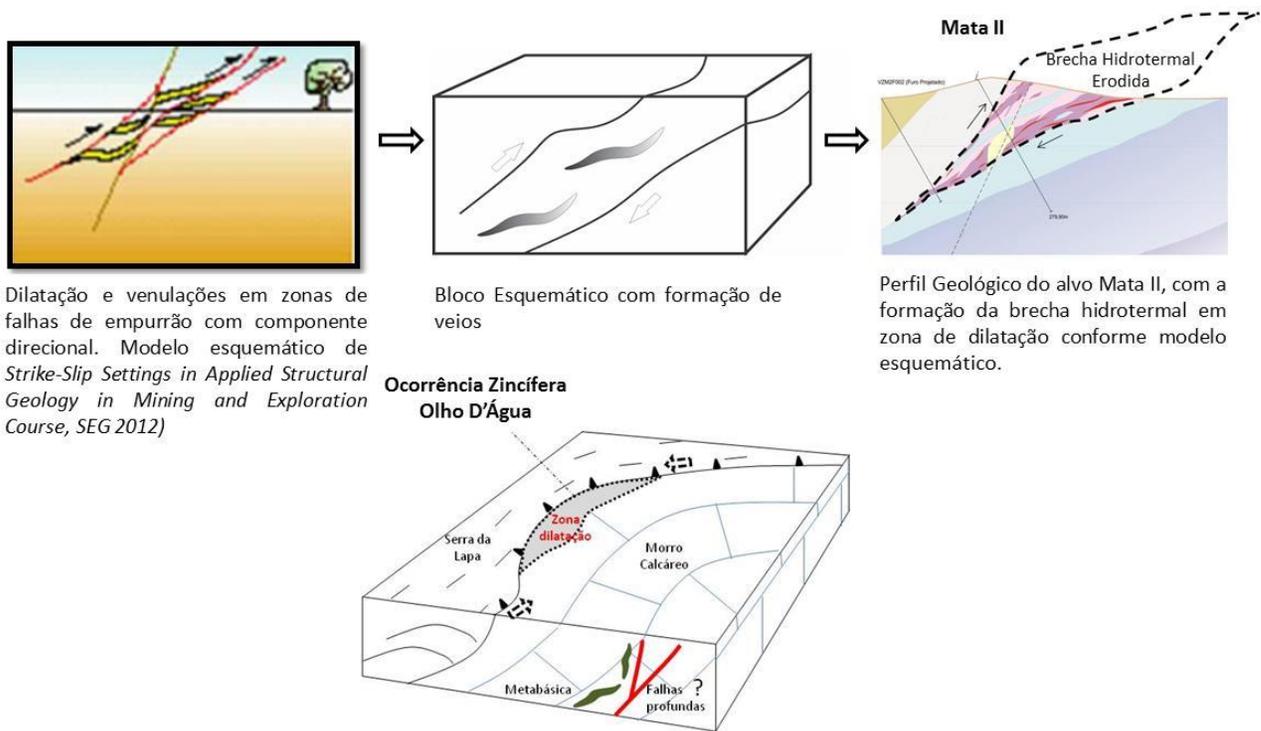


Figura 10. 4. Modelos estruturais para a formação das brechas hidrotermais dos alvos Mata II e Olho D'Água.

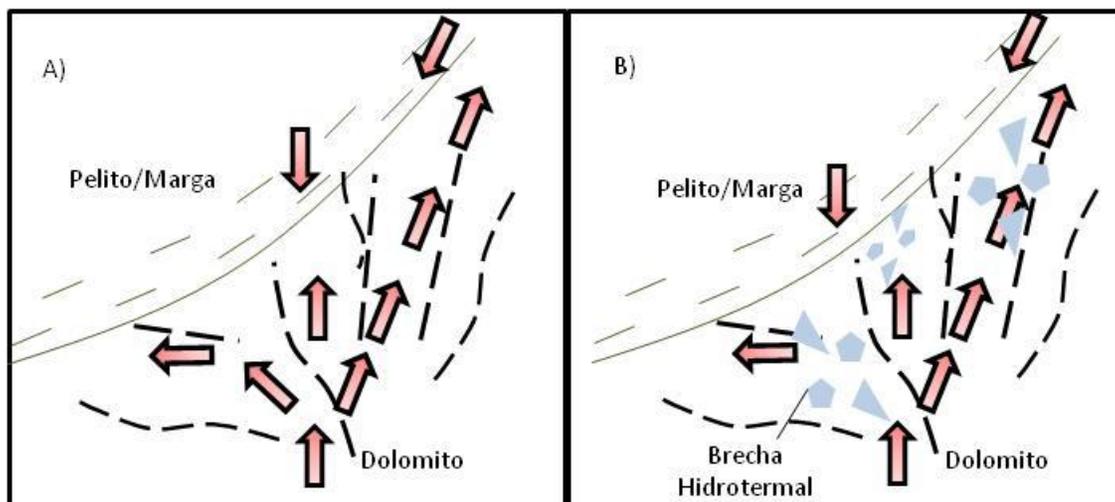


Figura 10. 5. (a) Fluidos bacinais e meteóricos migrando por zonas de alívio de pressão em condições de (b) Desenvolvimento da brecha hidrotermal por hidrofraturamento.

Essa interação entre fluido e rocha encaixante pode ser identificada nos cinco (5) tipos de brechas dolomíticas hidrotermais definidos nas ocorrências zincíferas Mata II e Olho D'Água. De acordo com os dados macro e microscópicos, nota-se que as feições características dos estágios de evolução da brecha hidrotermal dolomítica destas ocorrências poderiam ser atribuídos tanto a condições distintas de pressão de fluidos, e conseqüente hidrofraturamento, como a diferentes graus de interação fluido e rocha (Figura 10.6).

Deste modo, as brechas aqui denominadas do tipo I e tipo II, são representantes da interação com baixas a médias razões fluido/rocha, respectivamente, porém sem hidrofraturamento ($P_{\text{fluido}} < P_{\text{rocha}}$). Os processos hidrotermais neste tipo de brecha podem ser identificados pela presença de vênulas e fraturas preenchidas por Fe-carbonatos (*net-veined breccias*) e pela modificação localizada da cor das rochas que passam a apresentar coloração cinza a rosada (tipo I). Em condições de mais elevada interação fluido/rocha, houve substituição de grande parte da rocha encaixante por minerais carbonáticos ricos em ferro devido aos processos de dissolução e preenchimento, resultando em uma rocha de coloração rosa avermelhada, com as estruturas sedimentares ainda preservadas ou totalmente obliteradas pela alteração hidrotermal mais intensa. A coloração rosa identificada macroscopicamente nos tipos I e II também podem estar associada à oxidação da matéria orgânica e, principalmente, à formação de hidróxidos de ferro.

As brechas do tipo III e IV são caracterizadas por apresentarem os primeiros indícios do hidrofraturamento resultante da quebra dos clastos e implosão, devido às condições de $P_{\text{fluido}} > P_{\text{litostática}}$. Nessas brechas é possível observar a evolução do início da quebra. *Network* de fraturas romperam a rocha encaixante e separaram os clastos de dolomito, com pouco movimento destes fragmentos da rocha (fragmentação “*in situ*”), gerando *cracke breccias*. Evidências de cominuição e dissolução parcial dos clastos podem ser observadas, resultando em uma brecha dolomítica hidrotermal ora matriz, ora clasto suportada. Nas brechas do Tipo III, os clastos estão em parte totalmente hidrotermalizados (rosados) até parcialmente hidrotermalizados (cinzas), localmente com estruturas sedimentares ainda preservadas. A brecha do tipo IV representa um estágio de evolução da brecha mais avançado com elevada interação entre fluido hidrotermal e rocha. É representada por brecha hidrotermal dolomítica l matriz suportada, constituída por clastos de dolomitos totalmente rosados, sem estrutura sedimentar preservada.

A brecha do tipo V (mineralizada em zinco na ocorrência Olho D'Água), de acordo com as observações de campo e petrografia, representaria o estágio mais avançado da interação entre fluido hidrotermal e rocha, resultando em dissolução total da rocha carbonática original, sem a presença de clastos de dolomito, que, possivelmente, foram consumidos durante processos de dissolução da rocha hospedeira da mineralização (dolomito) e obliterado pela substituição da rocha por minerais hidrotermais de textura grossa (Olho D'Água), possivelmente por mecanismos de dissolução e reprecipitação.

No Olho D'Água foram identificados cristais de cerussita ($PbCO_3$), que representa mineral de minério de chumbo supérgeno importante e amplamente disseminado, formado pela ação das águas carbonatadas a partir da galena.

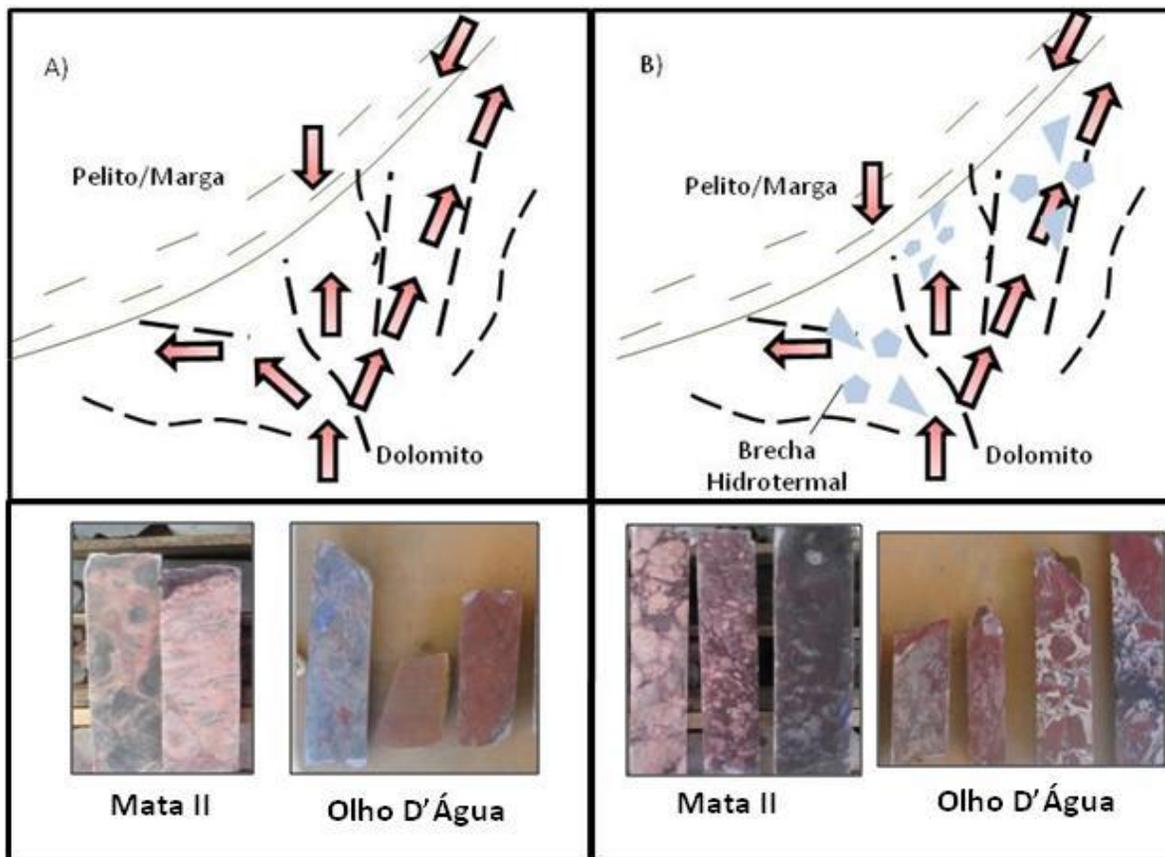


Figura 10. 6. (a) Fluidos basinais e meteóricos migrando por zonas de alívio de pressão em condições de $P_{\text{fluido}} < P_{\text{rocha}}$; (b) Desenvolvimento da Brecha Hidrotermal por hidrofraturamento em condições de $P_{\text{fluido}} > P_{\text{rocha}}$.

Quimicamente, o conteúdo de CaO e MgO diminui durante a evolução dos estágios da brecha hidrotermal devido à dissolução das rochas carbonáticas ainda preservadas nos estágios pré hidrofraturamento (brecha do tipo I e tipo II) com 30% de CaO e 20% de MgO. Porém, no Olho D'Água, a diminuição da concentração destes elementos é menor em comparação com a do Mata II, uma vez que na matriz da brecha hidrotermal pós hidrofraturamento (brechas do tipo III, IV e V) há preenchimento por dolomita branca hidrotermal, permitindo assim conteúdos ainda elevados desses elementos (15-25% de CaO e 10-18% de MgO), ao passo que no Mata II, a brecha do tipo V apresenta valores extremamente baixos, inferiores a 4% de CaO e 1% de MgO.

Quando comparado com as rochas pelíticas da Formação Serra da Lapa, percebe-se que esta apresenta uma concentração de elementos terras raras superior àquelas apresentadas pelos cinco tipos de brecha aqui definidos. No entanto, apresentam o mesmo padrão de distribuição de ETR com leve e discreto enriquecimento de elementos terras raras leves (ETRL) em relação aos pesados. Esse padrão semelhante pode indicar alguma interação do fluido hidrotermal com as rochas metapelíticas que capeiam a ocorrência. A assinatura química do fluido hidrotermal pode refletir a passagem e interação desses com as rochas pelíticas sobrejacentes, uma vez que as rochas metapelíticas apresentam maior conteúdo de elementos traços, metais e ETR do que as brechas hidrotermais dolomíticas. Mineralogicamente, o mineral portador de ETR encontrado nas brechas foram a monazita e xenotima, caracterizado na ocorrência do Mata II.

Os demais enriquecimentos químicos nas rochas alteradas observadas para ambas as ocorrências são: **Fe₂O₃** (hematita), **SiO₂** (quartzo; no caso do Olho D'Água se encontra em zona mais distal da brecha), **V** (comumente correlacionado com o incremento de Fe₂O₃, podendo ser incorporado a estrutura de hematita vanadífera, conforme descrito por Lemos (2011) em estudo das brechas do Extremo Norte da Mina de Vazante), **Pb** (presença de galena no Mata II e cerussita no Olho D'Água), **Na₂O** (condições evaporíticas, conforme trabalho de Oliveira, 2013) e P₂O₅ (apatita/xenotima), além de **Sb, As, Bi e Cd** (enriquecimento hidrotermal, principalmente associados a sulfetos).

No entanto, observa-se que ocorrência Olho D'Água é quimicamente mais rica, tendo um interesse econômico mais elevado, onde o **Zn** é encontrado em concentrações mais elevadas (1-3% de zinco) na brecha do tipo V, formando os minerais de minério willemita e franklinita e também presente na estrutura cristalina da dolomita esparítica e clorita, semelhante ao descrito na Mina de Vazante por Monteiro (1997; 2002). Concentrações mais elevadas de **Ag, Se, Hg e U**

também são observadas na ocorrência zincífera Olho D'Água, evidenciando um fluido com mais aporte de metais em relação ao Mata II.

Adicionalmente, a presença de estilólitos na rocha dolomíticas, bem como nos cristais de quartzo da brecha do tipo V (Mata II), além de hematita estirada e deformada (Olho D'Água), evidenciam processos tectônicos deformacionais, de componente contracional durante a formação da brecha. Em fase final rúptil, tem-se a formação de veios preenchidos por dolomita, cortando todo o arranjo acima descrito.

Uma particularidade do alvo Olho D'Água é a presença de rocha metabásica, o que pode sugerir relação desta brecha hidrotermal com uma falha de origem profunda (não aflorante), não interceptada na ocorrência do Mata II, semelhante ao que acontece na Mina de Vazante (Monteiro 1997; 2002), na qual *boudins* de rochas metabásicas são também reconhecidos.

- *Brecha Hidrotermal Estruturalmente Controlada:*

Neste grupo enquadram-se as brechas hidrotermais dolomíticas das ocorrências zincíferas do Pamplona e Mina do Cercado, controladas por falhas transcorrentes e normais com direção NE. Neste contexto, a circulação de fluidos e a mineralização foram controladas e restritas a zonas de falhas normais e transcorrentes em rochas carbonáticas (Figura 10.7a, 10.7b, 10.7c, 10.7d). O zoneamento da brecha tectônica identificado no Pamplona e Mina do Cercado é mais discreto e menos desenvolvido em relação às brechas hidrotermais das ocorrências zincíferas do Mata II e Olho D'Água, possivelmente devido ao fluxo altamente canalizado dos fluidos hidrotermais.

A zona de brecha apresenta evidências de deformação rúptil-dúctil marcada pela presença de minerais estirados, planos S-C, indicadores cinemáticos tipo Sigma, estrias e degraus de falha. Em ambos os casos, a estrutura mineralizada corta níveis estratigráficos distintos. Na Mina do Cercado, a ocorrência de dolomito nesta porção oeste da faixa carbonática, pode ser explicada pela presença de dobras abertas e suaves que afetam o Grupo Vazante devido ao fechamento da Faixa Brasília. A falha do Cercado está inserida em uma dessas janelas estratigráficas (rochas carbonáticas), controladas por estruturas de caráter normal com continuidade para norte, como evidenciado por brechas hematíticas, porém com movimento relativo de blocos muito discreto, formando apenas uma zona de bandas de deformação. Ao Sul, a continuidade da falha está inserida nas rochas metapelíticas da Formação Serra da Lapa, porém devido ao comportamento

dúctil desta unidade, a falha é amortecida, com evidências apenas locais de formação de brecha com willemita e hematita. No entanto, de acordo com a geometria identificada na Mina do Cercado, não se descarta a possibilidade de existência de falhas normais paralelas à falha Cercado, cobertas por rochas impermeáveis da Formação Serra da Lapa (Figura 10.7d).

Ao microscópico (Figura 10.7e e 10.7f), esta deformação é representada por uma foliação milonítica, evidenciada por orientação e estiramento mineral, sem estrutura sedimentar preservada, willemita com indicador cinemático do tipo sigma, microfraturas de cisalhamento e grãos microfraturados devido a deslizamento friccional e rotacional.

Quimicamente, diferentemente ao que ocorre nas ocorrências do Mata II e Olho D'água, o contraste observado na concentração dos elementos químicos entre as rochas encaixantes, rochas hidrotermalizadas e mineralizadas podem refletir canalização do fluido no conduto de falha, com menor interação com as rochas encaixantes. Diferentes estágios de dolomita branca, willemita e hematita identificados em petrografia são indicativas de diferentes pulsos/fases hidrotermais e evidenciam estruturas rúpteis tardias a formação da brecha mineralizada.

No entanto, os principais enriquecimentos químicos das rochas alteradas para estas ocorrências são: **Fe₂O₃** (principalmente relacionado com a formação de hematita); **SiO₂** (quartzo); **Zn** (é encontrado em concentrações mais elevadas de até 21% de zinco no Cercado e 12% de zinco na ocorrência Pamplona, formando os minerais de minério willemita e franklinita e também presente na estrutura cristalina da dolomita esparítica e da clorita, bem como em veios sulfetados tardios de esfalerita semelhante ao descrito na Mina de Vazante por Monteiro, 1997; 2002, e Slezak 2012); **Pb** (encontrado na estrutura de veios sulfetados tardios com galena e, adicionalmente, em meio aos cristais de hematita e franklinita. Na Mina do Cercado, foi possível identificar um óxido de manganês e chumbo, provavelmente coronadita - $Pb(Mn)_8O_{16}$, encontrados em veios hidrotermais ou *hot springs*, bem como o produto de alteração de depósitos de manganês, de origem secundária. Na ocorrência Pamplona, o mineral de origem secundária encontrado portador de chumbo foi a piromorfita $[Pb_5(PO_4)_3Cl]$); **Ag** e **Cu** (apesar de não encontrado em escala microscópica, a prata e o cobre são comumente encontrados e descritos na Mina de Vazante por Monteiro (1997, 2002), Lemos (2011) e Slezak (2012) na forma de veios sulfetados tardios de prata nativa/jalpaita e covellita (CuS), que cortam o minério willemítico).

Outros elementos que formam a assembleia química hidrotermal principal das brechas dolomíticas hidrotermais são: **As**, **Hg**, **Sb** (comumente associados a sulfetos), **Ba** (barita) **Se**, **V**,

Na₂O, onde o V pode estar associados a hematita vanadífera e o Na₂O₃ às condições evaporíticas às quais as rochas hospedeiras foram formadas.

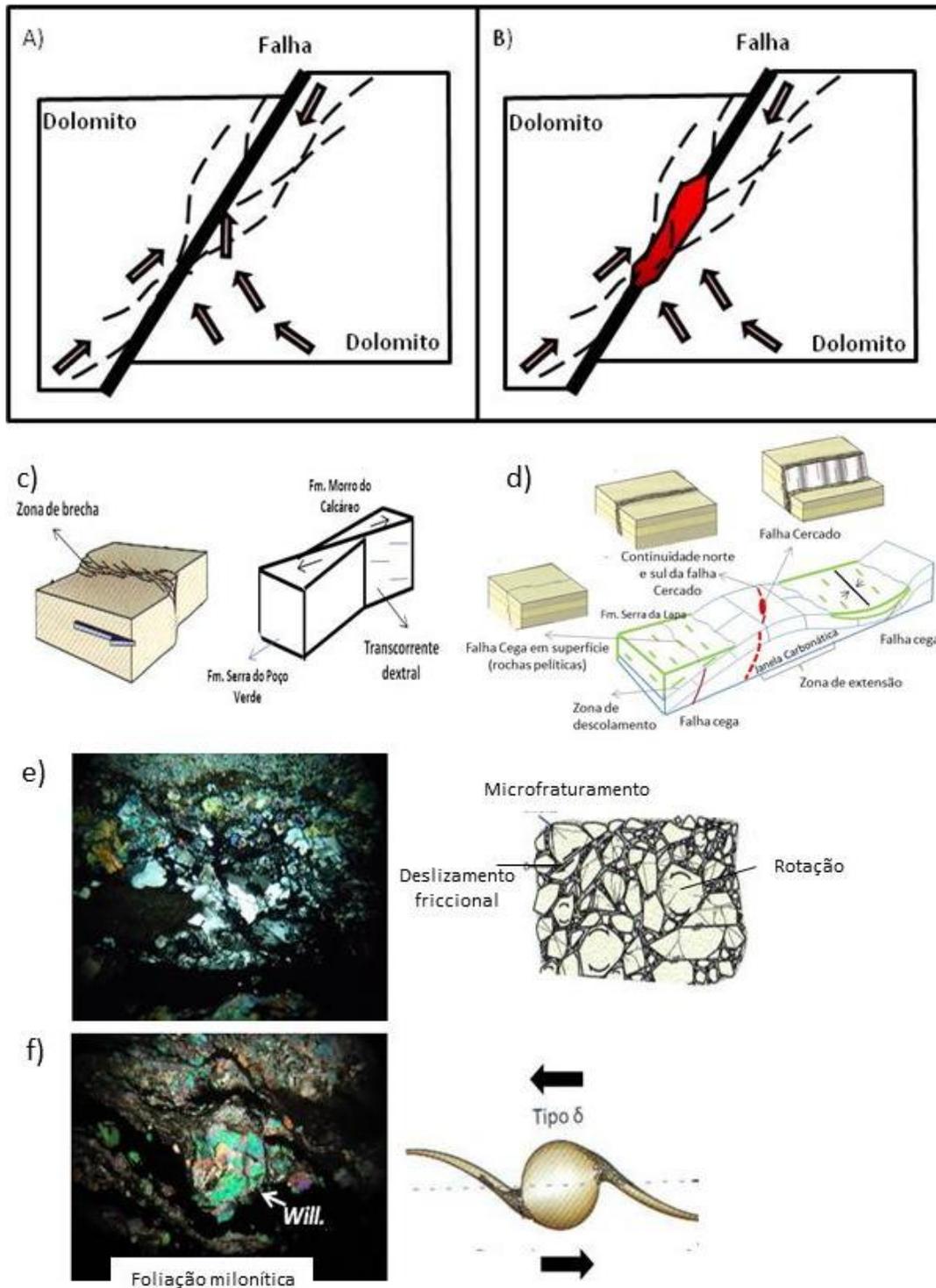


Figura 10. 7. (a) Fluidos basinais e meteóricos migrando para zona de falha; (b) Desenvolvimento de brecha dolomítica e mineralização restrita a zona de falha; (c) modelo estrutural para o alvo Pamplona; (d) Modelo estrutural para a Mina do Cercado; (e) Textura milonítica em dolomitos no Alvo Pamplona; (f) Estrias de falha e textura milonítica na Mina do Cercado; (g, h) evidências de deformação em escala microscópica.

10.2 Considerações Sobre Condições de Formação da Willemita

A formação dos principais minerais encontrados nas ocorrências zincíferas, tais como willemita, hematita e quartzo, está diretamente relacionada com a variação da temperatura, pH e fugacidades de O_2 , CO_2 e S_2 do fluido hidrotermal (Brugger *et al.*, 2003). Durante a passagem do fluido, suas características físico-químicas podem ser modificadas por sua interação com a rocha e/ou devido à mistura de fluidos meteóricos e/ou bacinais. Assim, dependendo de sua evolução, fluidos de uma mesma origem, em diferentes condições, podem favorecer a precipitação de um conjunto de minerais diferentes.

Nesse estudo foram estimadas temperaturas de 140 a 260 °C para a formação das principais fases minerais presentes nas brechas (hematita, dolomita e quartzo), com um valor mais elevado (290 °C) referente a um par dolomita-hematita da área de Olho D'Água. O valor mais elevado poderia refletir a associação de diques básicos hidrotermalizados nessa área. O intervalo geral de valores é condizente com os dados da literatura, que apontam para temperatura de formação da willemita da Mina de Vazante entre 160 e 250 °C, com base no uso de isótopos estáveis e inclusões fluidas (Monteiro, 2002).

Segundo estimativas realizadas por Brugger *et al.* (2003), condições de estabilidade da willemita em equilíbrio com hematita, em temperatura de 300 °C, seria esperada apenas em condições de pH acima de 6 e fugacidade de O_2 elevada (Figura 10.8).

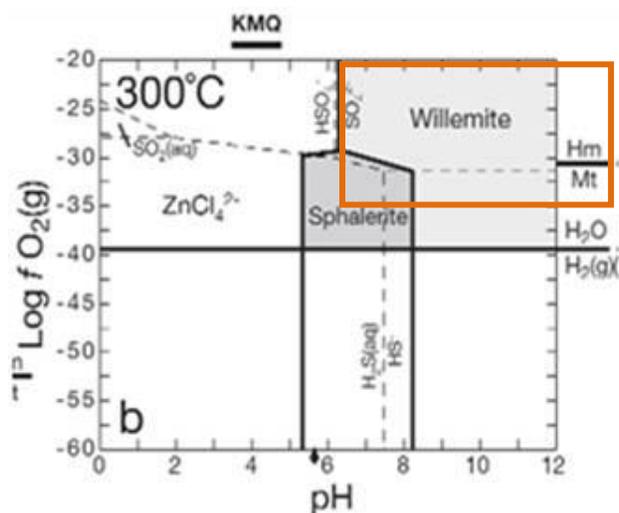


Figura 10. 8. Condições de precipitação de willemita e hematita a 300 °C, de acordo com Brugger *et al.* (2003).

Em condições de temperaturas mais baixas (100°C), o campo de estabilidade da willemita em equilíbrio com hematita se estenderia até condições um pouco mais baixas de fugacidade de O₂, nas mesmas condições de pH (Figura 10.9). Não obstante, mesmo em condições de pH elevado, esfalerita seria estável em detrimento de willemita em condições de fugacidade de O₂ muito baixas.

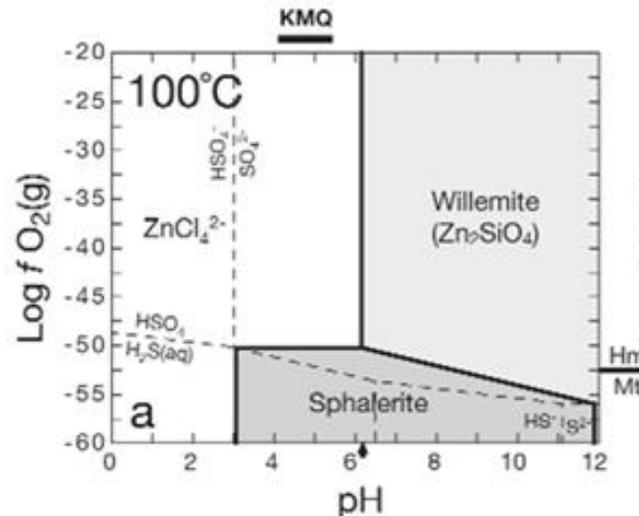


Figura 10. 9. Condições de precipitação de willemita e hematita a 100 °C, de acordo com Brugger *et al.* (2003).

Em condições de pH neutro (=7), a temperatura exerceria grande influência na solubilidade da willemita. Enquanto a baixas temperaturas (< 100 °C) a solubilidade é alta, em condições de 150 a 250 °C, a precipitação de willemita e da zincita seria preferencialmente favorecida em relação à esfalerita, desde que em condições oxidantes, indicadas por $\log(f\text{CO}_2/f\text{CH}_4) > 15$ (Figura 10.10). Em condições de pH ácido (=5), variações na temperatura não exerceriam influência importante na precipitação da willemita e zincita, mas decréscimo de temperatura representaria mecanismo bastante efetivo de precipitação da esfalerita, principalmente em condições mais redutoras (Figura 10.10), como tipicamente observados em depósitos de Zn-Pb hospedados em rochas carbonáticas, formados a temperaturas <150°C nos depósitos do tipo Mississippi Valley.

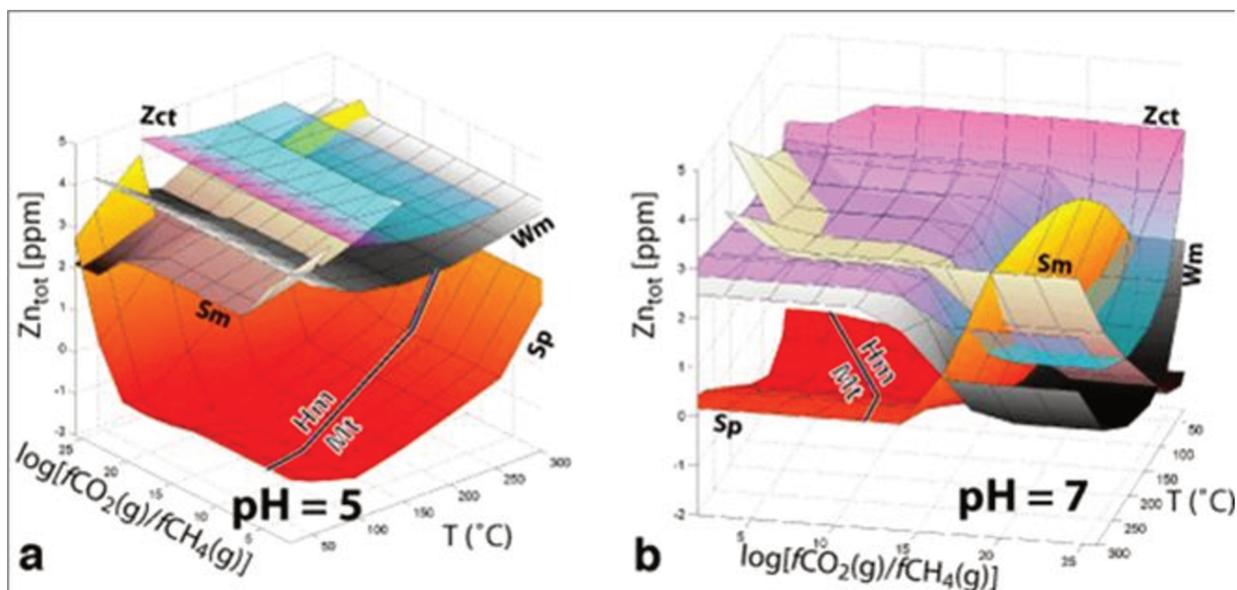


Figura 10. 10. Curvas de solubilidade de fases de zinco, mostrando as condições favoráveis à precipitação de willemita e zincita, smithsonita e esfalerita em condições de pH=5 e pH=7 (Brugger *et al.*, 2003).

Appold e Monteiro (2009), a partir de modelagem experimental numérica, mostram que a mistura de um fluido quente ($> 200^{\circ}\text{C}$), moderadamente salino, ácido, com baixo conteúdo de enxofre, metalífero, com um fluido meteórico frio, diluído, básico, pobre em metais pode produzir associação e distribuição mineral coerente com os padrões do depósito de Vazante, considerando-se o transporte do Zn como ZnCl_4^{2-} e do Fe como FeCl_3 (Riveros & Dutruziac, 1997 e Brugger *et al.*, 2003). Condições análogas a essas podem ser sugeridas para as áreas de estudo. Contudo, o grau de mistura entre os diferentes fluidos ou de interação entre fluidos metalíferos, ácidos, e as rochas hospedeiras carbonáticas podem ter condicionado a maior ou menor precipitação de willemita nos alvos de estudo, uma vez que o aumento de pH parece ser um fator crítico para a mineralização willemítica.

As condições de salinidade relativamente elevadas dos fluidos podem estar associadas ao ambiente evaporítico no qual as rochas da região de Vazante estão inseridas. Segundo Oliveira (2013), as rochas dolomíticas da Formação Serra do Poço Verde, membros Pamplona Inferior e Médio, foram formadas em ambiente sabkha, em condições oxidantes e pH neutro a levemente básico, e apresentam baixo conteúdo de enxofre, de modo análogo aos sedimentos de supramaré em Abu Dhabi descritos por Bontognali *et. al.* (2010). Dessa forma, interação dos fluidos hidrotermais com as rochas hospedeiras poderia ter resultado em maior salinidade do fluido a partir da dissolução de minerais evaporíticos formados no ambiente sabkha. Conseqüentemente, o

fluido modificado por processos de interação com essas unidades geológicas apresentaria maior potencial para transportar metais como complexos cloretados.

Condições de altas salinidades nos fluidos são evidenciadas pela alta concentração de Na₂O em rochas dolomíticas próximas à Mina do Cercado (10% de Na₂O) e pela presença de dolomita radial diagenética indicativa de ambiente marinho e nódulos de sílica provavelmente originados pela substituição de nódulos de barita, que em alguns casos podem indicar ambiente evaporítico.

10.3 Assinaturas Isotópicas de Oxigênio e Carbono: Considerações Sobre Processos Hidrotermais e Origem dos Fluidos

As análises isotópicas de rocha total de dolomitos pouco alterados revelam ampla variação dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ (-0,51‰ e +2,72‰) e de $\delta^{18}\text{O}$ (+22,09‰ e +28,13‰).

Estas variações, de acordo com Monteiro (2002), podem refletir heterogeneidades relacionadas às diferentes fácies das formações Morro do Calcáreo e Serra do Poço Verde. Segundo Taylor (1974), a diminuição da temperatura dos fluidos causa aumento dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ do mineral precipitado, assim como a hipersalinidade ocasionada pela evaporação. Assim, considerando-se temperaturas relativas ao ambiente diagenético, os valores mais elevados $\delta^{18}\text{O}$ podem refletir condições análogas à do ambiente sabka, como proposto por Oliveira (2013) para a Formação Serra do Poço Verde.

Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ são bons indicadores de condições redox dos fluidos a partir dos quais formaram-se os minerais carbonáticos. Os microorganismos, em seus processos metabólicos, absorvem e fixam preferencialmente o ^{12}C , o que provoca o aumento da concentração de ^{13}C nas rochas carbonáticas, elevando os valores de $\delta^{13}\text{C}$ dessas rochas. Ou seja, os valores mais elevados de $\delta^{13}\text{C}$ (+2,72‰) das rochas hospedeiras mais preservadas podem refletir período de maior fixação de ^{12}C por microorganismos, associado a condições mais anóxicas. Entretanto, os valores mais baixos (-0,51‰) podem refletir oxidação da matéria orgânica, uma vez que nesse processo o CO₂ liberado enriquece o ambiente em ^{12}C , o que provoca consequente diminuição dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ das fases carbonáticas (Taylor, 1974).

Por outro lado, as variações nas assinaturas isotópicas dos dolomitos podem resultar também de processos pós-deposicionais superpostos, diagenéticos ou hidrotermais, favorecidos por condições de alta permeabilidade nas fácies de recife (Monteiro 2002). Nota-se que algumas rochas encaixantes, apesar de macroscopicamente apresentarem feições preservadas da rocha original, apresentam assinatura isotópica indicativa de processos de recristalização. Exemplos são

verificados na área do Mata II, onde os valores de $\delta^{18}\text{O}$ (+22.09‰) são menores que aqueles das rochas preservadas, o que poderia ser explicado por interação com fluidos aquecidos.

Adicionalmente, as rochas carbonáticas, por apresentarem fases minerais muito reativas, mesmo após sua estabilização associada à diagênese meteórica e de soterramento, podem ser fortemente modificadas ao redor de depósitos minerais, devido à acidificação dos fluidos relacionada com a precipitação de sulfetos, que causa dissolução e substituições, e ao aquecimento associado à migração de fluidos hidrotermais, responsável por recristalização, além de modificações nas assinaturas geoquímicas destas rochas (Savard & Kontak, 1998). A composição dos isótopos de oxigênio representa um dos parâmetros mais sensíveis a estes processos de alteração. De forma geral, os dolomitos hidrotermalizados tendem a apresentar razões de oxigênio menores que os dolomitos preservados, refletindo a interação da rocha com o fluido hidrotermal, tipicamente mais empobrecido no isótopo ^{18}O , assim como razões fluido-rocha e condições de maior temperatura que as típicas da diagênese (Monteiro, 2002).

A variação isotópica observada no Olho D'Água e Pamplona, caracterizada pelo decréscimo gradual dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ nos estágios de alteração hidrotermal e mineralização, evidenciam processo de interação fluido-rocha mais intenso, refletindo tanto a composição isotópica inicial da rocha e do fluido hidrotermal, como condições de temperatura e razões fluido-rocha (W/R). Na Mina do Cercado, entretanto, há forte contraste dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ das rochas encaixantes e mineralizadas, evidenciando baixa interação fluido-rocha, possivelmente devido à canalização dos fluidos diretamente ao longo do plano de falha. Nesse caso, a composição isotópica das rochas mineralizadas reflete principalmente aquela dos minerais hidrotermais formados diretamente a partir dos fluidos hidrotermais e as condições físico-químicas que condicionaram a precipitação de fases hidrotermais, mas a mudança gradual da composição isotópica das rochas hospedeiras não é verificada.

Para a ocorrência Mata II, como o estágio de alteração hidrotermal mais intensa resulta em dissolução total da rocha carbonática, não foi possível detectar sinal desse processo.

A distribuição de valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$ das rochas mineralizadas da Mina do Cercado define uma tendência de covariância isotópica negativa, na qual os maiores valores de $\delta^{18}\text{O}$ correspondem aos menores de $\delta^{13}\text{C}$, sugestivos de mecanismos de interação fluido-rocha e progressivo resfriamento do fluido. Outro aspecto observado foi o decréscimo dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ nas rochas mineralizadas da Mina do Cercado, que apresentam valores de $\delta^{13}\text{C}$ de 0‰ até -

4‰. Este baixo valor de $\delta^{13}\text{C}$ ($< 0\text{‰}$) pode refletir uma fonte de carbono isotopicamente leve, relativa a processos de oxidação de matéria orgânica, não presente inicialmente nas rochas hospedeiras dolomíticas. Nesse caso, pode-se supor que fluidos descendentes, que percolaram unidades ricas em matéria orgânica, contribuíram para o sistema hidrotermal. Esta contribuição também é identificada nas demais ocorrências do Mata II e Olho D'Água, e seriam relacionadas provavelmente com os metapelitos sobrejacentes pertencentes à Formação Serra da Lapa.

Os diferentes valores de $\delta^{18}\text{O}$ da dolomita hidrotermal variam principalmente em função da temperatura e da composição isotópica dos fluidos a partir dos quais se precipitaram. Na Faixa Vazante, os depósitos sulfetados tendem a apresentar dolomita hidrotermal com valores de $\delta^{13}\text{C} < 0\text{‰}$, como é o caso do depósito de Fagundes, Ambrósia e Morro Agudo (Monteiro, 2002). Por sua vez, minerais carbonáticos do depósito willemítico de Vazante apresentam predominantemente valores de $\delta^{13}\text{C}$ positivos. Nos casos estudados, a assinatura de $\delta^{13}\text{C}$ ($< 0\text{‰}$) da dolomita na Mina do Cercado, se assemelha mais com as dos depósitos sulfetados. Isso poderia ser atribuído à uma maior contribuição de fluidos oxidantes descendentes que interagiram com as rochas metapelíticas (filitos pretos carbonosos) sobrejacentes, como parece ser o caso dos depósitos sulfetados.

Nos casos das ocorrências zincíferas Pamplona e Olho D'Água, os valores de $\delta^{13}\text{C} > 0\text{‰}$ se assemelham com aqueles do depósito de Vazante. Os valores mais baixos de $\delta^{18}\text{O}$ ($< 15\text{‰}$) como os identificados em minerais carbonáticos do Olho D'Água podem sugerir para este caso temperaturas mais elevadas para os fluidos a partir dos quais se formou a dolomita sin-mineralização, o que poderia ser um efeito da presença das rochas metabásicas.

As composições isotópicas estimadas para os fluidos em equilíbrio com hematita e quartzo do alvo Mata II pode evidenciar mistura de fluidos hidrotermais. Os fluidos com menores valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluido}}$ (-1,3‰ a 4,2‰) apresentam assinatura mais próxima daquela dos fluidos meteóricos modificados. O segundo fluido é bastante enriquecido em $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluido}}$ (7,7‰ a 12,1‰) e pode refletir um fluido formacional ou metamórfico resultante de devolatilização de unidades sedimentares. Alternativamente, os valores mais elevados de $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluido}}$ estimados para o Alvo Mata II podem refletir fluido meteórico, com composição similar a do primeiro, porém de temperatura mais baixa.

Na área de Olho D'Água, o conjunto de valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluido}}$ (2,2‰ a 4,8‰) estimados a partir de hematita, sugere a predominância de fluidos meteóricos modificados, seja por

mecanismos de interação fluido-rocha (fluidos formacionais) ou por mistura com fluidos metamórficos. Adicionalmente, alguma mistura com fluidos magmáticos poderia ser sugerida pela associação de diques básicos hidrotermalizados na área de Olho D'Água. Essa última possibilidade também poderia explicar as temperaturas mais elevadas calculadas (290 °C) para essa área, que também reflete-se em valor mais elevado de $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluido}}$ (8,3‰), estimado para um par mineral.

Adicionalmente, no Olho D'Água, observa-se decréscimo dos valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ com a evolução paragenética do depósito. A dolomita de bolsões com pirita, formada em estágios iniciais, possivelmente formou-se a partir de fluidos ($\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = +9,86\%$ a $+12,25\%$) formacionais ou em condições de menor temperatura. Os valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$, calculados a partir da composição isotópica da dolomita, a 200 °C, relativos ao estágio de mineralização são menores ($+2,66\%$ a $+5,42\%$), em relação aos estimado para o estágio de mineralização zincífera nos demais depósitos.

Na área de Pamplona, valores menores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluido}}$ (-4,5‰) relacionam-se à estágio de temperatura muito baixa (62 °C), com forte influência de fluidos superficiais, meteóricos. Fluidos hidrotermais com valores mais elevados de $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluido}}$ (11,4 a 11,7‰) poderiam ser resultantes de maior interação com unidades pelíticas em comparação com os fluidos predominantes no Alvo Olho D'Água ($\delta^{18}\text{O}_{\text{fluido}} = 2,2\%$ a 4,8‰).

Considerando-se a composição isotópica de oxigênio calculada para o fluido em equilíbrio com as fases de ganga presentes nas brechas hidrotermais (dolomita, hematita e quartzo) e tendo como base que o valor de δD calculado para este fluido a partir da composição isotópica da clorita da Mina de Vazante (-33,47‰; Monteiro, 2002), o conjunto de dados indica tanto a contribuição de fluidos isotopicamente pesados, resultantes de interação ou devolatização de unidades metapelíticas, como meteóricos de baixa latitude menos modificados para o(s) sistema(s) hidrotermal(is) (Figura 10.11). Evidências de decréscimo de temperatura e mistura progressiva desses fluidos é também sugerida.

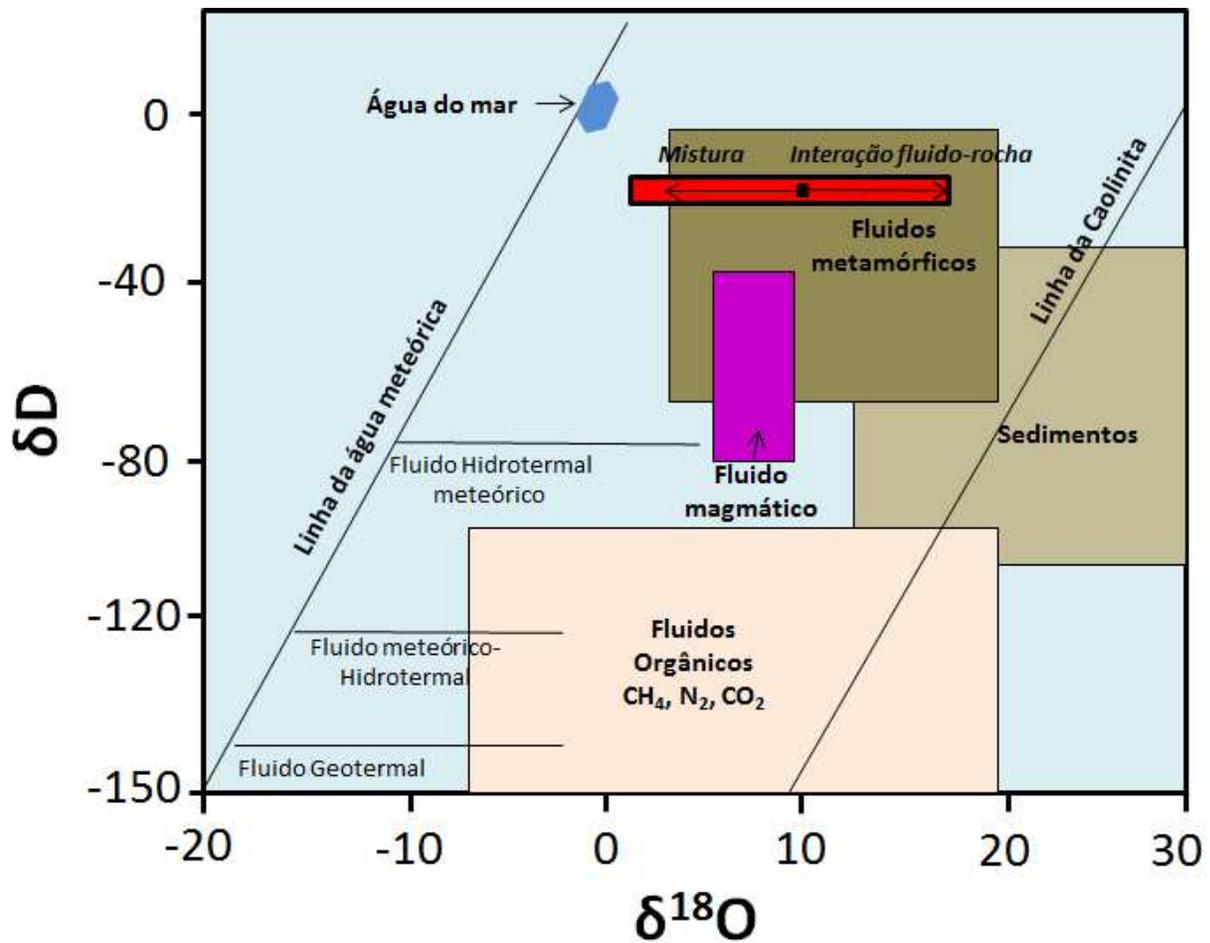


Figura 10. 11. Composição isotópica calculada, a 200 °C, para os fluidos em equilíbrio com diferentes fases minerais associadas às brechas hidrotermais (quartzo, hematita e dolomita) e comparações com campos para água do mar, meteóricas, metamórficas, magmáticas e sedimentos (Sheppard, 1986).

11. CONCLUSÕES

As ocorrências zincíferas não sulfetadas do Olho D'Água, Mata II, Pamplona e Mina do Cercado associam-se com a geração e transporte de fluidos hidrotermais em larga escala, controlados pela atividade tectônica principalmente relacionada à fase final compressiva da Faixa Brasília (Mata II e Olho D'Água), responsável pelo empilhamento atual da Faixa Vazante, e com o desenvolvimento de zonas de falhas normais e transcorrentes rúpteis-dúcteis (Pamplona e Cercado).

Os tipos principais de brechas hidrotermais (tabela 11.1) são estruturalmente controladas (Pamplona e Cercado), mas diferenciam-se devido ao controle estratigráfico também importante no caso das ocorrências de Mata II e Olho D'Água. Essas últimas apresentam dimensões restritas e inserem-se em zonas de dilatação no contato entre filitos carbonosos e metamargas da Formação Serra da Lapa e os dolomitos da Formação Morro do Calcáreo, com presença de rocha metabásica apenas no Olho D'Água.

Nas ocorrências de Mata II e Olho D'Água, processos de interação fluido-rocha resultaram em alteração hidrotermal dos dolomitos, revelada por cor rósea a avermelhada, decorrente de substituição da rocha por dolomita hidrotermal com inclusões de óxidos/hidróxidos de ferro. Processos de hidrofraturamento, cominuição e dissolução parcial a total dos clastos podem ser observadas, sendo acompanhados por diminuição nas brechas, em relação aos dolomitos menos alterados, dos conteúdos de CaO e MgO e aumento relativos de Fe₂O₃, SiO₂, V, Sb, As, Bi, Cd, P₂O₅ e ETRL. Enriquecimento em Hg, Zn e Pb foram também observados no Olho D'Água. Essas mudanças composicionais devem-se à formação de minerais hidrotermais que cimentam as brechas, e incluem hematita, clorita zincífera e apatita. Adicionalmente, quartzo, calcedônia, barita, feldspato potássico, apatita, zircão, xenotima, monazita, galena, covellita e pirolusita foram identificadas na ocorrência Mata II, enquanto no Olho D'Água a brecha é mineralizada e apresenta além de willemita e franklinita, dolomita branca zincífera e cerussita.

Nas ocorrências zincíferas do Pamplona e Mina do Cercado, as zonas de brecha são controladas por falhas transcorrentes destrais (N70E/55NW) e normal (N35E/75NW) respectivamente. Halos de alteração hidrotermal representados por dolomitos róseos silicificados e milonitizados são restritos, sugerindo fluxo canalizado de fluidos ao longo das falhas. As zonas de brecha apresentam evidências de deformação rúptil-dúctil marcada pela presença de minerais estirados e orientados ao longo da foliação milonítica, tais como a hematita e dolomita,

indicadores cinemáticos tipo Sigma em willemita, estrias, degraus de falha, microfraturas de cisalhamento e grãos microfraturados devido a deslizamento friccional e rotacional.

A evolução das brechas foi acompanhada nas quatro áreas por enriquecimentos relativos de Fe₂O₃, SiO₂, V, ETR, Sb, As, Bi, P₂O₅, Pb, V, Ba, Cd, SrO, Na₂O e Cr₂O₃ (MII); de Fe₂O₃, Zn, Pb, As, Hg, Sb, V, ETR, P₂O₅, Cd, Ag, Se, Bi, Co, U (OD); de Fe₂O₃, SiO₂, Zn, Pb, As, Hg, Sb, Ba, Se, Ag, V, Na₂O, Cu (CC) e de Fe₂O₃, SiO₂, Zn, Pb, As, Hg, Sb, Ba, Se, Ag, V, Cu, Cd, Na₂O (PP). No entanto, as variações químicas em cada área permitiram definir as assinaturas da mineralização e, conseqüentemente, elementos farejadores para zinco, definidos como Zn-Pb-As-Sb-ETR-Co-Se-V-Cd-Ag (Olho D'Água); Zn-Pb-Se-Na₂O-As-Ag-Cu (Cercado) e Zn-Pb-Se-Na₂O-As-Ag-Cu-Hg (Pamplona), não sendo observada forte correlação entre zinco e os demais elementos na área de Mata II

As brechas mineralizadas são constituídas por hematita, dolomita e clorita zincíferas, willemita, óxidos/hidróxidos de ferro e, subordinadamente, franklinita, coronadita, quartzo, sericita e zincita, além de esfalerita e galena inclusas na willemita e em vênulas tardias que cortam a zona mineralizada, caso da Mina do Cercado. Diferentes gerações de dolomita branca e hematita são indicativas de diferentes pulsos e/ou fases hidrotermais e evidenciam estruturas rúpteis tardias à formação da brecha mineralizada.

Os dados isotópicos sugerem o estabelecimento de sistemas hidrotermais de temperatura baixa a intermediária (140 a 260 °C), que podem refletir fontes comuns de fluidos e migração regional de fluidos. Possíveis fontes de metais nesse cenário podem ser derivadas de folhelhos ou argilitos acumulados durante a formação da bacia, que seriam posteriormente lixiviados pelos fluidos hidrotermais profundos formando complexos iônicos cloretados durante o soterramento, diagênese e metamorfismo, e seriam transportados juntamente com fluidos ao longo de unidades permeáveis, descontinuidades e falhas. Condições favoráveis para lixiviação e transporte de metais podem ser derivadas da interação local dos fluidos com as rochas dolomíticas da Formação Serra do Poço Verde, membros Pamplona Inferior e Médio, formados em ambiente sabkha, uma vez que a dissolução de minerais evaporíticos pode contribuir para o aumento da salinidade do fluido.

Na Mina do Cercado, covariância isotópica negativa definida pela correlação dos maiores valores de $\delta^{18}\text{O}$ com os menores de $\delta^{13}\text{C}$ são sugestivos de mecanismos de interação fluido-rocha e progressivo resfriamento do fluido. Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ de 0‰ até -4‰ podem refletir uma

fonte de carbono isotopicamente leve, derivada da oxidação de matéria orgânica dos filitos carbonosos da Formação Serra da Lapa, sobrejacentes, por interação com fluidos oxidantes descendentes.

Na área de Olho D'Água, observa-se decréscimo dos valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ com a evolução paragenética do depósito, indicando participação inicial de fluidos isotopicamente mais pesados ($\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = +9,86\text{‰}$ a $+12,25\text{‰}$), formacionais e/ou metamórficos, e predominância de fluidos meteóricos pouco modificados ($\delta^{18}\text{O}_{\text{fluido}} = 2,2\text{‰}$ a $5,42\text{‰}$, a 150 a 200 °C) no estágio de mineralização. No alvo Mata II mistura de fluidos meteóricos ($\delta^{18}\text{O}_{\text{fluido}} = -1,3\text{‰}$ a $4,2\text{‰}$, a 140 °C) com fluidos formacionais/metamórficos ($\delta^{18}\text{O}_{\text{fluido}} = 7,7\text{‰}$ a $12,1\text{‰}$, a 140 °C) também foi verificada, enquanto na área do Pamplona, os valores elevados de $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluido}}$ (11,4 a 11,7‰) indicam predominância dos fluidos formacionais/metamórficos. Evidências de decréscimo de temperatura e mistura progressiva desses fluidos é também sugerida.

A precipitação da willemita nos alvos Pamplona e Olho D'Água e na Mina Cercado pode estar associada à mistura de um fluido formacional metalífero, ascendente, quente, moderadamente salino, com baixo conteúdo de enxofre e um fluido meteórico de baixa latitude, descendente, diluído, pobre em metais (Figura 11.1). A maior participação de fluidos meteóricos pouco modificados, em geral não metalíferos, pode indicar áreas nas quais, apesar das evidências de alteração hidrotermal, o conteúdo metalífero tenderia a ser menor.

Por outro lado, o grau de mistura entre os diferentes fluidos ou de interação entre fluidos metalíferos e as rochas hospedeiras carbonáticas podem ter condicionado a maior ou menor precipitação de willemita nos alvos estudados, uma vez que o aumento de pH parece ser um fator crítico para a mineralização willemítica. Dessa forma, mesmo com a presença de brechas hidrotermais, como no caso da ocorrência Mata II, a formação de willemita pode ser limitada ou dificultada se houver predominância de fluidos ácidos. Essas condições podem ser decorrentes da contribuição de ácidos orgânicos derivados da oxidação do material carbonoso proveniente das unidades redutoras da Formação Serra da Lapa. As condições ácidas dos fluidos podem ser reveladas pela predominância de processos de dissolução total dos minerais carbonáticos nas brechas hidrotermais e, indiretamente, por menores valores de $\delta^{13}\text{C}$ ($<0\text{‰}$) em dolomita hidrotermal análogos aos tipicamente reconhecidos nos depósitos sulfetados hospedados no Grupo Vazante, tais como a Mina de Morro Agudo e depósitos de Ambrósia e Fagundes.

Dessa forma, em termos prospectivos para os depósitos de zinco não sulfetados, devem ser considerados: controles estruturais, (principalmente falhas com direção NE), posição estratigráfica sem relação direta com zonas de contato com a Formação Serra da Lapa, porém associada com as fácies de sabka da Formação Serra do Poço Verde, presença de brechas hidrotermais com cimentação carbonática (> pH) e assinatura isotópica dos carbonatos hidrotermais com valores de $\delta^{13}\text{C}$ positivos, semelhantes aos da Mina de Vazante.

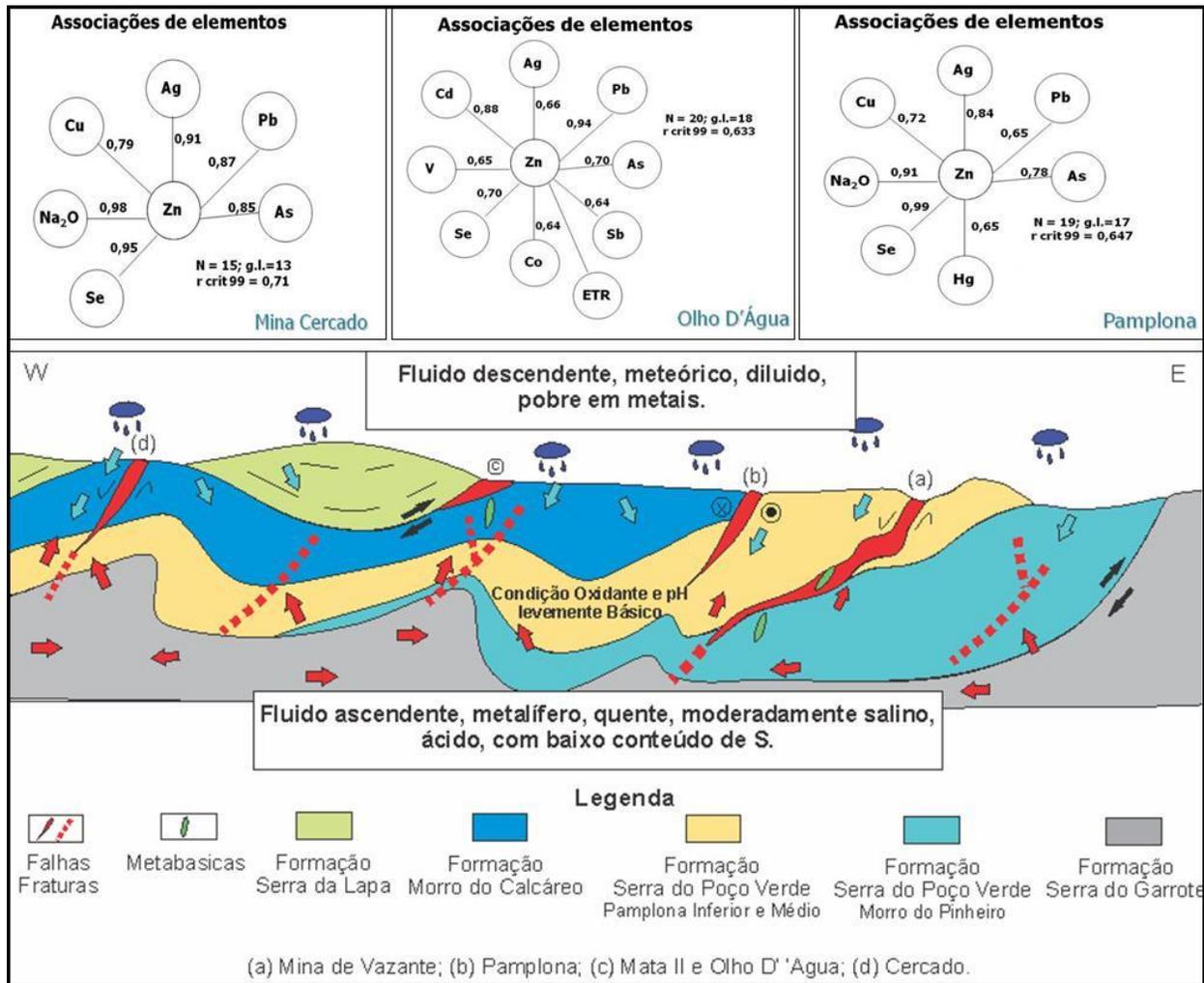


Figura 11. 1. Modelo esquemático para formação de precipitação de Willemita no segmento sul da faixa Vazante, evidenciando a mistura de fluidos ascendente e descendente associados a condições de oxidante e pH levemente básico dos dolomitos rosa da Formação Serra do Poço Verde e assinaturas químicas da mineralização de zinco para as ocorrências mineralizadas em zinco Cercado, olho D'Água e Pamplona).

Tabela 11. 1. Principais características das brechas hidrotermais das ocorrências zincíferas do Mata II, Olho D'Água, Cercado e Pamplona.

Alvo	Contexto Litológico	Controle das Formações da Brecha		Outras Características relevantes das Brechas dolomíticas	Minerais Hidrotermais Principais	Minerais Supérgeos	Principais Ganhos Relativos nas Brechas	Minerais Portadores de Zn	Minerais Portadores de Pb	Minerais Portadores de ETR / Cu / P	Assinatura Química da Mineralização (farejadores)
Mata II	Dolomito (cinza, estromatolítico), metamargas e filitos carbonosos	Brecha Hidrotermal Estruturalmente Controlada com Relevante Posição Estratigráfica (brecha de contato)	Condições de $P_{fluido} < P_{rocha}$, e condições de $P_{fluido} > P_{rocha}$ são responsáveis pela formação dos cinco tipos de brechas dolomíticas hidrotermais e diferentes graus de interação fluido e rocha nas ocorrências Mata II e Olho D'Água, sendo os tipos I e II representantes da interação fluido/rocha baixo a médio respectivamente, porém sem hidrofraturamento ($P_{fluido} < P_{rocha}$), e as brechas do tipo III e IV são caracterizadas por apresentarem os primeiros indícios do hidrofraturamento resultante da explosão e quebra dos clastos, originadas pelo hidrofraturamento ($P_{fluido} < P_{rocha}$) e a brecha do tipo V, representaria o nível mais avançado da interação fluido hidrotermal e rocha, resultando em uma dissolução total da rocha carbonática original, sem a presença de clastos de dolomito, que, possivelmente foram consumidos durante processos de dissolução da rocha hospedeira da mineralização (dolomito) e pela presença de minerais hidrotermais de textura grossa (Olho D'Água).	- Os processos hidrotermais nos tipos I e II podem ser identificados pela presença de vênulas e fraturas preenchidas por Fe-carbonatos e pela modificação localizada da cor das rochas que passam a apresentar coloração cinza a rosada (tipo I) e da elevada interação fluido/rocha, nas quais a interação com fluido hidrotermal resultou em substituição de grande parte da rocha encaixante por minerais carbonáticos ricos em ferro devido aos processos de dissolução e preenchimento, resultando em uma rocha de coloração rosa avermelhada, porém com as estruturas sedimentares ainda preservadas ou totalmente obliteradas pela alteração hidrotermal mais intensa (Tipo II). - Nas brechas do tipo III e IV o network entre fraturas rompe a rocha encaixante e passam a separar os clastos de dolomito, com pouco movimento destes fragmentos da rocha (fragmentação "in situ"), embora apresentem evidências de cominuição e dissolução parcial, resultando em uma brecha dolomítica hidrotermal ora matriz ora clasto suportada, com interação fluido rocha parcial (Tipo III), onde os clastos estão em parte totalmente hidrotermalizados (rosados) até parcialmente hidrotermalizados (cinzas), localmente com estruturas sedimentares ainda preservadas nestes clastos. A brecha do tipo IV representa um estágio de evolução da brecha mais avançado com elevada interação fluido hidrotermal e rocha, sendo formado por brechas hidrotermais dolomíticas matriz suportadas, constituídas por clastos de dolomitos totalmente rosados, sem estrutura sedimentar preservada,	quartzo, hematita, pirita, dolomita esparítica, barita, sericita, xenotima, monazita, galena, apatita, feldspato, óxido de Cu, covellita, feldspato K	pirolusita	Fe_2O_3 , SiO_2 , V, ETR, Sb, As, Bi, P_2O_5 , Pb, V, Ba, Cd, SrO, Na_2O e Cr_2O_3	Não Identificado	galena	monazita (ETR), xenotima (YPO ₄) Apatita e Covellita	Não determinada
Olho D'Água	Dolomito (cinza, laminado, localmente com birds eyes e estromatólitos); metamargas e filitos carbonosos.			O zoneamento da brecha identificado no Pamplona e Mina do Cercado é mais discreto e menos desenvolvido (restrito ao plano de falha) em relação às brechas hidrotermais das ocorrências zincíferas do Mata II e Olho D'Água. A zona de brecha apresenta evidências de deformação dúctil marcada pela presença de minerais estrirados, planos S-C, indicadores cinemáticos tipo Sigma, estrias e degraus de falha. Em ambos os casos, a estrutura mineralizada corta níveis estratigráficos distintos.		hematita, dolomita esparítica (2 gerações), quartzo, willemita, franklinita, apatita, clorita, pirita.	cerussita	Fe_2O_3 , Zn, Pb, As, Hg, Sb, V, ETR, P_2O_5 , Cd, Ag, Se, Bi, Co, U	franklinita, willemita, clorita zincífera e dolomita zincífera	cerussita	apatita
Cercado	Dolomito (cinza, laminado, localmente com intercalação de metapelito), metamargas e filitos carbonosos	Brecha estruturalmente controlada (falha Normal com direção N35E/75NW)		Na mina do Cercado, a ocorrência de dolomito nesta porção oeste da faixa carbonática, pode ser explicada pela presença de dobras abertas e suaves que afetam o Grupo Vazante no fechamento da Faixa Brasília. A falha do Cercado está inserida em uma dessas janelas estratigráficas (rochas carbonáticas), controladas por estruturas de caráter normal com continuidade para norte, como evidenciado por brechas hematíticas, porém com movimento relativo de blocos muito discreto, formando apenas uma zona de bandas de deformação. A Sul, a continuidade da falha está inserida nas rochas metapelíticas da Formação Serra da Lapa, porém devido ao comportamento dúctil desta unidade, a falha é amortecida, com evidências apenas pontuais de formação de brecha com willemita e hematita. No entanto, de acordo com a geometria identificada na Mina do Cercado, não se descarta a possibilidade de existência de falhas normais paralelas à falha Cercado cobertas por rochas dúcteis da Formação Serra da Lapa.	hematita, dolomita esparítica, quartzo, willemita, franklinita, esfalerita, galena, barita, monazita	smithsonita e coronadita	Fe_2O_3 , SiO_2 , Zn, Pb, As, Hg, Sb, Ba, Se Ag, V, Na_2O , Cu.	franklinita, willemita, esfalerita, dolomita zincífera e smithsonita	galena e coronadita	monazita (ETR) e Ag (análise química - Ag nativa/ Jalpaíta)	Zn-Pb-Se- Na_2O -As-Ag-Cu
Pamplona	Dolomito (cinza, estromatolítico) e dolomito rosa com intercalação de metapelitos)	Brecha estruturalmente controlada (falha transcorrente dextral com direção N70E/60NW)			hematita, quartzo, sericita, dolomita esparítica (3 gerações), apatita, galena, clorita, willemita	piromorfita	Fe_2O_3 , SiO_2 , Zn, Pb, As, Hg, Sb, Ba, Se Ag, V, Cu, Cd, Na_2O	willemita (2 gerações), dolomita zincífera, clorita zincífera	galena e piromorfita	apatita e Ag (análise química) - Ag Nativa/ Jalpaíta	Zn-Pb-Se- Na_2O -As-Ag-Cu-Hg

Alvo	Isótopos Estáveis Assinaturas das Rochas hospedeiras	Isótopos Estáveis Assinaturas das Rochas Alteradas Hidrotermalmente	Cálculo de Temperatura	Composição isotópica do oxigênio dos fluidos hidrotermais	Assinaturas isotópicas de carbonatos hidrotermais	Estudo isotópico mineral em dolomita (a 200 °C)
Mata II		No alvo Olho D'Água, observa-se decréscimo gradual dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ dos dolomitos encaixantes para as brechas dolomíticas hidrotermais, com valor mínimo de $\delta^{13}\text{C}$ de 0,64‰ na brecha do tipo V e de $\delta^{18}\text{O}$ de 15,46‰ para a brecha do tipo IV. Esta tendência não é tão clara no alvo Mata II, porque duas amostras de dolomitos inalterados apresentam os mais baixos valores de $\delta^{13}\text{C}$. Contudo, as brechas apresentam valor mínimo encontrado de $\delta^{13}\text{C}$ de 0,78‰ (brecha do tipo III) e de $\delta^{18}\text{O}$ de 21,80‰ (brecha do tipo IV).	Considerando-se que dois pares minerais do Alvo Mata II resultaram em temperaturas excessivamente elevadas (> 560 °C), foram utilizados nos cálculos as temperaturas mínimas obtidas para os demais pares do mesmo alvo (140 °C). Não obstante, tais assinaturas isotópicas podem evidenciar mistura de fluidos hidrotermais a aproximadamente 260 °C.	Apresenta um desequilíbrio isotópico, implicando que a hematita e quartzo não se formaram simultaneamente a partir do mesmo fluido hidrotermal, sugerindo que o fluido com menor valor de $\delta^{18}\text{O}$ apresentaria uma assinatura mais próxima daquela dos fluidos meteóricos e o segundo fluido o qual é bastante enriquecido em $\delta^{18}\text{O}$ refletiria um fluido muito modificado devido à interação com unidades pelíticas, fluido metamórfico resultante de devolatilização de unidades sedimentares, ou ainda, fluido de composição similar a do primeiro, porém de temperatura mais baixa.	Não determinado	Não determinado
Olho D'Água	Em geral, as rochas dolomíticas preservadas dos alvos estudados possuem valores aproximados de $\delta^{13}\text{C}$ entre -0,51‰ e +2,72‰ PDB e de $\delta^{18}\text{O}$ entre +22,09‰ e +28,13‰ V-SMOW.	Em temperaturas mais baixas (155 °C), os valores de $\delta^{18}\text{O}$ fluido estimados a partir de dolomita e hematita foram de 2,2‰ e 2,5‰, respectivamente, enquanto em temperaturas mais elevadas (205 °C), valores também mais elevados de $\delta^{18}\text{O}$ fluido foram obtidos (4,0‰ e 4,8‰). Para o par de temperatura mais elevada (290 °C), valor de $\delta^{18}\text{O}$ fluido de até 8,3‰ foram estimados.	Em temperaturas mais baixas (155 °C), os valores de $\delta^{18}\text{O}$ fluido estimados a partir de dolomita e hematita foram de 2,2‰ e 2,5‰, respectivamente, enquanto em temperaturas mais elevadas (205 °C), valores também mais elevados de $\delta^{18}\text{O}$ fluido foram obtidos (4,0‰ e 4,8‰). Para o par de temperatura mais elevada (290 °C), valor de $\delta^{18}\text{O}$ fluido de até 8,3‰ foram estimados.	O equilíbrio isotópico entre hematita e dolomita foi observado, sendo que o conjunto de valores de $\delta^{18}\text{O}$ fluido sugere a predominância de fluidos meteóricos modificados, seja por mecanismos de interação fluido-rocha (fluidos formacionais) ou por mistura com fluidos metamórficos. Adicionalmente, alguma mistura com fluidos magmáticos poderia ser sugerida pela associação de diques básicos hidrotermalizados na área de Olho D'Água. Essa última possibilidade também poderia explicar as temperaturas mais elevadas calculadas para essa área.	A dolomita esparítica associada com pirita apresenta valor de $\delta^{13}\text{C}$ entre +0,92‰ e 2,23‰, e de $\delta^{18}\text{O}$ entre +19,21‰ e +22,3‰, com assinatura isotópica próxima àquela observada para dolomita e siderita hidrotermal da Mina de Vazante. A dolomita sin-mineralização possui valores de $\delta^{18}\text{O}$ menores (+12,71‰ e +15,47‰), porém próximos daqueles observados para dolomita hidrotermal dos depósitos sulfetado, tais como Morro Agudo, Fagundes e Ambrósia e valor de $\delta^{13}\text{C}$ entre +1,16‰ e 1,90‰.	Os valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ do estágio de mineralização é menor em relação ao estimado para o estágio de mineralização zinferna nos demais depósitos. Isso pode sugerir maior contribuição de fluidos meteóricos pouco modificados nessa área. Evidências de decréscimo de temperatura e mistura progressiva desses fluidos é também sugerida.
Cercado		Há um forte contraste entre os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ das rochas encaixantes e mineralizadas, sendo identificados valores de $\delta^{13}\text{C}$ para as rochas mineralizadas de 0‰ até -4,07‰ e de $\delta^{18}\text{O}$ entre 18,54‰ até 23,74‰.	Não determinado	Não determinado	Assinaturas semelhantes àquelas identificadas para dolomita/siderita hidrotermal de Vazante foram observadas em amostras do Pamplona, enquanto que no Cercado os valores são próximos aos relativos à dolomita hidrotermal de Morro Agudo, com valores de $\delta^{13}\text{C}$ entre -0,65‰ e +0,82‰, e valor de $\delta^{18}\text{O}$ entre +17,91‰, e +20,53‰. A assinatura de $\delta^{13}\text{C}$ (< 0‰) na Mina do Cercado, se assemelha mais com as dos depósitos sulfetados. Isso poderia ser atribuído à uma maior contribuição das rochas metapelíticas sobrejacentes, como parece ser o caso dos depósitos sulfetados, porém com formação de minério willemítico.	As composições isotópicas do fluido em equilíbrio com a dolomita hidrotermal das áreas de Pamplona e Cercado, a 200 °C (valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ entre +7,86‰ a +10,48‰) sugere a participação de fluidos metalíferos bacinais ou fluidos de origem superficial modificados pela interação com as rochas sedimentares
Pamplona		Observa um decréscimo gradual mais acentuado dos valores de $\delta^{18}\text{O}$, acompanhado por diminuição mais sutil dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ das rochas dolomíticas com pouca alteração hidrotermal para as brechas mineralizadas. As últimas apresentam valores de $\delta^{13}\text{C}$ de 0,20‰ a 0,75‰ e de $\delta^{18}\text{O}$ de 19,24‰ a 22,06‰.	Fluidos com valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluido}}$ menores (-4,5‰) foram estimadas a partir de dolomita e hematita, a 62 °C, enquanto em condições de maiores temperaturas (260 °C), tem-se fluidos isotopicamente enriquecidos ($\delta^{18}\text{O} = 11,4$ a 11,7‰).	Fluidos isotopicamente enriquecidos, ($\delta^{18}\text{O} = 11,4$ a 11,7‰) semelhantes aos caracterizados no alvo Mata II teriam sido responsáveis pela mineralização willemítica associada com hematita e dolomita. Tais dados sugerem fluidos hidrotermais resultantes de maior interação com unidades pelíticas em comparação com o Alvo Olho D'Água.		

12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkmim F.F., Chemale Jr F., Endo, I. 1996. A deformação das coberturas proterozóicas do Cráton do São Francisco e seu significado tectônico. *Revista da Escola de Minas*, **49**(1): 22-38.
- Alkmim F. F. & Martins-Neto M. A. 2001. A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: Pinto, C.P. & Martins-Neto M.A. (eds.) *Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais*. Belo Horizonte, SBG-MG, p.9-30.
- Almeida, F.F.M. 1967. Origem e evolução da Plataforma Brasileira. Rio de Janeiro, DNPM/ DGM, *Boletim* 241, 36p.
- Almeida F.F.M. 1967. Observações sobre o Pré-Cambriano da região central de Goiás. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 21, Curitiba, Resumo das comunicações e roteiro das excursões, 19-22.
- Almeida F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, **7**(4):349-364.
- Almeida, F.F.M. 1981. O Cráton do Paramirim e suas relações com o do São Francisco: Na. Simp. Sobre o cráton do São Francisco e suas Faixas marginais, SBG/BA, 1, 1-10.
- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Fuck, R.A. 1981. *Brazilian structural provinces: Na introduction*. *Earth-Science Reviews*, **17**:1-29.
- Almeida, F.F.M., Hasui, Y. 1984. *O Pré-Cambriano do Brasil*. Edgard Blucher.
- Almeida F.F.M. 1993. Limites do cráton do São Francisco em Minas Gerais – Síntese dos conhecimentos. In: SBG, Simpósio do Cráton do São Francisco 2, Salvador, 1993. *Anais Salvador*, p. 256-259.
- Almeida, F.F.M., Brito Neves, B.B., Carneiro, C.D.R. 2000. *The origin and evolution of the South American Platform*. *Earth-Science Reviews*, **50**:7-111.
- Amaral, G. & Kawashita, K. 1967. Determinação da idade do Grupo Bambuí pelo método Rb/Sr. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 21, *Anais*, SGB, p. 214-217.
- Amaral G. 1968. Contribuições ao conhecimento dos depósitos de Zn-Pb-Cu-Ag da Serra do Poço Verde, Vazante, Estado de Minas Gerais. In: SBG, XXII Congresso Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte, *Anais*, 13-31.
- Amaral G. 1968c. Resultados preliminares do estudo sobre a mineralização e composição isotópica de chumbo em galenas de depósitos encaixados no Grupo Bambuí. In: SBG, XXII Congresso Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte, *Anais*, p. 51-53.

- Amaral G. 1969. Contribuição ao conhecimento dos depósitos de Zn-Pb-Cu-Ag da Serra do Poço Verde, Vazante, Estado de Minas Gerais. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 22, Belo Horizonte, *Anais*, 13-31.
- Appold, M.S. & Monteiro, L.V.S. 2009. *Numerical modeling of hydrothermal zinc silicate and sulfide mineralization in the Vazante deposit, Brazil. Geofluids*, **9**:96–115.
- Araújo Filho J.O. de & Marshak S. 1997. *Formation of the Pirineus Syntaxis: evidence for two episodes of Brasília (Pan African) deformation in the Brasília Orogenic Belt, Central Brazil. GSA Abstract with Programs A-228, BTH 44, Salt Lake City.*
- Azmy K., Veizer, J., Misi, A., Oliveira, T.F. de, Sanches, A.L., Dardenne, M.A. 2001. *Dolomitizations an isotope stratigraphy of the Vazante Formation, São Francisco Basin, Brazil, Precambrian Research*, **112**:303-329.
- Azmy K., Kaufman A. J., Misi A., Oliveira T.F. 2006. *Isotope stratigraphy of the Lapa Formation, São Francisco Basin, Brazil: Implications for Late Neoproterozoic glacial events in South America. Precambrian Research*, **149**:231-248.
- Azmy K., Kendall B., Creaser R. A., Heaman L., Oliveira T. F. 2008. *Global correlation of the Vazante Group, São Francisco Basin, Brazil: Re-Os and U-Pb radiometric age constraints. Precambrian Research*, **164**:160-172.
- Babinski, M.; Monteiro, L.V.S.; Fetter, A.H.; Bettencourt, J.S.; Oliveira, T.F. 2005. *Isotope geochemistry of the mafic dikes from the Vazante nonsulfide zinc deposit, Brazil. Journal of South American Earth Sciences*, **18**:293-304
- Barbosa O. 1965. Série Bambuí. In:SBG, Cong. Bras. Geol., 19, Rio de Janeiro, 1965. Simp. das Formações Eo-Paleozóicas. DNPM/DGM avulso4,15p.
- Boland, M.B., Kelly, J.G., Schaffalitsky, C. 2003, *The Shaimerden supergene zinc deposit, Kazakhstan. Economic Geology*, **98** (4):787-795.
- Boni, M. 2003. *Non-Sulfide Zinc Deposits: a new-(old) type of economic mineralization. SGA News*, n° 15.
- Boni, M., Gilg, H.A., Aversa, G., and Balassone, G. 2003. *The "Calamine" of SW Sardinia (Italy): geology, mineralogy and stable isotope geochemistry of a supergene Zn-mineralization. Economic Geology*, **98** (4):731-748.
- Bontognali, T. R. R., Vasconcelos, C., Warthmann, R. J., Bernasconi, S. M., Dupraz, C., Strohmenger, C. J. & McKenzie, J. A. 2010. *Dolomite formation within microbial mats in the coastal sabkha of Abu Dhabi (United Arab Emirates). Sedimentology*, **57**: 824-844.
- Borg, G., Karner, K., Buxton, M., Armstrong, R., and Merwe, Schalk W. v.d., 2003, *Geology of the Skorpioon supergene zinc deposit, southern Namibia. Economic Geology*, **98**(4): 749-771.

- Böttcher, M.E. (1994) $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ fractionation during synthesis of $\text{BaMg}(\text{CO}_3)_2$ and $\text{PbMg}(\text{CO}_3)_2$; Abstracts of the 16th IMA Meeting, pp. 53.
- Branco, J.J.R.; Costa, M.T. 1961. Roteiro para a excursão Belo Horizonte-Brasília. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 14, Belo Horizonte, 1961. Roteiro das excursões, p. 6-10.
- Braun O.P.G. 1968. Contribuição à estratigrafia do Grupo Bambuí. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 22. Belo Horizonte, 1968. *Anais*, 155-166.
- Brito Neves, B. B., Teixeira, W., Tassinari, C. C. G., Kawashita, K. 1990. A contribution to the subdivision of Precambrian South America. *Revista Brasileira de Geociências*, **20**: 267-276.
- Brito Neves B. B. A. 1995. Tafrogênese estateriana nos blocos paleoproterozóicos da América do Sul e processos subsequentes. *Geonomos*, **3**(2):1-21.
- Brito Neves B. B., Winge, M. , Carneiro, M.A. 1996 Orogêneses precedendo e Tafrogêneses sucedendo Rodínia na América do Sul. *Boletim IG-USP, São Paulo, Série Científica*, **27**:1-40.
- Brito Neves B.B., Neto, M C. C., Fuck R. A. 1999. From Rodinia to Western Gondwana: An approach to the Brasiliano-Pan African Cycle and orogenic collage. *Episodes* **22**: 155-166.
- Brod, J.A., Leonardos, O.H., Meneses, P.R., Albuquerque, M.A.C., Almeida, R., Araújo, R.N.G., Blanco, S.B., Cardoso, F.B.F., Carvalho Júnior, O.A., Junqueira, F.F., Riehl Junior, W., Souza, J.C.F., Tallarico, F.H.T., Thomsem, F.P.R., Berbet, M.L.C., Cerqueira, M.R.S., Chagas, M.A., Dias, R.R., Lima, C.V., Nakamura, E.T., Porto, S.G., Romão, P.A., Santos, P.C.V. 1991. Tectono-estratigrafia da Faixa Brasília na região do Alto Paranaíba. In: SBG, Simp. Geol. Centro-Oeste, 3, Cuiabá, 1991. *Anais*, Cuiabá, SBG. p.155-168.
- Brugger, J. 2003. *Formation of willemite in hydrothermal environments. Economic Geology*, **98**(4): 819-835.
- Campos Neto M.C. 1984a. Litoestratigrafia e evolução paleogeográfica dos Grupos Canastra e Paranoá (Região Vazante-Lagamar, MG). *Revista Brasileira de Geociências*, **14**(2): 81-91.
- Campos Neto M.C. 1984b. Geometria e fases de dobramento brasileiros superpostos no oeste de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, **14**(1): 60-68.
- Carman, C.E., Groves, I.M, Hitzman M.W. 2002. *The hypogene willemite deposits of the Aroona trend, South Australia. In: IAGOD, Sedimentary, Magmatic and Ore-Forming Responses to Compressional and Tensional Tectonics: A Focus on Africa, 11th Quadrennial IAGOD Symposium and Geocongress 2002, Windhoek, Namibia. Abstracts p. 21/CD-ROM.*
- Carman C.E. 2003. *The Aroona willemite trend North Flinders Ranges, South Australia: Sedimentary, Structural and Economic Geology.* Dissertação de Mestrado, Colorado School of Mines 180p.

- Cassedane J. 1968. Nota sobre o ambiente de sedimentação das rochas encaixando a mineralização de Vazante (MG). In: SBG, XXII Congresso Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte, *Anais*, 33-40.
- Cassedanne J. & Lassère M. 1969. *Étude géologique et analyse isotopique par la méthode au plomb de quelques galenas du Brésil. BRGM, Bulletin, Serie 2 Section 4*, p. 71-87.
- Cassedane J. 1972. *Les Gites de Plomb et de Zinc du Brésil et leur Repartition Lineamentaire. Tese de doutorado, Univ. Clermont Ferrand*, 336p.
- Coats R. P. 1973. *Copley, South Australia. Geological Survey of South Australia, Geological Series Explanatory Notes, Sheet SH/54-9*.
- Costa, L.A.M., Angeiras, A.G., Valença, J.G., Stevenazzi, V. 1970. Novos conceitos sobre o Grupo Bambuí e sua divisão em tectonogrupos. Rio de Janeiro, Bol. Geol. Inst. Geociências, **5**: 3-34.
- Costa, L.A.M., Angeiras, A.G. 1971. *Geosynclinal evolution of the epi-Baykalian platform of Central Brazil. Geol.Runds. 60* (3): 1024-1050.
- Couto, J. G. P., Crodani, U. G., Kawashita, K., Iyer, S. S., Moraes, N. M. P., 1981. Considerações sobre a idade do grupo Bambuí com base em análises isotópicas de Sr e PB. Revista Brasileira de Geociências, **11**: 5-16.
- Chaves, A. O. 1997. *K-Ar, Rb-Sr and Sm-Nd geochronology of the Proterozoic mafic dyke swarms of the Southern São Francisco Craton, MG, Brazil. In: Simpósio Sul-Americano de Geologia Isotópica. South-American Symposium on Isotope Geology, 1., Campos do Jordão. Anais... Campos do Jordão: [s.n.], p. 68-70.*
- Cunha, I. de A, Misi A., Babinski, M. 2001. *Lead isotope signatures of galenas from Morro agudo Pb-Zn deposit, Minas Gerais, Brazil. In: Misi, A. & Teixeira, J.B.G. (org) Proterozoic base metal deposits of África and South America. Contributins presented at the 1st Field Workshop International Geological Correlation Programme 450, Belo Horizonte, CNPq/UNESCO/IUGS, p45-47.*
- Dalziel, I.W.D. 1997. *Neoproterozoic-Paleozoic geography and tectonics: review, hypothesis, environmental speculation. Geological Society of America Bulletin, 109*: 16-42.
- Dardenne, M.A. 1974. Geologia da região de Vazante, Minas Gerais, Brasil. In: SGB, XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia, Porto Alegre, Resumos, p.182-185.
- Dardenne, M.A. 1976. Tipos de depósitos de chumbo e zinco no Grupo Bambuí de Minas Gerais. In: SGB, Congresso Brasileiro de Geologia, 29, Resumos, p. 289.
- Dardenne M.A. 1978. Geologia da região de Morro Agudo (Minas Gerais). SBG, Centro-Oeste, Bol. Inform., **7**:68-84.

- Dardenne M.A. 1978b. Zonação tectônica na borda ocidental do Cráton do São Francisco. In: SBG, XXX Congresso Brasileiro de Geologia, Recife, *Anais*, 2:299-308.
- Dardenne M.A. 1978c. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: SBG, XXX Congresso Brasileiro de Geologia, Recife, *Anais*, 2:597-610.
- Dardenne M.A. 1979. *Lês mineralisations plomb, zinc, flúor du proterozoïque superieur dans Le Bresil Central.These do Doctorat D'Etat, Univ. Pierreer Marrie Curie.*
- Dardenne, M.A. 1981. Os grupos Paranoá e Bambuí na Faixa Dobrada Brasília. In: SBG, Simpósio sobre o Cráton do São Francisco e suas Faixas Marginais, I, Salvador, 1981, *Anais*.
- Dardenne M.A. 2000. The Brasilia fold belt. In: U.G. Cordani, E. G. Milani, A. Thomaz Filho e D.A. Campos (eds.), *Tectonic evolution of South America*, p. 231-263.
- Dardenne M.A. 2001. *Lithostratigraphic sedimentary sequences of the Vazante Group. In: Misi, A., Teixeira, J.B. (eds.) Proterozoic base metal deposits of Africa and South America. CNPq/UNESCO/IUGS*, p. 48-50.
- Dardenne M.A. & Schobbenhaus C. 2000. *The Metallogensis of the South American Platform. In: U.G. Cordani, E. G. Milani, A. Thomaz Filho, D.A. Campos (eds.), Tectonic evolution of South America*, p. 800-809.
- Dardenne M.A., Freitas-Silva F.H., Nogueira G.M.S., Souza J.F.C. 1997. Depósitos de fosfato de Rocinha e Lagamar, Minas Gerais. In: Schobbenhaus C., Queiroz E.T., Coelho, C.E.S. Principais depósitos minerais do Brasil, DNPM/CPRM, v. IV C, p.113-122.
- Dardenne M.A., Freitas-Silva F.H., Souza J.C.F., Campos J.E.G. 1998. Evolução tectono-sedimentar do Grupo Vazante no contexto da Faixa de Dobramentos Brasília. In: SBG, XXXX Congresso Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte, Resumos, p. 26.
- Dejonghe, L. 1998. *Zinc-Lead deposits in Belgium. Ore Geology Review*, 12:329-354.
- Ferreira Filho, C.F.,Kamo,S.L.,Fuck, R.A.,Krogh, T.E.,Naldrett, A.J. 1994. *Zircon and rutile U-Pb geochronology of the Niquelândia layered mafic and ultramafic intrusion, Brazil: constraints for the timing of the magmatism and high grade metamorphism. Precambrian Res.*,68: 241-255.
- Fonseca, M.A. & Dardenne, M.A. 1996. Arcabouço estrutural e evolução cinemática da Faixa Brasília em seu segmento setentrional. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 39, Salvador, 1996. *Anais*. Salvador, SBG, p. 98-101.
- Fossen H. 2010. *Structural Geology. Cambridge University Press.*
- Freitas-Silva F.H., Dardenne M.A. 1992a. Quadro estratigráfico das formações Vazante e Paracatu na região de Paracatu – MG. *REM*, 45:91-93.

- Freitas-Silva F.H. & Dardenne M.A. 1992b. Evolução estrutural das formações Paracatu e Vazante na região de Paracatu – MG. *REM*, **45**:57-59.
- Freitas-Silva F.H. & Dardenne M.A. 1994. Proposta de subdivisão estratigráfica formal para o Grupo Canastra no Oeste de Minas Gerais e Leste de Goiás. In: SGB-DF/CO, IV Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, Brasília, *Anais*, p.164-165.
- Freitas-Silva F.H. & Dardenne M.A. 1997. *Pb/Pb isotopic patterns of galenas from Morro do Auro (Paracatu Formation), Morro Agudo/Vazante (Vazante Formation) and Bambuí Group deposits. In: South American Symposium on Isotope Geology, I, Campos de Jordão, Extended Abstracts*, p 118-120.
- Fuck R.A., Jardim de Sá E.F., Pimentel M.M., Dardenne M.A., Pedrosa Soares A.C. 1993. As faixas de dobramento marginais do Cráton do São Francisco: síntese dos conhecimentos. In: Dominguez J.M.L. & Misi A., (eds.) O Cráton do São Francisco. SBG/SMG/CNPq, Salvador, 161-185.
- Fuck R.A. 1994. A Faixa Brasília e a compartimentação tectônica na Província Tocantins. In: SBG, 4º Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, Brasília, *Anais*, 4: 184-187.
- Gilg, H.A., Allen, C., Balassone, G., Boni, M., Moore, F. 2003. *The 3-stage evolution of the Angouran Zn "oxide-sulfide deposit, Iran: Seventh Biennial SGA Meeting "Mineral Exploration and Sustainable Development", Athens, Greece, August 24-28 2003*, 4pp.
- Golyshev, S. I., Padalko, N.L. and Pechenkin, S. A., *Geochem. Int.*, 18, 85-99 (1981).
- Grant J.A. 1986. *The isocon diagram - A simple solution to Gresens' equation for metassomatic alteration. Economic Geology*, 81:1976-1982.
- Groves, I.M. & Carman, C.E. 2003. *Geology of the Beltana willemite deposit, Flinders Ranges, South Australia. Economic Geology*, **98**(4), 797-818.
- Groves, I.M., Carman C.E, Dunlap W.J. 2003. *Geology of the Beltana Willemite Deposit, Flinders Ranges, South Australia. Economic Geology*, **98**(4): 797 – 818.
- Haraly, N.E.L., Hasui, Y. 1982. *The gravimetric information and Archean-Proterozoic structural framework of eastern Brazil. Revista Brasileira de Geociências*, **12**, 160-16.
- Hirayama, K. 1986. *Geological study on the Anguran mine, northwestern part of Iran. Geological Survey of Japan, Rept. 226*, 1-25.
- Hitzman M. W. 1997a. *Sediment Hosted Zn-Pb and Au Deposits in the proterozoic Paracatu Vazante Fold Belt Minas Gerais Brazil. In: GSA, Geological Society of America Abstracts with Programs*, 27, p A408.

- Hitzman, M.W., Reynolds, N.A., Sangster, D.F., Allen, C.R., and Carman, C. 2003. *Classification, genesis, and exploration guides for nonsulfide zinc deposits. Economic Geology*, **98**:685–714.
- Iyer, S.S. 1984. *A discussion on the lead isotope geochemistry of galenas from the Bambuí Group, Minas Gerais, Brazil. Mineralium Deposita*, **19**:132-137.
- Iyer, S. S., Hoefs, J., Krouse, H. 1992. *Sulfur and lead isotope geochemistry of galenas from Bambuí Group, Minas Gerais, Brazil – Implication for ore genesis. Econ. Geol.*, **87**:437-443.
- Janasi, V. de A. 2002. *Elemental and Sr–Nd isotope geochemistry of two Neoproterozoic mangerite suites in SE Brazil: implications for the origin of the mangerite–charnockite–granite series. Precambrian Research*, **119**:301–327.
- John, T., Scherer, E. E., Haase, K., and Schenk, V. 2004. *Trace element fractionation during fluid-induced eclogitization in a subducting slab: trace element and Lu-Hf-Sm-Nd isotope systematics. Earth Planetary Science Letter*, **227**:441-456.
- Kamona, A.F. and Friedrich, G.H., 2007. *Geology, mineralogy and stable isotope geochemistry of the Kabwe carbonate-hosted Pb–Zn deposit, Central Zambia. Ore Geology Reviews*, **30**:217-243.
- Kortman, C.R. 1972. *The geology of the Zambia Broken Hill Mine, Kabwe. Geologie en Mijnbouw*, **51**(3), 347.
- Ladeira E.A., Tarcia R.F., Cabral J.A.L. 1963. Contribuição à geologia de Vazante. *REM*, **23**:29-33.
- Laranjeira, N.P.F. 1992. *Geologia do Grupo Paranoá na região de Unaí numa plataforma siliciclástica no Proterozóico de Minas Gerais, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 213 p.*
- Laukamp, C. 2006. *Structural and Fluid System Evolution in the Otavi Mountainland (Namibia) and its significance for the genesis of sulphide and nonsulphide mineralisation. Tese de Doutorado, University of Heidelberg*, 167 p.
- Leach D. L., Bradley, D. C., Huston D., Pisarevsky, S. A., Taylor, R. D. & Gardoll, S. J.. 2010. *Sediment-Hosted Lead-Zinc Deposits in Earth History Economic Geology* v. 105, p. 593-625.
- Leal E. D., Forlin R., Silva R. B. 1978. *Prospecção de zinco e chumbo na região de Vazante, MG. In: SBG, XXX Congresso Brasileiro de Geologia, Recife, Anais*, 4:1805-1816.
- Lemos M.G. 2011. *Caracterização geológica e tecnológica do minério de zinco do Extremo Norte da Mina de Vazante, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. UNICAMP, Brasil.*
- Madalosso A. & Valle C.R. 1978. *Considerações sobre a Estratigrafia e Sedimentologia do Grupo Bambuí na Região de Paracatu - Morro Agudo (MG). In: SBG, XXX Congresso Brasileiro de Geologia, Recife, Anais*, 2:622-634.

- Madalosso, A. 1979. *Stratigraphy and sedimentation of the Bambuí Group in Paracatu region, MG, Brazil*. Dissertação de Mestrado, University of Missouri.
- Madalosso A. 1980. Considerações sobre a paleogeografia do Grupo Bambuí na região de Paracatu – MG. In: SBG, XXXI Congresso Brasileiro de Geologia, *Anais*, 4:772-785.
- Marini, O.J., Fuck, R.A., Danni, J.C., Dardenne M.A. 1981. A evolução geotectônica da Faixa Brasília e de seu embasamento. In: CPM/SBG, Simpósio sobre o Cráton do São Francisco e suas Faixas Marginais, Salvador, *Anais*, 100-115.
- Martins-Neto, M.A. & Alkmim, F.F. 2001. Estratigrafia e evolução tectônica das bacias Neoproterozóicas do paleocontinente São Francisco e suas margens: Registro da quebra de Rodínia e colagem de Gondwana. In: Pinto C.P. & Martins-Neto M.A. (eds.). *Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais*. SBG-MG, Belo Horizonte, p.31-54.
- Matsuhisa, Y., Goldsmith, J.R. and Clayton, R.N. 1979. Oxygen isotopic fractionation in the system quartz-albite-anorthite-water, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **43**, , 1131-1140.
- Matthews, A. and Katz, A. 1977. *Oxygen isotope fractionation during dolomitization of calcium carbonate*. *Geochim. Cosmochim. Acta* 41, 1431-1438
- Melcher, F. 2003. *The Otavi Mountain Land in Namibia: Tsumeb, Germanium and Snowball Earth*. *Mitteilungen der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft*, **148**:413-435.
- Mello. O. Da Visão da Lapa ao Minério: Vazante. Prefeitura Municipal de Vazante, texto explicativo.
- Misiewicz, J.E. 1988. *The Geology and Metallogeny of the Otavi Mountain Land, Damara Orogen, SWA/Namibia, with particular reference to the Berg Aukas Zn-Pb-V deposit - A model for ore genesis*. Dissertação de Mestrado, Rhodes University, Grahamstown, 147p.
- Misi, A., Veizer, J., Kawashita, K., Dardenne, M.A. 1997. *The age of the Neoproterozoic carbonate platform sedimentation based on ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr determinations, Bambuí and Una Groups, Brazil*. In: *I South American Symposium on Isotope Geology, Campos do Jordão, São Paulo, Brazil, Extended Abstracts*, pp. 199–200.
- Misi, A., Sanches, A.L., Kaufman, A.J., Veizer, J., Azmy, K., Powis, K., Teixeira, J.B. 2005. *Phosphorite and the chemostratigraphic correlation of the Neoproterozoic sequences of the São Francisco Craton and the Brazilian Fold Belt*. In: *SBG, III Simpósio sobre o Cráton do São Francisco, Anais*, v.1 p. 291-294.
- Arnaud E., Halverson G. P., Shields-Zhou G. Guimarães J. T., Misi A., Pedreira A. J., Dominguez J. M. L.. 2011. In *The Geological Record of Neoproterozoic Glaciations, The Bebedouro Formation, Una Group, Bahia (Brazil)* Geological Society, London, *Memoirs*, eds Arnaud E., Halverson G. P., Shields-Zhou G. 36, pp 503–508

- Moeri, E. 1972. *On a columnar stromatolite in the Precambrian Bambui Group of Central Brazil*, *Eclog Geol Helv*, **65**: 185-195.
- Monteiro, L.V.S. 1997. Contribuição à gênese das mineralizações de zinco da Mina de Vazante, MG. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 159 p.
- Monteiro L.V.S. 2002. Modelamento metalogenético dos depósitos de zinco de Vazante, Fagundes e Ambrósia, associados ao Grupo Vazante, Minas Gerais. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, , 317 p.
- Monteiro, L.V.S., Bettencourt, J.S., Spiro, B., Graça, R., Oliveira, T.F. 1999. *The Vazante zinc mine, Minas Gerais, Brazil: Constraints on willemitic mineralization and fluid evolution*. *Exploration Mining and Geology*, **8**:21–42.
- Monteiro, L.V.S.; Bettencourt, J.S.; Juliani, C.; Oliveira, T.F., 2006. *Geology, petrography, and mineral chemistry of the Vazante non-sulfide and Ambrósia and Fagundes sulfide-rich carbonate-hosted Zn-(Pb) deposits, Minas Gerais, Brazil*. *Ore Geology Reviews*, **28**: 201-234.
- Monteiro, L.V.S.; Bettencourt, J.S.; Juliani, C.; Oliveira, T.F., 2007. *Nonsulfide and sulfide-rich zinc mineralizations in the Vazante, Ambrósia and Fagundes deposits, MG, Brazil: mass balance and stable isotope constraints on the hydrothermal alterations*. *Gondwana Research*, **11**:362-381.
- Moore, J.M. 1972. *Supergene mineral deposits and physiographic development in southwest Sardinia, Italy*. *Transactions Institution of Mining and Metallurgy, Sect. B: Applied Earth Sciences*), **71**:B59 - B66.
- Moraes R. & Fuck R.A. 1994. Deformação e metamorfismo das sequências Juscelândia e Serra da Malacacheta, Complexo Barro Alto, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, **24**: 189- 197.
- Moraes. R., Vasconcellos, A.C.B.C., Fuck, R.A.1994. Uma descontinuidade metamórfica no Complexo Barro Alto: evidência para sua compartimentação? In: SBG, IV Simp.Geol. Centro-Oeste, Brasília, Resumos, p. 135-137.
- Moraes R. & Fuck R.A. 1997. Estágio de resfriamento isobárico nos granulitos aluminosos do Complexo Barro Alto, Goiás. In: SBG/Núcleo Brasília. Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 6, Pirinópolis, *Anais de Resumos Expandidos*, 94 - 95.
- Muller, D. 1972. *The geology of the Beltana willemite deposits*. *Economic Geology* 67(8) p1146-1167.
- Oliveira, G.D. 2013. Reconstrução paleoambiental e quimioestratigrafia dos carbonatos hospedeiros do depósito de zinco silicatado de Vazante, MG. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, DF.

- Pimentel, M.M., Heaman, L., Fuck, R.A. 1991a. *U–Pb zircon and sphene geochronology of late Proterozoic volcanic arc rock units from southwestern Goiás, Central Brazil. Journal of South America Earth Science*, **4**: 329–339.
- Pimentel, M. M., Heaman, L., Fuck, R.A., Marini, O. J. 1991b. *U-Pb zircon geochronology of Precambrian tin-bearing continental-type acid magmatism in central Brazil. Precambrian Research*, **52**(3-4):321-335.
- Pimentel, M.M., Dardenne, M.A., Viana, M. das G, Costa Lima, S. M. C. L, Junges, S. Seer, H.J. 1999. *Nd isotopes and the provenance of the sediments of the Neoproterozoic Brasília Belt, Central Brazil, Geodynamic implications. In: South American Symposium on Isotope Geology, 2, Córdoba, Actas Córdoba*, p. 426-429.
- Pimentel M.M. & Fuck R.A. 1992. *Neoproterozoic crustal accretion in Central Brazil. Geology*, **20**:375 – 379.
- Pimentel, M.M., Fuck, R.A., Botelho, N.F. 1999. *Granites and the geodynamic history of the Neoproterozoic Brasilia Belt, Central Brazil: a review. Lithos*, **46** (3):1-21.
- Pinho J.M.M., Dardenne M.A., Rigobello A.E. 1989. *Evolução tectônica da mineralização de zinco de Vazante. In: SBG, V Simpósio de Geologia do Núcleo Minas Gerais, Anais, Bol.110*, p. 275-276.
- Pinho J. M. M., Dardenne M. A., Rigobello A. E. 1990. *Caracterização da movimentação transcorrente da Falha de Vazante, Vazante, MG. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 36, Anais, Natal, v. 5*, p. 2284-2295.
- Pinho, J. M. M. 1990. *Evolução Tectônica da mineralização de zinco de Vazante. Dissertação de Mestrado, UnB, 115p.*
- Piuzana, D., Pimentel, M.M., Armstrong, R., Fuck, R.A. 2003b. *Neoproterozoic granulite facies metamorphism and coeval granitic magmatism in the Brasilia Belt, Central Brazil: regional implications of new SHRIMP U–Pb and Sm–Nd data. Precambrian Research*, **125**: 245–273.
- Preiss W.V. 1987. *The Adelaide Geosyncline. Geological Survey of South Austrália, Bulletin*, 53.
- Rigobello A.E. Branquinho J.A., Dantas M. G. DA S., Oliveira T. F., Neves Filho W. 1988. *Mina de zinco de Vazante. In: Shobbenhaus C. & Coelho C.E.S. (eds.) Principais depósitos minerais do Brasil, DNPM*, 3:101-110.
- Rostirola, S.P., Mancini, F., Reis Neto, J.M., Figueira, E.G. 2002. *Análise estrutural da mina de Vazante e Adjacências: Geometria, Cinemática e Implicações para a hidrogeologia. Revista Brasileira de Geociências*, **32**(1):59-68.

- Rodrigues, J.B. 2008. Proveniência de sedimentos dos grupos Canastra, Ibiá, Vazante e Bambuí – Um estudo de zircões detríticos e Idades Modelo Sm-Nd. Tese de doutorado, Universidade de Brasília – UnB.
- Rubo, R.A., Monteiro, L.V.S. 2010. Sistemática de isótopos de oxigênio e carbono aplicada ao estudo da evolução metalogenética associada ao depósito de Zn-Pb de Morro Agudo, MG. *Revista Brasileira de Geociências*, **40**: 438-452.
- Savard, M., M., and Kontak, D., J., 1998. *Covariations in ore stage calcites at and around the Gays River Pb-Zn deposit: Evidence for fluid mixing. Economic Geology*, v. 93, p.818-833.
- Schobbenhaus C., Diógenes, A.C., Derza, G.R., Asmos, M.E. (Coords.) 1984. *Geologia do Brasil. DNPM*.
- Schneider, J., Melcher, F. Brauns, M. 2007. *Concordant ages for the giant Kipushi base metal deposit (DR Congo) from direct Rb-Sr and Re-Os dating of sulfides. Mineralium Deposita*, **42**(7), 791-797.
- Seer, H.J. 1999. *Evolução Tectônica dos Grupos Araxá, Ibiá e Canastra na Sinforma de Araxá, Minas Gerais. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 149p.*
- Sheppard, S. M. F. 1986. *Characterization and isotopic variations in natural waters: Rev. Mineral* **16**, 165-183.
- Silva, C.H. 2003. *Evolução geológica da Faixa Brasília na região de Tapira, sudoeste de Minas Gerais. Tese de Doutorado, IGCE-UNESP, 102p.*
- Simões L.S.A. 1995. *Evolução tectonometamórfica da Nappe de Passos, sudoeste de Minas Gerais. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 149p.*
- Slezak P. 2012. *Geology, mineralogy and geochemistry of the Vazante Northern Extension zinc silicate deposit, Minas Gerais, Brazil. Dissertação de Mestrado. Queen's University.*
- Slezak P., Olivo, G.R., Oliveira, G.D., Dardenne, M.A. 2014. *Geology, mineralogy and geochemistry of the Vazante Northern Extension zinc silicate deposit, Minas Gerais, Brazil. Ore Geology Reviews* (Publicado online: <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.06.014>), **56**: 234–257.
- Striedar, A.J. & Nilson, A.A. 1992. *Melange ofiolítica nos metassedimentos Araxá de Abadiânia (GO) e implicações tectônicas regionais. Rev. Bras. Geoc.*, **22** (2): 204-215.
- Taylor, H.P.Jr. 1974. *The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition. Econ. Geol.*, v. 69, p. 843-883.

- Terraciano, R. 2008. *Willemite Mineralisation in Namíbia and Zâmbia. Dottorato di Ricerca in Scienze della Terra XXI Ciclo Università degli Studi di Napoli "Federico II" Facoltà di Scienze MM. FF. NN.*
- Thomaz Filho, A., Kawashita, K., Cordani, U.G., 1998. A origem do Grupo Bambuí no contexto da evolução geotectônica e de idades radiométricas. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **70**:527– 548.
- Thomson, B.P., 1976. *Tectonics and regional geology of the Willyama, Mt Painter and Denison Inliers. In: Knight, C.L. (Ed.), Economic geology of Australia and Papua New Guinea, 1, Metals. Australasian Institute of Mining and Metallurgy. Monograph Series*,5:469-475.
- Thompson, B.P. , Daily, B. , Coats, R.P. , Forbes, B.G. 1976 *Late Precambrian and Cambrian geology of the Adelaide "Geosyncline" and Stuart Shelf, South Australia. 25th International Geological Congress. Excursion Guide 33^a.*
- Trompette, R. 1994. *Geology of Western Gondwana*. Rotterdam, A.A. Balkema, 350 p.
- Unrug, R. 1996. *The assembly of Gondwanaland*. Episodes, **19**: 11-20.
- Valeriano, C.M. 1992. Evolução tectônica da extremidade meridional da Faixa Brasília, região da represa de Furnas, Sudoeste de Minas Gerais. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 198p.
- Valeriano, C. M., Teixeira, W., Heilbron, M., Simões, L. S. A. 2000. *Southern Brasilia belt (SE Brazil): tectonic discontinuities, K-Ar data and evolution during the Neoproterozoic Brasiliano orogeny. Revista Brasileira de Geociências*, **30**(1): 195-199.
- Valeriano C.M., Machado N., Simonetti A., Valladares C.S., Seer H.J., Simões L.S.A. 2004a. *U-Pb geochronology of the southern Brasilia belt (SE-Brazil): sedimentary provenance, Neoproterozoic orogeny and assembly of West-Gondwana. Precambrian Research*, **130**:(1-4): 27-55.
- Valeriano C.M., Dardenne M.A., Fonseca M.A., Simões L.S.A., Seer, H.J. 2004b. A Evolução Tectônica da Faixa Brasília. In: V. Mantesso Neto, A. Bartorelli, C.D.R. Carneiro, B.B. Brito Neves (eds). *Geologia do Continente Sul-Americano – Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca, São Paulo, p. 575-592.
- Valeriano C.M., Pimentel M.M., Heilbron M., Almeida J.C.H., Trouw R.A.J. 2008. *Tectonic evolution of the Brasília Belt, Central Brazil, and early assembly of Gondwana. Geological Society, London, Special Publications* **284**:197-210.
- Yapp, C.J. 1990. *Oxygen isotopes in iron (III) oxides I. Mineral-water fractionation factors. Chem. Geol.* **85**, 329-335.

Zheng, Y.F.1991. *Calculation of oxygen isotope fractionation in metal oxides. Geochim. Cosmochim. Acta* 55, 2299-2307

Votorantim Metais, 2011. Relatório Anual de Atividades. Relatório Interno, 61p.

SEG Conference, 2012. Applied Structural Geology in Mining and Exploration, Apostila de Curso, SRK Consulting, 285p.

ANEXO I

Dados Químicos

CERCADO

CERCADO													
ID	Tipo de Amostra	Classificação	Al2O3	BaO	CaO	Cr2O3	Fe2O3	K2O	MgO	MnO	Na2O	P2O5	SiO2
			%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
VMRO013352	Superfície	Dolomito	0,35	0,001	29,40	0,001	0,40	0,182	20,50	0,018	0,001	0,046	2,00
VMRO013353	Superfície	Dolomito	0,89	0,006	28,90	0,001	0,57	0,396	19,60	0,021	0,400	0,049	4,47
VMRO013354	Superfície	Dolomito	0,28	0,001	30,30	0,001	0,32	0,130	20,40	0,015	0,001	0,041	1,62
VMRO013355	Superfície	Metapelito	14,70	0,060	0,28	0,014	6,73	7,200	2,33	0,006	0,062	0,061	65,90
VMRO013356	Superfície	Metapelito	14,65	0,054	0,26	0,011	7,22	7,080	2,39	0,009	0,055	0,067	64,00
VMRO013357	Superfície	Brecha/Dolomito rosa	2,68	0,030	24,80	0,001	1,87	0,928	17,15	0,047	0,001	0,026	14,00
VMRO013358	Superfície	Brecha/Dolomito rosa	0,56	0,004	28,90	0,001	0,60	0,193	19,70	0,029	0,001	0,070	4,85
VMRO013359	Superfície	Brecha/Dolomito rosa	0,79	0,001	28,40	0,001	0,51	0,364	19,45	0,018	0,001	0,018	4,73
VMRO013360	Superfície	Brecha/Dolomito rosa	0,29	0,001	30,10	0,001	0,64	0,134	20,30	0,024	0,001	0,021	1,97
VMRO013361	Superfície	Brecha Mineralizada	0,89	0,001	6,69	0,001	75,30	0,008	4,57	0,036	0,001	0,020	0,87
VMRO013362	Superfície	Brecha Mineralizada	0,16	0,001	5,07	0,001	10,60	0,001	3,56	0,012	10,000	0,027	15,35
VMRO013363	Superfície	Brecha Mineralizada	0,65	0,001	0,18	0,001	10,70	0,001	0,70	0,001	10,000	0,038	19,65
VMRO013364	Superfície	Brecha Mineralizada	0,27	0,001	1,54	0,001	12,50	0,001	1,52	0,001	10,000	0,038	17,70
VMRO013365	Superfície	Brecha Mineralizada	0,43	0,001	9,19	0,001	52,50	0,006	6,66	0,039	0,066	0,031	4,12
VMRO013366	Superfície	Brecha Mineralizada	0,54	0,001	3,54	0,001	16,00	0,001	2,74	0,007	9,490	0,092	15,20

ID	SrO	TiO2	Co	Ni	Ag	Cd	Cu	Mo	Pb	Zn	Ba	Cr	Cs	Ga	Hf
	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
VMRO013352	0,001	0,010	2,0	16,0	0,6	0,6	1,0	1,0	26,0	127,0	40,7	20,0	0,08	0,60	0,20
VMRO013353	0,006	0,020	1,7	33,0	0,5	0,8	2,0	1,0	11,0	87,0	83,5	30,0	0,36	1,30	0,50
VMRO013354	0,005	0,010	1,7	18,0	0,5	0,7	1,0	1,0	28,0	125,0	27,0	30,0	0,11	0,60	0,20
VMRO013355	0,001	0,670	8,4	42,0	0,5	0,5	6,0	1,0	12,0	96,0	471,0	90,0	8,70	20,70	5,50
VMRO013356	0,001	0,670	9,1	47,0	0,5	0,5	9,0	1,0	16,0	161,0	468,0	100,0	8,59	22,40	6,00
VMRO013357	0,001	0,110	4,9	30,0	0,5	0,5	4,0	1,0	6,0	37,0	269,0	40,0	0,73	4,30	1,50
VMRO013358	0,001	0,010	4,3	24,0	0,5	11,8	3,0	1,0	217,0	1510,0	40,3	30,0	0,20	0,80	0,20
VMRO013359	0,004	0,020	2,6	22,0	0,5	0,5	2,0	1,0	25,0	121,0	54,8	30,0	0,29	1,00	0,30
VMRO013360	0,002	0,010	2,6	16,0	0,5	4,7	1,0	1,0	115,0	1110,0	21,0	30,0	0,09	0,60	0,20
VMRO013361	0,001	0,010	15,3	53,0	0,5	171,5	28,0	5,0	1295,0	1755,0	8,1	30,0	0,14	1,60	0,20
VMRO013362	0,001	0,010	8,0	22,0	67,6	326,0	23,0	4,0	2900,0	300000,0	25,7	40,0	0,03	1,10	0,20
VMRO013363	0,001	0,010	9,3	30,0	90,2	6,3	35,0	5,0	18950,0	300000,0	31,0	40,0	0,02	3,80	0,20
VMRO013364	0,001	0,010	10,1	42,0	87,2	46,5	32,0	4,0	14700,0	300000,0	24,2	60,0	0,06	2,50	0,20
VMRO013365	0,001	0,010	23,8	42,0	8,4	673,0	31,0	8,0	2890,0	81000,0	7,3	50,0	0,12	1,40	0,20
VMRO013366	0,001	0,010	13,8	47,0	162,0	360,0	63,0	4,0	18100,0	300000,0	16,7	70,0	0,05	2,20	0,20

	Nb	Rb	Sn	Sr	Ta	Th	Tl	U	V	W	Zr	Ce	Dy	Er	Eu	Gd
ID	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
VMRO013352	0,30	4,20	1,00	79,40	0,10	0,39	0,50	0,42	9,00	4,00	10,00	3,00	0,16	0,11	0,04	0,17
VMRO013353	0,70	10,90	1,00	75,30	0,10	0,70	0,50	0,44	7,00	5,00	20,00	5,10	0,38	0,17	0,09	0,33
VMRO013354	0,30	3,60	1,00	74,60	0,10	0,23	0,50	0,49	9,00	4,00	5,00	2,10	0,07	0,06	0,03	0,10
VMRO013355	14,30	183,50	2,00	17,10	1,00	11,25	0,50	1,58	77,00	6,00	222,00	77,90	3,42	2,07	0,93	3,98
VMRO013356	15,10	183,00	2,00	14,70	1,20	11,95	0,50	1,68	85,00	5,00	223,00	84,00	3,67	2,11	1,01	4,06
VMRO013357	2,60	24,80	1,00	52,40	0,20	2,34	0,50	0,43	19,00	5,00	64,00	16,00	0,97	0,57	0,27	1,02
VMRO013358	0,40	5,90	1,00	62,00	0,10	0,45	0,50	0,45	19,00	3,00	12,00	3,70	0,21	0,14	0,06	0,20
VMRO013359	0,70	10,40	1,00	63,00	0,10	0,61	0,50	0,49	10,00	4,00	15,00	6,00	0,30	0,21	0,03	0,45
VMRO013360	0,30	4,60	1,00	78,70	0,10	0,30	0,50	0,31	14,00	4,00	7,00	2,90	0,08	0,12	0,04	0,20
VMRO013361	0,20	0,50	1,00	7,40	0,10	0,14	0,50	7,47	287,00	7,00	4,00	2,80	0,28	0,12	0,03	0,48
VMRO013362	0,20	0,30	1,00	7,80	0,10	0,07	0,50	1,17	74,00	4,00	2,00	2,10	0,05	0,06	0,03	0,10
VMRO013363	0,50	0,20	1,00	90,50	0,10	0,50	0,50	2,03	44,00	6,00	10,00	1,60	0,05	0,10	0,03	0,06
VMRO013364	0,20	0,50	1,00	37,30	0,10	0,13	0,50	2,36	88,00	4,00	2,00	2,20	0,11	0,03	0,03	0,07
VMRO013365	0,20	0,30	1,00	10,90	0,10	0,05	0,50	12,65	157,00	7,00	2,00	3,20	0,39	0,17	0,11	0,50
VMRO013366	0,20	0,30	1,00	23,00	0,10	0,17	0,50	1,58	109,00	5,00	4,00	3,80	0,17	0,15	0,04	0,28

	Ho	La	Lu	Nd	Pr	Sm	Tb	Tm	Y	Yb	As	Bi	Hg	Sb	Se	Te	S	C	LOI
ID	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	%
VMRO013352	0,03	1,40	0,01	1,20	0,32	0,19	0,02	0,02	1,10	0,12	0,20	0,01	0,022	0,06	0,20	0,01	0,01	13,40	45,27
VMRO013353	0,05	2,50	0,03	1,90	0,54	0,32	0,05	0,03	2,00	0,19	0,10	0,01	0,023	0,06	0,20	0,01	0,01	13,20	43,84
VMRO013354	0,01	1,20	0,01	0,90	0,24	0,23	0,01	0,01	0,70	0,10	0,10	0,01	0,019	0,06	0,20	0,01	0,01	13,10	45,40
VMRO013355	0,69	37,90	0,30	29,60	8,16	5,16	0,59	0,36	22,80	2,05	0,80	0,06	0,005	0,36	0,20	0,01	0,01	0,10	2,33
VMRO013356	0,69	42,60	0,29	31,80	8,79	5,30	0,61	0,36	21,90	2,08	1,00	0,08	0,005	0,47	0,20	0,01	0,01	0,09	2,40
VMRO013357	0,19	8,20	0,06	6,90	1,88	1,27	0,19	0,09	6,50	0,52	1,20	0,01	0,005	0,06	0,20	0,01	0,01	9,56	37,77
VMRO013358	0,03	1,90	0,02	1,40	0,36	0,29	0,03	0,03	1,80	0,13	1,00	0,01	0,161	0,05	0,20	0,01	0,01	13,00	43,74
VMRO013359	0,06	3,20	0,02	2,50	0,59	0,30	0,03	0,03	2,10	0,14	0,50	0,01	0,009	0,05	0,20	0,01	0,01	13,30	43,62
VMRO013360	0,02	1,60	0,01	1,00	0,32	0,12	0,01	0,01	1,00	0,10	1,70	0,01	0,052	0,05	0,20	0,01	0,01	13,10	45,28
VMRO013361	0,04	1,40	0,01	1,20	0,27	0,32	0,04	0,02	1,60	0,05	15,90	0,01	0,101	6,41	0,60	0,01	0,01	2,68	10,31
VMRO013362	0,01	1,10	0,01	0,80	0,24	0,13	0,02	0,01	0,80	0,03	33,40	0,04	5,950	0,88	22,70	0,01	0,29	2,48	9,33
VMRO013363	0,02	1,10	0,01	0,50	0,13	0,14	0,02	0,01	0,80	0,10	89,40	0,02	7,200	1,59	34,70	0,01	0,03	0,19	1,16
VMRO013364	0,02	0,80	0,01	0,80	0,18	0,10	0,02	0,01	0,60	0,03	69,60	0,03	11,500	2,10	33,30	0,01	0,02	0,84	3,38
VMRO013365	0,07	1,30	0,02	1,90	0,38	0,37	0,06	0,01	2,40	0,11	54,70	0,02	1030,000	12,15	5,20	0,01	0,01	3,73	14,66
VMRO013366	0,04	1,30	0,01	1,50	0,34	0,30	0,04	0,02	1,30	0,11	43,40	0,09	13,950	1,41	19,10	0,02	0,03	1,73	6,86

MATA II

ID	Tipo de Amostra	Furo	Profundidade	Classificação	Al2O3	BaO	CaO	Cr2O3	Fe2O3	K2O	MgO	MnO	Na2O	P2O5	SiO2	SrO
					%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
VMRO013300	Testemunho	VZM2F001	166,75	Dolomito	0,15	0,001	30,10	0,001	0,17	0,027	21,00	0,01	0,036	0,03	1,68	0,005
VMRO013301	Superfície	-	-	Dolomito	0,01	0,001	30,30	0,001	0,33	0,001	21,40	0,04	0,001	0,02	0,18	0,001
VMRO013302	Testemunho	VZM2F002	609,9	Dolomito	0,75	0,002	29,50	0,001	0,28	0,254	20,30	0,02	0,001	0,02	3,38	0,001
VMRO013303	Testemunho	VZM2F001	156	Dolomito	0,77	0,043	28,70	0,001	0,95	0,110	20,60	0,22	0,001	0,12	1,97	0,001
VMRO013308	Testemunho	VZM2F001	87,8	Tipo I	0,05	0,001	27,90	0,001	0,44	0,013	19,20	0,04	0,001	0,07	8,67	0,002
VMRO013309	Testemunho	VZM2F001	75,9	Tipo I	0,30	0,016	29,90	0,001	0,30	0,056	20,60	0,24	0,001	0,02	1,90	0,002
VMRO013310	Testemunho	VZM2F001	62,5	Tipo II	0,05	0,005	29,90	0,001	0,81	0,001	20,60	0,13	0,001	0,11	2,21	0,001
VMRO013311	Testemunho	VZM2F001	253	Tipo II	0,12	0,001	30,40	0,001	0,24	0,032	21,30	0,03	0,001	0,01	0,99	0,001
VMRO013312	Testemunho	VZM2F001	64,9	Tipo III	0,15	0,006	28,40	0,106	3,23	0,003	19,70	0,20	0,001	0,27	4,49	0,002
VMRO013313	Superfície	-	-	Tipo III	0,41	0,027	15,85	0,005	1,64	0,063	10,80	0,16	0,001	0,08	45,90	0,001
VMRO013314	Testemunho	VZM2F001	80,4	Tipo III	0,42	0,032	27,00	0,001	1,20	0,086	19,00	0,12	0,001	0,05	9,43	0,001
VMRO013315	Testemunho	VZM2F001	63,45	Tipo IV	0,11	0,001	24,10	0,001	4,29	0,001	17,00	0,19	0,001	0,16	16,30	0,001
VMRO013316	Superfície	-	-	Tipo IV	1,24	0,011	19,75	0,003	2,83	0,239	14,15	0,08	0,001	0,18	31,40	0,001
VMRO013317	Testemunho	VZM2F001	81,4	Tipo IV	0,58	0,004	23,10	0,001	1,97	0,070	16,10	0,06	0,001	0,11	22,50	0,001
VMRO013388	Testemunho	VZM2F001	57,45	Tipo V	2,04	0,081	0,49	0,003	11,35	0,421	0,58	0,01	0,046	0,15	81,60	0,008
VMRO013318	Superfície	-	-	Tipo V	0,25	0,011	0,63	0,003	21,50	0,001	0,35	0,09	0,013	0,16	77,20	0,001
VMRO013319	Superfície	-	-	Tipo V	0,19	0,011	0,30	0,006	44,90	0,001	0,11	0,15	0,019	0,13	53,50	0,001
VMRO013320	Superfície	-	-	Tipo V	0,49	0,032	2,72	0,004	5,35	0,076	0,28	0,01	0,002	1,94	88,60	0,001
VMRO013321	Superfície	-	-	Tipo V	0,24	0,025	0,11	0,009	3,34	0,008	0,12	0,06	0,006	0,05	96,40	0,001
VMRO013322	Superfície	-	-	Tipo V	0,14	0,010	1,18	0,011	4,99	0,001	0,12	0,04	0,001	0,84	92,50	0,001
VMRO013304	Testemunho	VZM2F002	105,55	Metapelitos	6,98	0,122	14,10	0,004	2,94	3,470	9,76	0,26	0,001	0,19	39,40	0,018
VMRO013305	Testemunho	VZM2F002	88,75	Metapelitos	8,10	0,055	13,15	0,006	3,56	4,070	8,99	0,16	0,005	0,04	40,50	0,010
VMRO013306	Testemunho	VZM2F002	177,35	Metapelitos	19,15	0,053	0,19	0,014	5,73	3,900	1,68	0,04	1,140	0,09	61,20	0,001
VMRO013307	Testemunho	VZM2F002	134,7	Metapelitos	26,10	0,089	0,16	0,020	5,04	7,040	1,50	0,04	0,252	0,13	52,70	0,001

	TiO2	Co	Ni	Ag	Cd	Cu	Mo	Pb	Zn	Ba	Cr	Cs	Ga	Hf	Nb	Rb	Sn
ID	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
VMRO013300	0,010	1,1	29,0	0,5	0,5	1,0	1,0	39,0	43,0	16,8	30,0	0,06	0,10	0,20	0,20	0,90	1,00
VMRO013301	0,010	0,5	17,0	0,5	0,5	1,0	1,0	23,0	98,0	5,0	30,0	0,06	0,10	0,20	0,20	0,40	1,00
VMRO013302	0,030	1,3	17,0	0,5	0,5	1,0	1,0	12,0	54,0	90,6	30,0	0,22	1,00	0,20	0,70	6,50	1,00
VMRO013303	0,030	10,7	28,0	0,5	0,5	17,0	1,0	21,0	43,0	587,0	30,0	0,14	1,30	0,30	3,00	2,80	1,00
VMRO013308	0,010	0,7	15,0	0,5	0,5	2,0	1,0	19,0	134,0	12,1	30,0	0,09	0,30	0,20	0,20	1,10	1,00
VMRO013309	0,010	4,0	24,0	0,5	1,7	8,0	1,0	67,0	264,0	210,0	30,0	0,16	0,80	0,20	0,50	2,00	1,00
VMRO013310	0,010	3,2	21,0	0,5	0,7	5,0	1,0	29,0	174,0	163,5	40,0	0,03	0,30	0,20	0,30	0,60	1,00
VMRO013311	0,010	0,6	13,0	0,5	0,5	1,0	1,0	2,0	18,0	21,4	30,0	0,03	0,20	0,20	0,20	1,00	1,00
VMRO013312	0,010	6,6	36,0	0,5	6,7	13,0	1,0	59,0	478,0	95,9	40,0	0,05	0,80	0,20	0,30	0,50	1,00
VMRO013313	0,010	4,2	25,0	0,5	3,8	17,0	1,0	334,0	1740,0	323,0	40,0	0,18	1,10	0,20	0,90	2,80	1,00
VMRO013314	0,010	2,2	26,0	0,5	5,0	6,0	1,0	91,0	382,0	344,0	40,0	0,56	1,20	0,20	2,60	2,90	1,00
VMRO013315	0,010	4,7	30,0	0,5	8,1	7,0	1,0	62,0	886,0	38,9	50,0	0,13	1,30	0,20	0,60	0,40	1,00
VMRO013316	0,070	4,4	31,0	0,5	5,6	5,0	1,0	284,0	464,0	107,0	50,0	0,79	2,10	0,30	1,60	7,80	1,00
VMRO013317	0,030	1,6	26,0	0,5	2,7	4,0	1,0	59,0	382,0	92,6	40,0	0,81	1,90	0,20	0,80	2,70	1,00
VMRO013388	0,100	6,3	26,0	1,1	0,5	156,0	2,0	260,0	388,0	817,0	70,0	1,20	3,70	0,80	2,30	15,10	1,00
VMRO013318	0,010	2,6	42,0	1,3	0,5	25,0	3,0	125,0	178,0	135,0	50,0	0,22	2,40	0,20	1,10	0,60	1,00
VMRO013319	0,010	3,3	26,0	0,5	0,5	111,0	4,0	240,0	170,0	167,0	50,0	0,17	4,10	0,20	0,20	0,40	1,00
VMRO013320	0,020	0,6	27,0	0,5	0,5	3,0	1,0	30,0	51,0	305,0	50,0	0,12	1,70	0,20	0,40	2,80	1,00
VMRO013321	0,010	1,5	32,0	0,5	0,5	5,0	1,0	34,0	50,0	231,0	40,0	0,04	1,20	0,20	0,20	0,80	1,00
VMRO013322	0,010	1,2	16,0	0,5	0,5	5,0	1,0	42,0	52,0	125,5	40,0	0,04	1,40	0,20	0,20	0,50	1,00
VMRO013304	0,340	10,7	36,0	0,5	0,5	16,0	1,0	17,0	41,0	1170,0	60,0	1,44	9,90	3,60	10,60	81,10	1,00
VMRO013305	0,400	7,1	32,0	0,5	0,5	12,0	1,0	12,0	36,0	525,0	80,0	1,70	12,00	4,40	9,80	97,20	1,00
VMRO013306	1,000	16,7	54,0	0,5	0,5	43,0	1,0	14,0	122,0	637,0	140,0	9,97	30,50	5,70	18,90	187,00	4,00
VMRO013307	0,990	23,1	58,0	0,5	0,5	23,0	1,0	19,0	102,0	794,0	150,0	8,34	36,20	4,40	32,90	220,00	5,00

	Sr	Ta	Th	Tl	U	V	W	Zr	Ce	Dy	Er	Eu	Gd	Ho	La	Lu	Nd
ID	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
VMRO013300	43,60	0,10	0,05	0,50	0,36	6,00	6,00	5,00	2,50	0,11	0,04	0,03	0,10	0,03	1,20	0,02	1,00
VMRO013301	34,30	0,10	0,05	0,50	1,22	12,00	3,00	2,00	0,80	0,05	0,08	0,03	0,05	0,01	0,60	0,01	0,40
VMRO013302	36,40	0,10	0,33	0,50	0,36	7,00	3,00	11,00	4,90	0,35	0,27	0,07	0,41	0,05	2,10	0,04	1,80
VMRO013303	76,30	0,30	1,51	0,50	5,08	17,00	8,00	19,00	18,60	1,35	0,90	0,40	1,20	0,29	10,50	0,12	6,60
VMRO013308	72,10	0,10	0,05	0,50	0,42	7,00	2,00	7,00	1,80	0,13	0,18	0,03	0,15	0,04	1,30	0,01	0,90
VMRO013309	65,10	0,10	0,05	0,50	1,44	10,00	2,00	5,00	4,00	0,47	0,31	0,09	0,44	0,08	2,10	0,03	1,60
VMRO013310	49,80	0,10	0,05	0,50	1,55	13,00	4,00	2,00	3,10	0,31	0,18	0,05	0,31	0,05	1,90	0,03	1,10
VMRO013311	30,50	0,10	0,05	0,50	0,21	6,00	4,00	2,00	1,30	0,09	0,13	0,03	0,05	0,02	0,70	0,01	0,60
VMRO013312	38,60	0,10	0,05	0,50	1,49	19,00	2,00	4,00	5,50	0,50	0,40	0,12	0,47	0,10	4,90	0,03	2,10
VMRO013313	51,70	0,10	0,34	0,50	2,33	115,00	5,00	4,00	10,30	0,70	0,48	0,17	0,59	0,15	7,10	0,06	3,10
VMRO013314	46,90	0,10	0,68	0,50	1,02	8,00	3,00	15,00	4,90	0,26	0,24	0,07	0,38	0,06	2,60	0,04	1,60
VMRO013315	28,60	0,10	0,18	0,50	1,44	13,00	4,00	6,00	3,40	0,31	0,15	0,09	0,41	0,06	3,00	0,06	1,40
VMRO013316	37,90	0,10	1,22	0,50	1,38	8,00	3,00	19,00	8,70	0,93	0,44	0,26	1,02	0,18	4,80	0,07	3,90
VMRO013317	51,50	0,10	0,70	0,50	0,87	9,00	2,00	9,00	6,30	0,50	0,19	0,11	0,57	0,10	3,80	0,04	2,70
VMRO013388	56,00	0,20	1,00	0,50	2,77	127,00	3,00	24,00	45,80	1,86	1,07	0,49	2,36	0,36	30,20	0,17	18,10
VMRO013318	27,70	0,10	0,05	0,50	0,73	280,00	3,00	9,00	2,60	0,25	0,21	0,03	0,29	0,06	1,50	0,03	1,00
VMRO013319	26,70	0,10	0,05	0,50	1,49	518,00	5,00	4,00	3,70	0,61	0,37	0,08	0,51	0,11	2,90	0,03	1,60
VMRO013320	32,90	0,10	0,16	0,50	3,00	35,00	3,00	7,00	18,60	1,54	0,98	0,33	1,74	0,34	13,80	0,06	8,80
VMRO013321	7,00	0,10	0,05	0,50	0,66	23,00	4,00	3,00	9,00	0,31	0,26	0,11	0,45	0,07	5,40	0,02	3,70
VMRO013322	14,10	0,10	0,05	0,50	1,49	32,00	3,00	3,00	6,40	0,80	0,53	0,16	0,93	0,19	4,70	0,03	3,80
VMRO013304	231,00	0,60	8,95	0,50	6,24	46,00	7,00	136,00	67,10	4,56	3,00	1,24	4,72	1,00	33,80	0,42	26,70
VMRO013305	164,50	0,60	6,34	0,50	2,26	52,00	5,00	166,00	40,10	3,13	2,03	0,79	3,06	0,64	18,90	0,26	16,30
VMRO013306	67,60	1,40	17,15	0,50	3,87	156,00	14,00	205,00	96,90	6,78	4,09	1,46	6,96	1,39	48,60	0,59	41,10
VMRO013307	37,60	2,20	23,40	0,50	4,23	149,00	7,00	157,00	201,00	7,06	3,77	1,96	8,07	1,43	99,60	0,60	72,20

ID	Pr ppm	Sm ppm	Tb ppm	Tm ppm	Y ppm	Yb ppm	As ppm	Bi ppm	Hg ppm	Sb ppm	Se ppm	Te ppm	S %	C %	LOI %
VMRO013300	0,24	0,20	0,02	0,01	1,10	0,11	0,10	0,01	0,03	0,05	0,20	0,01	0,01	13,40	44,26
VMRO013301	0,10	0,13	0,01	0,01	0,80	0,07	0,10	0,01	0,01	0,05	0,20	0,01	0,01	13,80	45,66
VMRO013302	0,53	0,32	0,06	0,03	2,50	0,26	0,10	0,02	0,03	0,12	0,20	0,01	0,01	13,30	44,18
VMRO013303	1,82	1,48	0,20	0,13	9,70	0,78	1,10	0,02	0,03	0,23	0,20	0,01	0,01	13,40	44,29
VMRO013308	0,22	0,10	0,02	0,01	2,10	0,15	0,20	0,01	0,02	0,05	0,20	0,01	0,01	12,70	41,70
VMRO013309	0,42	0,39	0,05	0,04	3,10	0,21	1,40	0,01	0,01	0,05	0,20	0,01	0,01	12,30	45,03
VMRO013310	0,33	0,33	0,06	0,03	3,10	0,25	1,20	0,01	0,02	0,09	0,20	0,01	0,01	13,40	44,75
VMRO013311	0,12	0,14	0,02	0,01	1,20	0,10	0,10	0,01	0,01	0,05	0,20	0,01	0,01	13,70	45,10
VMRO013312	0,60	0,39	0,08	0,04	4,90	0,37	3,70	0,01	0,01	0,76	0,20	0,01	0,01	12,80	42,40
VMRO013313	0,99	0,68	0,10	0,07	6,00	0,34	1,20	0,01	0,072	0,13	0,20	0,02	0,02	6,36	24,28
VMRO013314	0,38	0,28	0,03	0,03	2,30	0,31	2,90	0,02	0,015	0,23	0,20	0,01	0,01	12,20	41,09
VMRO013315	0,38	0,24	0,04	0,04	3,10	0,23	4,70	0,01	0,015	0,98	0,20	0,01	0,01	10,90	36,55
VMRO013316	0,99	0,84	0,13	0,07	5,10	0,44	2,20	0,03	0,010	0,66	0,20	0,01	0,01	8,32	29,99
VMRO013317	0,68	0,54	0,09	0,06	3,30	0,45	2,60	0,01	0,009	0,26	0,20	0,01	0,01	10,10	34,76
VMRO013388	4,91	2,92	0,31	0,16	13,10	1,01	5,30	0,18	0,061	2,88	0,20	0,07	0,05	0,14	0,77
VMRO013318	0,29	0,24	0,04	0,03	2,70	0,13	18,50	0,03	0,032	1,57	0,20	0,38	0,03	0,22	0,72
VMRO013319	0,40	0,32	0,08	0,04	4,80	0,25	38,40	0,03	0,026	1,76	0,20	0,01	0,03	0,07	0,11
VMRO013320	2,21	1,68	0,28	0,09	16,00	0,56	14,70	0,03	0,005	1,11	0,20	0,01	0,01	0,12	0,34
VMRO013321	1,04	0,61	0,08	0,03	3,40	0,12	4,00	0,02	0,006	1,02	0,20	0,01	0,01	0,20	-0,02
VMRO013322	1,05	0,74	0,15	0,06	9,40	0,27	6,60	0,02	0,016	1,58	0,20	0,01	0,01	0,06	-0,01
VMRO013304	7,26	5,25	0,77	0,41	28,60	2,59	2,70	0,06	0,020	0,37	0,70	0,01	0,01	5,67	22,45
VMRO013305	4,57	3,38	0,52	0,30	18,10	1,99	0,50	0,04	0,006	0,29	0,30	0,01	0,02	5,34	21,03
VMRO013306	10,80	8,31	1,05	0,58	38,40	4,06	7,90	0,44	0,008	0,62	0,20	0,02	0,23	0,36	3,83
VMRO013307	21,00	11,70	1,24	0,58	39,10	3,94	5,10	0,53	0,031	0,30	0,40	0,04	1,87	1,96	7,18

OLHO D' AGUA

ID	Tipo de Amostra	Furo	Profundidade	Classificação	Al2O3	BaO	CaO	Cr2O3	Fe2O3	K2O	MgO	MnO	Na2O	P2O5	SiO2	SrO	TiO2
VMRO013327	Testemunho	VZODF003	196,2	Dolomito	0,87	0,020	28,90	0,001	1,34	0,369	19,35	0,115	0,001	0,328	4,43	0,006	0,030
VMRO013328	Testemunho	VZODF001	241,4	Dolomito	0,86	0,060	28,90	0,001	0,85	0,445	19,80	0,080	0,001	0,031	4,13	0,006	0,040
VMRO013329	Superfície	-	-	Dolomito	1,28	0,003	24,40	0,001	2,29	0,384	16,20	0,233	0,001	0,011	15,90	0,001	0,070
VMRO013330	Testemunho	VZODF001	251,85	Dolomito	1,03	0,083	28,10	0,001	1,66	0,438	19,15	0,135	0,001	0,041	5,47	0,007	0,040
VMRO013333	Superfície	-	-	Tipo I	0,81	1,870	27,60	0,001	0,84	0,238	19,70	0,079	0,001	0,020	3,57	0,018	0,020
VMRO013334	Testemunho	VZODF002	146,00	Tipo I	0,14	0,001	28,90	0,001	0,48	0,037	20,10	0,056	0,001	0,025	3,65	0,003	0,010
VMRO013335	Testemunho	VZODF001	81,45	Tipo I	0,21	0,001	29,60	0,001	0,66	0,023	20,70	0,086	0,001	0,063	0,49	0,001	0,010
VMRO013336	Testemunho	VZODF001	92,85	Tipo II	0,36	0,014	30,00	0,001	1,38	0,070	21,00	0,085	0,001	0,079	0,51	0,004	0,020
VMRO013337	Testemunho	VZODF003	55,4	Tipo II	1,16	0,001	28,50	0,001	2,80	0,073	19,70	0,136	0,001	0,152	1,95	0,008	0,050
VMRO013338	Testemunho	VZODF002	114	Tipo II	2,52	0,015	27,70	0,001	2,22	0,748	19,60	0,078	0,001	0,076	4,11	0,006	0,090
VMRO013339	Testemunho	VZODF001	91,25	Tipo III	0,04	0,001	30,60	0,001	1,03	0,001	20,90	0,122	0,001	0,038	0,13	0,001	0,010
VMRO013340	Testemunho	VZODF002	101	Tipo III	0,37	0,030	30,30	0,001	0,71	0,073	20,90	0,109	0,057	0,041	0,56	0,001	0,010
VMRO013341	Testemunho	VZODF003	22,05	Tipo III	0,34	0,010	30,00	0,001	2,40	0,088	20,10	0,149	0,001	0,094	1,87	0,001	0,020
VMRO013342	Testemunho	VZODF001	100,75	Tipo IV	1,08	0,001	29,00	0,001	2,05	0,156	20,60	0,140	0,001	0,092	1,49	0,001	0,040
VMRO013343	Testemunho	VZODF001	85,4	Tipo IV	0,33	0,001	29,10	0,001	2,49	0,012	20,60	0,139	0,001	0,051	0,51	0,001	0,010
VMRO013344	Testemunho	VZODF002	144,00	Tipo IV	0,47	0,001	28,00	0,001	6,33	0,029	19,90	0,100	0,001	0,032	0,91	0,006	0,010
VMRO013345	Testemunho	VZODF001	96,40	Tipo V	0,11	0,001	27,70	0,001	7,44	0,013	18,90	0,159	0,001	0,020	0,30	0,001	0,010
VMRO013346	Superfície	-	-	Tipo V	0,44	0,001	26,70	0,001	8,09	0,017	18,10	0,200	0,023	0,441	1,17	0,006	0,010
VMRO013347	Superfície	-	-	Tipo V	1,53	0,001	17,95	0,001	39,40	0,023	11,35	0,096	0,001	1,860	1,49	0,002	0,020
VMRO013348	Superfície	-	-	Tipo V	1,38	0,001	24,10	0,001	19,55	0,073	15,30	0,136	0,308	1,720	1,18	0,005	0,030
VMRO013331	Superfície	-	-	Metapelito	17,10	0,039	0,28	0,015	5,29	3,870	2,20	0,047	1,120	0,074	64,30	0,003	0,78
VMRO013332	Superfície	-	-	Metapelito	17,00	0,035	0,23	0,013	5,61	3,790	2,07	0,034	1,050	0,074	65,20	0,002	0,70

ID	Co	Ni	Ag	Cd	Cu	Mo	Pb	Zn	Ba	Cr	Cs	Ga	Hf	Nb	Rb	Sn	Sr	Ta	Th	Tl
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
VMRO013327	2,3	17,0	0,5	0,5	4,0	1,0	9,0	23,0	233,0	30,0	0,28	1,50	0,30	0,80	9,80	1,00	44,80	0,10	0,46	0,50
VMRO013328	1,5	27,0	0,5	0,5	3,0	1,0	2,0	32,0	608,0	40,0	0,24	1,40	0,20	0,70	8,60	1,00	47,00	0,10	0,12	0,50
VMRO013329	0,9	19,0	0,5	6,3	1,0	1,0	58,0	475,0	131,5	40,0	0,23	1,80	0,70	1,50	9,00	1,00	34,40	0,10	0,69	0,50
VMRO013330	3,5	17,0	0,5	0,5	9,0	1,0	5,0	27,0	867,0	30,0	0,27	1,60	0,20	0,80	9,90	1,00	52,80	0,10	0,40	0,50
VMRO013333	1,2	31,0	0,5	0,5	1,0	1,0	11,0	16,0	10000,0	30,0	0,16	1,60	0,40	0,90	7,10	1,00	184,00	0,10	0,91	0,50
VMRO013334	0,8	16,0	0,5	0,5	1,0	1,0	9,0	49,0	100,5	30,0	0,10	0,50	0,20	0,20	1,30	1,00	48,00	0,10	0,19	0,50
VMRO013335	0,8	17,0	0,5	2,2	1,0	1,0	115,0	313,0	27,4	30,0	0,11	0,50	0,20	0,20	1,20	1,00	49,70	0,10	0,33	0,50
VMRO013336	4,2	26,0	0,5	5,5	5,0	1,0	184,0	1490,0	170,5	30,0	0,06	1,10	0,20	0,30	1,90	1,00	23,70	0,10	0,35	0,50
VMRO013337	2,5	24,0	0,5	183,0	2,0	1,0	1405,0	14950,0	63,5	30,0	0,12	2,00	0,50	1,30	2,00	1,00	96,40	0,10	0,99	0,50
VMRO013338	2,9	23,0	0,5	6,4	2,0	1,0	70,0	492,0	193,0	30,0	0,65	3,70	0,70	2,40	17,80	1,00	85,80	0,20	1,70	0,50
VMRO013339	2,5	19,0	0,5	145,5	3,0	1,0	152,0	3240,0	24,6	30,0	0,01	0,50	0,20	0,20	0,60	1,00	35,40	0,10	0,26	0,50
VMRO013340	3,4	20,0	0,5	4,9	3,0	1,0	48,0	565,0	355,0	30,0	0,10	0,90	0,20	0,30	2,30	1,00	43,50	0,10	0,29	0,50
VMRO013341	0,9	17,0	0,5	4,2	1,0	1,0	102,0	571,0	100,5	40,0	0,10	0,70	0,20	0,40	2,60	1,00	70,90	0,10	0,49	0,50
VMRO013342	3,6	33,0	0,5	25,4	3,0	1,0	331,0	2060,0	59,1	30,0	0,24	1,50	0,30	1,20	4,10	1,00	43,10	0,10	0,83	0,50
VMRO013343	4,3	27,0	0,5	122,0	6,0	1,0	704,0	4240,0	24,1	30,0	0,13	0,70	0,20	0,20	0,50	1,00	42,80	0,10	0,26	0,50
VMRO013344	6,7	48,0	0,5	14,9	9,0	1,0	597,0	1840,0	23,0	30,0	0,12	0,80	0,20	0,40	1,20	1,00	45,40	0,10	0,29	0,50
VMRO013345	2,4	26,0	0,6	149,0	15,0	1,0	1725,0	4690,0	15,9	40,0	0,10	0,60	0,20	0,20	0,40	1,00	30,20	0,10	0,12	0,50
VMRO013346	8,5	33,0	0,8	1000,0	5,0	1,0	4320,0	23200,0	5,2	30,0	0,06	2,50	0,40	0,40	0,40	2,00	36,30	0,10	0,40	0,50
VMRO013347	4,2	18,0	0,5	995,0	9,0	3,0	2250,0	13900,0	6,7	40,0	0,17	14,50	1,00	1,40	0,40	1,00	30,90	0,10	1,25	0,50
VMRO013348	5,2	37,0	0,5	776,0	8,0	2,0	2870,0	12700,0	13,7	30,0	0,13	8,60	1,00	1,80	1,00	1,00	40,60	0,10	1,48	0,50
VMRO013331	11,1	50,0	0,5	0,5	26,0	2,0	2,0	118,0	416,0	110,0	9,98	24,00	5,00	12,70	185,50	2,00	77,40	1,20	12,35	0,50
VMRO013332	14,3	59,0	0,5	0,5	27,0	2,0	8,0	88,0	401,0	120,0	10,50	24,20	5,10	13,20	183,50	3,00	69,10	1,00	13,20	0,50

ID	U	V	W	Zr	Ce	Dy	Er	Eu	Gd	Ho	La	Lu	Nd	Pr	Sm
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
VMRO013327	0,45	15,00	4,00	18,00	8,50	0,39	0,20	0,10	0,52	0,07	4,20	0,02	3,50	0,97	0,71
VMRO013328	0,52	9,00	6,00	12,00	4,40	0,28	0,18	0,08	0,34	0,05	2,20	0,02	1,70	0,52	0,42
VMRO013329	0,73	22,00	4,00	39,00	9,20	0,65	0,31	0,18	0,76	0,14	4,40	0,04	4,70	1,22	0,79
VMRO013330	0,51	16,00	7,00	14,00	5,70	0,32	0,25	0,08	0,31	0,08	2,60	0,01	2,50	0,66	0,47
VMRO013333	0,90	18,00	4,00	21,00	7,00	0,64	0,58	0,14	0,76	0,14	3,50	0,08	2,90	0,76	0,61
VMRO013334	0,24	5,00	5,00	3,00	2,10	0,11	0,11	0,03	0,12	0,03	1,00	0,01	0,70	0,23	0,12
VMRO013335	0,21	7,00	4,00	5,00	2,40	0,14	0,11	0,04	0,13	0,04	1,10	0,02	1,00	0,23	0,20
VMRO013336	0,44	8,00	6,00	6,00	3,40	0,52	0,32	0,12	0,43	0,09	1,80	0,04	2,00	0,48	0,49
VMRO013337	0,89	27,00	4,00	21,00	8,30	0,59	0,42	0,21	0,86	0,13	4,90	0,05	3,50	0,93	0,80
VMRO013338	1,00	21,00	9,00	29,00	13,00	0,96	0,60	0,24	1,00	0,20	6,40	0,07	5,90	1,44	1,16
VMRO013339	0,31	6,00	5,00	4,00	2,20	0,19	0,14	0,03	0,20	0,04	1,00	0,01	1,00	0,23	0,22
VMRO013340	0,28	8,00	5,00	5,00	2,90	0,28	0,17	0,06	0,26	0,05	1,50	0,03	1,40	0,35	0,23
VMRO013341	1,48	15,00	4,00	7,00	8,90	0,50	0,29	0,08	0,53	0,10	5,50	0,03	3,00	0,85	0,42
VMRO013342	0,71	15,00	5,00	14,00	8,00	0,67	0,40	0,11	0,55	0,13	3,90	0,03	3,00	0,73	0,72
VMRO013343	0,62	20,00	4,00	5,00	4,20	0,33	0,22	0,09	0,36	0,08	2,50	0,03	1,70	0,50	0,42
VMRO013344	1,79	45,00	6,00	5,00	5,14	0,32	0,24	0,04	0,30	0,05	2,30	0,03	1,40	0,36	0,25
VMRO013345	4,24	95,00	5,00	2,00	4,00	0,33	0,32	0,04	0,31	0,08	2,60	0,04	1,70	0,45	0,34
VMRO013346	2,23	65,00	5,00	14,00	10,80	1,47	0,93	0,31	1,54	0,34	7,00	0,10	6,30	1,49	1,50
VMRO013347	11,05	108,00	5,00	40,00	34,60	3,25	1,67	0,88	4,18	0,62	21,50	0,14	18,90	4,47	3,71
VMRO013348	8,75	75,00	4,00	44,00	37,60	2,99	1,51	0,87	3,68	0,52	21,30	0,12	19,30	4,59	3,92
VMRO013331	3,25	117,00	5,00	185,00	68,80	4,14	2,61	0,87	4,12	0,89	35,80	0,38	28,40	7,79	5,36
VMRO013332	2,76	108,00	4,00	190,00	91,00	4,27	2,52	1,07	4,94	0,90	46,90	0,40	35,00	9,76	6,28

ID	Tb	Tm	Y	Yb	As	Bi	Hg	Sb	Se	Te	S	C	LOI
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	%
VMRO013327	0,07	0,02	2,60	0,14	1,00	0,01	0,012	0,13	0,90	0,02	0,03	12,60	43,30
VMRO013328	0,04	0,02	1,50	0,15	0,10	0,01	0,005	0,05	0,20	0,01	0,02	12,80	43,85
VMRO013329	0,11	0,04	3,50	0,38	0,30	0,01	0,034	0,05	1,00	0,01	0,01	10,90	37,80
VMRO013330	0,04	0,03	1,90	0,17	2,90	0,02	0,007	0,08	0,20	0,02	0,02	12,50	43,01
VMRO013333	0,12	0,10	5,40	0,49	0,40	0,01	0,005	0,16	0,20	0,01	0,34	12,70	43,00
VMRO013334	0,02	0,02	1,40	0,08	0,10	0,01	0,011	0,05	0,20	0,01	0,01	12,20	44,50
VMRO013335	0,02	0,01	1,70	0,06	0,10	0,01	0,017	0,05	0,20	0,01	0,01	14,20	46,33
VMRO013336	0,08	0,04	4,00	0,21	3,90	0,01	0,017	0,57	0,20	0,01	0,01	13,70	45,55
VMRO013337	0,10	0,06	5,60	0,29	3,50	0,01	0,157	1,08	0,80	0,01	0,01	12,50	43,54
VMRO013338	0,17	0,09	6,50	0,61	9,30	0,06	0,019	0,32	0,20	0,01	0,01	12,30	42,53
VMRO013339	0,03	0,02	2,10	0,14	1,10	0,01	0,050	0,40	0,30	0,01	0,01	13,70	46,14
VMRO013340	0,04	0,03	2,70	0,21	1,50	0,01	0,010	0,14	0,20	0,01	0,01	13,70	46,17
VMRO013341	0,06	0,03	4,00	0,18	1,50	0,01	0,078	0,28	0,20	0,02	0,01	13,20	45,10
VMRO013342	0,10	0,05	5,00	0,31	2,50	0,02	0,029	0,82	0,20	0,01	0,01	13,00	44,44
VMRO013343	0,08	0,05	4,10	0,25	2,70	0,02	0,227	3,65	0,40	0,01	0,01	13,40	45,22
VMRO013344	0,04	0,03	3,00	0,20	2,50	0,03	0,026	1,28	0,20	0,02	0,01	12,60	43,07
VMRO013345	0,06	0,03	3,90	0,16	2,90	0,04	0,705	29,30	0,80	0,04	0,01	13,00	42,92
VMRO013346	0,23	0,13	12,40	0,75	13,20	0,04	0,533	17,90	1,20	0,01	0,01	12,10	41,04
VMRO013347	0,48	0,22	23,50	0,93	24,70	0,12	0,075	47,00	0,80	0,01	0,01	6,09	24,29
VMRO013348	0,49	0,16	22,10	0,93	20,40	0,08	0,091	35,10	0,80	0,01	0,01	9,51	34,04
VMRO013331	0,65	0,41	26,40	2,80	3,70	0,34	0,045	0,54	0,30	0,04	0,39	1,47	4,65
VMRO013332	0,64	0,35	24,60	2,65	4,90	0,29	0,034	0,55	0,30	0,03	0,36	0,38	3,36

PAMPLONA

ID	Tipo de Amostra	Furo	Profundidade	Classificação	Al2O3	BaO	CaO	Cr2O3	Fe2O3	K2O	MgO	MnO	Na2O	P2O5	SiO2	SrO
					%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
VMRO013369	Testemunho	VPF52	37,6	Brecha Mineralizada	0,33	0,001	13,65	0,001	9,77	0,001	9,26	0,07	5,030	0,103	12,40	0,001
VMRO013370	Testemunho	VPF54	107,5	Brecha Mineralizada	0,18	0,003	17,65	0,001	36,50	0,005	11,70	0,12	0,001	0,228	5,97	0,007
VMRO013371	Testemunho	VPF54	150,3	Brecha Mineralizada	0,44	0,001	26,50	0,001	4,77	0,018	18,20	0,15	0,081	0,033	5,49	0,005
VMRO013372	Testemunho	VPF49	154,6	Brecha Mineralizada	0,15	0,001	13,90	0,001	22,90	0,002	9,63	0,12	0,268	0,130	9,02	0,009
VMRO013373	Testemunho	VPF49	178,6	Brecha Mineralizada	0,16	0,001	4,36	0,001	25,70	0,001	3,34	0,03	6,990	0,029	14,20	0,001
VMRO013374	Testemunho	VPF52	-	Brecha Mineralizada	0,14	0,176	27,20	0,001	3,72	0,001	18,15	0,25	0,001	0,013	3,20	0,007
VMRO013375	Testemunho	VPF52	200,85	Dolomito Rosa	0,75	0,001	28,90	0,001	0,79	0,517	19,75	0,05	0,007	0,024	3,46	0,007
VMRO013376	Testemunho	VPF52	227	Metapelito (Dolomito Rosa)	15,50	0,042	0,26	0,010	6,11	8,880	2,57	0,01	0,128	0,082	61,30	0,008
VMRO013377	Testemunho	VPF54	196,7	Dolomito Rosa	0,73	0,014	28,60	0,002	0,66	0,295	19,50	0,03	0,001	0,016	5,41	0,004
VMRO013378	Testemunho	VPF54	226	Metapelito (Dolomito Rosa)	14,05	0,064	0,45	0,021	7,29	8,800	1,82	0,01	0,077	0,089	64,00	0,002
VMRO013379	Testemunho	VPF49	192,9	Dolomito Rosa	1,38	0,002	27,50	0,001	1,04	0,689	19,05	0,06	0,001	0,026	7,19	0,003
VMRO013380	Testemunho	VPF49	196,3	Metapelito (Dolomito Rosa)	14,60	0,278	0,34	0,018	5,27	7,930	2,79	0,01	0,056	0,058	65,10	0,002
VMRO013381	Testemunho	VPF54	36,7	Brecha	0,15	0,006	30,10	0,001	0,62	0,065	20,30	0,05	0,001	0,052	1,92	0,001
VMRO013382	Testemunho	VPF54	55	Brecha	1,56	0,001	27,30	0,001	1,23	0,574	18,25	0,05	0,001	0,087	8,33	0,001
VMRO013383	Testemunho	VPF49	18,05	Brecha	0,34	0,003	29,00	0,001	0,75	0,198	19,70	0,05	0,001	0,008	5,39	0,001
VMRO013384	Testemunho	VPF52	38,25	Dolomito	0,13	0,011	30,10	0,001	0,80	0,036	20,20	0,05	0,001	0,170	1,50	0,005
VMRO013385	Testemunho	VPF54	116,2	Dolomito	0,98	0,018	28,00	0,001	1,60	0,275	19,55	0,11	0,001	0,028	5,11	0,001
VMRO013386	Testemunho	VPF54	155	Dolomito	0,09	0,004	30,00	0,001	1,24	0,027	20,40	0,10	0,001	0,029	1,22	0,008
VMRO013387	Testemunho	VPF49	175,9	Dolomito	1,78	0,015	23,90	0,001	2,20	0,577	16,65	0,07	0,010	0,056	16,95	0,010

ID	TiO2	Co	Ni	Ag	Cd	Cu	Mo	Pb	Zn	Ba	Cr	Cs	Ga	Hf	Nb	Rb	Sn	Sr
	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
VMRO013369	0,010	25,5	53,0	8,8	175,5	51,0	5,0	5240,0	233000,0	53,3	40,0	0,2	3,3	0,2	0,2	0,4	1,0	66,3
VMRO013370	0,010	37,9	59,0	0,5	69,9	17,0	7,0	2240,0	9670,0	51,2	40,0	0,1	1,6	0,2	0,2	0,3	1,0	28,2
VMRO013371	0,010	48,9	61,0	1,5	174,0	172,0	2,0	2190,0	13500,0	42,3	40,0	0,1	2,0	0,2	0,2	0,4	1,0	42,9
VMRO013372	0,010	53,6	90,0	2,2	331,0	62,0	8,0	8250,0	167500,0	81,5	30,0	0,1	1,5	0,2	0,2	0,3	1,0	60,4
VMRO013373	0,010	20,4	87,0	4,3	105,0	393,0	6,0	1930,0	300000,0	24,7	40,0	0,1	2,7	0,2	0,2	0,2	1,0	16,0
VMRO013374	0,010	94,5	66,0	0,5	207,0	5,0	1,0	2560,0	14600,0	1875,0	30,0	0,0	1,1	0,2	0,2	0,2	1,0	84,6
VMRO013375	0,030	4,2	21,0	0,5	3,6	12,0	3,0	93,0	1210,0	46,0	40,0	0,1	1,0	0,2	0,5	6,6	1,0	62,3
VMRO013376	0,710	9,8	48,0	0,6	1,0	4,0	2,0	25,0	1790,0	448,0	110,0	5,6	22,5	5,6	17,4	168,0	3,0	26,8
VMRO013377	0,010	7,1	44,0	0,5	3,4	4,0	1,0	185,0	597,0	103,5	40,0	0,3	1,5	0,3	0,5	7,9	1,0	53,4
VMRO013378	0,660	7,2	59,0	0,5	0,9	5,0	5,0	51,0	455,0	469,0	100,0	6,4	18,5	6,1	15,7	146,5	2,0	27,0
VMRO013379	0,040	2,4	46,0	0,5	0,5	2,0	2,0	11,0	526,0	98,1	40,0	0,5	2,1	0,5	1,0	15,0	1,0	69,5
VMRO013380	0,580	9,0	42,0	0,5	0,5	3,0	11,0	18,0	280,0	2170,0	100,0	5,8	20,5	3,8	11,8	153,0	2,0	41,3
VMRO013381	0,010	1,0	17,0	0,5	0,5	1,0	1,0	4,0	95,0	38,3	30,0	0,1	0,4	0,2	0,2	1,2	1,0	49,2
VMRO013382	0,050	4,0	29,0	0,5	0,6	5,0	1,0	7,0	160,0	73,3	50,0	1,0	2,3	0,2	1,0	15,0	1,0	60,0
VMRO013383	0,010	1,3	22,0	0,5	0,5	1,0	1,0	9,0	54,0	48,6	40,0	0,2	0,8	0,2	0,2	3,3	1,0	52,8
VMRO013384	0,010	2,7	24,0	0,5	14,8	64,0	1,0	201,0	2510,0	110,5	30,0	0,1	0,5	0,2	0,2	0,9	1,0	67,3
VMRO013385	0,040	23,6	32,0	0,5	23,0	5,0	4,0	247,0	4190,0	215,0	40,0	0,2	1,9	0,4	0,8	7,0	1,0	52,0
VMRO013386	0,010	11,4	24,0	0,5	18,8	51,0	2,0	1360,0	3000,0	24,2	40,0	0,1	0,9	0,2	0,2	1,0	1,0	47,1
VMRO013387	0,070	12,90	32	0,5	21,4	27	3	908	3150	101,00	40,00	0,77	2,90	0,20	1,30	16,80	1,00	57,70

	Ta	Th	Tl	U	V	W	Zr	Ce	Dy	Er	Eu	Gd	Ho	La	Lu	Nd	Pr	Sm
ID	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
VMRO013369	0,1	0,2	0,5	1,5	26,0	5,0	3,0	6,80	0,34	0,11	0,09	0,53	0,05	3,10	0,03	1,80	0,51	0,34
VMRO013370	0,1	0,1	0,5	2,4	323,0	5,0	2,0	3,80	0,42	0,17	0,09	0,55	0,06	2,50	0,04	1,40	0,39	0,21
VMRO013371	0,1	0,3	0,5	0,8	23,0	10,0	3,0	5,50	0,30	0,07	0,05	0,44	0,04	3,90	0,03	1,80	0,51	0,25
VMRO013372	0,1	0,1	0,5	3,5	25,0	4,0	2,0	5,20	0,37	0,11	0,12	0,52	0,04	3,00	0,01	2,00	0,48	0,38
VMRO013373	0,1	0,1	0,5	3,6	45,0	3,0	2,0	5,40	0,18	0,03	0,04	0,27	0,02	1,80	0,01	1,40	0,30	0,24
VMRO013374	0,1	0,1	0,5	0,5	5,0	6,0	2,0	7,10	0,41	0,13	0,13	0,48	0,08	5,50	0,01	2,30	0,58	0,35
VMRO013375	0,1	0,4	0,5	0,4	5,0	4,0	9,0	4,00	0,24	0,10	0,05	0,34	0,05	1,90	0,03	1,50	0,39	0,31
VMRO013376	1,4	10,3	0,5	1,4	84,0	17,0	218,0	70,90	3,51	2,05	0,99	3,91	0,68	36,30	0,31	25,90	7,60	4,60
VMRO013377	0,1	0,6	0,5	0,3	5,0	2,0	13,0	4,40	0,27	0,17	0,03	0,35	0,04	2,10	0,02	1,70	0,45	0,36
VMRO013378	1,2	8,9	0,5	1,4	70,0	6,0	241,0	71,40	3,90	2,18	1,28	4,42	0,77	34,10	0,32	28,50	7,66	5,46
VMRO013379	0,1	0,7	0,5	0,4	8,0	3,0	22,0	5,40	0,27	0,13	0,08	0,42	0,06	2,60	0,03	1,70	0,54	0,31
VMRO013380	0,9	9,4	0,5	1,0	68,0	4,0	134,0	67,90	2,49	1,25	0,85	3,17	0,50	34,90	0,21	24,30	7,29	4,60
VMRO013381	0,1	0,2	0,5	0,4	5,0	3,0	5,0	1,00	0,05	0,05	0,03	0,12	0,01	0,60	0,01	0,40	0,10	0,04
VMRO013382	0,1	0,8	0,5	0,8	25,0	8,0	12,0	8,60	0,52	0,24	0,10	0,55	0,08	4,30	0,03	3,30	0,86	0,56
VMRO013383	0,1	0,2	0,5	0,6	5,0	3,0	9,0	2,10	0,12	0,05	0,03	0,11	0,02	0,90	0,01	0,60	0,15	0,14
VMRO013384	0,1	0,2	0,5	0,5	5,0	3,0	7,0	2,30	0,20	0,07	0,03	0,21	0,04	1,20	0,01	0,90	0,24	0,09
VMRO013385	0,1	0,5	0,5	0,6	8,0	2,0	15,0	5,70	0,57	0,15	0,11	0,49	0,07	2,80	0,02	2,10	0,58	0,34
VMRO013386	0,1	0,1	0,5	0,4	28,0	6,0	8,0	2,90	0,17	0,09	0,08	0,21	0,02	1,70	0,02	1,40	0,33	0,15
VMRO013387	0,10	1,15	0,50	0,55	16,00	3,00	16,00	8,70	0,52	0,31	0,11	0,56	0,10	4,50	0,04	3,30	0,97	0,66

ANEXO II

Isótopos Estáveis - Rocha Total

	ID	Tipo de Amostra	Furo	Profundidade	Classificação	$\delta^{13}\text{C}_{\text{‰}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{‰}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{‰}}$
Mata II	VMRO013300	Testemunho	VZM2F001	166.75	Dolomito	2.34	-6.76	23.89
	VMRO013301	Superfície	-	-	Dolomito	-0.51	-8.51	22.09
	VMRO013308	Testemunho	VZM2F001	87.8	Tipo I	2.51	-2.01	28.79
	VMRO013309	Testemunho	VZM2F001	75.9	Tipo I	-0.14	-6.31	24.36
	VMRO013310	Testemunho	VZM2F001	62.5	Tipo II	0.80	-9.20	21.37
	VMRO013311	Testemunho	VZM2F001	253	Tipo II	1.50	-4.57	26.15
	VMRO013312	Testemunho	VZM2F001	64.9	Tipo III	1.66	-4.36	26.37
	VMRO013313	Superfície	-	-	Tipo III	0.78	-8.00	22.62
	VMRO013314	Testemunho	VZM2F001	80.4	Tipo III	2.27	-7.98	22.63
	VMRO013315	Testemunho	VZM2F001	63.45	Tipo IV	1.66	-8.79	21.80
	VMRO013316	Superfície	-	-	Tipo IV	1.77	-8.70	21.89
	VMRO013388	Testemunho	VZM2F001	57.45	Tipo V	s/ sinal	s/ sinal	s/ sinal
	VMRO013318	Superfície	-	-	Tipo V	s/ sinal	s/ sinal	s/ sinal
	VMRO013319	Superfície	-	-	Tipo V	s/ sinal	s/ sinal	s/ sinal
	VMRO013320	Superfície	-	-	Tipo V	s/ sinal	s/ sinal	s/ sinal
VMRO013322	Superfície	-	-	Tipo V	s/ sinal	s/ sinal	s/ sinal	
Olho D' Água	VMRO013327	Testemunho	VZODF003	196.2	Dolomito	2.12	-4.84	25.87
	VMRO013328	Testemunho	VZODF001	241.4	Dolomito	2.72	-5.40	25.30
	VMRO013334	Testemunho	VZODF002	146.00	Tipo I	2.11	-6.15	24.52
	VMRO013335	Testemunho	VZODF001	81.45	Tipo I	2.53	-6.19	24.48
	VMRO013337	Testemunho	VZODF003	55.4	Tipo II	1.28	-13.68	16.76
	VMRO013338	Testemunho	VZODF002	114	Tipo II	2.53	-10.01	20.54
	VMRO013339	Testemunho	VZODF001	91.25	Tipo III	2.27	-9.65	20.91
	VMRO013341	Testemunho	VZODF003	22.05	Tipo III	1.12	-7.01	23.64
	VMRO013343	Testemunho	VZODF001	85.4	Tipo IV	1.86	-14.94	15.46
	VMRO013344	Testemunho	VZODF002	144.00	Tipo IV	1.84	-13.58	16.86
	VMRO013346	Superfície	-	-	Tipo V	0.64	-11.04	19.48
	VMRO013348	Superfície	-	-	Tipo V	0.82	-10.55	19.98
	Cercado	VMRO013352	Superfície	Dolomito	1.20		-2.65	28.13
VMRO013354		Superfície	Dolomito	1.29		-2.97	27.79	
VMRO013357		Superfície	Brecha/Dolomito rosa	2.22		-2.83	27.95	
VMRO013358		Superfície	Brecha/Dolomito rosa	1.43		-4.31	26.42	
VMRO013362		Superfície	Brecha Mineralizada	-2.68		-8.13	22.48	
VMRO013364		Superfície	Brecha Mineralizada	-2.70		-9.86	20.69	
VMRO013365		Superfície	Brecha Mineralizada	0.00		-11.95	18.54	
VMRO013366		Superfície	Brecha Mineralizada	-4.07		-6.92	23.73	
Pamplona	VMRO013369	Testemunho	VPF52	37.6	Brecha Mineralizada	-0.20	-11.27	19.24
	VMRO013372	Testemunho	VPF49	154.6	Brecha Mineralizada	0.75	-9.07	21.51
	VMRO013373	Testemunho	VPF49	178.6	Brecha Mineralizada	0.68	-8.54	22.06
	VMRO013375	Testemunho	VPF52	200.85	Dolomito Rosa	2.13	-3.18	27.58
	VMRO013377	Testemunho	VPF54	196.7	Dolomito Rosa	2.25	-4.04	26.70
	VMRO013381	Testemunho	VPF54	36.7	Dolomito	0.97	-4.75	25.96
	VMRO013383	Testemunho	VPF49	18.05	Dolomito	1.72	-2.70	28.08
	VMRO013385	Testemunho	VPF54	116.2	Brecha	0.69	-6.26	24.41
	VMRO013387	Testemunho	VPF49	175.9	Brecha	2.44	-5.27	25.43

